



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

대규모 능동형 RFID 시스템을
위한 멀티홉 기반의 수집 및
동기 기법

2011년 2월

부산대학교 대학원

컴퓨터공학과

조 현 태

공학박사 학위논문

대규모 능동형 RFID 시스템을
위한 멀티홉 기반의 수집 및
동기 기법

지도교수 백 윤 주

2011년 2월

부산대학교 대학원

컴퓨터공학과

조 현 태

조현태의 공학박사 학위 논문을 인준함

2010년 12월 일

위원장 정 상 화 (인)

위 원 백 윤 주 (인)

위 원 김 종 덕 (인)

위 원 유 영 환 (인)

위 원 김 병 호 (인)

목 차

제 1 장	서 론	1
1.1	능동형 RFID 시스템	3
1.2	멀티홉 기반의 능동형 RFID 네트워크	5
1.3	연구의 배경 및 목적	7
1.4	논문의 구성	11
제 2 장	관련 연구	12
2.1	능동형 RFID 표준	12
2.2	RFID의 수집 기법	15
2.2.1	DCS	16
2.2.2	Colorwave	18
2.2.3	멀티홉 기반의 태그 수집	19
2.3	시각 동기 기법	21
2.3.1	시각 동기 기법의 분류	23
2.3.2	시각 동기 기법	26
제 3 장	멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집 기법	28
3.1	문제정의	28
3.2	멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집	30
3.2.1	경로 확산	30

3.2.2	능동형 RFID 리더 발견	32
3.2.3	선택적 플러딩	34
3.2.4	능동형 RFID 수집	36
3.2.5	신규 또는 미발견 리더 정보 획득	39
3.3	능동형 RFID 태그의 다중 관독 회피	40
제 4 장	멀티홉 기반 능동형 RFID 시스템의 동기화	45
4.1	문제정의	45
4.2	시스템의 시각 동기화 기법	48
4.2.1	토폴로지 구성	48
4.2.2	시각 동기 프로토콜	50
4.2.3	동기화 메시지를 위한 선택적 플러딩	56
4.2.4	정밀 타임 스탬프	57
4.2.5	표류 보정 기법	58
제 5 장	설계 및 구현	65
5.1	시스템 구조	65
5.2	능동형 RFID 싱크	67
5.3	능동형 RFID 리더	68
5.4	능동형 RFID 태그	68
제 6 장	실험 및 성능 평가	71
6.1	멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집	71
6.1.1	시뮬레이션	71
6.1.2	실험	77

6.2	능동형 RFID 태그의 다중 판독 회피	83
6.2.1	다중 판독 회피를 통한 태그 수명 연장	83
6.3	멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템 시각 동기	88
6.3.1	시뮬레이션	88
6.3.2	실험	94
제 7 장	결론 및 향후 연구 과제	99
7.1	결론	99
7.1.1	멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템 특징	100
7.1.2	대규모 능동형 RFID를 위한 새로운 접근법	100
7.1.3	능동형 RFID의 원격 수집	100
7.1.4	능동형 RFID 태그의 수명 연장	101
7.1.5	시스템 시각 동기 기법	101
7.2	향후과제	102
	참 고 문 헌	103

그림 목 차

1.1	RFID 시스템의 구성도	2
1.2	멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템	6
1.3	멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템에서의 시각 동기	10
2.1	ISO/IEC 18000-7 동작 개념도	14
2.2	충돌 방지를 위한 프레임 구조	15
2.3	DCS 동작 과정	18
2.4	태그간 통신을 통한 멀티홉 기반의 RFID 수집	20
2.5	시각 동기 기법의 분류	24
2.6	분류에 따른 동작 방식	25
2.7	TPSN 프로토콜의 동작 과정	26
2.8	ACS 프로토콜의 동작 과정	27
3.1	리더간 충돌	29
3.2	토폴로지 구성을 위한 경로 확산	32
3.3	RFID 리더 발견 과정	33
3.4	Dominant pruning	35
3.5	Greedy set cover	37
3.6	멀티홉 환경에서 슬롯 기반의 RFID 수집	38
3.7	RFID 리더의 네트워크 참여	39

3.8 다중 관독 문제 해결 과정	41
4.1 토폴로지 구성을 위한 레벨 확산	49
4.2 자식 리더 발견 단계	51
4.3 왕복 여행을 통한 시각 동기	52
4.4 메시지 송신시의 불확실도	53
4.5 네트워크 부하를 줄인 동기화 프로토콜	54
4.6 네트워크 부하를 줄인 동기화 예제	55
4.7 메시지 전달을 위한 플러딩 문제	56
4.8 타임 스탬프 지점의 결정	58
4.9 오프셋 및 표류에 의한 오차 요인	59
4.10 클럭 표류를 보정	61
5.1 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템	66
5.2 능동형 RFID 시스템 구성 요소	69
6.1 RFID 수집 성능 평가를 위한 네트워크 구성	72
6.2 시간에 따른 태그 수집량	73
6.3 DCS에 의한 리더간 충돌 회피 확률 (컬러 수 vs. 충돌률)	74
6.4 대규모 환경을 위한 RFID 배치	75
6.5 대규모 환경에서의 태그 수집량	76
6.6 단일홉내에서의 능동형 RFID의 수집	78
6.7 리더간의 신호 간섭 실험	80
6.8 멀티홉 환경에서 RFID 수집을 위한 시스템 설정	81

6.9 멀티홉 내에서의 태그 수집 시간	82
6.10 능동형 RFID 태그의 전류 소모량	86
6.11 다중 관독에 의한 RFID 태그의 전류 소모량	87
6.12 홉수에 따른 시각 동기 정확도 및 정밀도	89
6.13 리더 수에 따른 시각 동기 정확도 및 정밀도	91
6.14 대규모 환경에서의 메시지수	93
6.15 최적 플러딩을 통한 동기화 성능	93
6.16 시각 동기 성능 평가를 위한 시스템 환경	94
6.17 리더 표류율 실험	95
6.18 정밀 타임 스탬프를 이용한 시각 동기	96
6.19 표류율 보정을 통한 시각 동기	98
6.20 성능 평가 척도에 따른 분석	98

표 목 차

5.1	ISO/IEC 18000-7 물리적 특성	67
6.1	RFID 수집을 위한 환경 설정	71
6.2	태그 수집에 필요한 평균 슬롯 및 프레임 수	73
6.3	DCS의 color 크기에 따른 리더 충돌 횟수	74
6.4	대규모 RFID 수집을 위한 환경 설정	75
6.5	대규모 환경에서의 태그 수집에 필요한 시간	77
6.6	멀티홉 내에서의 태그 수집 시간	82
6.7	능동형 RFID 태그의 전류 소모량	84
6.8	제안한 기법의 전류 소모량	85
6.9	수집 명령의 수에 따른 전류 소모량	86
6.10	리더의 수에 따른 전류 소모량	87
6.11	시각 동기를 위한 시뮬레이션 환경	88
6.12	홉수에 따른 시각 동기 정확도 및 정밀도	90
6.13	리더 수에 따른 시각 동기를 위한 환경 설정	90
6.14	리더 수에 따른 따른 시각 동기 정확도 및 정밀도	92
6.15	타임 스탬프 장치를 이용한 시각 동기	97
6.16	표류 보정을 통한 시각 동기	98

제 1 장 서론

유비쿼터스 시대가 도래함에 따라 많은 서비스 산업, 물류, 산업·제조 및 재료 소재 관리 시스템 등에서 자동 인식 방법(auto-ID: automatic identification)에 대한 관심이 높아졌다. 자동 인식 시스템은 운송중에 사람, 동물, 상품 및 생산품에 대한 정보를 제공하기 위해 사용된다 [HHWYY06]. 현재 자동 인식 수단으로 가장 널리 사용되고 있는 바코드는 빠른 입력 속도, 해독의 정확성 그리고 무엇보다 저렴한 가격을 무기로 상품의 자동 인식 수단으로 널리 보급되었다. 하지만, 바코드는 적은 저장 용량, 느린 인식 속도, 그리고 재사용 등의 한계점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 IC(integrated circuit) 칩의 데이터 저장 공간을 활용하는 스마트 카드가 일상 생활에서 많이 사용되고 있다. 스마트 카드는 물리적으로 가까이 접근하여야 하는 단점 때문에 종종 비실용적일 경우가 있다. 비접촉 방식의 데이터 인식 및 전송 장치는 많은 응용들에서 유연함을 제공할 수 있다. RFID(radio frequency identification)는 리더(또는 판독기), RFID 태그, 안테나를 통하여 사람 또는 상품 등을 비접촉으로 인식해 태그에 기록된 정보를 판독하거나 기록하는 무선 주파수 인식 기술이다 [Klaus03, HHWYY06, FW10].

RFID 시스템은 기본적으로 고유의 식별자, 데이터 메모리를 내장한 초소형 IC와 안테나로 구성된 태그(tag 또는 transponder), 전파를 발산하여 태그의 정보를 수집하는 리더(reader 또는 interrogator), 그리고 태그와 리더 사이에 교환되는 정보를 받아들이는 호스트 컴퓨터(host computer)로 구성된다 [Klaus03]. 그림 1.1은 RFID 시스템의 구성도를 보여준다. 물류에서 RFID의 흐름 단계는 다음과 같다.

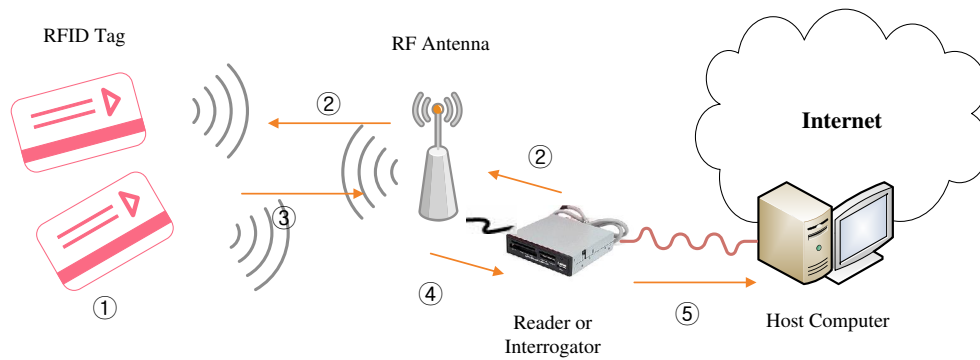


그림 1.1: RFID 시스템의 구성도

① 칩과 안테나로 구성된 태그는 활용 목적에 맞는 정보를 입력하고 대상에 부착된다. ② 리더에 부착된 안테나를 통해 전송된 무선 주파수가 태그에 접촉되고, ③ 태그는 무선 주파수에 반응하여 입력된 데이터를 안테나로 전송한다. ④ 안테나는 전송받은 데이터를 리더로 전달하고, ⑤ 리더는 전달받은 데이터를 디지털 신호로 변조하여 호스트 컴퓨터로 전달하는 일련의 과정을 거친다 [Roy06].

이러한 RFID 기술은 사물의 고유 ID를 무선으로 인식하여, 해당 정보를 수집, 저장, 가공 및 추적함으로써 사물에 대한 측위, 원격 처리, 관리 및 사물 간의 정보 교환 등의 서비스를 제공할 수 있다. 다음은 RFID 기술의 응용 분야를 나타낸 것이다 [Klaus03, MM05, DWDH09].

- 개인 식별 : 사원증, 지불용 카드, 교통카드
- 제조 분야 : 복잡한 제조 라인, 검사, 배송 등의 합리화
- 물류 분야 : 배송 관리, 재고 관리, 입출고 관리
- 판매 유통 : 상품 관리, 고객 관리, 매상 관리
- 도로 교통 : 항공·철도 여객 지원, 위치 정보

- 식품 : 상품 이동 경로 추적, 식품 자동 관리 및 구매 유도
- 금융 : 지폐·유가 증권의 위조 방지
- 의료·약품 : 의료·약품 복용 지원, 약품 관리
- 환경 : 폐기물 및 재활용품 관리

1.1 능동형 RFID 시스템

RFID는 태그의 내부 전원 여부에 따라 수동형(passive)과 능동형(active)로 나뉘어진다. 수동형은 내부 전원없이 리더의 전파 신호로부터 에너지를 공급받아 동작하며, 능동형은 전지가 내장되어 스스로 동작한다. 수동형 RFID 시스템은 수 미터 이내 근거리 통신용으로 태그의 가격이 저렴하고 수명이 반영구적이다. 능동형 RFID 시스템은 내부 전원을 이용하기 때문에 수명이 제한적이며, 태그의 가격이 고가이다. 능동형 RFID의 특징은 다음과 같다.

- 전력을 필요로 하는 외부 센서를 장착할 수 있다.
- 매우 장거리에서도 태그의 정보를 읽을 수 있기 때문에, 장치의 활용도를 향상시킬 수 있다.
- 주변의 상태를 독립적으로 관찰 및 제어할 수 있는 능력이 있다.
- 통신을 주재(initiating)할 수 있다.
- 자신의 상태를 진단할 수 있는 능력이 있다.
- 높은 대역폭을 가진다.

- 능동형 RFID 태그는 자율적인 네트워크와 함께 연동이 될 수 있다. 따라서 태그는 자율적으로 통신 선로를 결정할 수 있다.

상기와 같은 이유로 인하여 많은 응용에서 능동형 RFID 활용도가 증가하고 있으며, 능동형 RFID가 사용되는 응용은 다음과 같다 [HY06, YJH09].

- 항만은 마켓으로 드나드는 게이트웨이이며, 광역 물류 시스템에서 중요한 부분을 담당하고 있다. 특히, 거대한 허브 항구는 항구 내외로 컨테이너들을 운송 및 처리하는데 많은 부하를 안고, 항만 물류 환경에서 컨테이너들의 운송을 신속하게 처리하기 위하여 능동형 RFID 시스템이 활용된다 [HHWYY06].
- 능동형 RFID를 확장하여 컨테이너의 위치 추적과 컨테이너의 개봉 여부 및 화물 변형 여부를 확인할 수 있는 봉인 장치(e-seal)로서의 역할을 수행할 수 있다.
- 물류 창고는 넓은 공간에 많은 제품들이 적재되어 있다. 이들 제품들의 재고를 확인하기 위하여 능동형 RFID를 배치하여 실시간으로 상태를 확인할 수 있다.
- 의료 분야에서는 노인 또는 환자의 상태를 능동형 RFID로 실시간으로 검사하고, 이상이 발생시 위치를 확인하여 신속한 응급 조치가 이루어질 수 있다 [SWCLY06].
- RFID 태그에 센서를 장착하여 원격지의 환경 감시 및 도로 교통 정보 시스템 등에서 위치 정보를 제공할 수 있다.

전술한 바와 같이 능동형 RFID 시스템의 응용 분야는 수동형 RFID와는 달리 넓은 범위의 영역을 포함할 수 있어야 하며, 주변 환경 센싱, 위치 측위 등 다양한

응용에 적용될 수 있을만큼 능동적이어야 한다. 하지만, 전통적인 RFID 시스템은 단일홉 기반의 네트워크를 구축하여 사물의 정보를 획득하며, 이러한 단일홉 기반의 RFID 시스템은 다음과 같은 이유로 인하여 대규모 환경에서 능동적인 서비스를 제공하지 못한다.

- 능동형 RFID도 전송 거리의 한계를 가지는 무선 주파수를 활용하여 태그의 정보를 수집한다.
- 무선 주파수는 철재 구조물, 액체 등의 물질에 방해를 받아 신호를 전달할 수 없는 경우가 발생한다.
- 능동형 RFID가 위치 측위를 위한 노드로 사용될 때 리더의 근접성에만 의존하여 정확한 위치 정보를 제공하지 못한다.
- 사람이 접근하기 힘든 곳이나 재난 지역 등에서는 자산이나 사람의 상태를 확인할 수 없다.
- 능동형 RFID에서 태그 정보의 수집은 수동형 RFID와 마찬가지로 마스터-슬레이브(master-slave) 방식으로 태그를 수집하기 때문에 효율적인 확장성을 제공하지 못한다.

1.2 멀티홉 기반의 능동형 RFID 네트워크

전술한 바와 같이 단일홉 기반의 능동형 RFID 리더는 통신 거리의 한계, 또는 금속 및 액체 등의 장애물로 인하여 태그 정보를 인식하지 못하는 상황에 놓이게 된다. 대규모 환경, 음영 지역, 접근 불가능 지역에서 성공적인 RFID의 수집을 위해서는 멀티홉 기반의 능동형 RFID 배치가 필요하다 [YO06, YJH09]. 대규모 및

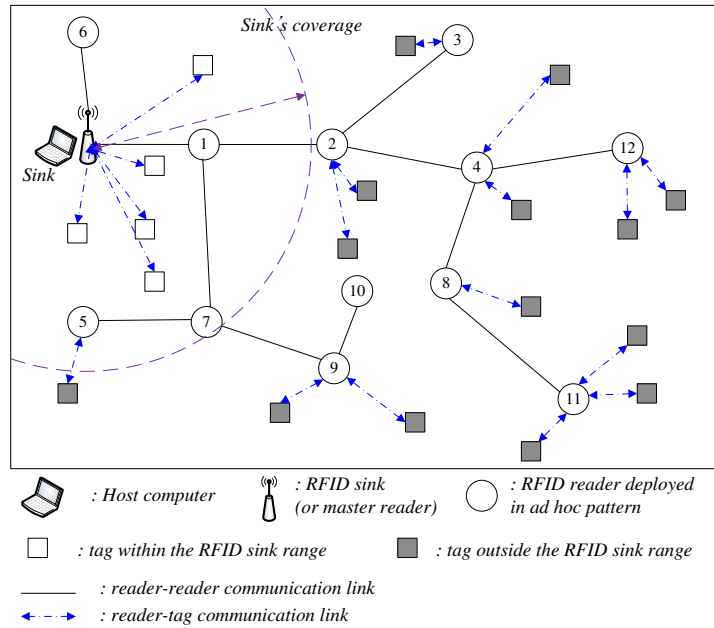


그림 1.2: 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템

음영 지역에서 효율적인 RFID 수집을 위한 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템은 그림 1.2와 같다. 시스템은 RFID 싱크(sink), RFID 리더, 그리고 RFID 태그로 구성된다. 시스템의 각 장치가 수행하는 역할은 다음과 같다.

- RFID 싱크 : 전통적인 RFID 리더로서의 역할을 수행하며, 자신의 통신 영역 내의 태그의 정보들을 수집한다. RFID 싱크의 통신 영역 밖의 태그를 수집하기 위해 RFID 리더들의 정보를 획득, 관리 및 제어한다.
- RFID 리더 : RFID 리더는 필드에 애드혹(ad hoc) 방식으로 배치되며, 대규모 능동형 RFID 시스템에서 RFID 태그의 정보를 수집하기 위해 사용된다. RFID 싱크에 의해 제어되며, 싱크로부터 명령을 받은 후, 자신의 통신 영역 내의 RFID 정보를 획득한다. 또한, 싱크의 명령을 이웃한 리더로 전달하는

중간 노드로서의 역할도 수행한다.

- RFID 태그 : 사물에 부착되어 사물의 ID 및 센싱 정보를 제공하는 역할을 수행하며, 전통적인 능동형 RFID 태그와 동일한 기능을 내장하고 있다.

1.3 연구의 배경 및 목적

멀티홉으로 배치된 능동형 RFID 시스템은 RFID 리더 또는 RFID 태그의 위치가 미리 결정될 필요가 없고, 접근이 어려운 영역이나 대규모 환경에서 확장성(scalability)을 제공한다는 점에서 애드혹 또는 무선 센서 네트워크와 유사한 특성을 지닌다. 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템은 자가 구성(self-organizing) 능력을 가지며, RFID 리더들이 서로 협력하여 동작한다. 사용자나 응용은 싱크와 연결된 범용 RFID 리더를 통하여 RFID 필드에 질의를 전달하거나 RFID 필드에서 수집된 데이터를 전달받을 수 있다. 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템에서 효율적인 정보 수집을 위해서 필수적으로 고려되어야 할 사항은 다음과 같다.

- 토폴로지 형성 : 애드혹으로 배치된 리더들간의 통신을 위한 토폴로지 형성 기법
- 이동성 : 능동형 RFID 시스템이 차량, 모바일 리더, 그리고 재난 현장등에서 임의 설치로 인하여 경로가 고정되어 있지 않음
- 신호 간섭 : 태그를 둘 이상의 리더가 동시에 하나의 채널을 통하여 동시에 인식 하고자 할 경우 인식 불능
- 다중 관독(multiple reads) : 둘 이상의 리더에 의해 각기 다른 시간에 여러번 인식

- 표준과의 호환성 : RFID는 전세계적으로 활용되는 시스템으로, 이종 제품 간의 호환성을 제공
- 능동형 RFID 리더들간의 동기화

먼저, 싱크는 네트워크 내에 애드혹 방식으로 배치된 RFID 리더들과의 통신을 위하여 토폴로지를 형성하고, 명령을 전달한다. RFID 태그의 수집 명령을 전달받은 리더들은 무선 주파수 전송을 통하여 태그를 수집한다. 능동형 RFID 수집을 위하여 모바일 리더의 사용 및 현장에서 장기간의 운용이 아니라 일시적인 운용이 필요할 경우 리더들간의 경로가 고정되지 않는다. 예를 들어, 항만 환경에서 컨테이너에 부착된 능동형 RFID 인식을 위하여 차량에 모바일 리더를 장착한다. 이러한 차량은 멀티홉 기반의 능동형 RFID 네트워크에서 빈번한 토폴로지 변화를 초래한다. 이러한 유동적인 토폴로지 환경에서 토폴로지의 설정 및 RFID 수집 기법을 고려한 프로토콜의 설계가 필수적이다.

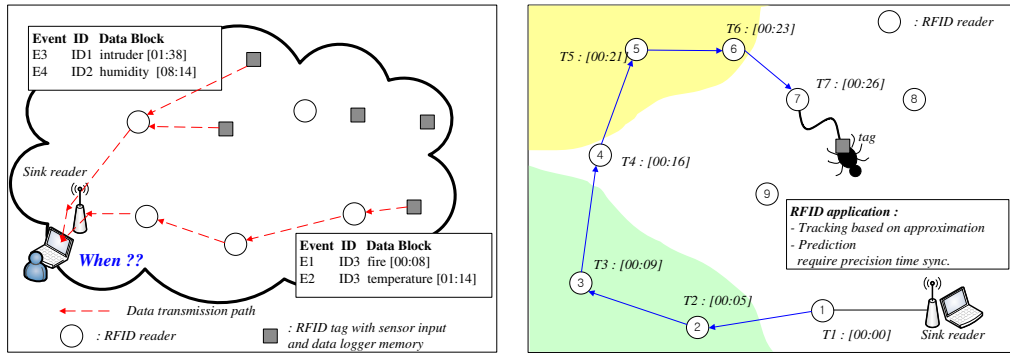
두번째, 하나의 리더가 태그 수집시, 또 다른 리더의 통신 범위와 중복이 발생할때, 리더들간의 신호의 간섭으로 인하여 태그를 인식하지 못하는 리더 충돌이 발생한다. 리더간 신호 간섭은 통신의 범위가 긴 능동형 RFID 시스템에서는 빈번히 발생할 수 있는 문제로 필수적으로 해결되어야 한다.

세번째, 신호 간섭과는 달리 RFID 태그가 각각 다른 시간에 다수의 리더에 의해 관독되는 문제를 다중 관독이라 한다. 다중 관독의 문제는 리더가 태그의 정보를 획득하는데 추가적인 시간을 요구하고, 미들웨어에서 이를 제거하기 위해 추가적인 필터링 작업을 요구한다. 더불어 응답하지 않아도 될 RFID 태그가 응답함으로써 태그의 추가적인 배터리 소모를 초래한다. 리더들간의 신호 간섭뿐만 아니라 다중 관독 문제 또한 반드시 해결되어야 할 과제이다.

네번째, 능동형 RFID 시스템은 전통적으로 단일홉 기반의 네트워크에서 동작한다. 대규모 환경, 음영 지역 극복, 장애물 회피 등을 위하여 멀티홉 기반의 능동형 RFID 네트워크를 구축하여 태그의 정보를 수집한다고 할지라도 전통적인 표준 기법과의 호환성을 유지되어야 한다. 다시 말해, RFID는 자동 인식 시스템을 위한 가장 스마트한 기술로서, 많은 응용 분야에서 활용되고 있으며 많은 제조 업체들이 RFID를 생산해내고 있다. 이러한 이중의 RFID 태그들이 이중의 리더에 의해 읽혀지기 위해서는 시스템이 표준과 호환성을 유지하여야 한다. 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템에서도 신호의 간섭, 다중 판독 회피, 빠른 인식 시스템, 태그의 저전력 동작 등 많은 요구 사항이 존재하지만, 이러한 요구 사항을 만족시키기 전에 표준과의 호환성을 고려하여 설계되어야 한다.

마지막으로, RFID는 사물의 독립적인 ID를 식별하는 것이 기본적인 목적이지만, 능동형 RFID의 경우 사물의 인식, 주변 환경의 센싱, 위치의 추적등 다양한 응용에 활용될 수 있다. 하지만, 표준을 비롯한 전통적인 능동형 RFID 시스템에서는 태그내에 시간에 대한 정보를 포함하지 않고 있다. 따라서, 태그들이 센싱한 데이터를 전달받더라도 언제 인식되었는지에 대한 정보를 획득하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템에서는 리더들간의 시각 동기가 필수적이다.

그림 1.3은 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템에서의 시각 동기가 필요한 응용의 예를 보여준다. (a)는 센서를 장착한 태그로부터 센싱한 데이터를 획득하는 과정에서 시각 정보를 포함하여 싱크로 전달하는 응용을 나타내며, (b)는 근접한 리더의 위치에 근거하여 태그 또는 사물의 위치를 추적 및 예측하기 위하여 리더들간의 시각 정보를 이용한다. 이러한 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템은 네트워크 내의 다수의 RFID 리더들이 상호 협업하여 결과를 산출하는 분산 시스템의 하나로



(a) 태그로부터의 데이터 수집 시간 획득

(b) 리더에 근거한 추적 및 예측

그림 1.3: 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템에서의 시각 동기

써 RFID의 분산 수집, 리더들간의 충돌 회피, 수집된 태그 데이터의 정렬, 그리고 위치 측위 등의 많은 응용들이 시각 동기를 필요로 한다. 네트워크 내의 리더들은 범용 컴퓨터 클럭과 마찬가지로 내부 오실레이터로 수정 발진자를 사용한다. 수정 발진자는 휨(skew)과 표류(drift)의 특성을 가지며, 보통의 경우 초당 1 ~ 40마이크로초의 오차를 갖는다 [HSY08]. 이러한 상황에서 네트워크 내의 노드들간의 시각 오차는 시간이 지남에 따라 커지게 되며, 특히 이러한 오차는 멀티홉 기반의 네트워크에서 거리가 증가함에 따라 커지게 된다. 이러한 멀티홉 기반의 환경 내에서 정확한 동기를 맞출 수 있는 시각 동기 기법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 상기에서 언급한 리더간 신호 충돌, 다중 관독, 표준과의 호환성, 그리고 리더들간의 시각 동기를 고려한 대규모 능동형 RFID 시스템을 위한 멀티홉 기반의 수집 및 동기 기법을 제안한다.

1.4 논문의 구성

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구로 능동형 RFID 시스템을 위한 ISO/IEC 18000-7 표준과 다수의 리더를 분산 처리하여 RFID를 수집하는 기법 및 멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집 기법을 소개한다. 또한, 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템에서 리더들간의 시각 동기의 필요성에 대해 언급하고, 컴퓨터 클럭의 특성에 대해 살펴본다. 이를 기준으로, 시각 동기 기법의 분류 근거를 제시하고 이에 따라 현재까지 제시된 동기 기법을 분류 및 정리한다.

3장에서는 관련 연구에서 분석된 RFID 수집 기법들의 문제점을 제시하고, 이를 극복하기 위한 대규모 시스템에서 멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집 기법에 대해서 기술한다. 제안한 수집 기법은 크게 리더간 신호 간섭 회피, 다중 관독 회피, 빠른 인식을 위한 알람 신호의 병합으로 나뉜다.

