

## Device-to-Device 통신 환경에서의 매칭 이론을 이용한 자원 할당 기법

이승현, 이용우, 신지태  
성균관대학교 전자전기공학부

{dreamian, tencio2001, jtshin}@skku.edu

## Resource Allocation using Matching Theory for Device-to-Device Underlay Communication

Seung Hyun Lee, Yongwoo Lee, Jitae Shin  
Sungkyunkwan University

### 요 약

Underlay Device-to-Device (D2D) 통신 환경에서 D2D 수신단에 대해 기지국이 셀룰러 유저의 자원을 어떻게 할당하는지에 대한 고려는 전체 셀룰러 네트워크 시스템의 성능 향상을 위해 필수적이다. 본 논문은 무선이동통신 환경에서 균일하게 분포된 셀룰러 유저와 D2D 페어 간의 효율적인 자원 할당에 대해 Gale-Shapley 알고리즘을 이용한 매칭 이론을 적용하였다. 시뮬레이션을 통해 한정된 셀룰러 자원의 할당 방식에 대한 Gale-Shapley 알고리즘의 성능을 검증하고 이 때 Gale-Shapley 알고리즘에서의 D2D 페어가 프로포징 유저일 때 전체 시스템 성능이 향상됨을 검증하였다.

### I. 서 론

최근 모바일 유저들이 새로운 멀티미디어 환경을 접하게 되면서 무선 통신 환경에서의 모바일 트래픽 수요가 급증하고 있다. 2020년에는 2013년을 기준으로 전체 모바일 데이터 생산량이 1000배 이상 증가할 것으로 예측된다.[1] 그러나, 현존하는 통신 인프라 환경으로는 이러한 급증하는 모바일 트래픽 수요를 적절하게 대처할 수 없다. 즉, 현재 네트워크 환경은 소피콜, 스타디움과 같은 환경에서 모바일 유저들의 서로간의 거리가 근접하기 때문에 발생하는 높은 데이터 트래픽 수요를 제한된 시스템 용량(System capacity)으로 적절히 대처할 수 없다.[2] 이는 다수의 통신 기기들에 의해 발생한 트래픽 정체로 심한 간섭을 받게 되기 때문이다. 그러므로 4세대(4G) 네트워크 환경은 현실적으로 고품질 비디오 스트리밍이나 증강 현실(AR)과 같은 높은 시스템 용량을 요구하는 트래픽 환경을 충족시키기 힘들다. 이러한 이유로, 산업 환경이나 연구 환경에서의 미래 네트워크에 관한 활발한 토론이 일어나고 있으며, 차세대 통신인 5세대(5G) 통신에 대한 관심이 높아지고 있다. 단말간 직접 통신(D2D) 기술은 이러한 문제를 해결할 수 있는 5G의 핵심 통신 기술 중 하나로 D2D 유저들이 기지국을 직접 경유하지 않고 셀룰러 자원을 재사용함으로써 단말간 직접 송수신을 할 수 있도록 하는 기술을 의미하며 proximity, hop, reuse, pairing에 대한 이득을 갖게 된다.[3] 또한 D2D 통신은 단말간 통신 비용을 절약할 수 있고 자원 사용의 효율성을 높일 수 있다.[4] 하지만, D2D 통신에서 D2D 페어가 어떠한 방식으로 셀룰러 자원을 할당받는 지에 따라 시스템 성능은 크게 달라진다. 즉, D2D 페어에 셀룰러 자원을 할당하는 기지국(Base Station, BS)은 어떻게 하면 자원 낭비를 최소화하는 동시에 전체 시스템 수용량을 높일 수 있을지에 대해 반드시 고려해야 한다. 이러한 이유로, 자원 낭비를 최소화하기 위해 어떠한 방식으로 셀룰러 자원을 D2D 유저에 할당하는 지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 대해 현대 경제학 이론을 적용하여 해결하려는 시도가 많이 보이고 있다. 그 이유는 다른 산업 환경과는 다르게 무선 네트워크 환경이 경제학에서 다루는 시장 환경과 매우 유사하기 때문이다. 현대 무선 네트워크 환경이 점점 방대해지고 복잡해지면서 기지국의 과부하 현상을 막기 위해 점점 분산형 네트워크로 변화함에 따라 복잡한 시스템 환경에 대한 경제학적 메커니즘의 적용의 필요성은 더욱