4장에서는 멀티홉으로 배치된 능동형 RFID 리더들을 위한 시각 동기 기법에 대해서 기술한다. 시각 동기 기법은 리더들간의 동기 정밀성에 중점을 두며, 동기의 정밀도를 높이기 위하여 동기에 필요한 메시지량을 최소화하는 기법을 제안한다. 또한, 네트워크 프로토콜 스택에서의 지터를 제거하고 리더들간의 표류율 차이를 극복하여 정밀도를 향상시킨다.

5장에서는 대규모 능동형 RFID 시스템을 위한 멀티홉 기반의 능동형 RFID 네트워크의 요구사항을 분석한다. 분석된 자료를 근거로 대규모 능동형 RFID 배치를 위한 RFID 싱크와 태그, 그리고 태그의 정보를 수집해 줄 애드혹 기반의 능동형 RFID 리더를 설계 및 구현한다.

6장에서는 제안하는 멀티홉 기반의 수집 기법 및 동기 기법에 대해서 실험 및 성능 평가를 수행한다. 마지막으로 7장에서는 향후 과제와 함께 결론을 맺는다.

제 2 장 관련 연구

2.1 능동형 RFID 표준

ISO/IEC 18000-7 [ISO18000-7]은 433MHz 주파수 대역의 RFID 장치를 위한 에어 인터페이스(air interface)에 대한 표준이다. 능동형 RFID 시스템은 호스트 시스템, RFID 리더, 그리고 태그들로 구성이 된다. 호스트 시스템은 RFID와 연동되는 응용 프로그램을 운용하고, 태그는 자산, 사물 또는 사람에게 부착되어 정보를 제공한다. 기본적으로 RFID 리더는 자신의 무선 통신을 이용하여 통신 범위 내의 RFID 태그들의 정보를 수집한다. ISO/IEC 18000-7에 정의된 RFID의 주요 역할은 범위 내의 태그들의 정보를 식별하고, 데이터를 읽고 쓰며, 시스템들을 제어한다. 또한 그룹이나 주소를 기반으로 태그들을 선택하고 다수의 태그들에 대한 정보를 교환하며 오류에 대한 처리를 담당하고 있다.

RFID 리더가 무선 통신 범위 내의 태그 정보를 수집 과정은 마스터-슬레이브 방식으로 동작한다. 그림 2.1은 표준에서 제공하는 리더와 태그 사이의 통신 과정을 나타낸다. 가장 먼저 리더는 수면 상태의 태그들을 깨우기 위해 알람 신호를 보냄으로써 프로토콜을 시작한다. 태그가 활성화 상태가 된 후, 리더는 수집 명령을 초기 프레임 크기와 함께 브로드캐스트한다. 명령을 받은 태그들은 프레임 내에서 임의의 슬롯을 선택하고 해당하는 명령에 대해서 응답한다. 이때, 둘 이상의 태그들이 같은 슬롯을 선택하여 전송시에 태그들의 신호간에 간섭 또는 방해가 발생한다. 이러한 신호의 방해는 성공적인 태그의 정보 수집을 방해하므로 태그의 충돌 방지 기법이 필요하다. ISO/IEC 18000-7 표준에서는 DFSA(dynamic framed slotted

ALOHA) 방식의 충돌 회피 기법을 사용한다. DFSA는 효율적인 태그 정보 수집을 위해서 프레임 크기를 변경할 수 있다. 프레임의 크기를 변경하기 위해 DFSA는 식별된 태그의 정보와 충돌한 슬롯의 수를 활용하기 때문에 고정된 프레임 크기를 사용함으로써 발생하는 비효율성을 해소한다. 리더가 프레임 윈도우 크기 내에서 RFID 수집을 완료한 후에, 리더는 UDB(universal data block) 명령을 수집된 태그들에게 점대점(point-to-point) 방식으로 전송한다. UDB 메시지를 받은 태그는 리더에게 자신의 UDB 정보를 리더에게 응답한다. UDB 메시지를 성공적으로 전송한 후에 태그는 자신의 에너지를 절약하기 위하여 수면 상태로 진입한다. 연속적으로, 리더는 모든 태그로부터 UDB 정보를 초기 윈도우 기간동안 획득하고, 새로운 프레임 크기를 계산하여 다음 수집 과정을 거친다 [HWY07].

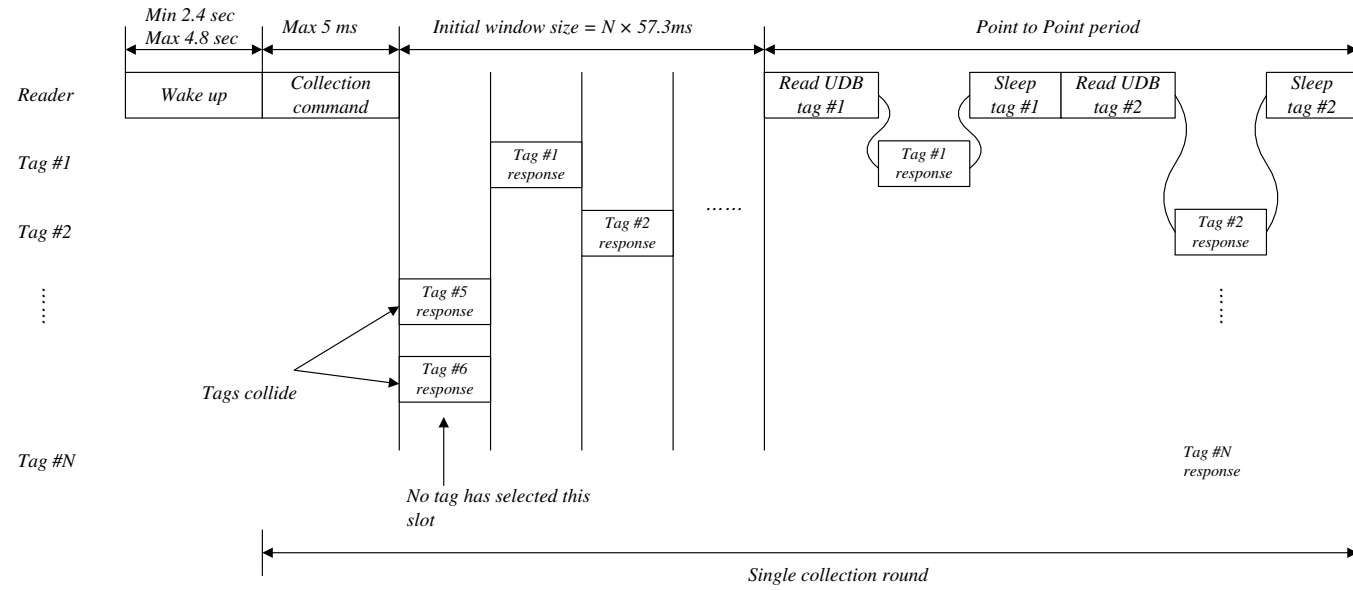


그림 2.1: ISO/IEC 18000-7 동작 개념도

2.2 RFID의 수집 기법

분산 리더 시스템에서 태그의 정보를 효율적으로 수집하고, 리더간 신호의 충돌을 방지하는 알고리즘으로는 DCS(distributed color selection)와 Colorwave가 있다 [JDS03a, JDS03b, LL06]. 이러한 기법들은 시분할 방식을 이용하여 리더들 간의 신호 충돌을 방지한다. 리더들은 필드 내의 RFID 태그 정보를 수집하기 위해 수집 기간을 슬롯으로 두고 다수의 슬롯들로 이루어진 프레임 내에서 하나의 슬롯을 선택한 후, 해당 슬롯 기간 내에 태그의 수집을 수행한다 [DE01]. 이러한 시분할 방식의 알고리즘은 리더들간의 통신을 통하여 각 리더들이 슬롯을 결정하므로, 리더 사이의 통신이 보장되어야 한다. 그림 2.2는 시분할 방식의 리더간 충돌 방지 기법의 일례를 나타낸다. 리더간 통신 구간(R-R, reader-reader kick period)과 리더가 태그 정보를 수집하는 구간(R-T, reader-tag communication period)이 하나의 슬롯을 구성하고 있다.

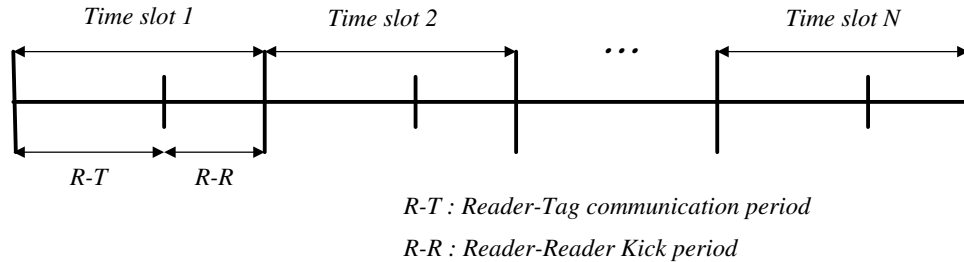


그림 2.2: 충돌 방지를 위한 프레임 구조

이러한 시분할 방식의 충돌 방지 알고리즘은 리더가 자신이 사용하는 프레임의 크기를 유동적으로 확장할 수 있는지에 따라 고정된 크기의 프레임을 사용하는 DCS와 프레임의 크기를 유동적으로 할당하는 Colorwave로 나누어진다 [LL06].

2.2.1 DCS

DCS에서는 RFID 리더들이 프레임 내에서 임의의 슬롯(color)을 선택하여 슬롯 기간내에서 태그들을 인식함으로써 리더들 간의 신호 충돌을 방지하는 기법이다. 리더는 충돌이 발생하면 자신이 선택했던 슬롯을 변경하고, 신호 충돌이 발생하지 않고 유일한 슬롯을 선택하였을 경우에는 다음 프레임에도 이를 유지하여 충돌 가능성을 줄인다. DCS에서는 프레임의 크기를 max_color라고 하며, 리더가 선택한 슬롯의 프레임 내 위치를 color라고 일컫는다.

DCS에서 RFID 리더는 해당 슬롯에 충돌이 감지되면 다음 프레임에서 선택할 color를 미리 예약하고, 이 예약 정보를 주변의 리더들에게 알린다. 이 정보를 수신한 주변 리더들은 수신한 color 값과 다음 프레임에서 자신이 사용할 color 값을 비교하여 동일할 경우 자신의 color 값을 재변경한다. 이때 재변경한 color 값은 주변의 리더들에게 다시 전송하지는 않는다. 이러한 DCS의 동작 과정은 충돌이 발생하지 않은 리더는 다음 프레임에서 리더간의 신호 간섭없이 태그를 인식할 수 있는 기회를 얻게 된다.

알고리즘 1은 DCS의 동작 과정을 보여주는 의사코드이다. DCS는 3단계의 과정을 거친다: 전송(transmission), 충돌(collision), 그리고 충돌 회피(collision resolution). 전송 과정은 리더가 프레임 내에서 태그 수집을 위해 사용할 슬롯을 획득하는 과정이며, 충돌 과정은 충돌을 경험한 리더가 자신의 슬롯을 변경하는 것이다. 마지막으로 충돌 회피 과정은 충돌한 리더들이 다음 프레임에서 사용할 슬롯을 예약하고, 이 예약 정보를 주변의 리더들에게 전송함으로써 해당 슬롯에 대해 독점하는 과정을 나타낸다.

그림 2.3은 DCS 동작 과정을 보여주는 예이다. 먼저, DCS에서는 리더들 간

Algorithm 1 DCS 동작 의사코드 [JDS03a]

DCS Subroutine 1 - Transmission

```
if (timeslot_ID % max_color) == current_color then
    transmission
else
    idle until (timeslot_ID % max_color) == current_color
end if
```

DCS Subroutine 2 - Collision

```
if attempted transmission but experienced collision then
    current_color == random (max_color)
    broadcast the information stating new color
end if
```

DCS Subroutine 3 - Collision resolution (kick)

```
if the information received stating current_color then
    randomly change to different color within max_color
end if
```

의 시각 동기를 가정하고 있다. 리더들은 상호간에 동기를 맞춘 후 자신이 사용할 color를 선택한다. 리더 1은 color로 1을 리더 2는 3을 리더 3과 5는 2를 리더 4는 5를 선택한다. 첫 프레임에서 리더 1, 2, 4는 충돌없이 성공적으로 태그 수집 과정을 완료하지만, 리더 3과 5는 충돌로 인하여 color를 재선택한다. 다음 프레임에서 리더 1,2,4는 동일한 color로 태그를 수집하며, 리더 3은 자신의 color를 4로 변경하여 리더 5에게 알린다. 리더 5는 color 4를 피하여 슬롯을 선택하게 되고, 다음 프레임에서 성공적인 태그 수집을 수행하게 된다.

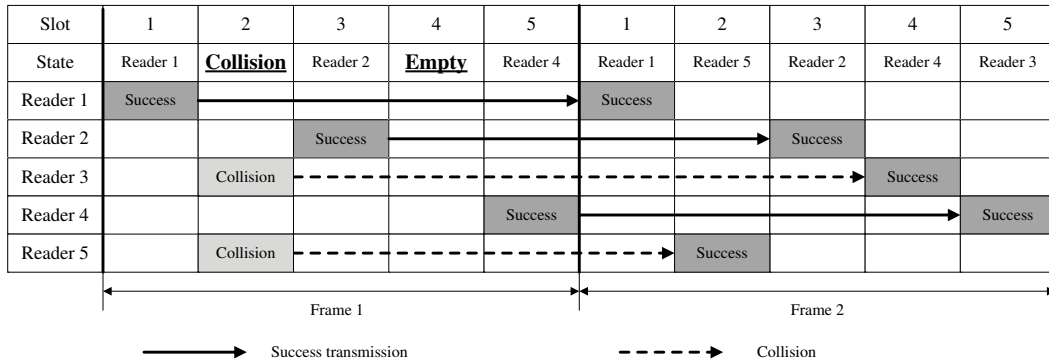


그림 2.3: DCS 동작 과정

2.2.2 Colorwave

DCS는 프레임의 크기가 고정되어 있어 충돌이 발생하는 리더의 수가 많아질 경우 능동적으로 변경할 수 없다는 한계점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 리더의 충돌 발생 빈도에 따라 리더의 프레임 크기(max_color)를 변경할 수 있는 Colorwave가 제안되었다. Colorwave 에서 충돌을 많이 경험한 리더는 프레임의 크기를 증가시켜서 선택할 수 있는 슬롯의 크기를 늘린다. 또한 충돌을 적게 경험한 리더는 반대로 프레임의 크기를 줄여 슬롯의 크기를 줄임으로써 네트워크의 변경에 따라 유동적으로 대처하도록 한다.

Colorwave는 두 단계의 과정으로 나뉘어 동작하게 된다. 먼저, 리더 충돌이 발생할 경우 충돌 회피를 위하여 DCS와 같은 접근법을 이용한다. 다음은 리더가 자신의 프레임 크기를 변경하기 위한 과정이다. 알고리즘 2는 두 번째 과정을 설명하는 의사코드이다. 리더들은 일정 시간동안 자신이 경험하는 리더 충돌의 횟수를 기록하고, 그 횟수가 특정 임계치(UpSafe) 이상이 되면 자신의 프레임 크기를 1슬롯씩 증가시키고, 그 횟수가 또 다른 임계치(DownSafe)보다 작으면 프레임의 크기를 1 슬롯씩 감소시킨다. 이때 리더는 변경된 프레임 크기를 주변 리더들에게 알리고,

Algorithm 2 Colorwave 동작 의사코드 [JDS03a]

Colorwave Subroutine 1 - Color change

if collision percentage is past SAFE threshold **and** time spent in current max_color exceeds min_time threshold **then**

 Change max_color up or down one (depending on threshold exceeded)

 Next iteration, initiate kick to new max_color.

end if

DCS Subroutine 2 - Kick resolution

if If kick received stating current_color **then**

 change to random color within max_colors OTHER THAN current_color

end if

if kick received stating change to new max_color **and** collision percentage is past TRIGGER threshold **and** time spent in current max color exceeds min time threshold **then**

 Change max_color to kicked value.

 Next iteration, initiate kick to new max_color.

end if

All DCS subroutine are also in use

주변 리더들은 전송된 프레임 크기와 자신의 프레임 크기 및 자신의 리더 충돌 횟수를 이용하여 프레임 크기를 변경한다.

2.2.3 멀티홉 기반의 태그 수집

DCS와 Colorwave는 대규모 RFID 시스템에 적용하기 위해 다수의 리더를 배치하고, 이들 리더간의 충돌을 회피하면서 분산적으로 수집을 수행한다. RFID 리더를 필드에 다수 배치하는 접근법은 인프라를 설치하는데 많은 비용이 요구되며 대규모 네트워크에 적용시키기에는 확장성이 부족하다. Y.Yoo [YJH09]는 리더의 통

신 거리가 도달하지 않는 음영 지역을 극복하기 위하여 태그 수집 신호를 멀티홉 기반으로 전달하는 새로운 접근 기법을 제안하였다. 그림 2.4는 Y.Yoo에 의해 제안된 기법의 동작 방식이다. 리더는 RFID 수집을 위해 통신 범위의 태그들에게 수집 명령을 전송한다. 리더 통신 범위 밖에 존재하는 태그를 수집하기 위해 통신 범위 내의 태그가 이를 확인하고 재전송한다. 음영 지역의 태그들은 이웃한 태그로부터 재전송된 수집 명령을 확인하고 응답한다. 이러한 일련의 과정은 태그간 통신을 통하여 이루어지며, 태그들은 자율적으로 계층적인 토폴로지를 형성한다. 본 기법에서는 433MHz 대역의 능동형 RFID 시스템을 중점적으로 다루고 있지만, 433MHz 주파수 대역의 능동형 RFID 표준인 ISO/IEC 18000-7에서는 리더가 태그의 정보를 수집하기 위해 단일홉 방식을 정의하고 있다. Y.Yoo는 리더의 태그 수집 범위를 확장하기 위하여 ISO/IEC 18000-7의 프로토콜을 재정의하였다.

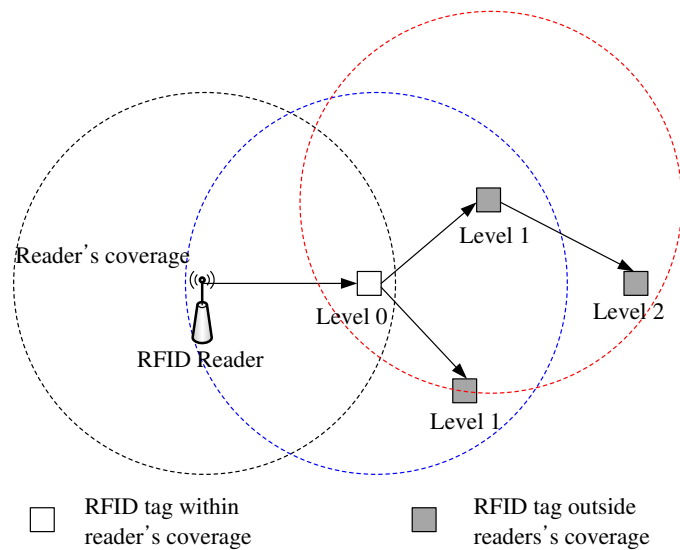


그림 2.4: 태그간 통신을 통한 멀티홉 기반의 RFID 수집

2.3 시각 동기 기법

모든 분산 시스템에서 시각 동기가 중요하듯이 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템에서도 시각 동기는 중요한 부분에 속한다. 특히, 능동형 RFID는 사물 또는 사람의 정보를 획득할 수 있으며, 센서를 부착하여 주변 환경을 센싱할 수 있다. 하지만, 능동형 RFID 태그는 네트워크내에서 시간을 공유할 수 있는 방법을 제공하고 있지 않는다. 따라서, 이러한 수집된 정보를 정렬하기 위해서는 정보 수집의 주체가 되는 리더들 간의 동기는 필수적이다. 능동형 RFID 리더들간의 시각 동기 기법을 분류하기 전에 먼저 본 연구에서 사용될 용어를 정의한다 [FCF08]. $c(t)$ 는 이상적인 시각(ideal 또는 perfect time)을 표현하며, t 는 UTC(coordinated universal time)와 같은 실제 시각(real time)을 의미한다. 네트워크 내의 모든 노드들은 자신의 지역 시각(local clock)을 유지한다. 이 지역 시각은 특정 주파수로 발진하는 수정 크리스탈 오실레이터의 진동을 카운팅한 타이머이다. 일반적으로 타이머는 클럭 틱(clock tick)이라는 인터럽트를 생성하도록 프로그램되어 있다. 매 클럭 틱에서 인터럽트 처리가 수행되어 클럭 값이 증가되고 내부 메모리에 저장된다.

임의의 두 노드의 지역 시각이 $c_i(t)$ 와 $c_k(t)$ 일 경우, 만약 $c_i(t) = c(t)$ 한다면, $c_i(t)$ 는 시간 t 에 보정(correct)되었다고 한다. 또는 $dc_i(t)/dt = dc(t)/dt$ 한다면 시간 t 에 $c_i(t)$ 를 정확하다(accurate)고 표현한다. 그리고, $c_i(t) = c_k(t)$ 한다면 시간 t 에 두 클럭 $c_i(t)$ 와 $c_k(t)$ 는 동기화(synchronized)되었다고 한다. 다시 이야기해서 동기화된 두 클럭은 항상 보정되거나 정확하지는 않다는 것이다. 즉, 동기화는 시각 보정과 정확도에 항상 연관있는 것이 아니라는 것이다.

하지만 대부분의 응용에서 노드들간의 충분한 동기를 이룰수 있다. 크리스탈 오실레이터의 동작 주파수는 온도 변화, 공급 전압, 기압 등 주변의 조건에 의해

시변(time-varying)하는 시스템이기 때문에 노드 i 의 클럭 $c_i(t)$ 은 $c_i(t) = a_i(t)t + b_i(t_0)$ 로 표현될 수 있다. 여기서 $b_i(t_0)$ 는 클럭 $c_i(t)$ 에 의해 표현된 시각과 초기 인스턴트값 t_0 (i.e. $b_i(t_0) = c_i(t_0) - c(t_0)$)에서의 실제 시각과의 차이인 클럭 오프셋(clock offset)값을 의미한다. 그리고 두 노드 사이의 클럭 표류율(drift) $\rho_i(t)$ 는 클럭 $c_i(t)$ 와 이상적인 시각 (ideal clock) $c(t)=t$ (i.e. $\rho_i(t) = dc_i(t)/dt-1$) 사이의 차이로 정의된다. 따라서, $a_i(t) = \rho_i(t)+1$ 로 정의된다. 여기서 $\rho_i(t)$ 는 이상적인 값으로부터 오실레이터의 주파수 편차만큼 반영되는 시각 변수이다. 이를 다시 정리 하면 다음과 같다.

$$c_i(t) = a_{ik}(t)c_k(t) + b_{ik}(t_0) \quad (2.1)$$

여기서 $\rho_{ik}(t) = a_{ik}(t) - 1$ 은 상대적인 클럭 표류율을 나타내며 $b_{ik}(t_0)$ 는 상대적인 클럭 오프셋을 의미한다.

동기화 기법은 물리적으로 지역 시각 $c_i(t)$ 을 직접 수정하던지 소프트웨어 클럭 $h_i(t)$ 을 조절하는 방법으로 나뉘어진다. 소프트웨어 클럭은 지역 시각 $c_i(t)$ 을 입력으로 가지고 $h_i(t)$ 으로 변환하는 함수이다. 예를 들어, $h_i(t) = h_i(t_0) + g\{c_i(t) - c_i(t_0)\}$ 함수는 보정된 실제 시각 t_0 에 시작되는 소프트웨어 클럭이다. 여기서 $g\{\cdot\}$ 는 지역 시각의 카운터 값을 하나의 소프트웨어 클럭으로 변환하기 위해 사용되는 증가치(interval)이다. 만약 시스템의 4MHz 주파수의 크리스탈 오실레이터를 사용하면, 시스템의 지역 시각 $c_i(t)$ 해상도는 0.25마이크로초이다. 이때, 소프트웨어 클럭 카운터가 매 64클럭 틱 마다 증가치를 가진다면 $g\{\cdot\} = 16us$ 가된다. 즉, 소프트웨어 클럭은 62.5kHz로 동작하며, 해상도는 16 마이크로초가 된다. 본 연구에서는 소프트웨어 클럭을 이용하여 노드들간의 시각 동기를 이룬다.

2.3.1 시각 동기 기법의 분류

무선 네트워크 관점에서 시각 동기는 단일홉 또는 멀티홉의 네트워크로 연결된 노드들의 클럭을 동기화하는 것이다. 네트워크를 경유하여 클럭을 동기화하는 많은 기법들이 소개되었다. Reference Broadcast Synchronization (RBS) [EGE02], Adaptive Clock Synchronization (ACS) [SAD04], Lightweight Time Synchronization (LTS) [GR03], TSync [DH04], Timing- Sync Protocol for Sensor Networks (TPSN) [GKS03], Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP) [MKS04], 및 Tiny-Sync and Mini-Sync (TS/MS) [MV03]는 분산 네트워크의 대표적인 일레인 무선 센서 네트워크에서 가장 잘 알려진 동기 기법들이다. 이러한 프로토콜은 공통적으로 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 간단한 비연결 메시징 프로토콜(simple connectionless messaging protocol)
- 노드들 간의 지역 클럭 교환
- 메시지 전달시 비결정적 요소의 제거
- 차별된 개념과 알고리즘을 활용하여 동기화

시각 동기 기법은 크게 두가지 종류로 분류된다 [FCF08]: 양방향 교환 동기 기법(bidirectional pair-wise synchronization)와 단방향 방송 동기 기법(unidirectional broadcast synchronization). TPSN, LTS, TSync, 그리고 TS/MS는 양방향 동기화 기법으로 나뉘며, 단방향 동기 기법은 다시 단순 참조 시각 방송 기법(reference broadcast)과 수신 기간 (receiver-receiver)동기 기법으로 다시 나뉜다. FTSP는 단순 참조 시각 방송 기법으로 분류되며, RBS와 ACS는 수신기간 동기 기법으로 분류된다.

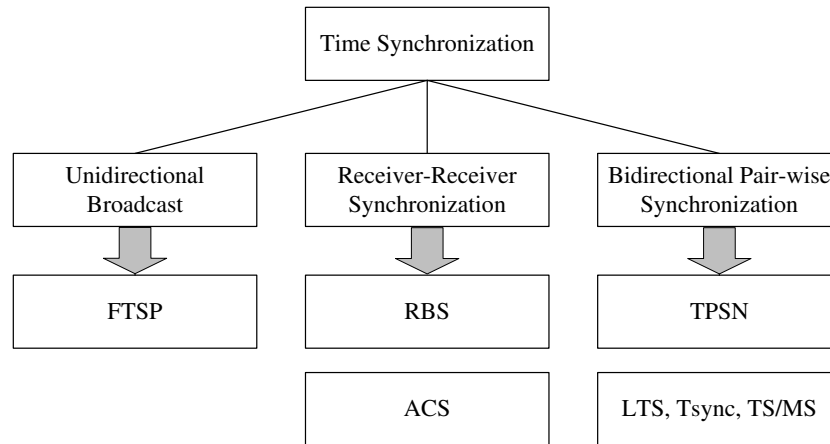


그림 2.5: 시각 동기 기법의 분류

참조 시각 방송 기법은 2.6(a)와 같이 단순히 참조 시각을 전송하고, 수신기가 자신의 클럭값을 보정하는 방법으로 가장 원시적인 기법이다. 수신기간 동기 기법(2.6(b))은 비컨 노드가 주기적으로 자신의 이웃 노드들에게 비컨 메시지를 전송한다. 수신 노드는 메시지의 도착 시각을 노드들의 클럭을 비교하기 위한 참조 포인트로 사용하며, 비컨 신호의 수신 시각을 교환한다. 그리고 마지막으로 노드들의 클럭을 동기화하기 위해 수신 시각들의 차이를 기준으로 오프셋을 계산한다. 2.6(b)는 단방향 동기 기법의 대표적인 기법은 RBS의 동작을 보여준다. 이더넷상의 전통적인 시각 동기 기법과 비교하여 주요한 장점은 메시지를 교환함에 있어서 비결정적 요소와 송수신 시간을 제거하는데 있다. 따라서 RBS는 네트워크내에서 높은 정확도를 가진 동기화를 제공한다.

양방향 동기화 기법은 또한 송수신기(sender-receiver)간의 동기 기법으로 불리며 송/수신 노드간의 양방향 통신을 통하여 지역 클럭 교환을 수행한다. 그림 2.6(c)는 다음의 3단계를 포함하는 기본적인 동작 과정을 보여준다.

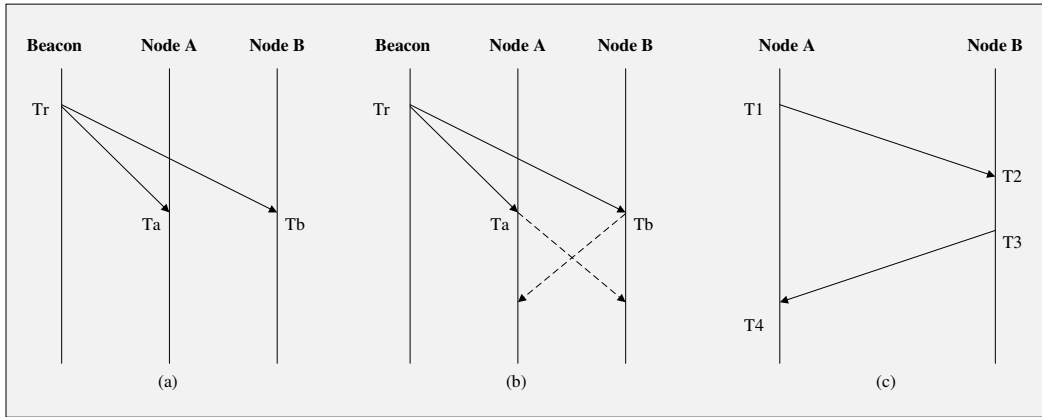


그림 2.6: 분류에 따른 동작 방식

- 송신 노드 A는 자신의 시각 T1을 포함한 전송하고, 수신 노드 B는 이 패킷을 자신의 지역 시각 T2에 수신한다. 이때, $T2 = T1 + d + \delta$ 계산된다. 여기서 δ 두 노드사이의 클럭 오프셋을 의미하고 d는 두 노드간의 전송 지연을 의미한다.
- 시각 T3에서, 노드 B는 ACK 패킷을 전송하고 이 패킷은 T2와 T3의 값을 포함한다. 노드 A는 이 패킷을 T4에 수신한다. 이와 비슷하게 T4는 T3로 계산되어질 수 있다 ($T4 = T3 + d - \delta$).
- 송신 노드 A는 두 노드간의 클럭 오프셋과 전송 지연을 다음과 같이 계산할 수 있다. $d = [(T2 - T1) + (T4 - T3)]/2$ 및 $\delta = [(T2 - T1) - (T4 - T3)]/2$.

그 후, 송신 노드 A는 자신의 지역 시각을 수신 노드 B의 시각에 동기화 한다.

비록 TPSN, LTS, TSync 그리고 TS/MS가 같은 양방향 동기화 기법을 채택한다고 할지라도, 각기 다른 응용의 특별한 요구 사항을 만족시키기 위하여 서로간의 차이점이 존재한다.

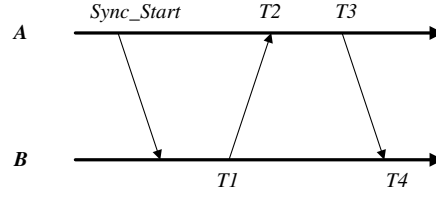


그림 2.7: TPSN 프로토콜의 동작 과정

2.3.2 시각 동기 기법

TPSN

TPSN의 동작방식은 토폴로지 형성 단계와 시각 동기 단계로 나뉘어진다. 토폴로지 형성 단계에서는 루트 노드가 레벨이 0이 되며, 루트와의 홉수가 증가할수록 레벨도 증가한다. 시각 동기 단계는 하위 레벨의 노드가 상위 레벨의 노드에게 동기에 필요한 시각 정보를 요청하여 동기를 이룬다. 그림 2.7은 TPSN의 동작 과정을 보여준다. 먼저, 계층간의 시각 동기를 위해 상위 레벨 노드가 *sync start* 메시지를 전송하고, 이 메시지를 수신한 하위 계층의 노드는 상위 계층의 노드에게 T1 시간에 동기 요청 메시지를 보낸다. 상위 레벨 노드는 이를 T2 시간에 수신하고, T3 시간에 ACK 메시지를 회신하며 T4 시간에 회신 메시지를 받은 하위 레벨의 노드는 4개의 시각 정보를 이용하여 오프셋과 전송 지연을 식 2.2와 같이 계산한다. TPSN은 모든 노드들이 이러한 일련의 과정을 반복하는 프로토콜으로써, 복잡도는 네트워크 내의 노드 수에 비례한다.

$$\delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}, d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (2.2)$$

ACS

ACS는 외부의 비컨 노드가 참조 펄스를 이웃한 노드들에게 전송하여 노드들이 이 펄스의 수신 시각을 상호 교환하여 상대적인 시각을 맞추는 기법으로 RBS를 확장한 것이다. 그림 2.8은 ACS의 동작 과정을 설명한다. 먼저, 비컨 노드는 참조 시각이 아니라 연속된 펄스를 네트워크에 브로드캐스트한다. 이 펄스를 수신한 노드들은 일정 시간 후, 펄스를 수신한 자신의 지역 클럭을 비컨 노드에게 전달하고 비컨 노드는 이 연속된 비컨 신호 수신 시각들의 기울기를 모든 노드들로부터 비교한다. 비교된 값을 다시 모든 노드들에게 브로드캐스트하고 노드들은 이 비교된 값에 자신의 클럭을 동기화 한다. 멀티홉 동기를 위해서 노드들은 비컨 노드의 펄스에 동기화 된 노드들은 자신이 다시 비컨 노드가 되어 동일한 과정을 반복한다. 이러한 과정은 플러딩을 통하여 네트워크 내의 모든 노드들이 비컨 과정을 수행하며, 비컨에 상대적으로 동기화 될 수 있다.

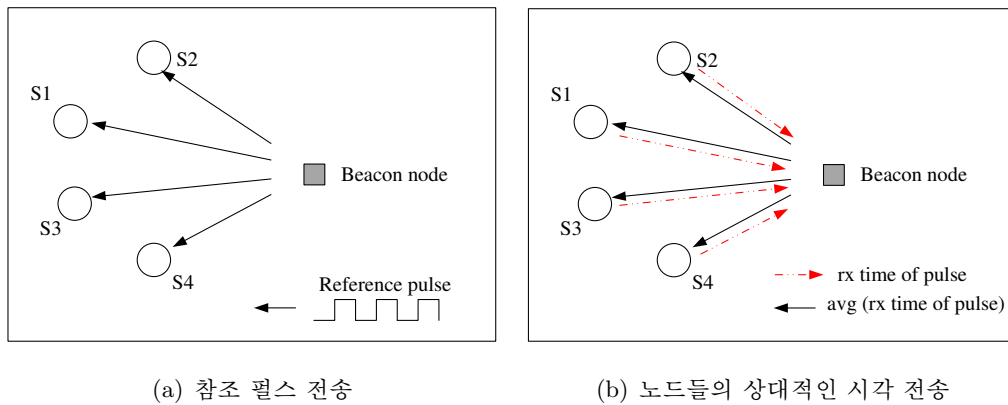


그림 2.8: ACS 프로토콜의 동작 과정

제 3 장 멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집 기법

본 장에서는 멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집을 위하여 고려하여야 할 사항에 대해 언급하고, 제시된 문제를 해결하기 위한 RFID 수집 기법을 제안한다. 제안된 기법은 433MHz 주파수 대역의 능동형 RFID 표준인 ISO/IEC 18000-7과의 호환성을 고려하며, 다수의 리더들이 태그 수집시 발생할 수 있는 신호의 간섭, 다중 판독 문제를 회피한다.

3.1 문제정의

대규모 능동형 RFID 시스템에서 장애물, 리더의 통신 범위 한계 등으로 인한 단점을 극복하기 위하여 다수의 RFID 리더를 멀티홉 배치하여 태그의 정보를 수집할 때 고려하여야 할 사항은 다음과 같다 [KMP05, DPDS06].

- 표준과의 호환성
- 신뢰성있고 신속한 수집
- 애드혹 배치된 리더의 효율적인 관리
- 리더간 신호 간섭
- 다중 판독

DCS와 Colorwave는 RFID가 분산 배치된 필드에서 리더간의 충돌을 회피하면서 태그의 정보를 효과적으로 수집할 수 있다. 하지만, 이러한 분산 수집을 ISO/IEC

18000-7 표준을 준수하는 능동형 RFID 시스템에 적용시키기 위해서는 다음과 같은 문제점이 존재한다.

- 두 알고리즘은 충돌 회피를 위해 리더간의 통신을 고려하고 있다. 하지만, 그림 3.1과 같이 리더간 통신이 불가능할 경우에도 신호의 간섭은 발생할 수 있다. DCS와 Colorwave는 이를 전혀 고려하지 않는다.
- 다수의 리더에 의해 하나의 태그가 여러번 읽혀지는 다중 판독 문제를 고려하지 않는다.
- 시분할 기법으로써 리더간 통신 기간 및 태그 수집에 필요한 시간이 고정적이다. 이러한 고정된 슬롯의 크기는 필드내에 존재하는 태그의 수를 정확히 파악하는 것이 어렵기 때문에 태그의 인식에 실패할 가능성이 높다.
- 다수의 리더가 네트워크에 존재시 표준은 긴 수집 시간을 소요한다.

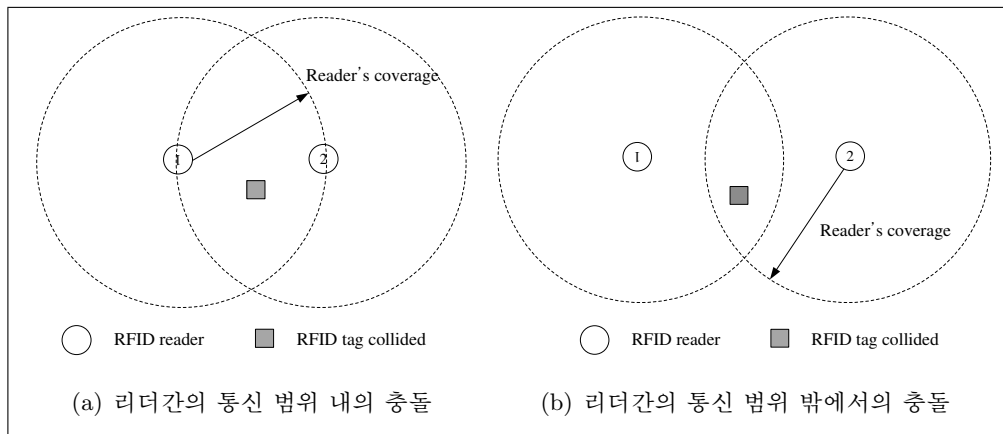


그림 3.1: 리더간 충돌

3.2 멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집

멀티홉 기반의 능동형 RFID를 수집하는 첫 단계는 네트워크 내의 RFID 싱크로부터 전체 RFID 리더들의 계층적 토폴로지를 구성하는 것이다. 두번째 단계는 RFID 싱크가 생성된 계층적 토폴로지와 경로 정보를 기반으로 리더의 정보를 발견해 나가는 과정이며, 마지막으로, 리더 정보를 기반으로 RFID 필드에 산재해 있는 태그의 정보를 수집한다.

3.2.1 경로 확산

경로 확산 단계는 토폴로지 구성 단계로써 RFID 수집 명령을 수행하기 전에 RFID 싱크에 의해 시작된다. 네트워크내의 리더들에게 계층적 토폴로지와 RFID 싱크와의 경로를 설정하기 위해 싱크는 경로 확산 메시지를 브로드캐스트한다. 경로 확산 메시지에는 메시지의 ID, 레벨 정보, 그리고 메시지의 전달 경로가 포함된다.

그림 3.2는 경로 확산 과정의 예를 보여주며, 알고리즘 3은 경로 확산을 위한 의사 코드이다. 먼저, 싱크는 자신의 레벨을 0으로 설정하고, 자신의 레벨과 주소를 경로 확산 메시지에 포함하여 전달한다. 메시지를 수신한 리더들은 자신의 레벨을 메시지 내의 레벨에 1 증가시켜 경로 정보와 함께 저장하고, 이 정보를 다시 자신의 이웃한 리더들에게 재전송한다. 경로 확산 메시지는 네트워크 내의 모든 리더들에게 전달되며, RFID 리더를 경유할 때마다 레벨이 증가되고, 경로 정보에 경유한 리더의 ID를 추가한다.

Algorithm 3 네트워크 토폴로지 구성

```
if ( RFID_sink ) then
    msg.level  $\leftarrow$  0
    msg.path  $\leftarrow$  my_address
    msg.src  $\leftarrow$  my_address
    msg.intermediate  $\leftarrow$  my_address
    msg.seq  $\leftarrow$  seq++
    broadcast route_dissemination_message(msg)
else
    receive route_dissemination_message
    get msg from received message
    cache.seq = findInCache(msg.src, msg.seq)
    if ( $\sim$ cache.seq) then
        update cache  $\leftarrow$  msg.src and msg.seq
        if (my_level > msg.level + 1) then
            update my_level  $\leftarrow$  msg.level + 1
            update my_parent  $\leftarrow$  msg.intermediate
            update route  $\leftarrow$  msg.path
        end if
        msg.intermediate  $\leftarrow$  my_address
        msg.level  $\leftarrow$  msg.level + 1
        add msg.path  $\leftarrow$  my_address
        broadcast route_dissemination_message(msg)
    end if
end if
```

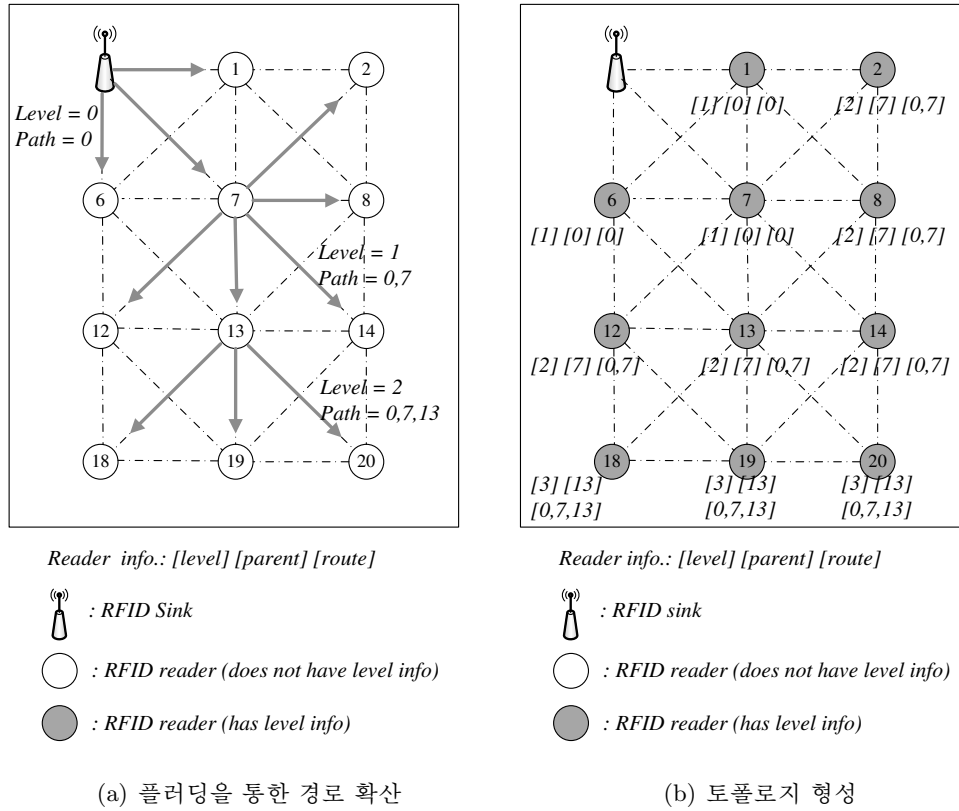


그림 3.2: 토폴로지 구성을 위한 경로 확산

3.2.2 능동형 RFID 리더 발견

경로 확산 단계가 끝나고 나면 RFID 싱크는 네트워크 내의 RFID 리더들의 목록을 작성하는 RFID 리더 발견 단계를 가진다. 싱크는 RFID 필드 내에 존재하는 RFID 리더의 목록을 확보하기 위하여 리더 발견 메시지를 전송한다. 이 메시지는 수집하고자 하는 리더의 레벨 정보를 포함하고 있다. 먼저, 싱크는 레벨 1부터 순차적으로 RFID 리더들을 발견해 나간다. 그림 3.3은 리더 발견 및 리더 테이블 작성 과정을 보여준다. RFID 싱크는 레벨 1을 리더 발견 메시지에 포함시켜 전송한다. 리더 발견 메시지를 수신한 리더들은 자신의 레벨과 리더 발견 메시지내의 레

벨을 비교하여 일치하면, 자신의 경로 정보를 이용하여 응답 메시지를 싱크로 보낸다. 이때 응답 메시지 내에는 RFID 싱크에서 리더 자신까지의 경로 정보를 포함한다. 응답 메시지를 수신한 싱크는 자신의 테이블내에 해당 리더의 정보를 기록한다. 레벨 1의 RFID 리더 발견 과정이 끝나고 나면, RFID 싱크는 레벨 i 를 $i+1$ 로 갱신하여 연속적으로 네트워크 내의 RFID 리더들을 발견해 나간다. RFID 싱크는 이러한 과정을 네트워크에서 더이상 RFID 리더가 발견되지 않을때까지 반복된다.

3.2.3 선택적 플러딩

경로 확산과 RFID 리더 발견을 위해 두번의 플러딩 과정을 수행한다. 플러딩에 의해 발생하는 문제점은 다음과 같다.

- 중복 메시지 발생 : RFID 리더가 브로드캐스트 메시지를 자신의 이웃 리더들에게 재전송할 때, 이미 이웃 리더들은 그 메시지를 수신한 경험이 있을 수 있다.
- 채널 경쟁 : 브로드캐스트 메시지를 수신하고, 재전송 할 경우, 이웃한 리더들과 동시에 채널을 점유하려 하기 때문에 많은 지연을 포함할 수 있다.
- 충돌 : 동시에 전송시 메시지의 손실이 발생할 수 있다.

Dominant pruning 알고리즘[LC01]은 이홉(two-hop) 이웃 리더들의 정보를 활용하여 최적의 플러딩 트리를 형성하는 프로토콜이다. 또한, dominant pruning 기법은 패킷을 전송하는 각각의 리더가 다음 패킷을 전달할 인접 리더를 결정한다. 선택된 인접 리더의 ID는 포워딩 리스트에 포함되어 전달된다. 그림 3.4는 dominant pruning 알고리즘을 설명한다.

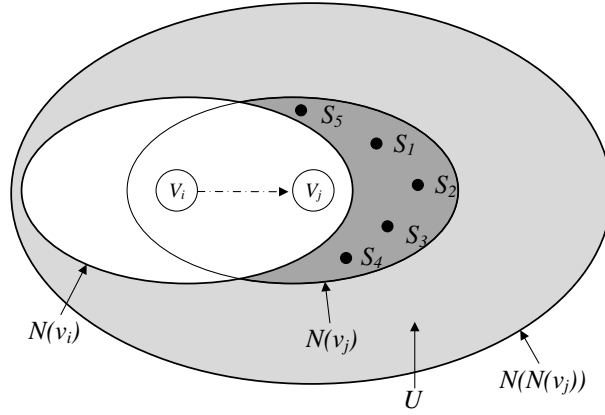


그림 3.4: Dominant pruning

V_j 는 V_i 로부터 패킷을 수신하는 리더이고, V_j 는 포워드 리스트내에 기록된다고 가정한다. $N(V_i)$ 는 V_i 의 단일홉 내의 이웃 리더들을 일컫으며, $N(V_j)$ 는 V_j 의 단일홉 내의 이웃 리더들의 집합이다. 리더 V_j 는 V_j 로부터 이홉 거리내의 모든 리더들이 패킷을 받게하기 위하여 포워드 리스트를 작성한다. V_j 로부터 이홉 거리내의 리더들의 집합을 $N(N(V_j))$ 라 표기한다. V_i 가 V_j 에게 패킷을 전달할시에 $N(V_i)$ 는 이미 패킷을 수신하고, V_j 가 패킷을 전달할때, $N(V_j)$ 가 패킷을 받게 될 것이다. 따라서, V_j 는 집합 $U = N(N(V_j)) - N(V_i) - N(V_j)$ 내의 모든 리더들이 패킷을 전달받게 하기 위하여 포워드 리스트를 작성한다. $N(V_j) - N(V_i)$ 내에서 포워드 리스트 F 를 작성하는 것은 NP-complete 문제인 set cover 문제와 동일하다. 포워드 리스트 F 의 작성을 위한 greedy set cover 알고리즘은 의사코드 4와 같다.

그림 3.5는 greedy set cover 알고리즘에서 탐욕적인 방법으로 포워드 리스트를 작성하는 과정을 보여준다. 그림 3.4에서 $N(V_j) - N(V_i)$ 내의 리더 S_k 들은 그림 3.5와 같은 인접 리더들의 집합을 이루고 있다고 가정하자.

- $S_1 = \{1, 2, 3, 8, 9, 10\}$, $S_2 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $S_3 = \{4, 5, 7\}$, $S_4 = \{5, 6, 7\}$, S_5

Algorithm 4 Greedy set cover

Let $F = \emptyset, Z = \emptyset, K = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ where $S_k = N(V_k) \cap U$

if $V_j == \text{RFID sink (source_node)}$

$U = N(N(V_j)) - N(V_j) - V_j$

else

$U = N(N(V_j)) - N(V_i) - N(V_j)$

end if

while($Z \neq U$)

Find the set S_k whose size is maximum in a set K

$F = F \cup \{V_k\}, Z = Z \cup \{S_k\}$

$K = K - \{S_k\}, S_l = S_l - S_k$ for all $S_l \in K$

end while

$= \{6, 7, 8, 9, 10\}$

그림에서 S_2 와 S_5 가 모든 포인트를 포함하기 때문에 이 두개의 집합을 구하는 것이 최적의 해법이다. Greedy set cover 기법은 전체 집합중에 가장 큰 집합 $S_1 = \{1, 2, 3, 8, 9, 10\}$ 을 선택한다. 집합 S_1 의 모든 포인트를 제외하면 $\{4, 5\}, \{4, 5, 7\}, \{5, 6, 7\}$, 그리고 $\{6, 7\}$ 의 집합이 남게된다. 남은 집합중 크기가 3인 집합을 선택한다. 알고리즘은 $S_3 = \{4, 5, 7\}$ 을 선택한 다음 나머지 $\{6\}$ 을 가진 집합을 선택하므로써 알고리즘을 완료한다. Greedy set cover 알고리즘은 패킷이 전달되는 현 단계에서는 최적의 해법을 제공한다.

3.2.4 능동형 RFID 수집

능동형 RFID의 수집 과정은 리더 발견 과정에서 작성된 리더 테이블을 참조하여 수행한다. 사용자나 응용으로부터 RFID 수집 명령을 받은 RFID 싱크는 자신의

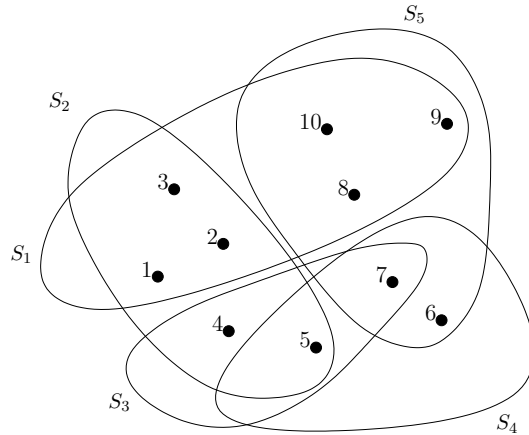
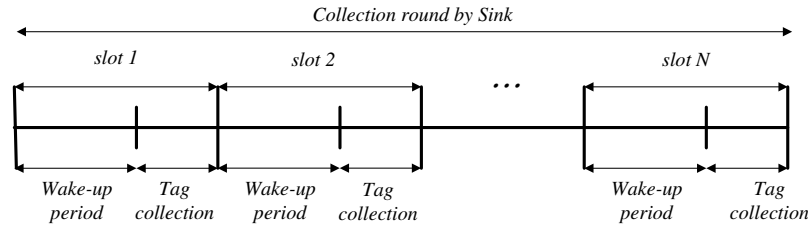


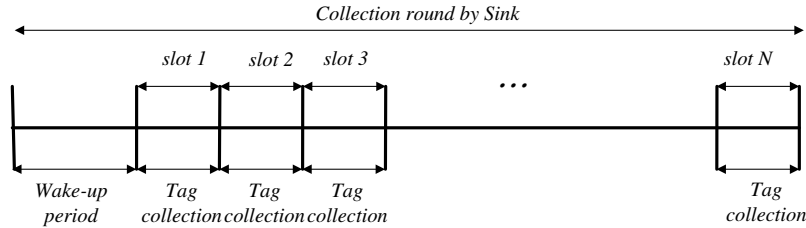
그림 3.5: Greedy set cover

RFID 통신 범위 내의 RFID 정보 획득 과정을 가진다. 태그의 수집 과정이 완료되면, 싱크는 테이블 내의 리더들에게 슬롯을 할당한다. 그림 3.6(a)는 슬롯에 기반한 RFID 수집 방법을 보여준다. RFID 싱크로부터 슬롯을 할당받은 RFID 리더는 이 슬롯 기간동안 채널을 점유하게 되며, 통신 범위 내의 태그를 수집하게 된다. 싱크가 할당하는 이 슬롯은 ISO/IEC 18000-7의 알람 신호 기간과 수집 기간을 모두 포함한다. 수집 기간동안 태그의 정보를 수집한 후, 리더는 수집된 정보를 싱크로 전달하고, 싱크는 테이블 내의 다음 리더에게 슬롯을 할당한다. 순차적으로 싱크로부터 슬롯을 할당받은 리더는 슬롯 기간동안 채널을 점유하여 태그의 정보를 획득하며, 이 과정은 RFID 싱크의 테이블에서 모든 리더들로부터 태그의 정보를 획득할 때까지 반복된다.

제안하는 기법은 RFID 리더들간의 신호 간섭을 완전히 제거할 수 있지만, 표준과의 호환성으로 인하여 태그 수집에 많은 시간을 소요하게 된다. 다시 말해서, ISO/IEC 18000-7 프로토콜은 수면 상태의 태그를 활성화시키기 위해 최소 2.4초에



(a) ISO/IEC 18000-7 기반 RFID 수집



(b) 병합된 wake-up을 통한 RFID 수집

그림 3.6: 멀티홉 환경에서 슬롯 기반의 RFID 수집

서 최대 4.8초까지 알람 신호를 전송한다. 태그가 활성화된 후 리더는 필드의 태그를 수집하고, 수집된 태그 정보를 이용하여 UDB 등 태그의 추가 정보를 획득하는 과정을 거친다. 네트워크 내의 모든 리더들이 독립적인 알람 신호와 연속된 수집 단계를 가지게 됨으로써 많은 수집 시간을 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 태그를 활성화시키기 위한 알람 신호와 태그의 정보를 획득하는 수집 기간을 분리한다.