더 커지고 있다.[5] 본 논문에서는 어떤 환경에서의 두 집단 간 상호의 선호도 목록(preference list, PL)이 존재할 때, 안정적인 매칭을 보장해주는 Gale-Shapley 알고리즘을 이용하여 각각의 D2D 페어와 셀룰러 유저 사이의 안정적인 매칭을 찾고, 그에 따른 시스템 성능의 향상 정도에 대해 논하고 시스템 성능을 최대화하기 위해서 어떠한 집단을 우선순위로 고려해야 하는지에 대해서도 알아본다. 이에 따라 II장에서는 본 논문에서 제안하는 시스템 모델과 이에 따른 해결해야 할 최적화 문제를 형성한다. III장에서는 형성된 문제에 대한 최적화 전력 할당 방식과 D2D 유저들에 대한 셀룰러 유저의 자원 할당에 대한 매칭 이론적 접근 방식을 제안한다. IV장에서는 실험 결과에 대해 제시하는 매칭 이론적 접근 방식의 성능을 검증하고 D2D 유저와 셀룰러 유저 중 어떠한 유저를 우선적으로 고려하여야 전체 시스템 성능이 높아질지에 대해 분석한다. V장에서는 실험에 대한 결과를 요약하여 논한 후, 향후 연구 과제에 대해 밝힌다.

### II. 시스템 모델 및 문제 형성

본 논문에서 제시하는 시스템 모델은 주파수 분할 이중화(FDD) 방식의 그림 1과 같은  $M$ 개의 D2D 페어와  $N$ 개의 셀룰러 유저가 단일 셀 내에 균일하게 분포하는 Underlay D2D 통신 환경 상황을 고려한다. 이 때, 기지국으로부터 자원을 할당받을 때에 상향 링크가 사용된다. 또한,  $N$ 개의 셀룰러 유저의 집합과  $M$ 개의 D2D 페어의 집합을 각각 다음과 같이 정의한다.

$$C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_i, \dots, c_N\}, \quad 1 \leq i \leq N \quad (1)$$

$$D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_j, \dots, d_M\}, \quad 1 \leq j \leq M \quad (2)$$

이러한 시스템 환경 하에 기지국은 D2D 통신 조건을 만족하는 D2D 페어들에 대해 이용 가능한 셀룰러 자원을 할당하게 된다. 이 때, D2D 통신이 허용되면 기지국은 각각의 허용된 D2D 페어에 대해 D2D 송신단(D2D Tx)으로부터의 간섭의 영향을 받는다. 또한 셀룰러 자원을 공유하여 D2D 통신을 하는 D2D 수신단(D2D Rx) 역시 셀룰러 자원을 공유해주는 셀룰러 유저로부터 간섭의 영향을 받게 된다. 본 논문에서는 시스

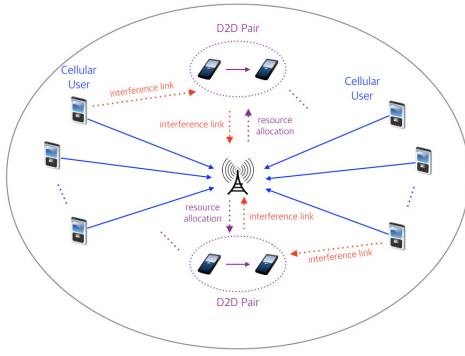


그림 1. Underlay D2D 통신 시스템 모델

Fig 1. Underlay D2D communication system model

템 모델에 대한 다중 경로 페이딩(multipath fading)과 슬로우 페이딩(slow fading) 효과를 고려한다. 이에 대해 셀룰러 유저  $c_i$ 와 기지국 사이의 채널 이득(channel gain)에 대해 다음과 같이 정의한다.