그림 3.6(b)는 신호의 분리를 통한 RFID 수집 기법을 보여준다. RFID 싱크는 RFID를 수집하기 위해 네트워크 내의 모든 리더들에게 알람 명령을 전달한다. RFID 싱크로부터 명령을 받은 리더들은 wake-up 기간 동안 알람 신호를 태그들에게 전송하여 수면 상태의 태그를 활성화 시킨다. wake-up 기간이 완료되면, 싱크는 자신의 테이블을 확인하여 리더들에게 슬롯을 할당한다. 슬롯을 할당받은 리더는 알람 신호를 제외하고 즉시 태그 수집 기간을 가진다. 태그 수집이 완료되면 리더

는 싱크에게 회신하고, 싱크는 다음 리더에게 슬롯을 할당한다. 슬롯 내에서 리더들은 알람 신호가 제거된 수집 기간만 가지게 되어 신속한 수집을 이룰수 있다. 하지만, 이러한 알람 신호의 동시 전송은 다수의 리더들에 의해 신호의 간섭이 발생할 수 있다. 표준에 의한 알람 신호는 일정한 패턴을 가지며, 이 신호는 간섭이 발생하지 않는다고 가정한다. 본 연구의 성능 평가에서는 다수의 리더에 의해 알람 신호를 전송할 때, 태그가 성공적으로 활성화되는 것을 실험을 통하여 검증하였다.

3.2.5 신규 또는 미발견 리더 정보 획득

네트워크 내에서 RFID 싱크가 RFID 리더 발견 단계를 모두 수행 후에 네트워크에 합류되지 않은 리더가 존재할 수 있다. 예를 들어, 싱크가 RFID 필드내의 리더를 수집하고 난 후에 새로이 리더가 생기거나 네트워크의 통신 채널 충돌로 인하여 리더가 응답을 못 하였을 경우, 해당 리더는 네트워크 내에서 싱크로부터 명령을 받지 못하여 네트워크에 합류하지 못하게 된다. 이 경우에 리더는 네트워크 계층에서 어떠한 경로도 할당받지 못하게 된다.

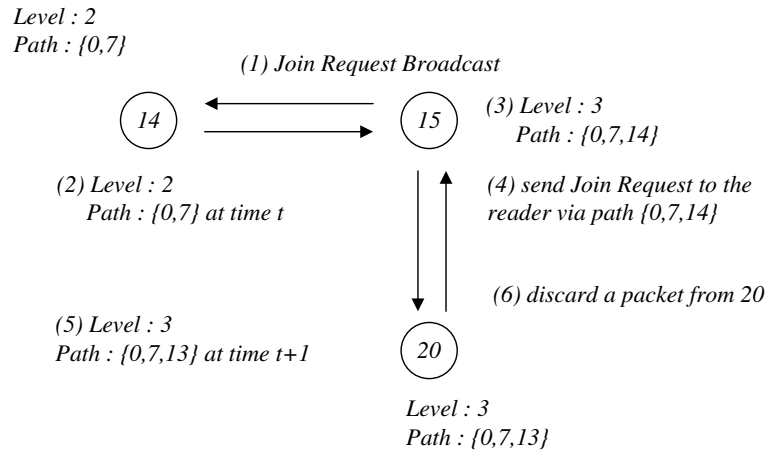
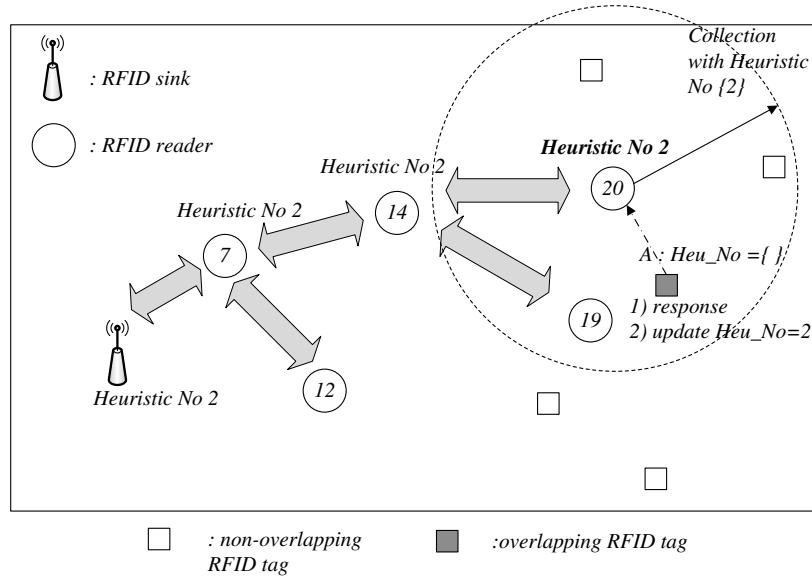


그림 3.7: RFID 리더의 네트워크 참여

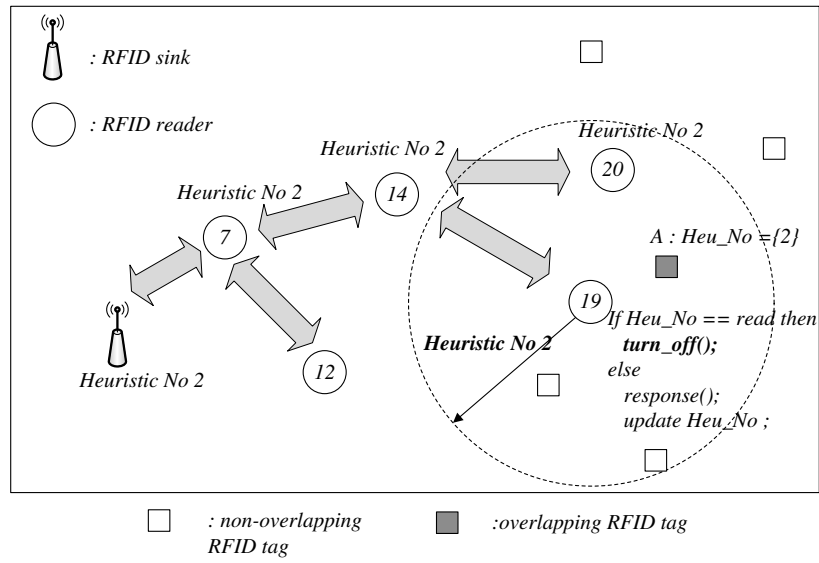
그러나 계층적 토폴로지에 속하지 않은 리더가 자신의 주위 RFID 태그를 수집하기 위해 전체 네트워크를 새로이 구성하고 RFID 싱크로부터 명령을 받을 필요는 없다. 리더가 RFID 필드에 배치되었을 때, 리더는 일정 시간동안 경로 확산 단계와 RFID 리더 발견 단계가 완료될 때까지 대기한다. 만약 일정 시간이 지난 후에도 자신이 어떠한 레벨과 경로를 할당받지 못한다면 리더는 네트워크 참가 요청(join request) 메시지를 브로드캐스트한다. 이 참가 요청 메시지를 수신한 이웃 리더는 자신의 레벨과 경로를 응답한다. 새로운 리더는 이 응답 메시지를 수신하여 자신의 레벨과 경로를 설정하고, 네트워크 내에서 루트인 RFID 싱크에게 계층 트리에 합류시켜줄 것을 요청한다. 싱크는 이 메시지를 수신 후, 자신의 테이블 내에 정보를 저장하고, 다음 수집 라운드에 이를 적용시킨다. 그림 3.7은 신규 또는 레벨 정보를 받지 못한 리더가 네트워크 토폴로지에 참여하는 과정을 보여준다.

3.3 능동형 RFID 태그의 다중 관독 회피

RFID 수집 과정에서 제안한 멀티홉 기반의 수집 기법은 대규모 능동형 RFID 시스템, 장애물이 많은 환경, 접근이 불가능한 지역등에서 효과적이고 신속하게 RFID 태그들의 정보를 수집할 수 있다. 또한, 다수의 리더들이 배치되어 신호의 범위가 중복되어 태그를 인식할 수 없는 리더간 신호 간섭을 완전히 제거하였다. 하지만, 둘 이상의 리더들이 각기 다른 시간에 태그를 중복하여 인식하는 다중 관독 문제가 존재한다. 예를 들어, 그림 3.8에서 RFID 태그 A는 리더 19와 20의 두 리더에 의해 무선 신호의 범위가 겹쳐진다. 두 리더에 의해 다중 관독의 문제는 새로운 접근법이 필요하다. 본 절에서는 능동형 RFID 태그의 특징을 활용하여 다중 관독의 문제를 해결한다. 제안하는 방법은 수집 명령의 학습에 기반한다. 싱크가 RFID 수집 명령을 시작할 때, 싱크는 싱크의 식별자인 학습 번호(heuristic number)를 생



(a) 신규 수집 명령



(b) 중복된 수집 명령

그림 3.8: 다중 판독 문제 해결 과정

성한다. 이 학습 번호는 네트워크 내의 RFID 리더들이 모두 공유하여 중복된 수집 명령은 리더에게 응답하지 않는다.

그림 3.8에서 RFID 싱크는 RFID 수집을 위해 학습 번호 2를 생성하고, 20번 리더에게 학습 번호와 함께 수집 명령을 전달한다. 20번 리더는 학습 번호를 수집 명령 내에 포함하여 태그에게 전달하고, 태그는 수집 명령을 수신 후, 자신의 메모리 내에 저장된 번호와 비교한다. 비교 후, 동일한 번호가 없으면 태그는 표준을 준수하여 리더에게 응답한다. 그림 3.8(b)는 19번 리더가 태그를 수집하는 과정이다. 19번 리더는 동일하게 싱크로부터 2번의 학습 번호를 부여받고 통신 범위 내의 태그를 수집한다. 이 때, 태그는 자신의 메모리내에 2의 학습 번호를 기록하고 있기 때문에, 수집 명령을 분석 후 즉시 수면 상태로 다시 진입한다.

리더가 태그에게 수집 명령을 전달시, 학습 번호는 수집 명령 메시지 내에 포함된다. ISO/IEC 18000-7 표준 내의 수집 명령어는 1바이트의 옵션 필드를 가지고 있으며, 이 중 상위 5비트는 향후 목적을 위해 예약되어 있다. 따라서, 다중 판독 회피를 위해 이 예약 비트들에 학습 번호를 삽입하여 수집 명령과 동시에 태그들에게 전송한다.

알고리즘 5는 태그의 다중 판독 회피 기법을 보여준다.

- Heu_No는 RFID 싱크로부터 전달되며, 수집 명령 메시지에 포함된 학습 번호를 나타낸다.
- BDT_Heu_No는 브로드캐스트 명령의 학습 번호, PTP_Heu_No는 점대점 명령의 학습 번호를 나타낸다.

본 절에서 제안한 충돌 회피 기법은 능동형 RFID가 내부 전지에 의해서 전원을 공급 받고 내부 메모리내에 정보를 기록할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 가

능한 방법이다. 또한, 제안한 방법은 ISO/IEC 18000-7 표준과의 호환성을 제공하며, 다중 판독을 회피함으로써 태그의 전력 소모를 최소화 할 수 있다.

Algorithm 5 능동형 RFID 태그의 다중 판독 회피 기법

```
if ( wake_up_signal ) then
    state ← ACTIVATE
else
    state ← SLEEP
end if
if (state == ACTIVATE) then
    while ( IS_RECEPTION ) do
        if (protocol_ID == 0x04) and (BROADCAST) then
            if (BDT_Heu_No < Heu_No) then
                response with data at a random slot
                tmp_BDT_Heu_No ← Heu_No
            end if
        else if (protocol_ID == 0x04) and (POINT-TO-POINT) then
            if (P2P_Heu_No < Heu_No) then
                if (response() == SUCCESS) then
                    tmp_P2P_Heu_No ← Heu_No
                end if
            end if
        else if (protocol_ID == 0x04) and (SLEEP) then
            BDT_Heu_No ← tmp_BDT_Heu_No
            P2P_Heu_No ← tmp_P2P_Heu_No
            state ← SLEEP
        end if
    end while
end if
state ← SLEEP
```

제 4 장 멀티홉 기반 능동형 RFID 시스템의 동기화

분산 시스템은 다수의 노드들이 상호 연결되어 거대한 업무를 효율적이고 정확하게 처리하기 위해 분산 장치들 간에 시각 동기는 필수적이다. 특히, 멀티홉 기반의 능동형 RFID는 사물 또는 사람의 정보를 획득할 수 있으며, 센서를 부착하여 주변 환경을 센싱할 수 있다. 하지만, 능동형 RFID 태그는 네트워크내에서 시간을 공유할 수 있는 방법을 제공하고 있지 않으며, 수집된 정보를 정렬, 분산 수집 및 시각 정보 제공등을 위해서는 정보 수집의 주체가 되는 RFID 리더들 간의 동기는 반드시 이루어져야 한다.

4.1 문제정의

시각 동기 기법에서 참조 시각(reference clock)과의 지역 시각(local clock) 차이는 응용의 해상도를 결정짓는 중요한 요소가 된다. 예를 들어, 무선 주파수의 전달 속도를 이용하여 위치를 측정하는 시스템의 경우, 1마이크로초의 오차는 300미터의 거리 오차를 가지게 한다. 이처럼 시각 동기 해상도가 높으면 다양한 응용에서 정확한 정보를 얻을 수 있다. 시각 동기의 해상도를 떨어뜨리는 불확실 요소는 네트워크 프로토콜 스택의 모든 계층에 걸쳐 발생한다. 네트워크 프로토콜 스택에서 발생하는 불확실도는 다음과 같다 [BPPMAD06, LeeC07].

송신측 오류 요인

- 요청 시간(send time) : 메시지를 생성하고 MAC 계층에 전송 요청하는데 걸리는 시간이며, 이 지연은 시스템 콜 부하와 프로세서의 부하에 따라 가변적이다.
- 접근 시간(access time) : 전송이 시작되고 채널에 접근하는데 걸리는 시간이며, 이 지연은 채널 경쟁(channel contention)시간에 따라 가변적이다.
- 전송 시간(transmission time) : 전체 메시지를 송신하는데 걸리는 시간이며, 이 지연은 메시지의 길이와 전송 속도에 따라 가변적이다.
- 변조 시간(encoding time) : 메시지를 변조하고 전자기파로 변환하는데 걸리는 시간이며, 이 지연은 송수신 장치(radio transceiver)의 칩 속도(chip rate)에 따라 가변적이다.
- 전달 지연(propagation time) : 메시지가 송신기에서 수신기까지 전달되는데 걸리는 시간으로써 두 노드사이의 거리에 따라 이 시간은 변한다.

수신측 오류 요인

- 복조 시간(decoding time) : 전자기파를 복조하는데 걸리는 시간이며, 송수신 장치의 칩 속도에 따라 변한다.
- 수신 시간(reception time) : 전체 메시지를 수신하는데 걸리는 시간이며, 만약 전달 지연이 무시된다면 전송 시간과 같다.
- 응답 시간(receive time : 수신한 메시지를 처리하고, 수신기의 응용계층에 알리는데 걸리는 시간이며, 요청 시간과 유사하다.

- 인터럽트 처리 시간(interrupt handling time) : 프로세서가 무선 메시지의 도착 시각을 측정하기 위해 걸리는 시간이며, 이 시간은 프로세서의 부하에 따라 가변적이다.

TPSN, RBS, TSync, ACS 등 많은 연구에서 네트워크 프로토콜의 스택에서 발생하는 불확실성을 제거하려고 노력하였다. 하지만, 관련 연구들은 노드와 노드의 입장에서 시각 동기를 이루었으며, 네트워크 전체에서 발생할 수 있는 불확실도를 간과하였다. 또한, 기존 연구들은 무선 애드혹 또는 센서 네트워크 기반의 동기화 프로토콜로써, 본 연구에서 새롭게 제안하는 멀티홉 기반의 RFID 시스템에서 발생할 수 있는 불확실성들이 고려되지 않았다. 대규모 능동형 RFID 시스템을 위한 멀티홉 기반 시스템에서 RFID 리더들 간의 시각 동기는 다음과 같은 사항을 만족시켜야한다.

- 네트워크 내의 리더들 간의 동기화 뿐만 아니라 UTC와 같은 글로벌 시각과의 동기가 필요
- 상대적으로 많은 데이터 교환이 이루어지는 RFID 시스템에서 네트워크 내에 많은 트래픽 발생시 채널 경쟁 및 백오프로 인하여 불확실성 증가한다. 동기에 필요한 메시지수를 최소화한 동기 기법이 요구
- 네트워크 내의 리더들은 범용 컴퓨터 클럭과 마찬가지로 내부 오실레이터로 수정 발진자를 사용한다. 수정 발진자의 휨과 표류를 보정할 수 있는 동기 기법이 요구
- 네트워크 프로토콜 내에서 발생하는 지연 및 지터의 제거를 위한 정밀 타임 스탬프(time stamp) 장치의 개발

4.2 시스템의 시각 동기화 기법

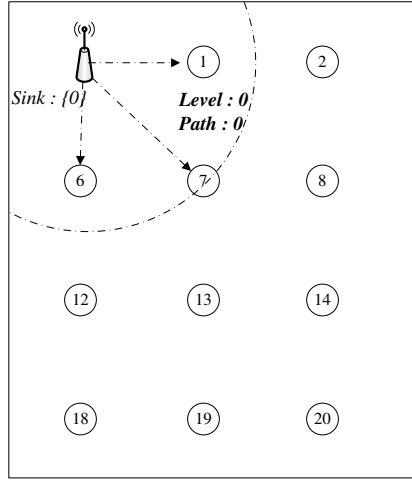
본 절에서는 분석된 요구 사항을 기반으로 대규모 능동형 RFID 시스템의 효율적인 분산 처리를 도와줄 동기화 기법에 대해서 언급한다. 동기화 기법은 토폴로지 구성, 시각 동기 프로토콜, 정밀 타임 스탬프 기법, 그리고 표류 보정 기법으로 구성된다.

4.2.1 토폴로지 구성

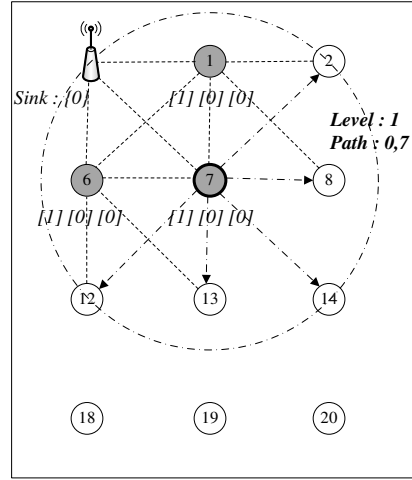
네트워크 내의 능동형 RFID 리더의 정보를 획득하고, 리더들의 토폴로지를 형성하기 위한 과정이다. 네트워크 구축을 위하여 토폴로지 구성 단계는 레벨 확산 단계와 자식 리더 수집 단계로 나뉘어진다.

레벨 확산

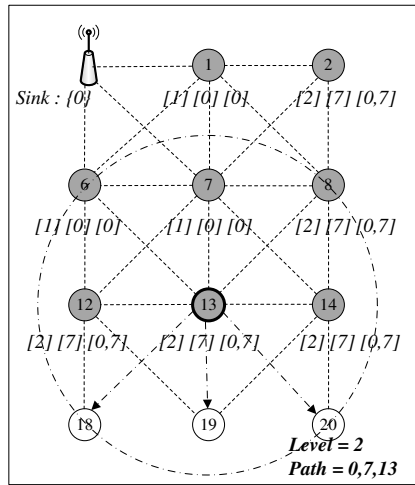
시각 동기에서의 레벨 확산 단계는 RFID 리더 수집에서의 경로 확산 단계와 유사하다. RFID 싱크는 네트워크 토폴로지 형성을 위해 레벨 확산 메시지를 전송한다. 레벨 확산 메시지는 레벨 i 와 경로 정보를 포함하고 있다. 그림 4.1은 RFID 싱크에 의한 레벨 확산 과정을 보여준다. RFID 싱크는 네트워크 내에서 루트 노드의 역할을 하며, 자신의 레벨을 0으로 설정한 후, 네트워크 내의 RFID 리더들에게 확산한다. 싱크로부터 레벨 확산 메시지를 수신한 리더는 자신의 레벨을 $i+1$ 로 설정하고, 메시지를 송신한 리더를 자신의 부모로 등록시킨다. 또한 레벨 확산 메시지는 패킷의 전달 경로를 포함하고 있으며, 이 정보를 싱크까지의 경로로 설정한다. 레벨과 경로 정보를 저장한 리더는 자신의 레벨 정보와 자신의 주소를 경로 정보에 추가하여 재전송한다. 레벨 확산 단계를 위한 의사 코드는 알고리즘 3과 동일한 방법으로 진행된다.



(a) 레벨 0 전송

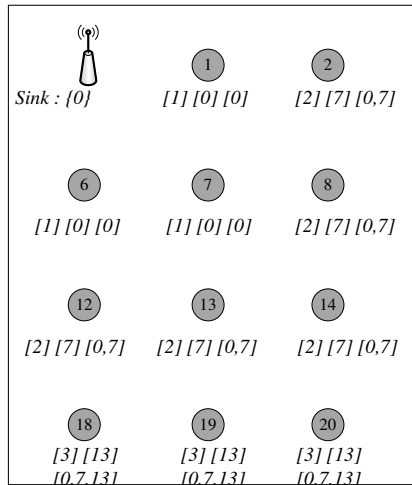


(b) 레벨 1 전송



Reader info.: [level] [parent] [route]
 ----- Flooding link
 - - - - - Level dissemination link
 : RFID sink
 : RFID reader (no level assigned)
 : RFID reader (level assigned)

(c) 레벨 2 전송



Reader info.: [level] [parent] [route]
 ----- Flooding link
 - - - - - Level dissemination link
 : RFID sink
 : RFID reader (no level assigned)
 : RFID reader (level assigned)

(d) 토폴로지 완성

그림 4.1: 토폴로지 구성을 위한 레벨 확산

자식 리더 발견

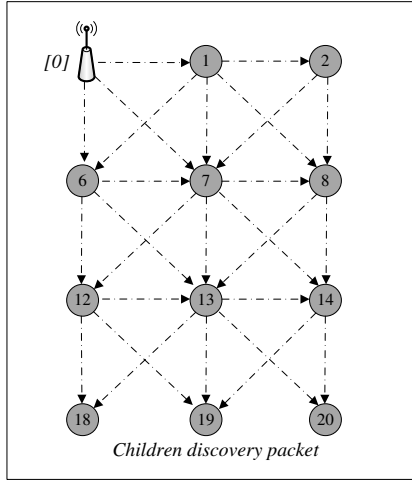
레벨 확산 단계가 종료된 후 RFID 싱크는 네트워크 토폴로지 내에서 각 리더들이 자신의 하위 리더를 발견하기 위한 자식 리더 발견 단계를 수행한다. 그림 4.2는 자식 리더 발견 단계의 예를 보여준다. 먼저, 그림 (a)에서는 자식 리더의 발견을 위해 RFID 싱크는 자식 리더 발견 패킷을 전송한다. 메시지를 수신한 RFID 리더들은 랜덤 시간 후에 자신의 부모 리더에게 응답을 수행하고, 이를 수신한 리더는 자신의 자식 리더 리스트에 추가한다. (b)에서는 RFID 싱크를 부모 리더로 선택한 하위의 RFID 리더를 수집하고, (c)와 (d)에서는 리더 7과 13을 각각 부모로 선택한 리더들을 발견해 나가는 과정을 나타낸다. 생성된 자식 리더의 리스트는 시각 동기화 프로토콜 과정에서 레벨 i 와 $i+1$ 과의 전송 지연을 계산하기 위한 대표를 선출하는데 활용된다.

4.2.2 시각 동기 프로토콜

시각 동기 기법중 양방향 교환 동기 기법은 네트워크의 계층적 트리 내에서 레벨 i RFID 리더와 $i+1$ 리더의 시각 동기를 왕복 여행 시간(round trip time)의 계산을 통하여 수행한다. 그림 4.3과 식 4.1은 시각 오프셋과 전송 지연을 획득하는 전통적인 방법이다 [GKS03]. 시각 오프셋은 기준 시각에 일치하도록 조절해야 하는 지역 클럭의 보정량을 나타낸다. 두 리더 A와 B 사이의 전송 지연과 시각 오프셋은 무선 통신 링크를 통해 교환되는 타임 스탬프 메시지에 의해 구해진다. 리더 B에 대한 리더 A의 시각 오프셋 δ 과 전송 지연 d 는 다음과 같다.

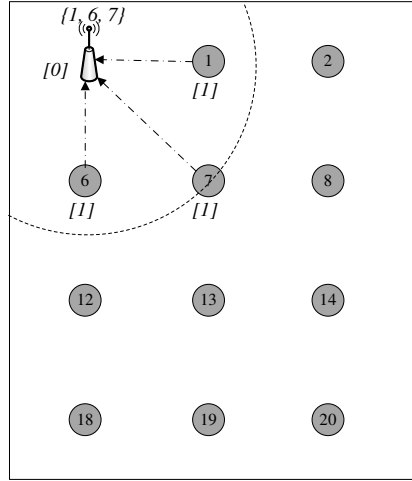
$$\delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}, d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (4.1)$$

Sink ID : {0}



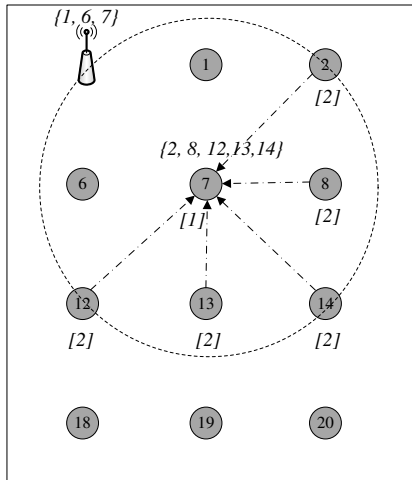
(a) 자식 리더 발견 메시지

Sink ID : {0}



(b) 레벨 1 리더 발견

Sink ID : {0}



Level []

Children list {}



: RFID sink



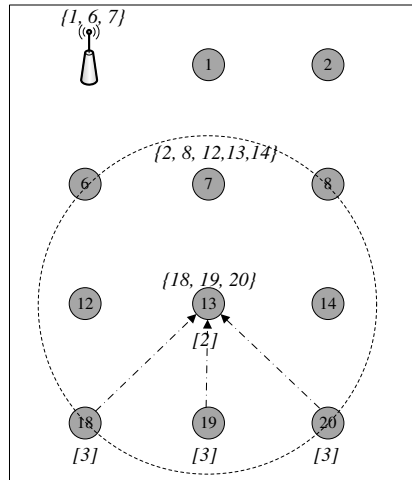
: RFID reader (no level assigned)



: RFID reader (level assigned)

(c) 레벨 2 리더 발견

Sink ID : {0}



Level []

Children list {}



: RFID sink



: RFID reader (no level assigned)



: RFID reader (level assigned)

(d) 레벨 3 리더 발견

그림 4.2: 자식 리더 발견 단계

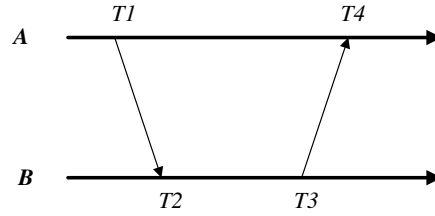


그림 4.3: 왕복 여행을 통한 시각 동기

토폴로지 내에서 레벨 i 리더와 $i+1$ 리더간의 동기는 TPSN의 경우, 모든 리더들과 개별적으로 이루어지므로 네트워크내의 복잡도는 $\Theta(2N)$ 이 된다. 이러한 메시지의 양은 네트워크 내에서 시각 동기의 정밀도를 저하시키는 중요한 요소이다. 그림 4.4는 메시지 양이 증가함에 따라 발생할 수 있는 불확실성을 나타낸다. 송신 리더는 시각 정보를 전달하기 위해 $T1$ 시간에 타임 스탬프를 수행하여 무선 신호를 통하여 전달한다. 이 과정에서 송신 리더는 채널을 점유하기 위해 채널의 상태를 확인하고, 채널이 비어 있을 경우 시각 정보를 무선으로 전달한다. 이러한 접근 시간은 채널의 상황에 따라 가변적으로 변한다. 다시 말해서, 네트워크 내의 메시지 발생량이 증가할 경우 채널을 점유하기 위해 해당 RFID 리더들은 경쟁 시간을 가지게 된다. 반면, 메시지의 양이 적을 경우 채널 경쟁으로 인한 불확실성이 줄어들어 시각 동기 과정중에 발생하는 불확실성은 적어지며 결과적으로 정밀한 시각 동기를 이루게 된다.

ACS와 TSync는 단일홉 내에서 동기에 필요한 메시지의 양을 줄이기 위한 접근 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 이러한 접근 방법에 근거한 확장된 동기 기법을 제안한다. 참조 시각 전송을 위해 레벨 i 리더는 주기적으로 시각 정보를 전송하고 $i+1$ 리더들은 i 리더로부터 받은 시각 정보를 이용하여 오프셋을 계산한다. 이때, 계산된 오프셋은 전송 지연을 포함하고 있으므로, 상위 레벨의 리더

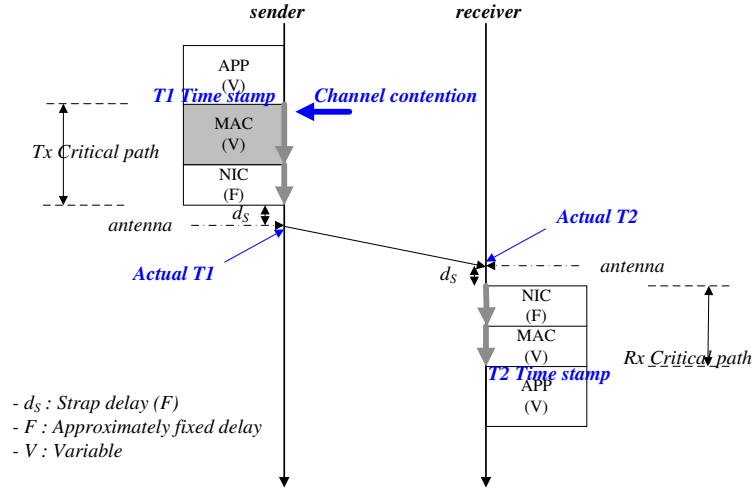


그림 4.4: 메시지 송신시의 불확실도

는 자식 리더들 중 대표 리더를 선출하여 레벨 i 와 $i+1$ 간의 전송 지연을 계산하고, 하위 레벨로 계산된 전송 지연 정보를 브로드캐스트한다. 그림 4.5와 4.6은 네트워크에서 트래픽을 최소화한 동기화 기법의 과정을 보여준다.

레벨 i 리더는 참조 시각을 포함한 *sync* 메시지를 $T1$ 시간에 전송한다. 단일 홉 내에 존재하는 레벨 $i+1$ 리더들은 부모 리더로부터 참조 시각을 $T2$ 시간에 수신하게 된다. 레벨 $i+1$ 리더들은 시각 정보 $T1$ 과 $T2$ 를 가지고 부모 리더와의 오프셋을 다음과 같이 구한다.

$$T2 = T1 + d + \delta \quad (4.2)$$

$$\delta = T2 - T1 \quad (4.3)$$

식 4.2에서 알 수 있듯이 오프셋 보정은 레벨 i 와 $i+1$ 사이에 전송 지연 d 가 존재함을 알 수 있다. 전송 지연 d 를 계산하기 위해 레벨 i 리더는 *sync* 메시지를 전

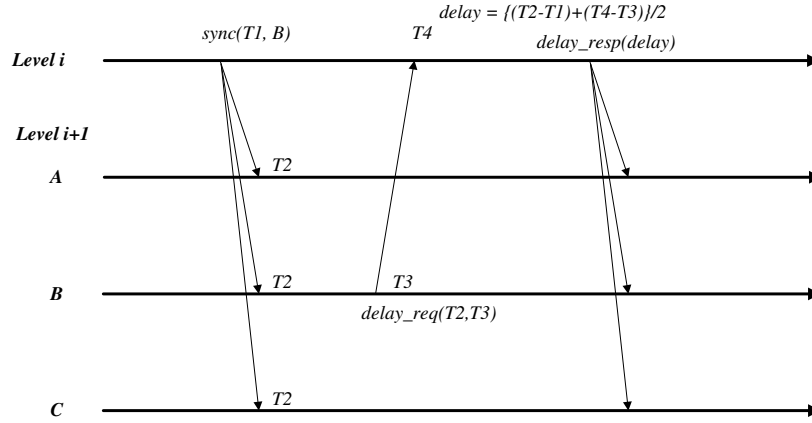


그림 4.5: 네트워크 부하를 줄인 동기화 프로토콜

송할 때, 자신의 자식 리더들 중 한 리더를 지명하여 *sync* 메시지내에 포함한다. *sync* 메시지를 수신한 자식 리더들은 메시지를 분석하여 메시지 내에 포함된 응답 리더의 식별자를 판단하여 자신의 식별자와 동일할 경우, 전송 지연 계산에 필요한 *delay_req* 메시지를 부모 리더에게 전송한다. 이때, *delay_req* 메시지 내에는 *sync* 메시지의 수신 시각 T2와 *delay_req* 메시지의 송신 시각 T3를 포함한다. 부모 리더인 레벨 *i*는 이 *delay_req* 메시지를 T4 시간에 수신하게 되고 4개의 시각 정보를 이용하여 하위 레벨과의 전송 지연을 식 4.4와 같이 계산하게 된다.

$$d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (4.4)$$

마지막으로 부모 리더와 자식 리더간의 전송 지연을 보정하기 위해 부모 리더는 전송 지연 정보를 포함한 *delay_resp* 메시지를 전송한다. 이 메시지를 수신한 자식 리더는 자신의 오프셋과 전송 지연을 보정하여 시각 동기를 수행한다. 상위 레벨과 시각 동기를 완료한 리더는 다시 자신의 하위 레벨의 리더들에게 참조 시각을 전달함으로써 동기화 과정을 반복한다.

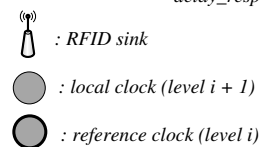
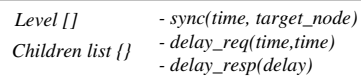
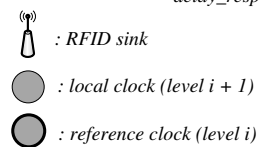
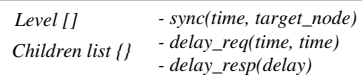


그림 4.6: 네트워크 부하를 줄인 동기화 예제

4.2.3 동기화 메시지를 위한 선택적 플러딩

시각 동기 과정 중, 참조 시각의 전달을 위한 *sync*와 전송 지연 전달을 위한 *delay_resp*는 플러딩을 기반으로 이루어진다. 플러딩 기반의 메시지 전달은 네트워크 내에 중복된 메시지를 확산한다. 그림 4.7은 플러딩시에 발생할 수 있는 문제점을 보여준다. 네트워크 내에 12개의 리더가 존재하고, 모든 리더에게 메시지를 전달하기 위해서는 3번만의 플러딩이 존재하면 된다. 하지만, 단순 플러딩(blind flooding)의 경우 리더의 수만큼 플러딩을 수행하게 된다 [SYJ99, LC01].

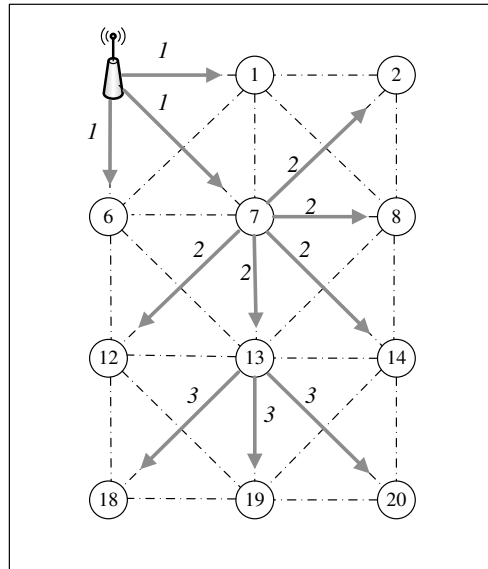


그림 4.7: 메시지 전달을 위한 플러딩 문제

제안하는 동기 기법은 단일 브로드캐스트 도메인 내에서 시각 동기화에 필요한 메시지의 양이 고정되어 있어 채널 경쟁에서 발생하는 불확실성을 줄여준다. 하지만, 멀티홉으로 배치된 리더들에게 동기를 수행하고자 할 경우 과도한 동기 메시지를 초래한다. 이러한, 시각 동기화에 필요한 메시지의 수를 최소화하기 위해 네트워크 내에서 minimum cost dominating set (MCDS)을 구한다. MCDS는 네트워크 내

에서 참조 시각을 전송받은 후, 리더들이 네트워크 내에서 다시 참조 시각을 하위 레벨의 리더들에게 제공할 리더를 선출한다. MCDS 계산을 위해 greedy set cover algorithm을 사용하며, 알고리즘은 3.2.3절의 의사코드 4와 같다.

4.2.4 정밀 타임 스탬프

시각 동기 과정 중 시각을 결정하는 것을 타임 스탬프 또는 시각 소인이라 한다. 시각 동기 프로토콜에서 타임 스탬프 지점은 중요하며, 시각 동기 정밀도에 영향을 미친다. 응용 계층에서 타임 스탬프를 수행하게 되면 하위 계층들에서 전송 지연 및 지터를 발생시킨다. 이러한 불확실성은 시각 동기 정밀도에 여러 요인으로 작용한다.

시각 동기 프로토콜에서의 타임 스탬프는 프로토콜 스택의 하위 계층에서 수행하는 것이 동기 오차를 제거하는 좋은 방법이다 [Cox05, PXKG09, HD04]. 논문에서의 시각 동기 메시지의 타임 스탬프를 위해 물리 계층에서 무선 주파수 송수신기가 생성하는 신호를 직접 타임 스탬프하여 시각 동기원으로 활용한다. 즉, 무선 주파수 송수신기는 메시지를 송수신 과정에서 물리 계층 헤더를 포함한다. 이 헤더에는 프리앰블, SFD(start of delimiter) 및 길이 정보를 가지고 있으며, 이 중 1바이트 SFD의 마지막 비트가 전송된 시점을 타임 스탬프 위치로 정한다. 리더의 타임 스탬프 장치는 SFD 신호가 생성된 시점을 기록하여 시각 동기 정보로 활용한다. 이렇게 함으로써 전달 지연과 변복조 시간을 제외한 대부분의 불확실성을 제거할 수 있다. 그림 4.8은 시각 동기에 필요한 타임 스탬프 지점 및 전달 과정을 나타낸다.

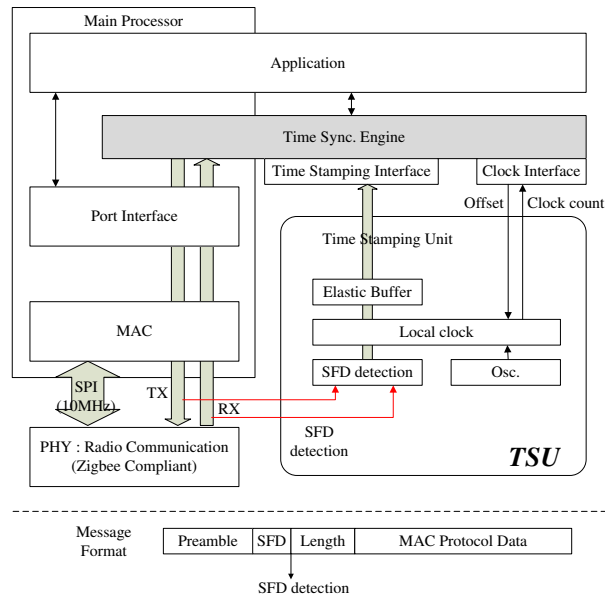


그림 4.8: 타임 스탬프 지점의 결정

4.2.5 표류 보정 기법

컴퓨터 시스템은 전통적으로 크리스탈이나 오실레이터 등과 같은 물리 클럭의 발진을 카운팅함으로써 시간을 측정한다. 이러한 물리 클럭은 이상적인 환경 하에서, 정확한 주파수를 가지고 동작하지만, 실세계에서는 제조 공정에서의 오차, 온도, 습도 등과 같은 환경의 영향으로 인하여 동작 주파수는 가변적이게 된다. RFID 리더 또한 전통적인 컴퓨터와 마찬가지로 오실레이터로부터 클럭을 공급받는다. 물리 클럭에 의한 오류 요인은 다음과 같다.

- 시각 표현 에러(time representation error) : 이벤트가 발생한 시점과 이 이벤트를 인지하는데 걸리는 시간 차이이다. 컴퓨터 시스템은 이산적인 데이터를 기록하는 시스템이다. 이러한 시각 표현 에러는 프로세서의 클럭 주파수에 의해 영향을 받으며 최대 시각 표현 에러는 $1/f$ 이다. 이러한 시각 표현 에러

는 프로세서뿐만 아니라 무선 주파수 송수신기등과 같은 모든 이산 시스템에서 발생하며, 이러한 시각 표현 에러를 완전히 제거하는 것이 불가능하다.

- 주파수 휨(frequency skew) : 두 노드 클럭 주파수 사이의 차이를 의미한다. 두 노드는 다른 주파수 위상을 가지기 때문에 이벤트가 동시에 발생하더라도 각기 다른 시점을 이벤트 발생 시점이라고 기록할 것이다.
- 주파수 표류(frequency drift) : 노드에서 사용되는 클럭이 이상적인 주파수로 동작하지 않고 가변적인 주파수로 동작하는 것이다.
- 환경에 의한 특성 : 온도, 습도, 오실레이터의 수명등에 의해서 주파수는 영향을 받는다. 이러한 특성은 오실레이터에 따라 다르게 나타나므로 완전한 제거가 힘들다.

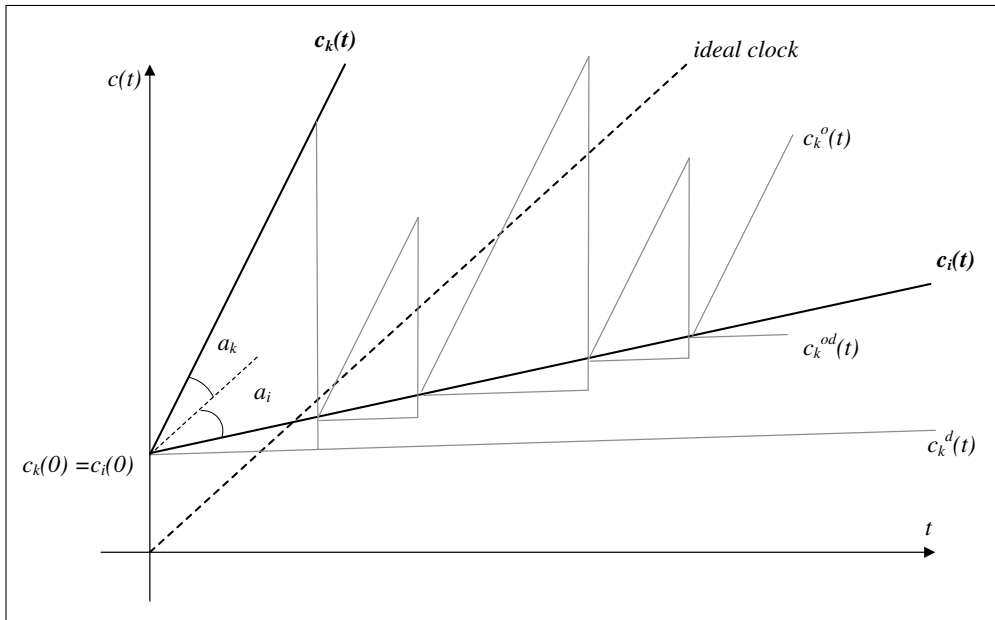


그림 4.9: 오프셋 및 표류에 의한 오차 요인

식 2.1은 시각 동기화 기본 원리인 시각 동기화의 오프셋 보정과 표류율 보정에 대해서 설명한 것이다 [FCF08]. 만약 동기화 알고리즘이 동기화 시간 t 에 클럭 $c_i(t)$ 와 $c_k(t)$ 사이의 상대적인 오프셋 $b_{ik}(t)$ 를 알 수 있다면, $c_k(t)$ 는 매 동기 지점에서 상대적인 오프셋 $b_{ik}(t)$ 를 보정함으로써 쉽게 $c_i(t)$ 에 동기화할 수 있다. 매 동기 지점마다 동기된 클럭 $c_k^o(t)$ 는 그림 4.9에 나타나 있다. 여기서 정리의 간소화를 위하여 클럭 $c_i(t)$ 와 $c_k(t)$ 는 이상적인 시각이 아니며, 각기 다른 표류율을 가지고 있다고 가정한다. 또한 각 클럭이 가진 표류율은 상수라고 가정한다. 그리고 두 클럭의 초기 값은 같다고 가정한다($c_i(t) = c_k(t)$). 주기적인 보정을 통하여 매 보정 시간마다 오프셋을 보정하여 정확하게 $c_i(t)$ 와 $c_k(t)$ 가 동기를 이루었다고 하더라도 이 결과는 클럭의 표류율을 고려하지 않은 보정이기 때문에, 동기화된 클럭 $c_k^o(t)$ 는 지역 시각 $c_k(t)$ 의 표류율 변화량과 동일한 변화량을 유지하게 된다. 따라서, 동기의 주기가 길면 길수록 더 많은 동기 에러를 초래하게 된다. 시각 동기화 성능을 향상시키기 위해서 동기 주기를 짧게 할 수도 있지만, 이를 결과적으로 더 많은 부하를 초래한다.

여기서 두 클럭 사이의 상대적인 클럭 표류율 $a_{ik}(t) = a_i(t) = -a_{ki}(t)$ 이 정확하게 계산되어 진다면, 표류율 보정을 통하여 더 정밀한 시각 동기를 이룰수 있다. 그림 4.9 의 $c_k^d(t)$ 는 클럭 $c_k(t)$ 에 이런 표류율을 보정한 결과지만, 참조 시각 $c_i(t)$ 와는 다소 차이가 있다. 만약 클럭 표류율을 추정치가 정확하다면, $c_k^d(t)$ 와 $c_i(t)$ 는 정확히 한 직선에 겹쳐지게 된다. 하지만, 실제 환경에서 온도, 습도와 같은 주변 환경의 영향으로 인하여 정확하게 측정된 표류율을 가지기는 힘들다. 본 연구에서는 이런 표류율을 정밀하게 측정하여 보정함으로써 $c_k^{od}(t)$ 와 같은 정밀하게 보정된 시각 동기를 제공한다.

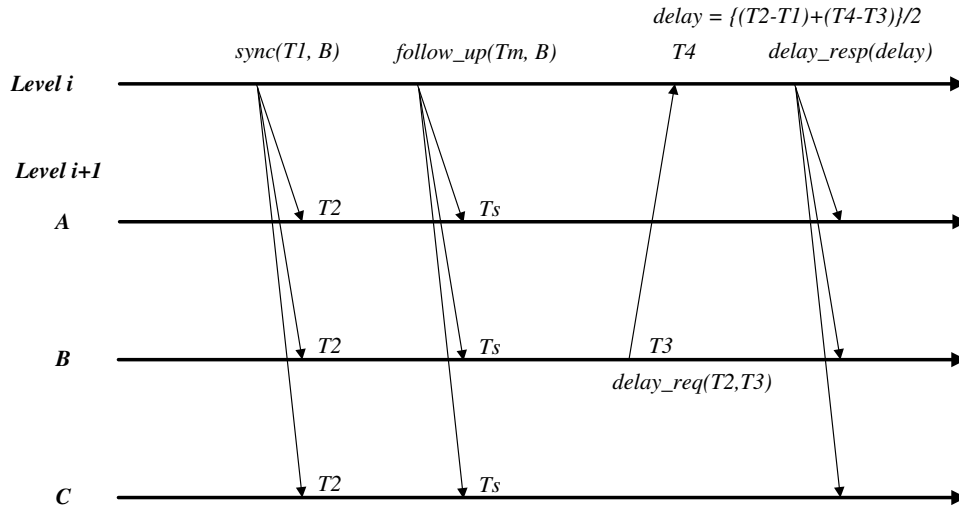


그림 4.10: 클럭 표류율 보정

RFID 리더에서 사용되는 클럭은 오실레이터로부터 공급되고, 범용 크리스탈 오실레이터의 경우 환경적인 요소에 의해 정상적인 주파수로 동작하지 않고 가변적이게 된다. 두 리더는 각각 독립적인 오실레이터를 사용하기 때문에 각기 다른 주파수로 표류하게 된다. 두 리더 사이의 주파수 휨에 의한 에러는 시각 동기화의 정확도에 영향을 미친다. 두 리더 사이의 주파수 휨은 시간에 따라 증가하기 때문에 주기적인 보정이 필요하다. 비록 주기적으로 시각 동기를 수행함으로써 클럭 차이를 줄인다 하더라도, 두 시각 동기 메시지 내에서 여전히 클럭의 차이가 존재한다. 주기적인 시각 동기 메시지 사이의 주파수 휨을 보정하기 위해 레벨 $i+1$ 리더는 레벨 i 리더와 자신의 클럭 표류율을 모두 계산한다. 식 4.5는 클럭 표류율을 계산하여 하위 레벨의 리더가 자신의 표류율을 보정하는 식을 나타내며, 그림 4.10은 표류율을 계산하는데 필요한 시각을 결정하는 지점을 나타낸다.

식 4.5에서 레벨 i 리더의 표류율 Δ_m 은 *sync* 메시지와 *follow-up* 메시지의 송신 간격으로 계산이 되며, 레벨 $i+1$ 리더의 표류율 Δ_s 는 *sync* 메시지와 *follow-up* 메시지를 수신한 시각 차이 값으로 계산되어진다. 알고리즘 6은 시스템 시각 동기를 위한 의사 코드이다.

$$\begin{aligned}
 \Delta_m &= T_m - T_1 \\
 \Delta_s &= T_s - T_2 \\
 drift &= \frac{\Delta_s - \Delta_m}{\Delta_m}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Algorithm 6 시각 동기 프로토콜

```
receive message
switch ( message.type )
  case U_PTP_TIME_SYNC_SYNC_MSG
    T2  $\leftarrow$  reception_time
    my_drift[0]  $\leftarrow$  T2
    T1  $\leftarrow$  message.T1
    parent_drift[0]  $\leftarrow$  T1
  case U_PTP_TIME_SYNC_FOLLOW_MSG
    my_drift[1]  $\leftarrow$  reception_time Ts
    parent_drift[1]  $\leftarrow$  message.Tm
    if(own_address == message.target_node)
      T3  $\leftarrow$  send_time
      send delay_req(T2, T3)
    end if
  case U_PTP_TIME_SYNC_DELAY_REQ_MSG
    if(message.dest_address == own_address)
      T4  $\leftarrow$  reception_time
      T3  $\leftarrow$  message.T3
      T2  $\leftarrow$  message.T2
      delay  $\leftarrow$  {(T4-T3)+(T2-T1)}/2
      broadcast delay_resp(delay)
    end if
```

Algorithm 7 시각 동기 프로토콜 (계속)

```
case U_PTP_TIME_SYNC_DELAY_RESP_MSG  
    offset  $\leftarrow$  (T2-T1)  
    delay  $\leftarrow$  message.delay  
     $\Delta_m \leftarrow$  parent_drift[1] - parent_drift[0]  
     $\Delta_s \leftarrow$  my_drift[1] - my_drift[0]  
    drift  $\leftarrow$  ( $\Delta_s - \Delta_m$ ) /  $\Delta_m$   
    correct offset, delay, drift  
    T1  $\leftarrow$  send_time  
    broadcast sync(T1)  
    Tm  $\leftarrow$  send_time  
    broadcast follow_up(Tm, target_node)  
end switch
```

제 5 장 설계 및 구현

본 장에서는 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템을 위한 요구 사항을 분석하고, 분석된 결과를 토대로 능동형 RFID 싱크, 리더, 태그를 설계 및 구현한다.

5.1 시스템 구조

멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템은 RFID 싱크, RFID 리더, 필드 내의 RFID 태그로 구성된다. 일반적으로 싱크와 리더는 전통적인 능동형 RFID 리더와 동일한 역할을 하며, 상호간의 통신을 위하여 별도의 통신 채널을 가진다. RFID 태그는 ISO/IEC 18000-7 표준을 준수하는 능동형 RFID 태그이다. 그림 5.1은 대규모 능동형 RFID 시스템을 위한 구조이다. 기본적으로 능동형 RFID 시스템은 ISO/IEC 18000-7 표준을 준수하여 통신 범위내의 RFID 태그의 정보를 수집한다. 통신 범위 밖의 태그 정보를 수집하고자 할 경우, 싱크는 2.4GHz 지그비(ZigBee) 채널을 이용하여 RFID 필드 내의 리더들과 네트워크를 형성한다. 능동형 RFID 싱크와 리더간의 통신 또는 리더들 상호간의 통신은 2.4GHz의 지그비 채널을 활용하며, 능동형 RFID 태그의 정보를 수집할 때는 433MHz 대역의 분리된 채널을 사용하므로써 상호간의 충돌을 회피한다.

먼저, ISO/IEC 18000-7 표준을 준수하는 능동형 RFID 시스템을 구현하기 위해서는 표준에서 제안하는 물리적인 통신 특성을 파악하여야 한다. 표준에서 정의하는 물리적인 특성은 표 5.1과 같다.

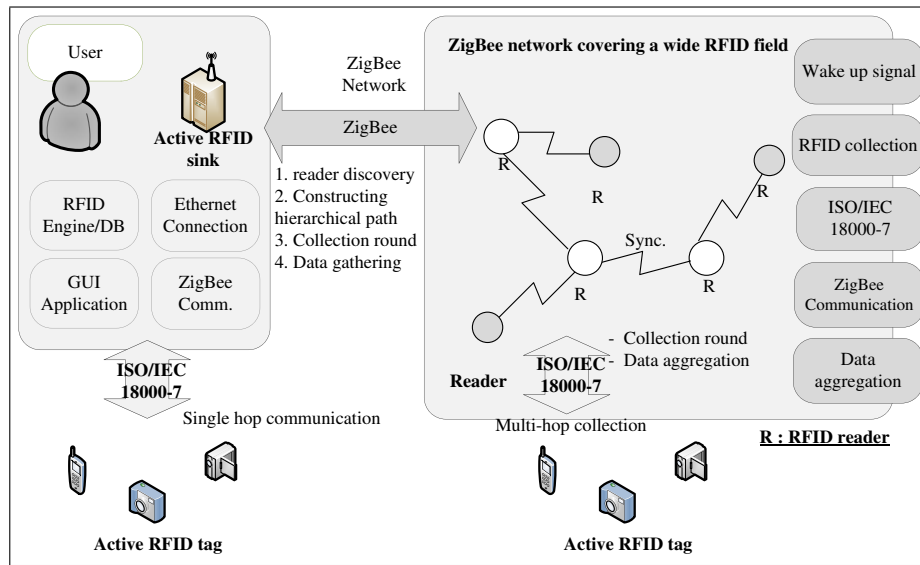


그림 5.1: 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템

능동형 RFID를 위해 채택한 무선 주파수 송수신기의 경우 NRZ(non return zero) 방식 또는 맨체스터(manchester) 인코딩 방식 중 하나가 선택 가능하다. 하지만, 표준은 데이터 인코딩을 위해서 맨체스터 방식을 제안하고 있으며, 각각의 펄스의 간격은 엄격히 정해져 있다. 예를 들어, 프리앰블 신호는 20개의 30마이크로초 하이(high) 신호와 30마이크로초 로우(low) 신호로 이루어지며, 추가로 sync 비트를 가진다. sync 비트는 통신의 방향을 나타내며, 42마이크로초 하이 54마이크로초 로우이면 태그에서 리더로의 통신 54마이크로초 하이 54마이크로초 로우이면 리더에서 태그로의 통신을 나타낸다. 표준은 이처럼 엄격한 클럭 동기를 요구하고 있다. 하지만 기본적으로 무선 주파수 송수신기는 이러한 요구사항을 충족하지 못하기 때문에 본 연구에서는 NRZ 기법을 사용하여 소프트웨어적으로 맨체스터 신호를 생성하였다. 이렇게 생성된 신호는 송수신기를 통하여 송신되게 된다. 이 소프트웨어적 기법은 프로세서의 클럭에 의존하여, 8MHz의 경우 한 클럭이 125나노초

표 5.1: ISO/IEC 18000-7 물리적 특성

Carrier frequency	433.92MHz
Modulation type	FSK
Frequency deviation	$\pm 50\text{kHz}$
Symbol low	$f_c + 50\text{kHz}$
Symbol high	$f_c - 50\text{kHz}$
Modulation rate	27.7kHz
Wake up signal	31.25kHz sub-carrier tone followed 10kHz tone

이므로 이를 더하거나 빼서 신호의 펄스를 정확하게 맞추게 된다.