$$G_{i,BS} = K\beta_{i,BS}\zeta_{i,BS}D^{-\alpha} \quad (3)$$

이 때,  $K$ 는 시스템 환경 상수,  $\beta_{i,BS}$ 는 셀룰러 유저  $c_i$ 로부터 기지국까지의 다중 경로 페이딩 이득을 나타내며  $\zeta_{i,BS}$ 는 슬로우 페이딩 이득을 나타낸다.  $D$ 는 둘 사이의 물리적 거리(physical distance)를 의미하며  $\alpha$ 는 경로손실 먹지수(pathloss exponent)를 나타낸다. 이와 유사한 방식으로 D2D 페어 간의 채널 이득  $G_j$ ,  $j$ 번째 D2D 페어 내의 D2D Tx가 기지국에 보내는 간섭 경로에 대한 채널 이득  $G_{j,bs}$ ,  $c_i$ 가  $d_j$ 에 보내는 간섭 경로에 대한 채널 이득  $G_{i,j}$ 을 유사한 방식으로 구할 수 있다. 또한, 가우시안 백색소음(AWGN)의 전력을  $N_0$ 라고 하고, 셀룰러 유저  $c_i$ 와  $j$ 번째 D2D Tx의 전송 전력을 각각  $P_c^i$ ,  $P_j^d$ 라고 하자. 이 때  $i$ 번째 셀룰러 유저의 상향 링크를 받을 때의 기지국의 SINR과  $j$ 번째 D2D 페어의 D2D Rx의 SINR을 각각  $\gamma_i^c$ ,  $\gamma_j^d$ 라 하면, 전체 시스템 수용량(기지국과 모든 D2D Rx의 수용량의 총합)은 기대되는 전체 시스템 처리량(모든 셀룰러 유저와 D2D Tx의 처리량의 총합)과 같다. 이에 대해 전체 시스템 처리량을 높이기 위해서 다음과 같은 문제가 형성된다.

$$\max_{\rho_{i,j}, P_c^i, P_j^d} W_i \sum_{c_i \in C} \sum_{d_j \in A} [\log_2(1 + \gamma_i^c) + \rho_{i,j} \log_2(1 + \gamma_j^d)], \quad (4)$$

$$s.t. \quad \gamma_i^c = \frac{P_c^i G_{i,BS}}{N_0 + \rho_{i,j} P_j^d G_{j,BS}} \geq \gamma_{i,\min}^c \quad (5)$$

$$\gamma_j^d = \frac{P_j^d G_j}{N_0 + \rho_{i,j} P_c^i G_{i,j}} \geq \gamma_{j,\min}^d \quad (6)$$

$$\sum_{d_j \in A} \rho_{i,j} \leq 1, \rho_{i,j} \in [0,1], \forall c_i \in C \quad (7)$$

$$\sum_{c_i \in C} \rho_{i,j} \leq 1, \rho_{i,j} \in [0,1], \forall d_j \in A \quad (8)$$

$$P_j^d \leq P_{\max}^d, \forall d_j \in A \quad (9)$$

$$P_c^i \leq P_{\max}^c, \forall c_i \in C \quad (10)$$

여기에서  $A$ 는 셀룰러 자원을 공유 받을 수 있는 D2D 페어의 집합을 나타낸다.  $\rho_{i,j}$ 는  $i$ 번째 셀룰러 유저와  $j$ 번째 D2D 페어 사이에 자원의 공유 가능한지에 대한 resource indicator를 나타낸다. 즉,  $j$ 번째 D2D 페

어가  $i$ 번째 셀룰러 자원을 공유 받을 수 있다면,  $\rho_{i,j} = 1$ 이 된다. 이 때,  $A$ 에 속한 각각의 D2D 페어는 오직 하나의 셀룰러 유저로부터의 자원만 할당받는다.  $P_{\max}^c$ 와  $P_{\max}^d$ 는 각각 셀룰러 유저와 D2D Tx에 대한 최대 전송 전력을 의미한다. 위 (4)-(10)의 최적화 문제는 MINLP(Mixed Integer Non-Linear Problem)이기 때문에 NP hard의 경우로 분류된다. 즉, 이러한 경우에 다항 시간(Polynomial time) 내에 완전 해를 찾는 것이 불가능하며 최적화를 통해 완전 해에 대해 추측할 수 있을 뿐이다.[6] 본 논문에서는 완전 해가 실현 가능하지 않은 이러한 문제에 대하여 최적화된 해를 찾고자, (4)-(10)의 문제에 대해 셀룰러 유저  $c_i$ 와 D2D 페어  $d_j$ 가 자원을 공유하는 상황을 가정하였을 때( $\rho_{i,j} = 1$ ), (5), (6), (9), (10)에 대한 전력 할당 방식을 고려하고, 이후에 할당된 각각의 전력을 바탕으로 (4)-(10)에 대해 자원 할당 방식을 고려한다.