5.2 능동형 RFID 싱크

능동형 RFID 싱크는 크게 지그비 모듈과 RFID 모듈로 이루어진다. 지그비 모듈은 네트워크를 구성하고 리더와의 통신을 위해 사용된다. 지그비 모듈과 RFID 모듈을 상호 독립적인 프로세서와 무선 주파수 송수신기를 사용한다. 지그비 통신을 위해 TI사의 CC2420[CC2420]가 사용되며, 프로세서는 ATMEL사의 ARM 기반인 AT91SAM7[AT91]이 사용되었다. 지그비 모듈은 수집된 RFID 정보의 가공을 담당하고 있으며, 주변 장치들의 제어를 담당하고 있다. RFID 모듈의 프로세서보다 많은 일을 담당해야 하기 때문에 48MHz의 클럭으로 고속 동작을 수행한다. 능동형 RFID 모듈은 표 5.1의 요구 사항을 만족시키기 위하여 8MHz로 동작하는 ATMEL 사의 ATmega128L[AVR] 프로세서와 TI사의 CC1100[CC1100] 무선 주파수 송수신기를 사용하였다.

설계 및 구현된 433.92MHz 능동형 RFID 싱크의 구조는 그림 5.2와 같으며, 싱크는 RS-232 인터페이스를 통해 호스트로부터 명령을 받고, 마이크로컨트롤러에

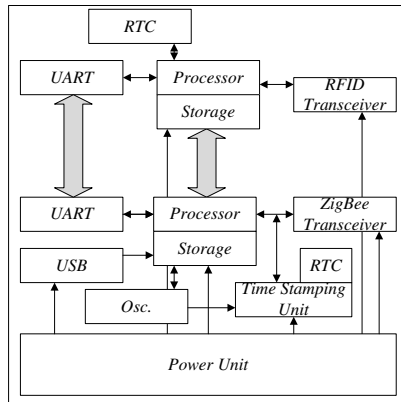
서 명령을 처리한 후 데이터를 전송한다. RFID 싱크와 태그간의 통신은 ISO/IEC 18000-7 에어 인터페이스에서 정의된 내용에 따라 통신되며, 통신의 시작은 싱크가 먼저 질의를 보내면 태그가 응답한다. 무선 주파수 송수신기를 통하여 데이터를 전송할 때는 FSK 기법으로 변조한 후에 전송하며 송수신기를 제어하기 위해서 마이크로컨트롤러는 SPI(serial peripheral interface)를 사용한다.

5.3 능동형 RFID 리더

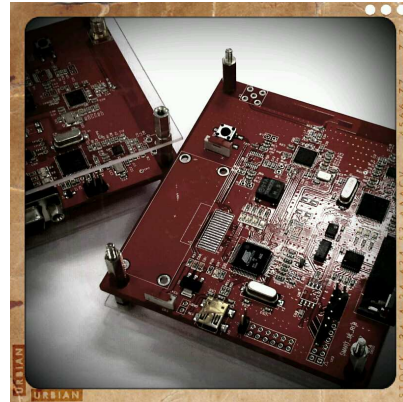
RFID 리더 또한 싱크 시스템과 마찬가지로 지그비 모듈과 RFID 모듈로 이루어진다. 지그비 통신을 위해 CC2420 무선 주파수 송수신기 사용되며, ATMEL사의 ARM 기반인 AT91SAM7이 프로세서가 사용되었다. 리더는 싱크와의 시각 동기를 위해 시각 동기 모듈을 추가로 탑재하고 있다. 리더는 USB로부터 전원을 공급 받을수 있으며, 내부 전지를 포함할 수 있도록 설계되었다. RFID 리더의 구조는 그림 5.2(c)와 같으며, 싱크와 유사한 구조를 가진다. .

5.4 능동형 RFID 태그

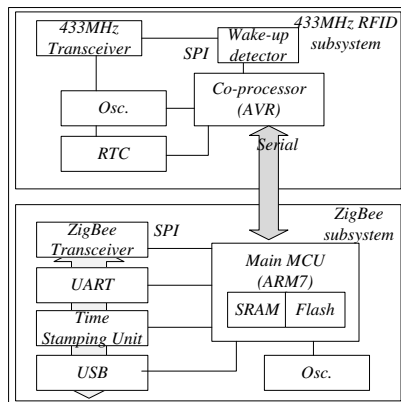
능동형 RFID 태그는 기본적으로 3V에서 동작하도록 설계되었으며, 프로세서를 위해 ATMEL사의 ATmega128L을 사용한다. 무선 통신을 위해서 극초단파 대역의 RF 칩인 TI사의 CC1100을 사용하였다. ATmega128L은 8MHz의 스피드로 동작하며, 53개의 I/O 및 128k바이트의 프로그램 메모리를 가지는 8비트 RISC 구조의 마이크로컨트롤러이다. RF 칩은 433, 868, 및 915MHz의 주파수에서 동작하며 FSK 변조방식을 사용한다.



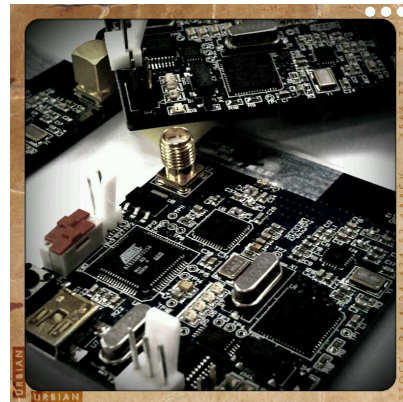
(a) RFID 싱크의 구조



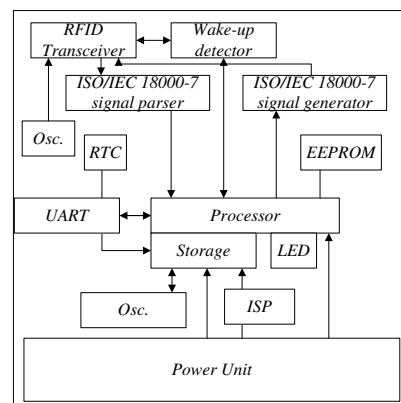
(b) 프로토타입



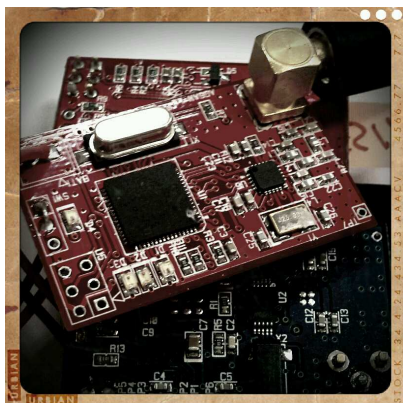
(c) RFID 리더의 구조



(d) 프로토타입



(e) RFID 태그의 구조



(f) 프로토타입

그림 5.2: 능동형 RFID 시스템 구성 요소

태그는 능동형 RFID 표준에서 제안된 프로토콜을 확장하고, 테스트의 용도로 활용하기 위하여 RTC(real-time clock)를 내장하고 있으며, 주 프로세서의 요청이 있을때 실제 시간을 제공한다. 또한, 주기적으로 인터럽터를 발생하여 태그를 깨울 수 있으며, 태그의 고유한 ID와 내부 주파수 설정등을 위하여 EEPROM을 사용한다. 능동형 RFID 태그는 내부 전지로 동작하므로 수명의 제한이 있다. 따라서 저전력 사용을 기반으로 시스템이 동작하도록 설계되어야 한다. 설계된 능동형 RFID는 대부분의 시간을 수면 상태로 존재하고, 리더로부터의 알람 신호가 감지되면 활성화 상태가 되어 리더의 명령에 응답하도록 설계되었다.

제 6 장 실험 및 성능 평가

본 장에서는 제안한 연구들에 대하여 실험 및 성능 평가를 수행한다. 성능 평가는 멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집, RFID 태그의 다중 관독 회피, 그리고 시스템을 위한 시각 동기화 대한 성능 평가의 3단계로 분류가 된다.

6.1 멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집

6.1.1 시뮬레이션

멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집을 위해 DCS와 제안하는 기법의 성능을 시뮬레이션으로 비교하여 본다. 시뮬레이션 환경은 표 6.1과 같이 300×200 미터의 영역에 12개의 RFID 리더와 100개의 태그를 랜덤하게 배치하였다. 그림 6.1은 성능 평가를 위해 사용된 네트워크 토폴로지이다. 성능 평가를 위해 모든 실험은 100회 반복되었다.

DCS는 리더들이 동일한 크기의 프레임 내에서 하나의 슬롯을 선택해 태그를 인식함으로써 리더 충돌을 방지하는 방법이다. DCS를 사용하는 리더는 충돌이 발생

표 6.1: RFID 수집을 위한 환경 설정

# RFID reader	12
# RFID tag	100
tag deployment	uniformly random
radio coverage for tag collection	75m
area	$300\text{m} \times 200\text{m}$

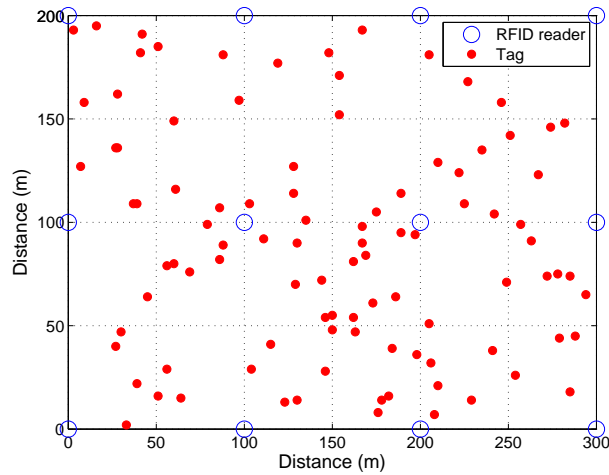


그림 6.1: RFID 수집 성능 평가를 위한 네트워크 구성

하면 자신이 사용하던 슬롯 위치를 변경하고, 리더 간섭이 발생하지 않는 경우에는 자신의 슬롯 위치를 유지하여 다음 프레임에서 충돌이 발생할 수 있는 가능성을 줄인다. 그림 6.2는 전체 네트워크에서 제안하는 기법과 DCS의 color의 크기가 변경됨에 따른 태그 수집 능력을 나타내는 그래프이다. 그래프는 전체 리더들에 의해 수집된 태그의 수를 매 슬롯 단위로 기술한 것이다. 전체 슬롯 수에서 제안하는 기법은 전체 태그를 수집하기 위해 12슬롯을 사용하며, DCS는 color의 크기에 따라 가변적이다. 그래프에서 color의 크기가 커짐에 따라 태그의 수집 시간이 증가하는 것으로 보여질 수 있다. 제안하는 기법이 12번째의 슬롯에서 100%의 태그를 수집할 동안 DCS는 약 84%(color size = 8)의 태그만 수집을 수행하였다. Color 크기가 12일 경우에는 단지 77%의 태그만 수집되었다. 필드내의 모든 태그를 수집하는데 걸리는 슬롯과 프레임의 크기는 표 6.2에 정리하였다. 12개의 리더로부터 모든 태그를 수집하는데 걸리는 시간은 color의 크기가 12일 경우, 평균 1.8의 프레임 또는 평균 21.56 슬롯 수가 소요됨을 알 수 있다.

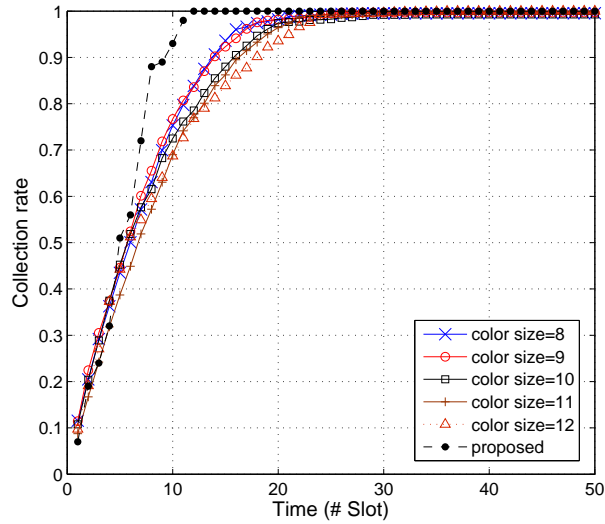


그림 6.2: 시간에 따른 태그 수집량

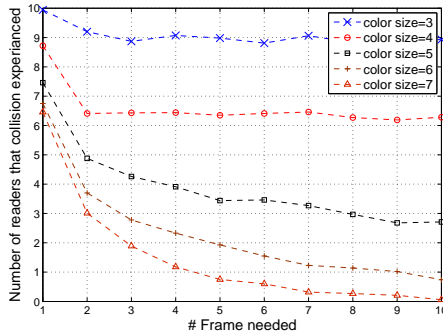
표 6.2: 태그 수집에 필요한 평균 슬롯 및 프레임 수

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	proposed
# slot	72.45	22.51	17.75	16.22	16.47	17.27	17.36	19.03	19.61	21.56	12
# frame	24.15	5.63	3.55	2.70	2.35	2.16	1.93	1.90	1.78	1.80	×

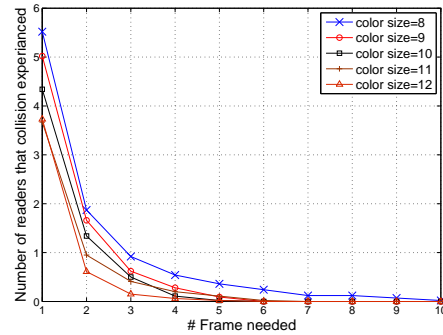
그림 6.3과 표 6.3은 DCS의 프레임 단계에서 color의 크기에 따른 리더간의 충돌 회피를 나타내는 그래프이다. Y축은 매 프레임 단계마다 충돌을 경험한 리더들의 수를 보여준다. 그래프는 color의 크기에 따라 충돌을 경험하는 수가 증가하고, 프레임이 증가할수록 충돌을 경험하는 리더 수가 적어진다는 것을 알 수 있다.

하지만, DCS는 리더간 통신을 가정하고 있다. 리더간의 통신 링크가 설정되지 않는 상황에서도 리더간의 신호 간섭은 발생할 수 있다. DCS는 이러한 통신 범위의 한계를 전혀 고려하지 않은 단점이 존재한다. 또한 리더가 태그의 정보를 수집하기 위해 필요한 수집 기간 슬롯의 길이가 고정되어 있다. 이때, 각 리더는 네트워크 내에 얼마나 많은 RFID 태그가 존재하는지 알 수 없다. 따라서, 고정된 수집

시간은 RFID 태그 정보 수집의 단편을 초래하게 된다. 반면 제안한 기법은 리더간 충돌은 전혀 발생하지 않으며, 다중 관독을 100% 제거하는 장점을 지니고 있다. 더불어, 표준을 준수하면서 네트워크 내에 알려지지 않은 태그의 수를 정확히 관독해 낼 수 있다.



(a)



(b)

그림 6.3: DCS에 의한 리더간 충돌 회피 확률 (컬러 수 vs. 충돌률)

표 6.3: DCS의 color 크기에 따른 리더 충돌 횟수

# Frame	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
color size	#R	#R	#R	#R	#R	#R	#R	#R	#R	#R
3	9.94	9.2	8.87	9.07	8.98	8.81	9.06	8.83	8.89	8.93
4	8.72	6.41	6.43	6.44	6.35	6.41	6.46	6.27	6.19	6.28
5	7.46	4.88	4.26	3.91	3.44	3.46	3.27	2.97	2.68	2.71
6	6.75	3.7	2.78	2.33	1.93	1.55	1.23	1.14	1.02	0.74
7	6.46	3.01	1.89	1.18	0.75	0.6	0.32	0.27	0.21	0.06
8	5.52	1.87	0.92	0.54	0.36	0.24	0.12	0.12	0.07	0.02
9	5.02	1.66	0.62	0.28	0.09	0	0	0	0	0
10	4.34	1.34	0.5	0.11	0.02	0	0	0	0	0
11	3.67	0.95	0.41	0.2	0.11	0.02	0	0	0	0
12	3.73	0.61	0.15	0.06	0.02	0	0	0	0	0

R=reader collided

전술한 성능 평가를 확장하여 대규모 필드에서 RFID 수집을 비교 분석한다. 성능 평가를 위한 환경 설정은 표 6.4와 같다. 리더의 수는 192, RFID 태그의 수는 1,600, RFID 필드의 범위는 $1,500 \times 1,100\text{m}$ 이다. 그림 6.4는 RFID 필드내에서 리

표 6.4: 대규모 RFID 수집을 위한 환경 설정

# RFID reader	192
# RFID tag	1,600
tag deployment	uniformly random
radio coverage for tag collection	75m
area	1,500m × 1,100m

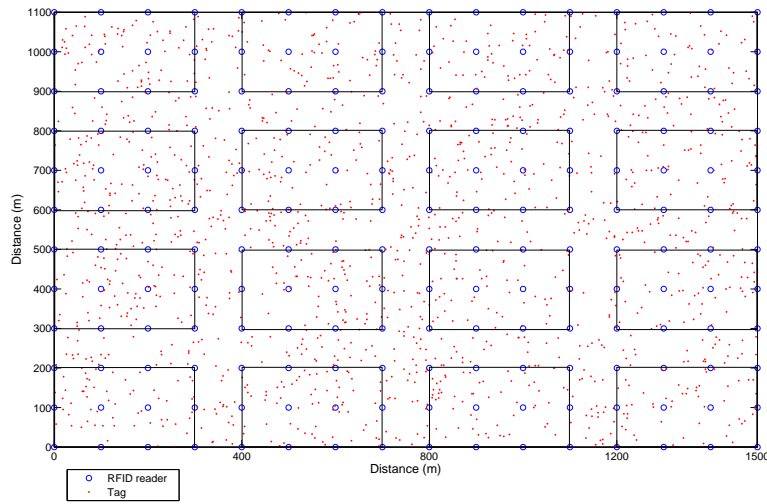


그림 6.4: 대규모 환경을 위한 RFID 배치

더와 RFID 태그가 배치된 환경을 보여준다.

대규모 환경에서 성능 평가를 위하여 제안하는 기법의 토폴로지를 다음과 같이 구성하였다.

- 리더들은 균일한 간격으로 배치된다.
- 일정한 간격을 기준으로 셀(cell)을 구성한다 (본 성능 평가에서는 12개의 리더 단위로 셀을 구성한다).

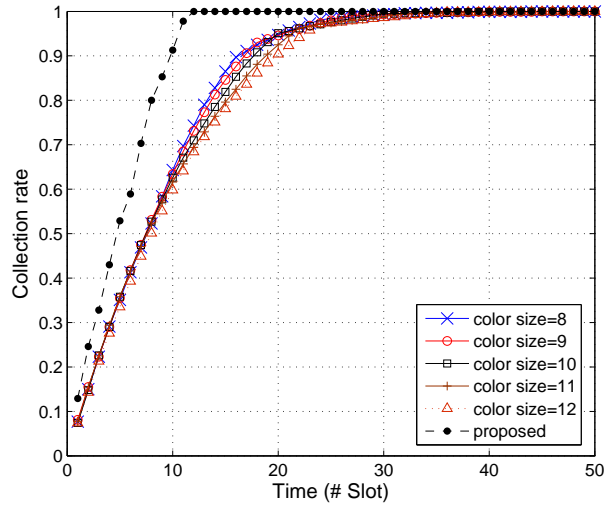


그림 6.5: 대규모 환경에서의 태그 수집량

- 리더들은 셀 내의 상대적인 위치를 기준으로 동일한 시간, 동일한 패턴으로 태그 수집 과정을 수행한다. 예를 들어, 셀 1번 내의 리더 1번과 셀 2번의 리더 1번은 동일한 시간에 수집을 수행한다.

제안하는 기법은 12 슬롯 내에 모든 태그들을 수집할 수 있는 반면, 12의 color를 가지는 DCS의 경우 12 슬롯에서 약 68%의 태그를 수집한다. 그림 6.5와 표 6.5는 성능 평가 결과를 보여준다. 성능 평가 결과 제안하는 기법은 16개의 셀이 동기화 되어 분산 수집을 수행하기 때문에 총 12슬롯내에 수집을 완료할 수 있다. 하지만 DCS가 12 color를 사용할 경우, 100%의 태그를 수집하기 위해 약 39.4 슬롯이 소요됨을 알 수 있다.

표 6.5: 대규모 환경에서의 태그 수집에 필요한 시간

	8	9	10	11	12	proposed
# slot	38	38.65	38	39.25	39.4	12
# frame	4.7	4.2	3	3.5	3.2	×

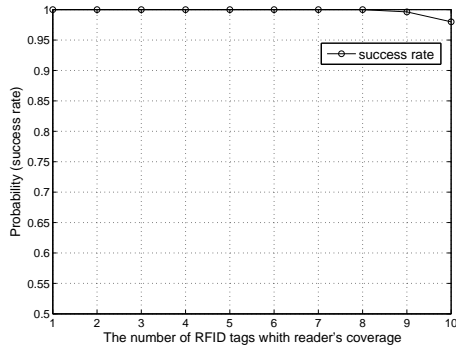
6.1.2 실험

시뮬레이션을 통하여 제안하는 기법은 DCS 보다 효율적으로 필드내에 존재하는 태그를 수집하는 것을 알 수 있었다. 본 절에서는 실제 능동형 RFID 시스템을 활용하여 단일홉에서 RFID 수집에 걸리는 시간과 멀티홉에서 소요되는 시간을 비교하여 본다. 또한 제안하는 통합 wake-up 기간의 사용에 대해 성능을 비교 분석한다.

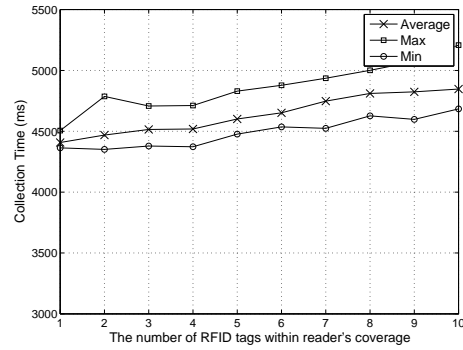
단일홉 내에서의 RFID 수집

멀티홉 기반의 능동형 RFID 수집을 평가하기 전에, 단일홉 내에서 RFID 싱크의 통신 영역내에 존재하는 태그를 수집하는데 필요한 수집 시간과 수집 능력을 평가하는 비교의 척도가 필요하다. RFID 싱크의 통신 영역내에 1개의 태그부터 10개의 태그까지 증가시키면서 수집 능력 및 수집 시간을 비교하였다. 그림 6.6(a)는 단일홉 내에서 태그의 수집 성공률을 보여준다. RFID 싱크의 통신 범위내에 8개의 태그가 존재할 때까지는 완벽하게 수집한다. 9개의 태그가 존재할 경우, 30번의 시도중 단지 1개의 실패만이 존재하였다. 10개의 태그가 존재할 경우, 30번 중 6번의 수집 단계 중 단 한개의 태그만 실패하였다.

그림 6.6(b)는 필드내에서 태그를 수집하는데 소요되는 시간을 나타낸다. RFID 싱크가 한개의 RFID 태그를 수집할 경우 대략 4.5초의 시간이 걸렸으며, 이 시간



(a) 단일홉 내에서의 RFID 수집 성공률



(b) 단일홉 내에서의 RFID 수집 시간

그림 6.6: 단일홉내에서의 능동형 RFID의 수집

은 수면중인 태그를 깨우기 위해 2.5초의 알람 시간, 수집 단계, 3 차례의 수집 단계(collection round), 그리고 화면에 표시하는 시간까지 포함한다.

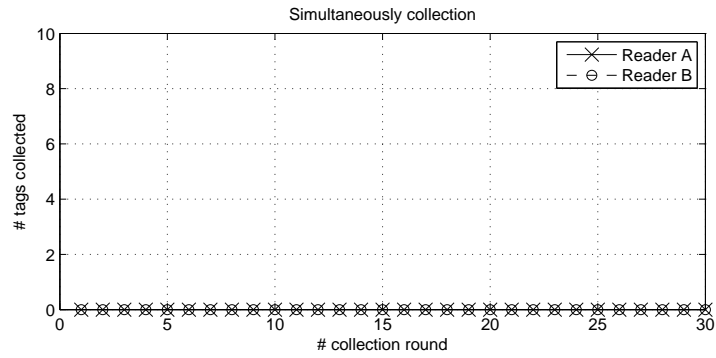
RFID 필드에 산재한 태그를 깨우기 위하여, 싱크는 표준에 따라 최소 2.4초 동안 부반송파를 전송한다. 부반송파 전송이 완료된 후, 싱크는 수집 단계를 수행하여 필드내의 태그를 수집한다. RFID 싱크는 3회의 빈 수집 단계를 확인하여 수집 단계의 완료를 결정한다. 다시 말해서, 싱크는 3번의 연속된 수집 단계 동안 수집되는 태그가 존재하지 않을시까지 수집 과정을 계속한다.

RFID 필드내에 10개의 태그가 존재할 경우 평균적으로 약 4.85초의 수집 시간이 소요되며, 최대 5.2초, 최소 4.68초의 시간이 소요되었다. 이때의 표준 편차는 122 밀리초였다.

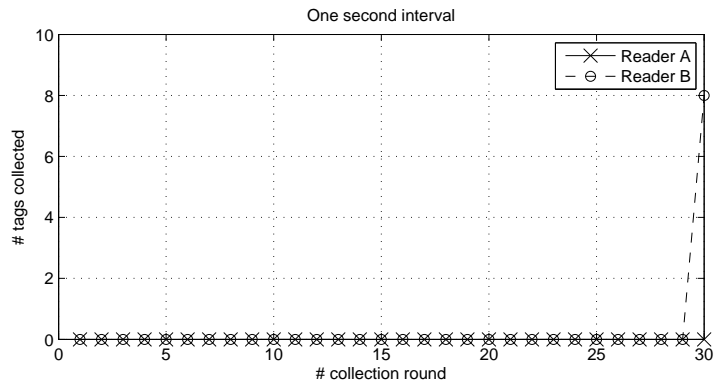
알람 신호의 인식

본 절에서는 3.2. 절에서 제안한 알람 신호의 동시 전송했을때의 신호 충돌에 대한 실험을 포함한다. 두 개의 리더가 인접하여 존재하고 두 리더의 통신 범위 내

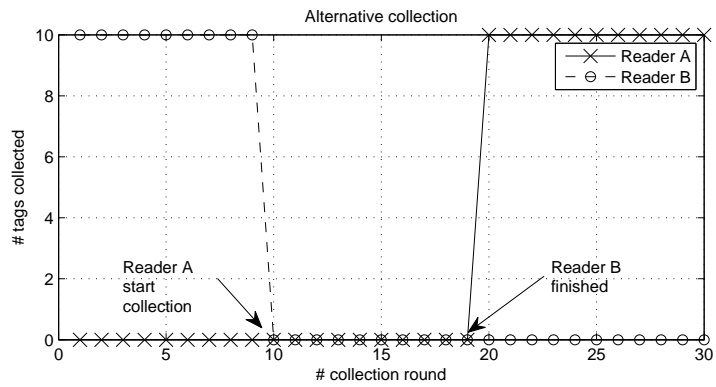
에 10개의 RFID 태그가 존재하도록 배치하였다. 두 개의 리더가 중복될 때, 동시에 RFID 수집, 약간의 시간 간격을 둔 RFID 수집, 그리고 두 리더가 교대로 수집을 시도한 경우의 성능 평가를 수행하였다. 가장 먼저 동시에 두 리더로부터 알람 신호를 포함한 수집 신호를 전송하였다. 그림 6.7은 성능 평가의 결과를 보여준다. 그래프에서 볼 수 있듯이 30번의 연속 수집 명령동안 단 한개의 RFID 태그도 읽혀지지 않았다. 하지만, 이 연속된 수집 기간동안 RFID는 항상 활성화 상태로 존재하였다. 두번째 실험으로 두 리더에서 1초의 간격을 두고 수집 명령을 전송하였다. 이 경우 역시 모든 태그들이 응답을 할 수 없었고, 마지막 1초전에 태그를 인식할 수 있었다. 태그 인식 실패 과정중에도 태그는 항상 활성화 상태로 존재하였다.



(a) 동시 수집



(b) 1초뒤 B 리더 수집 시작



(c) 교대로 수집

그림 6.7: 리더간의 신호 간섭 실험

멀티홉 내에서의 RFID 수집

멀티홉 내에서 능동형 RFID 시스템의 성능을 평가하기 위해, RFID 태그를 싱크의 범위로부터 떨어뜨려 놓았다. RFID 필드내에는 5개의 리더가 존재하며, 각 리더의 통신 범위내에는 각각 5개의 RFID 태그가 존재한다. 그림 6.8은 멀티홉 환경에서 성능 평가를 위한 환경을 보여준다. 모든 실험은 30회씩 수행되었다.

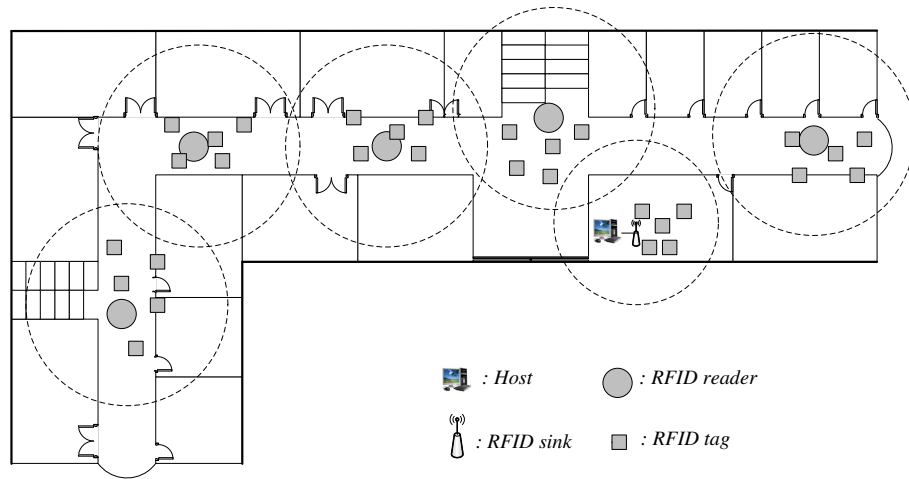


그림 6.8: 멀티홉 환경에서 RFID 수집을 위한 시스템 설정

그림 6.9는 멀티홉 환경에서 모든 RFID 태그를 수집하는데 소요되는 시간을 나타낸다. 태그 수집을 위한 리더가 매 수집 기간에 알람 신호를 포함할 경우, 단일홉 내에서 5개의 태그를 수집하는데 약 4.6초가 걸린 반면, 6홉 범위 내에서 리더의 통신 범위 내 태그를 수집하는데 약 33초가 소요된다. 하지만, 제안하는 기법은 6홉 내의 모든 리더로부터 태그의 정보를 수집하는데 불과 20초만 소요되었다. 전체 홉 수에 따른 수집 시간은 표 6.6에 정리하였다. 필드내에서 RFID 태그를 수집하는데 걸리는 시간은 리더의 수에 따라 많은 차이를 보이게 된다. 차이의 주요한 이유는 수면 상태의 태그를 깨우기 위해 오랜 시간 알람 신호를 보내는 ISO/IEC 18000-7의

특징 때문이다. 제안한 기법인 표준의 단점을 제거하여 효율적인 수집이 가능하다.

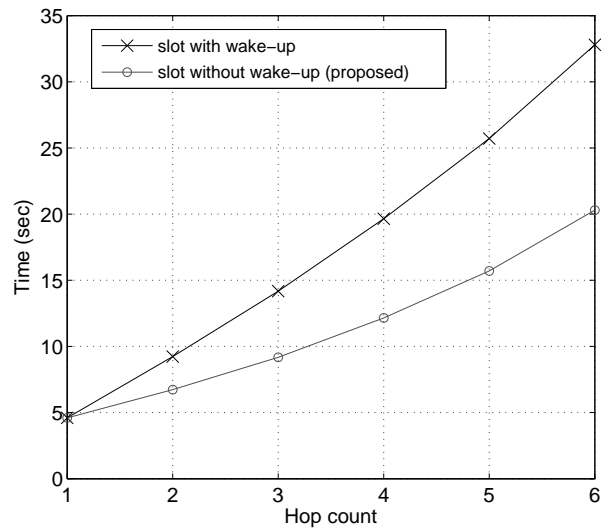


그림 6.9: 멀티홉 내에서의 태그 수집 시간

표 6.6: 멀티홉 내에서의 태그 수집 시간

hop count	1	2	3	4	5	6
slot with wake-up signal	4.6	9.2	14	19	26	32.8
slot without wake-up signal	4.6	6.7	9.18	12	15.7	20

unit : second

6.2 능동형 RFID 태그의 다중 판독 회피

멀티홉 환경에서 태그를 수집할 경우, 통신 범위의 중복으로 인하여 여러개의 리더에 의해 다중 판독될 수 있다. 본 절에서는 다중 판독 회피 기법을 통하여 다수의 리더로부터 다중 판독되는 문제를 제거하고, 더불어 RFID 태그의 내부 전지 수명을 향상시킨다.

6.2.1 다중 판독 회피를 통한 태그 수명 연장

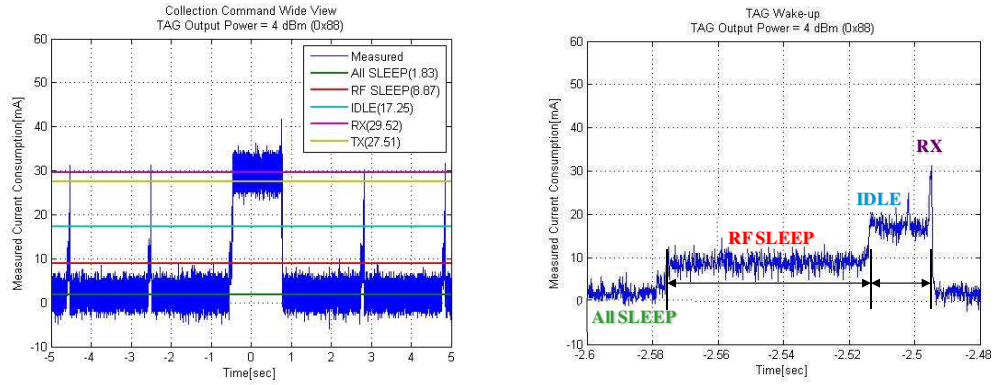
다중 판독 회피 기법은 태그의 정보의 다중 인식을 제거할 뿐만 아니라 이를 통하여 태그의 불필요한 응답을 줄임으로써 수명을 연장할 수 있다. 성능 평가를 위해, 먼저 ISO/IEC 18000-7 표준을 준수하는 능동형 RFID 태그의 전류 소모를 평가하였다. 능동형 RFID 태그는 ATmega128L 프로세서와 CC1100을 사용한다. 표 6.7은 능동형 RFID에서 소요하는 전류량을 보여준다. 모든 주변 장치가 꺼진 휴면 상태에서 약 0.011mAh(ampere)의 전류를 소모하고, 프로세서 활성화 상태에서 17.25mAh, 수신 모드에서 29.52mAh, 송신 모드에서 27.51mAh의 전류를 소모한다. 그림 6.10은 RFID 태그가 리더로부터 메시지를 수신하고 응답하는데 걸리는 시간과 소요 전류량을 보여준다. 태그는 활성화 상태가 된 후, 프로세서 활성화 모드를 위해 20밀리초 동안 8.87mAh를 소모하고, 대기 모드를 위해 17밀리초 동안 17.25mAh, 그리고 수신 모드를 위해서 1.5초 동안 29.52mAh를 소모한다. 그리고 리더의 명령에 응답하기 위해 송신 모드로 14밀리초 동안 27.51mAh를 소모한다. 하지만, 제안하는 방법은 능동형 RFID 태그가 중복된 수신 메시지를 수신하였을 경우, 송신 모드에 진입하지 않고 1.1초의 수신 모드만 유지한다. 표 6.8은 제안한 기법을 통하여 다중 인식될 때의 전류 소모량을 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 제안한 기법은 수신 시간과 응답 시간을 줄임으로써 태그의 수명 연장을 제공한다.

표 6.7: 능동형 RFID 태그의 전류 소모량

		Status current [mAh]	Status time [sec]	발생회수 [회]/year	전류소모 [mAh/year]	total
all sleep		0.011	x	x	92.45388	92.45388
wake-up	RF sleep	8.87	0.02	15768000	777.012	2190.7446
	IDLE	17.25	0.017	15768000	1284.435	
	RX	29.52	0.001	15768000	129.2976	
response	RF sleep	8.87	0.02	1	4.928e-05	0.0125377
	IDLE	17.25	0.017	1	8.146e-05	
	RX	29.52	1.5	1	0.0123	
	TX	27.51	0.014	1	0.000107	

표 6.8: 제안한 기법의 전류 소모량

		Status current [mAh]	Status time [sec]	발생회수 [회]/year	전류소모 [mAh/year]	total
all sleep		0.011	x	x	92.45388	92.45388
wake-up	RF sleep	8.87	0.02	15768000	777.012	2190.7446
	IDLE	17.25	0.017	15768000	1284.435	
	RX	29.52	0.001	15768000	129.2976	
response	RF sleep	8.87	0.02	1	4.928e-05	0.0091507
	IDLE	17.25	0.017	1	8.146e-05	
	RX	29.52	1.1	1	0.00902	
	TX	27.51	0	1	0	



(a) 활성화 상태의 RFID 태그의 전류 소모량 (b) 알람(wake-up) 신호 감지를 위한 RFID 태그의 전류 소모량

그림 6.10: 능동형 RFID 태그의 전류 소모량

그림 6.11(a)는 두 개의 리더로부터 중복된 수집 명령을 받은 능동형 RFID 태그의 전류 소모량을 보여준다. 표준을 따르는 능동형 RFID는 두 개의 리더로부터 명령을 받고 응답하므로 각각 12.5uA의 전류를 소모하고, 제안하는 방법은 두 번째 수집 명령의 경우 약 9.1uA의 전류를 소모한다. 표 6.9는 수집 명령의 수에 따른 전류 소모량을 비교한 표이다. 두 리더가 처음 메시지를 전송할 경우 제안하는 기법은 약 22uA를 소모하는 반면 표준은 25uA를 소모한다. 메시지의 양이 10까지 증가할 경우, 표준은 250uA까지 소모하게 된다. 반면, 제안하는 기법은 217uA의 전류 소모량을 가지며, 약 16%의 에너지 향상도를 보여준다.

그림 6.11(b)는 태그로부터 중복된 리더의 수가 증가함에 따른 태그의 전류 소모량을 나타낸다. 두 개의 중복된 리더가 있을 경우 태그는 수집 기간 동안 대략

표 6.9: 수집 명령의 수에 따른 전류 소모량

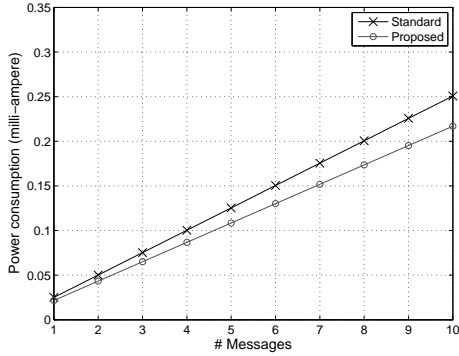
# messages	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Standard	0.025	0.050	0.075	0.100	0.125	0.150	0.176	0.201	0.226	0.251
proposed	0.022	0.043	0.065	0.087	0.108	0.130	0.152	0.174	0.195	0.217

unit : mA

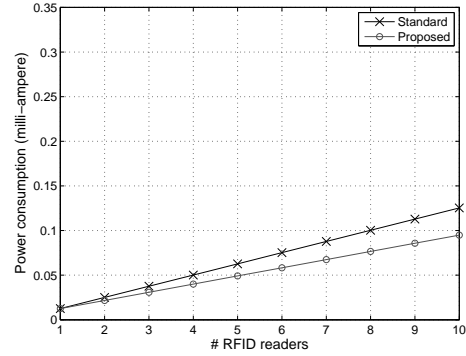
표 6.10: 리더의 수에 따른 전류 소모량

# readers	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Standard	0.013	0.025	0.038	0.050	0.063	0.075	0.088	0.100	0.113	0.125
Proposed	0.013	0.022	0.031	0.040	0.049	0.058	0.067	0.077	0.086	0.095

unit : mA



(a) 수집 명령의 수에 따른 전류 소모량



(b) 중복 리더의 수에 따른 전류 소모량

그림 6.11: 다중 관독에 의한 RFID 태그의 전류 소모량

22uA를 소모한다. 태그에게 수집 명령을 보내는 리더의 수가 증가할수록 태그의 에너지 소모도 증가함을 알 수 있다. 10개의 중복된 리더가 존재하여 한 차례의 수집 명령을 수행할 경우, 다중 관독 회피를 하지 못하는 방법은 125uA를 소모하며, 제안하는 방법은 약 95uA를 소모한다. 다시 말해, 중복되는 리더의 수가 많아지면 성능 향상의 정도가 상대적으로 높아진다. 2개 리더가 중복될 경우 16% 향상되지만, 중복 리더 수가 10개가 될 경우 에너지 절약도는 약 32%가 증가한다.

6.3 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템 시각 동기

6.3.1 시뮬레이션

본 절에서는 대규모 능동형 RFID 시스템에서 싱크와 리더간의 시각 동기 방법에 대해서 성능 평가를 수행한다. 성능 평가의 척도는 1)시각 동기의 정확도 (accuracy), 2)동기의 정밀도(precision), 그리고 3)시각 동기시 발생하는 메시지 양으로 하였다. 정확도는 참조 시각과의 오프셋을 나타내는 값으로 평균 오프셋으로 결정되어 질수 있다. 정밀도는 오차의 범위를 말하며, 표준 편차나 RMS(root mean square)로 도출되어질 수 있다. 마지막으로 메시지의 양은 네트워크내에서 발생하는 메시지의 빈도를 측정함으로 결과를 산출한다. 성능평가를 위해 Matlab/Simulink를 사용하였다. 시뮬레이터 환경은 표 6.11과 같다.

표 6.11: 시각 동기를 위한 시뮬레이션 환경

area	500 × 500m
MAC	802.15.4 (CSMA)
data rate	250kbps
sync interval	10 sec.
packet size	28
clock drift	20 PPM
initial offset	2 sec.

홉수에 따른 시각 동기 결과

가장 먼저 네트워크에서 리더들이 참조 시각과의 거리에 따른 시각 동기의 성능을 비교하였다. 성능 평가의 비교군으로서는 TPSN이 사용되었다. 이해의 편의

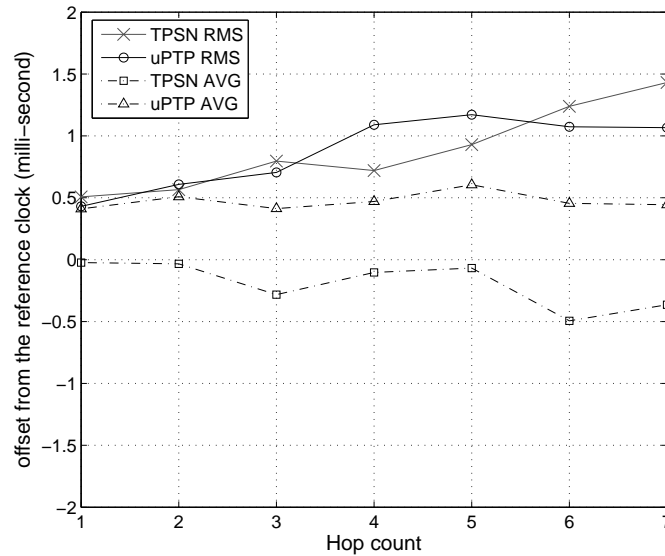


그림 6.12: 홉수에 따른 시각 동기 정확도 및 정밀도

를 위해 제안하는 기법을 uPTP라고 표기하였다. 그림 6.12와 표 6.12는 홉수에 따른 시각 동기의 정확도와 정밀도를 비교하였다. 그래프가 의미하는 바는 다음과 같다. 양수의 경우 참조 시각보다 빠르게 지역 클럭이 동작하는 것을 의미하며, 음수의 경우 참조 시각 보다 느리게 동작한다는 것을 의미한다.

그래프에서 RMS는 리더들 간의 시각 동기 정밀도를 의미하며, AVG(평균)은 참조 시각과의 동기 정확도를 나타낸다. TPSN과 비교하여 제안하는 기법은 정밀도 면에서는 큰 차이가 발생하지 않는다. 또한 두 프로토콜 모두 홉수에 따라 정밀도의 오차가 증가함을 알 수 있다. 하지만, 정확도의 측면에서는 두 프로토콜이 0을 기준으로 양수와 음수로 나뉘어지는 것을 볼 수 있다. 이는 프로토콜 내에서 전달 지연을 계산함에 있어 통신 링크의 비대칭성으로 인하여 발생하는 것이다. 즉, TPSN은 전송지연 계산을 자식 리더가 시작하고, 제안하는 기법은 전송 지연 계산

표 6.12: 홑수에 따른 시각 동기 정확도 및 정밀도

hop	1	2	3	4	5	6	7
TPSN RMS	507	566	796	720	929	1239	1431
uPTP RMS	431	608	705	1090	1171	1074	1066
TPSN AVG	-24	-34	-283	-103	-68	-494	-364
uPTP AVG	411	508	413	470	605	455	444

unit : microsecond(us)

을 부모 리더가 시작하게 된다. 이 차이로 인한 두 프로토콜간의 편차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

RFID 리더 수에 따른 시각 동기 성능

네트워크 규모에 따른 시각 동기 성능을 분석하였다. 표 6.13은 필드내에서 리더 수에 따른 시각 동기 성능을 알아보기 위한 환경을 요약한 것이다. RFID 필드는 $500 \times 500\text{m}$ 이며, 필드 내의 리더 수는 각각 40, 50, 60, 70이다. 리더들은 필드 내에 균등한 랜덤(uniformly random)으로 배치되었다. 리더의 수가 30이하일 경우에는 리더들 간의 통신 거리 한계로 인하여 네트워크 분리가 이루어지는 상황이 발생하였다. 리더들간의 통신 거리는 120m로 설정하였다.

표 6.13: 리더 수에 따른 시각 동기를 위한 환경 설정

area	$500 \times 500\text{m}$
deployment	uniformly random
# RFID readers	40, 50, 60, 70
communication range	120m

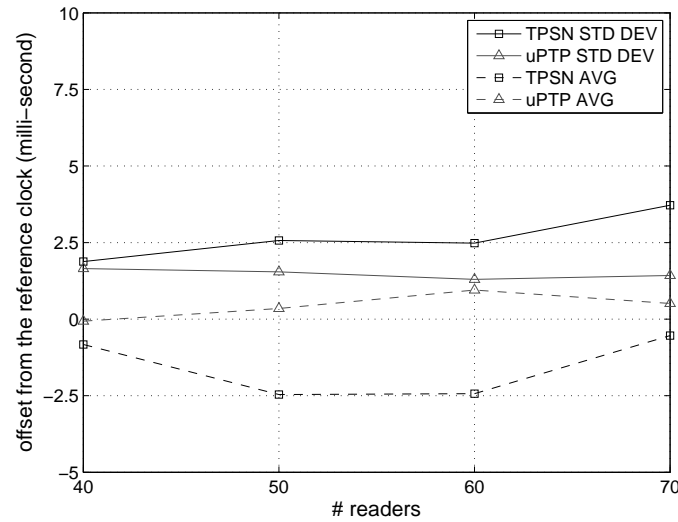


그림 6.13: 리더 수에 따른 시각 동기 정확도 및 정밀도

그림 6.13은 리더 수에 따른 시각 동기의 정확도와 정밀도를 나타내는 그래프이다. 리더 수가 40일 때, TPSN은 평균 -0.83 밀리초, 표준 편차 1.88 밀리초를 나타내었으며, 제안하는 기법은 평균 -0.065 밀리초, 표준 편차는 약 0.35 밀리초를 보여주었다. 리더의 수가 70까지 증가하였을 경우, 제안하는 기법은 표준 편차가 1.42인 반면 TPSN은 3.7까지 증가하였다. 이러한 결과는 동일한 네트워크의 크기에 리더들의 수가 증가함으로 인하여 교환 메시지로 인한 부하로 발생하는 것이다. 즉, TPSN은 네트워크내에 리더의 수에 따라 교환되는 수가 급격히 증가하지만, 제안하는 기법은 증가치가 적기 때문에 재전송으로 인한 오차가 줄어들어 시각 동기의 정밀도에 많은 영향을 미치지 않는다.

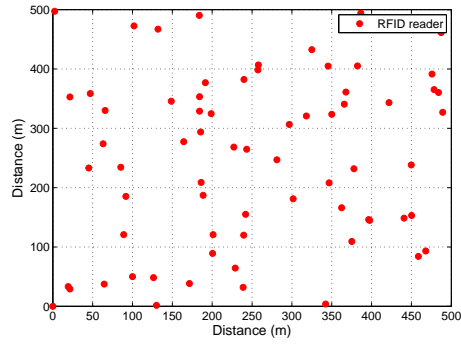
표 6.14: 리더 수에 따른 시각 동기 정확도 및 정밀도

# readers	40	50	60	70
TPSN STD DEV	1.88	2.567	2.483	3.718
uPTP STD DEV	1.65	1.545	1.296	1.42
TPSN AVG	-0.83	-2.46	-2.43	-0.54
uPTP AVG	-0.065	0.35	0.95	0.51

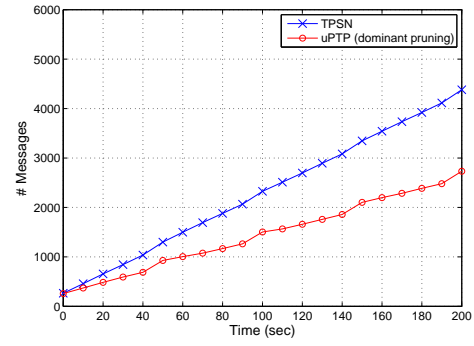
unit : milli-second(ms)

동기에 필요한 메시지 수

그림 6.14는 대규모 네트워크 내에서 시간의 흐름에 따른 동기 메시지수를 관찰한 그래프이다. 리더의 수는 70개이며, 균등한 랜덤으로 배치되었다. 토폴로지 형성 단계는 50초마다 수행되며, 시각 동기는 매 10초마다 수행된다. 성능 평가 결과, TPSN은 100초후에 약 2,326개의 메시지를 발생한 반면, 제안한 기법은 약 1,504의 메시지를 생성하였다. 이러한 메시지양의 차이는 시간의 흐름에 따라 증가한다. 200초 후, TPSN은 4,380개의 메시지를 생산한 반면, 제안한 uPTP(dominant pruning)은 2,733의 메시지 메시지를 발생하였다. 시각 동기의 정확도는 dominant pruning이 blind 플러딩보다 약간 높은 수치를 나타내었지만, 이는 음수의 불확실도가 줄어들며 따라 증가한 것이다. 정밀도를 나타내는 표준 편차는 dominant pruning이 약 1.35 밀리초로 blind 플러딩보다 좋은 성능을 보여주었다. 하지만, 제안한 기법과 TPSN의 성능 차이는 네트워크내의 노드의 밀집도에 따라 더욱 향상될 것으로 기대한다.



(a) 네트워크 배치



(b) 시간의 흐름에 따른 메시지 수

그림 6.14: 대규모 환경에서의 메시지 수

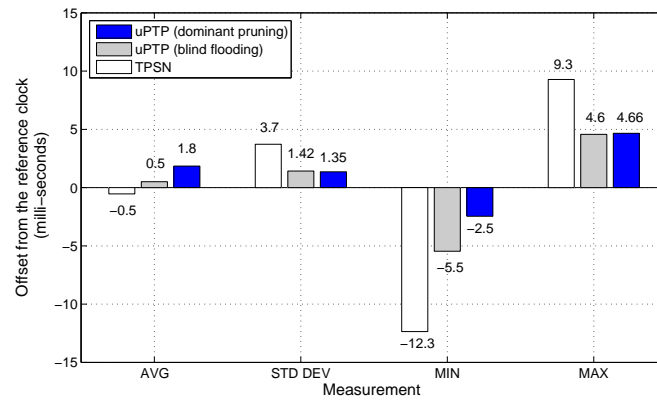


그림 6.15: 최적 플러딩을 통한 동기화 성능

6.3.2 실험

본 절에서는 제안하는 프로토콜 및 기법에 대한 성능 평가를 위해 실제 리더에 구현하였다. 성능 평가를 위한 실험 환경은 그림 6.16과 같다. 참조 시각을 제공하는 RFID 싱크는 주기적으로 시각 동기 메시지를 전송하고, 리더들은 이 메시지를 듣고, 싱크의 클럭에 동기화 시킨다. 상호간의 클럭 동기화 중 외부에서 동시에 이벤트를 발생시켜 각 리더에서 이벤트 감지 시점을 기록/분석하여 성능을 비교한다.

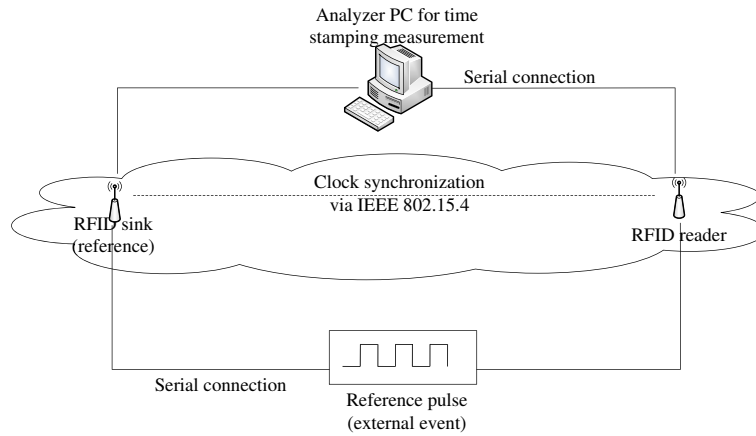


그림 6.16: 시각 동기 성능 평가를 위한 시스템 환경

성능 평가를 위해 가장 먼저 5개의 리더들에 대한 지역 클럭의 표류율을 비교 분석하였다. 리더가 사용하는 수정 발진자는 20PPM의 범용 오실레이터를 탑재하였다. 성능 분석 결과 리더들은 RFID 싱크로부터 다음과 같은 클럭 표류율을 나타내었다. 리더 A의 경우 초당 약 -21 마이크로초, 리더 B는 약 -14 마이크로초의 표류율을 보여주었다. 이때 음수는 참조 시각을 제공하는 능동형 RFID 싱크보다 느린 오실레이터를 의미하며, 양수의 경우는 RFID 싱크보다 빠르게 동작한다는 것을 의미한다. 리더 C는 -4, 리더 D는 -8, 리더 E는 -13 마이크로초의 표류율을 나타내었다. 이러한 클럭 표류율로 인하여 리더들은 시간의 흐름에 따라 참조 시각과

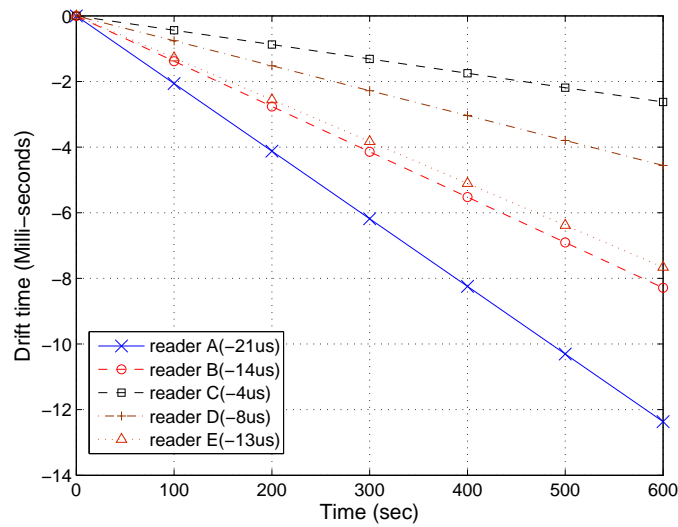
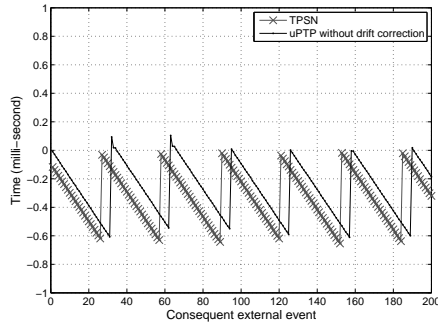


그림 6.17: 리더 표류율 실험

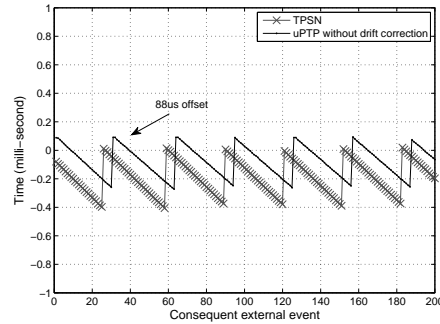
의 차이가 증가하게 된다. 따라서 표류율 보정을 위한 주기적인 시각 동기화 필요하다.

타임 스탬프 장치를 통한 시각 동기

시스템 시각 동기의 성능 평가에서 가장 먼저 시뮬레이션을 통하여 TPSN과 제안하는 프로토콜의 성능을 비교하였다. 제안한 프로토콜은 전송 지연 계산을 위해 응답 리더와 비응답 리더로 나뉘어진다. 다시 말해 응답 리더는 부모 리더와 능동적인 메시지 교환을 수행하고, 비응답 리더는 부모 리더와 메시지를 교환하는 것이 아니라 일방적으로 동기 메시지를 전달받는 리더이다. 본 절에서는 실험을 통하여 정밀하게 타임 스탬프를 하였을 경우, TPSN과 제안하는 기법의 성능을 비교하였다. 성능의 비교는 응답 리더와 비응답 리더로 분리하여 성능을 평가되었다. TPSN의 경우는 점대점 방식이므로 모든 리더가 응답 리더가 될 수 있지만, 각 리



(a) 응답 리더 동기 결과



(b) 비응답 리더 동기 결과

그림 6.18: 정밀 타임 스탬프를 이용한 시각 동기

더의 지역 클럭 표류율의 차이로 인하여 비응답 리더와 동일한 리더를 활용한다.

그림 6.18과 표 6.15는 응답 리더와 비응답 리더에 대하여 TPSN과 제안하는 프로토콜의 성능을 비교 분석한 것이다. 그림 6.18(a)는 응답 리더의 성능을 분석한 것이며, 그림 6.18(b)는 비응답 리더의 성능을 나타내는 그래프이다. 성능 분석의 정확성을 높이기 위해, TPSN의 기준으로 시각 동기시 정확하게 0의 오프셋이 발생하도록 시스템을 수정하였다. 시각 동기의 주기는 30초이며, 잡음이 발생하지 않는 맑은 환경에서 동기 메시지를 전송한다. 성능 평가 결과 응답 리더의 경우 TPSN과 제안하는 프로토콜과의 차이는 거의 없었으며, 비응답 리더의 경우 TPSN보다 약 88마이크로초의 차이가 발생하였다. 88 마이크로초의 오차는 약 5초간의 표류율에 의한 오차와 비슷한 수준임을 알 수 있다. 이러한 오차는 표류율 보정을 통하여 TPSN보다 좋은 성능을 도출해 낼 수 있다. 다음 절에서는 표류율 보정을 통한 성능 향상 기법을 언급할 것이다.

표 6.15: 타임 스탬프 장치를 이용한 시각 동기

	응답 리더			비응답 리더		
	AVG	RMS	STD DEV	AVG	RMS	STD DEV
TPSN	-323	370	179	-186	219	116
uPTP	-270	327	184	-75	129	104

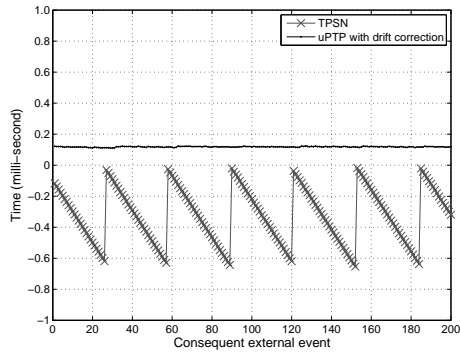
unit : microsecond(us)

표류 보정을 통한 시각 동기 결과

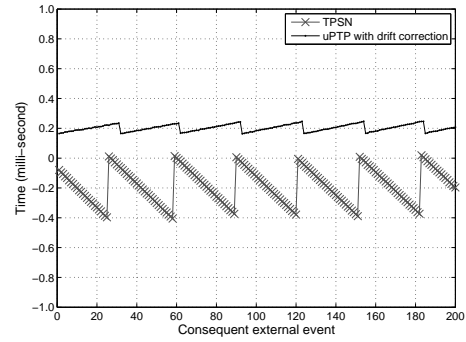
지금까지 살펴본 바와 같이 제안하는 시각 동기 프로토콜은 네트워크 내에 발생하는 메시지의 양을 획기적으로 줄임과 동시에, TPSN 보다 정밀한 동기 성능을 보여주었다. TPSN 동기 프로토콜은 네트워크 내의 리더들의 지역 클럭 표류율을 고려하지 않았기 때문에 시간의 흐름에 따라 오차는 증가하게 된다. 본 절에서는 제안한 기법에 표류 보정을 통하여 TPSN과의 오차의 차이를 비교해본다.

그림 6.19와 표 6.16은 표류율 보정을 통한 시각 동기 정밀도 및 정확도를 보여주는 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 표류율 보정을 수행하지 않는 TPSN의 경우 응답 리더는 약 -324 마이크로초, 비응답 리더는 약 -186 초의 평균 오프셋을 보인다. 반면, 표류율 보정을 통한 동기 기법은 응답 리더의 경우 약 118 마이크로초, 비응답 리더의 경우 약 202의 평균 오프셋을 보여준다. 그림 6.20은 표류 보정을 통한 동기 결과를 히스토그램으로 요약한 도표이다.

본 절에서 성능 평가를 수행한 표류 보정은 정밀한 시각 측정이 전제되어야 한다. 단순히 MAC 계층에서 타임 스탬프하여 표류를 보정할 경우 채널 경쟁으로 인한 지연 때문에 정확한 보정이 이루어지기 어렵다. 표류 보정은 정밀한 타임 스탬프가 전제된 후에 이루어져야 한다.



(a) 응답 리더 동기 결과



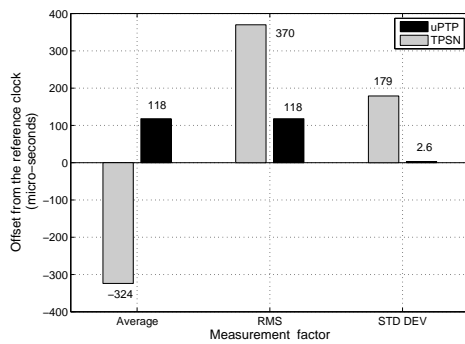
(b) 비응답 리더 동기 결과

그림 6.19: 표류율 보정을 통한 시각 동기

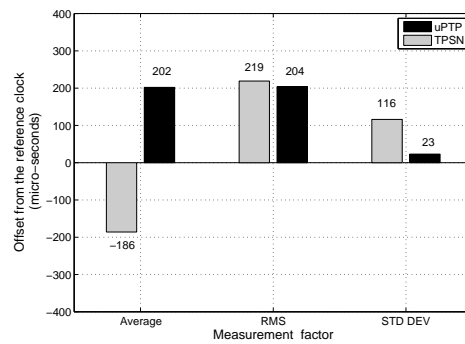
표 6.16: 표류 보정을 통한 시각 동기

	응답 리더			비응답 리더		
	AVG	RMS	STD DEV	AVG	RMS	STD DEV
TPSN	-324	370	179	-186	219	116
uPTP	118	118	2.6	202	204	23

unit : microsecond(us)



(a) 응답 리더



(b) 비응답 리더

그림 6.20: 성능 평가 척도에 따른 분석

제 7 장 결론 및 향후 연구 과제

7.1 결론

본 연구에서는 단일홉 능동형 RFID 시스템의 한계를 극복하기 위하여 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템을 정의하고 이를 기반으로 효율적이고 신속한 수집이 가능한 멀티홉 수집 및 동기화 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 대규모 환경에서 RFID 태그를 수집할 수 있는 리더를 애드혹 방식으로 배치하여 RFID 리더의 통신거리 한계를 극복하여 효율적으로 사물에 부착되어 있는 태그의 정보를 수집한다. 또한, 분산 배치되어 있는 RFID 리더들에게 시각 정보를 제공 및 동기화를 유지함으로써 다양한 응용에 사용될 수 있는 기저를 제공한다. 본 연구의 기여도는 다음과 같이 요약된다.

- 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템에서 다수의 리더를 활용하여 리더간 신호의 간섭을 회피하여 효율적으로 태그를 수집하는 기법을 제안
- 분산 배치된 다수의 리더에 의해 다중 관독됨을 회피함으로써 중앙 시스템에서 추가 가공의 작업을 제거할 뿐만 아니라 태그의 불필요한 송수신을 제거함으로써 수명을 연장시키는 기법을 제안
- RFID 필드에 배치된 리더들에게 시각 정보를 제공하고, 리더들간의 정밀한 동기화를 유지하기 위하여 시각 동기화에 필요한 메시지의 양을 획기적으로 줄이는 기법을 제안

7.1.1 멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템 특징

멀티홉 기반의 능동형 RFID 시스템은 무선 주파수를 사용하는 RFID 싱크의 전송거리 한계를 극복하기 위해 다수의 리더를 애드혹 배치함으로써 대규모 시스템에 적용하고자 하는 시스템이다. 또한 대규모 시스템뿐만 아니라 장애물이 존재하는 지역내에서 RFID의 태그를 효과적으로 수집할 수 있다.

7.1.2 대규모 능동형 RFID를 위한 새로운 접근법

제안하는 기법은 대규모 영역 또는 장애물이 존재하는 RFID 필드내에 다수의 리더를 배치하여 이들 상호간에 네트워크를 구성한다. 구성된 네트워크는 RFID 수집뿐만 아니라 RFID 필드내에서 능동형 태그들이 주변 환경을 감시 및 모니터링하여 싱크 또는 사용자에게 전달할 수 있는 방법을 제공한다. 반대로 싱크는 리더와 RFID 태그들에게 명령을 전달하여 사물의 정보뿐만 아니라 주변에 대한 정보를 손쉽게 획득할 수 있다.

리더간 통신을 위해 ISM 주파수 대역을 활용하여 능동형 RFID 표준인 433MHz 주파수 대역과의 충돌을 회피하며, 또한 센서 네트워크와의 연동이 가능하기 때문에 넓은 범위를 극복할 수 있다.

7.1.3 능동형 RFID의 원격 수집

원격지의 태그를 수집하기 위해 제안하는 기법은 ISO/IEC 18000-7 표준을 준수하는 RFID 시스템을 설계 및 구현하였다. 더불어 제안하는 기법은 싱크 또는 리더의 통신 범위 내의 RFID를 수집하기 위하여 표준을 엄격히 준수한다. 또한 리더간의 충돌을 회피하기 위하여 네트워크 내에서 효율적인 스케줄링을 수행하여 싱크간 또는 리더간의 간섭을 완전히 제거하였다.

7.1.4 능동형 RFID 태그의 수명 연장

RFID 리더간의 충돌은 두가지로 분류된다. 신호의 간섭과 다중의 리더에 의해 인식되는 다중 판독이다. 신호의 간섭은 두 싱크간에 단편적으로 다른 시간대에 수집을 수행함으로서 해결이 가능하다. 다중 판독 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 네트워크에서 싱크의 식별자를 활용하였다. 다중 판독 문제의 해결은 중앙의 시스템에서 효과적인 처리를 제공할 뿐만 아니라 태그의 입장에서 전력 절약을 할 수 있는 방법을 제공한다. RFID 수집 명령 중 무선 신호의 수신 시간과 응답 시간을 제거함으로써 태그의 불필요한 응답을 제거함으로써 태그의 수명을 연장하는 기법을 제안하였다.

7.1.5 시스템 시각 동기 기법

대규모 능동형 RFID 시스템을 위해 다수의 리더를 배치한 것은 분산 시스템으로 볼 수 있다. 분산 시스템은 다수의 리더들이 상호 연결되어 거대한 업무를 분산 처리하는 시스템이다. 분산 시스템에서 장치들 간에 업무를 효율적이고 정확하게 처리하기 위해서 시각 동기는 필수적이다. 특히, 능동형 RFID 시스템은 태그에 센서를 부착하여 주변 환경을 감시할 수 있는 능력을 제공한다. 수집된 센싱 데이터의 정렬을 위해서 시각 동기는 기본적으로 제공되어야 한다. 즉, 대규모 능동형 RFID 시스템에서의 리더의 배치 또한, 분산 시스템의 일례로서 리더들 간의 시각 동기가 필요하다.

본 연구에서는 싱크와 리더들간에 시각 동기화 기법을 제안하였다. 제안한 시각 동기 기법은 네트워크 내에서 발생하는 시각 동기 메시지의 양을 최소화고 리더들간의 정밀한 시각 동기를 이루었다.

네트워크 내의 리더들은 범용 컴퓨터 클럭과 마찬가지로 내부 오실레이터로 수정 발진자를 사용한다. 수정 발진자는 휨과 표류의 특성을 가진다. 이러한 휨과 표류는 시각 동기의 정확도와 정밀도에 영향을 미치는 요소로서 이를 제거 또는 최소화 하여야 하지만 대부분의 연구에서 이를 미묘한 오차로 가정하고 있다. 본 연구에서는 이러한 지역 클럭의 표류를 제거하기 위하여 정밀한 시각 측정을 수행하였다.

7.2 향후과제

본 연구에서 제안한 대규모 능동형 RFID 시스템을 위한 멀티홉 수집 및 동기화 기법은 현재 가속화되고 있는 자동 인식 시스템에서 광범위하게 활용되어 질 수 있는 획기적인 접근법이다. 본 연구에서 포함하고 있는 향후 과제로는 대규모 능동형 RFID를 활용한 서비스 응용, 표준을 준수하는 보다 효율적인 분산 수집, 리더들을 위한 에너지 절약, 노드의 이동성을 고려한 프로토콜 설계, 그리고 다양한 시스템 프로토콜 개발들이 있다.

참 고 문 헌

- [AT91] Atmel, AT91SAM7S datasheet, <http://www.atmel.com>, 2005.
- [AVR] Atmel, Atmega128(L) datasheet, <http://www.atmel.com>, 2005.
- [BPPMAD06] Branislav Kusy, Prabal Dutta, Philip Levis, Miklos Maroti, Akos Ledeczi, David Culler, Elapsed Time on Arrival: A simple and versatile primitive for canonical time synchronization services, *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, pp. 239–251, Jan. 2006.
- [CC2420] Texas Instrument, CC2420 datasheet, <http://www.ti.com>, 2004.
- [CC1100] Texas Instrument, CC1100 datasheet, <http://www.ti.com>, 2006.
- [Cox05] D. Cox, E. Jovanov, A.Milenkovic, Time synchronization for Zigbee networks, in *Proceedings of the 37th Annual Southeastern Symposium on System Theory*, pp. 135–138, Mar. 2005.
- [DE01] D. Engels, The Reader Collision Problem. Technical Report, *MIT-AUTOID-WH-007*, 2001.
- [DH04] H. Dai, R. Han, TSync: a lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks, *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 8(1):125–139, 2004.

- [DPDS06] D.H. Shih, P.L. Sun, D.C. Yen, S.M. Huang, Taxonomy and survey of RFID anti-collision protocols, *Computer Communications*, vol. 29, no. 11, pp. 2150–2166, 2006.
- [DWDH09] Dong-Liang Wu, Wing W. Y. Ng, Daniel S. Yeung, Hai-Lan Ding, A brief survey on current RFID applications, *2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Jul. 2009.
- [EGE02] J. Elson, L. Girod, D. Estrin, Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts, *The Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, pp. 147–163, Dec. 2002.
- [FCF08] Fengyuan Ren, Chuang Lin, Feng Liu, Self-Correcting Time Synchronization Using Reference Broadcast in Wireless Sensor Network, *Wireless Communications, IEEE*, vol. 15, Issue 4, pp. 79–85, Aug. 2008.
- [FW10] Samuel Fosso Wamba, Alison Wicks, RFID Deployment and Use in the Dairy Value Chain: Applications, Current Issues and Future Research, *AutoID Lab*, Jun. 2009.
- [GJP05] S.L. Garfinkel, A. Juels, R. Pappu, RFID privacy: an overview of problems and proposed solutions, *IEEE Security & Privacy*, pp. 34–43, May 2005.
- [GKS03] S. Ganeriwal, R. Kumar, M.B. Srivastava, Timing-sync protocol for sensor networks, *Proceedings of the ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 138–149, 2003.

- [GR03] J. Greunen, J. Rabaey, Lightweight time synchronization for sensor networks, *Proceedings of the ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications*, pp. 11–19, 2003.
- [HD04] Hans Weibel, Dominic Bechaz, IEEE 1588 Implementation and Performance of Time Stamping Techniques, *2004 Conference on IEEE 1588*, Sep. 2004.
- [HHWYY06] Hyuntae Cho, Hoon Choi, Woonghyun, Yeonsu Jung, Yunju Baek, LITeTag : Design and implementation of an RFID System for IT-based Port Logistics, *Journal of Communication*, vol. 1, Issue 4, pp. 48–57, Jul. 2006.
- [HHWYY06] Hyuntae Cho, Hoon Choi, Woonghyun Lee, Yeonsu Jung, Yunju Baek, Design and implementation of a Smart Tag System for IT-Based Port Logistics, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4159, pp. 32–43, Sep. 2006,
- [HHY10] Hyuntae Cho, Hyunsung Jang, Yunju Baek, Multi-Phase Correlator-based Realistic Clock Synchronization for Wireless Networks on IEEE 802.15.4, *The 10th IEEE International Conference on Scalable Computing and Communications*, pp. 2596–2603, Jun. 2010.
- [HSY08] Hyuntae Cho, Sanghyun Son, Yunju Baek, Implementation of a Precision Time Protocol over Low Rate Wireless Personal Area Networks,

The Thirteenth IEEE Asia-Pacific Computer Systems Architecture Conference, Aug. 2008.

- [HWY07] Hyuntae Cho, Woonghyun Lee, Yunju Baek, LDFSFA : A Learning-based Dynamic Framed Slotted ALOHA for Collision Arbitration in Active RFID Systems, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4459, pp. 655–665, May 2007.
- [HY06] Hyuntae Cho, Yunju Baek, Design and Implementation of an Active RFID System Platform, *Proceedings of the International Symposium on Applications and the Internet Workshops*, Jan. 2006.
- [HY10] Hyuntae Cho, Yunju Baek, Reader collision avoidance for multihop deployment of active RFID readers, *IEICE Electron. Express*, vol 7, no. 18, pp. 1396–1402, 2010.
- [ISO18000-7] ISO/IEC 18000-7, Information technology - radio frequency identification for item management - Part 7: parameters for active air interface communications at 433 MHz, *ISO/IEC*, 2008.
- [JDS03a] J. Waldrop, D. W. Engles, S. E. Sarma, Colorwave : A MAC for RFID Reader Networks, *2003 IEEE Conference on Wireless Communication and Networking*, Mar. 2003.
- [JDS03b] J. Waldrop, D. W. Engles, S. E. Sarma, Colorwave : An Anticollision Algorithm for the Reader Collision Problem, *2003 IEEE International Conference on Communications*, May 2003.

- [Klaus03] Klaus Finkenzeller, RFID Handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards and identification, *Wiley press*, 2003.
- [KMP05] Kin Seong Leong, Mun Leng Ng, Peter H. Cole, The reader collision problem in RFID systems, *Proceedings of IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, May 2005.
- [LC01] H. Lim, C. Kim, Flooding in wireless ad hoc networks, *Computer Communications*, vol. 24, issues 3–4, pp. 353–363, 2001.
- [LeeC07] Lee Cosart, Precision Packet Delay Measurements Using IEEE 1588v2, *2007 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization (ISPCS)*, Oct. 2007.
- [LL06] 이수련, 이채우, RFID 시스템에서의 Enhanced Colorwave 리더 충돌 방지 알고리즘, *전자공학회 논문지*, 제43권 TC편 제2호, pp. 183–194, 2006.
- [Mills] D.L. Mills, Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis, *RFC1305*, 1992.
- [MKS04] M. Maróti, B. Kusy, G. Simon, Á. Lédeczi, The flooding time synchronization protocol, *Proceedings of the ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 39–49, 2004.
- [MM05] K. Michael, L. McCathie, The Pros and Cons of RFID in Supply Chain Management, *International Conference on Mobile Business*, 2005.

- [MV03] Mihail L. Sichitiu and Chanchai Veerarittiphan, Simple, Accurate Time Synchronization for Wireless Sensor Networks, *IEEE Wireless Commun. and Networking*, 2003.
- [PXKG09] Ping Song, Xiaodong Shan, Kejie Li, Guangping Qi, Highly precise time Synchronization Protocol for ZigBee networks, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics 2009 (AIM2009)*, Jul. 2009.
- [Ron05] Ron Weinstein, RFID: A Technical Overview and Its Application to the Enterprise, *IT Professional*, vol. 7, no. 3, pp. 27–33, May 2005.
- [Roy06] Roy Want, An introduction to RFID technology, *IEEE Pervasive Computing*, vol. 5 Issue 1, pp. 25–33, 2006.
- [SAD04] S. Palchaudhuri, A.K. Saha, D.B. Johns, Adaptive clock synchronization in sensor networks, *International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2004.
- [SWCLY06] Shang-Wei Wang, Wun-Hwa Chen, Chorng-Shyong Ong, Li Liu, Yun-Wen Chuang, RFID Application in Hospitals: A Case Study on a Demonstration RFID Project in a Taiwan Hospital, *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan. 2006.

- [SYYJ99] S. Ni, Y. Tseung, Y. Chen, J. Sheu, The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network, *International Conference on Mobile Computing and Networking*, Aug. 1999.
- [Tom03] Tom Singer, Understanding RFID (A Practical Guide for Supply Chain Professionals), *Tompkins*, 2003.
- [TT10] LUND University, TrueTime manual,
<http://www.control.lth.se/truetime>, 2010.
- [WSS08] Won-Ju Yoon, Sang-Hwa Chung, Seong-Joon Lee, Implementation and performance evaluation of an active RFID system for fast tag collection, *Computer Communications*, vol. 31, no. 17, pp. 4107–4116, Nov. 2008.
- [YJH09] Younghwan Yoo, Jinhwan Kim, Haosong Gou, Yijiang Hu, RFID reader and tag multi-hop communication for port logistics, *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops*, Jun. 2009.
- [YO06] Yi Zhi Zhao, Oon Peen Gan, Distributed Design of RFID Network for Large-Scale RFID Deployment, *2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 44–49, Aug. 2006.

Multihop Collection and Synchronization for Large-scale Active RFID Systems

Hyuntae Cho

**Department of Computer Engineering
Pusan National University**

Abstract

Radio frequency identification (RFID) is an emerging automatic identification technology that uses radio waves to exchange information. An active RFID tag can be read at distances of one hundred meters or more and may include other sensors that can extend its application. The ISO/IEC 18000-7 standard defines the air interface for active RFID systems in the 433-MHz band. However, the standard has been designed for a single-hop network. It is difficult to apply the standard to a large area such as a port and an air logistics hub because of its limited radio communication range and obstacles.

Hence, in order to overcome a radio shadow area that does not reach signals from the RFID reader, this paper models a multi-hop active RFID network deployed in an ad hoc pattern, and proposes a multi-hop collection and time synchronization method for a large-scale active RFID system. We consider the following several difficulties associated with efficient collection in a multi-hop-based RFID system: topology construction, signal interference among readers, multiple reads, mobility, and synchronization.

The proposed collection method has four phases: route discovery, RFID reader discovery, RFID collection, and avoidance of multiple reads. The route discovery and reader discovery phases construct the network topology and gather reader information. The RFID sink then collects RFID tags via readers in the RFID field. Because an active RFID system originally focuses on a long communication range, collisions between readers are likely to occur when the readers' coverage areas overlap. The proposed method not only avoids collisions between readers but also extends the tag's lifetime by avoiding collisions between readers.

Time synchronization is essential for a number of network applications to operate efficiently because the multi-hop active RFID network is a distributed network. In particular, time synchronization among active RFID readers deployed in an ad hoc pattern is important for provision of time information, distributed collection, and arrangement of gathered data. In this paper, we analyze the factors of latency and jitter in wireless environments and minimize these factors to achieve precise synchronization. This paper also introduces semi-bidirectional synchronization to minimize traffic, a precision time stamp, and clock drift correction.

Finally, this paper presents an experiment and performance evaluation. To evaluate the proposed method's performance, we designed and implemented a multi-hop-based active RFID system that can provide the compatibility with ISO/IEC 18000-7. The proposed method and system represent a milestone for a large-scale RFID deployment. We expect the proposed method to significantly improve the efficiency of many civil applications such as field surveillance, logistics, and asset management.

감 사 의 글

대학원에 입학한지 만 8년이라는 세월이 흘렀습니다. 석사 과정 2년과 박사 과정 6년의 오랜 기간을 아버지와 같은 마음으로 많은 지도와 아낌없는 사랑을 주신 백윤주 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 본 논문이 완성되기까지 아낌없는 가르침과 조언을 주신 정상화 교수님, 김종덕 교수님, 유영환 교수님, 김병호 교수님 감사드립니다. 존경하는 교수님들의 진심어린 조언을 가슴깊이 새겨 교수님들의 명성에 누가 되지 않는 삶을 살도록 노력하겠습니다.

임베디드시스템 연구실의 초기 멤버로서 많은 추억이 있습니다. 연구실의 자리매김 과정에서부터 오랜 기간 많은 도움과 즐거움을 주었던 사랑하는 후배 최훈과 정연수에게 고마움을 전합니다. 모든 후배들의 귀감이 되며 많은 영감을 주신 황소영 교수님과 정효 선배님께도 감사의 말씀을 드립니다. 연구실 후배이자 친동생같은 이진호, 정동호 너희랑 연구실 생활할때가 가장 즐거웠던 나날이었다. 2년간 매일같이 얼굴을 부비며 시간을 보냈던 후배 동재, 웅현, 동환, 인구, 새나, 택현, 그리고 잠제에게는 많은 미안함이 있습니다. 이제 연구실의 핵심 멤버가 된 세영이, 상현이, 현성이, 종찬이, 정태에게도 좋은 마무리가 있었으면 합니다. 많은 추억과 깨우침을 안겨준 부산대학교 컴퓨터공학과 대학원 동기 및 선후배님들께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고, 오랜 기간동안 곁에서 지친 심신을 위로해주고 즐거움과 추억을 함께한 친구들에게도 고마운 마음을 전합니다.

항상 옆에서 따뜻하게 격려를 아끼지 않았던 사랑하는 부모님 그리고 형을 위해 많은 것을 양보해준 하나뿐인 동생에게 깊은 감사의 뜻을 전합니다.