### III. 전력 할당 방식 및 자원 할당 방식

#### 3.1 최적화 전력 할당 방식(Optimized PA)

식 (5), (6), (9), (10)을 만족하는 셀룰러 유저와 D2D 페어의 순서쌍의 집합을  $A$ 라 하면 영역  $A$ 에 속한 유저들의 순서쌍에 대해, 최적화된 전력을 할당하기 위해 각각의 셀룰러 유저와 D2D 페어의 처리량(throughput)의 합이 최대화되는 방향으로 전력이 할당돼야 한다. 이 때, 처리량의 총합을  $f(P_c^i, P_j^d)$ 로 정의하면,  $f(P_c^i, P_j^d)$ 가 최대가 될 때 셀룰러 유저와 D2D 페어 중 하나는 반드시 최대 전송 전력의 상한 값을 갖게 된다. 이때 나머지 유저에 대한 전력의 값은  $f(P_c^i, P_j^d)$ 가 아래로 볼록한 함수(convex function)이므로 집합  $A$ 가 나타내는 영역의 경계 값(critical value)에 위치한다.[7] 이러한 방식으로  $A$ 에 속한 모든 순서쌍에 대한 최적화된 전력을 할당할 수 있다.

#### 3.2 임의 전력 할당 방식(Random PA)

본 논문에서 제시하는 임의 전력 할당 기법이란,  $A$ 에 속한 각각의 유저의 순서쌍에 대해 어떠한 최적화 방식도 거치지 않고 임의로 전력을 할당하는 방식이다. 즉,  $A$ 에 속한 셀룰러 유저와 D2D 페어는 (5), (6), (9), (10)이 나타내는 부등식의 영역에 속하게 되는데, 이 때 이 영역 중 임의의 한 점을 셀룰러 유저와 D2D 페어의 전력으로 할당하는 방식이다.

#### 3.3 Gale-Shapley 알고리즘 기반 자원 할당 방식(GS RA)

Gale-Shapley(GS) 알고리즘은 David Gale 과 Lloyd Shapley가 제안한 매칭 이론으로 본 논문에서 제시하는 알고리즘은 시스템 모델을 고려하여 Stable marriage 알고리즘인 경우만을 한정하여 생각한다.[8] Stable marriage 알고리즘이란  $N$ 명의 남자에 대해  $N$ 명의 여자가 매칭되는 상황을 생각하여 서로 간의 선호도 리스트(preference list)가 존재할 때 두 집단은 항상 안정적인 매칭이 고려된다는 알고리즘이다. 이 알고리즘에 대한 매칭의 완전성(perfection), 안정성(stability), 알고리즘의 성능을 보장하는 종착성(termination)이 [9]에서 증명된다. 또한 자원 배분이 가장 효율적인 상태인 파레토 최적성(Pareto optimality)을 가진다는 것에 대해 [10]에서 증명되었다. 이 알고리즘의 작동 원리는 표 1에 제시한다.

표 1. GS 알고리즘의 작동 원리

Table 1. The flow chart of Gale-Shapley algorithm

1	모든 남자와 여자들이 매칭되지 아니한 상태에서 시작하여 각각의 남자들이 본인의 가장 높은 선호도를 갖고 있는 여자에게 프로포즈를 한다.
2	프로포즈를 받은 여자에게 대해서는 프로포즈 받은 남자들 중에 선호도가 높은 남자의 프로포즈를 승낙하며 받지 못한 여자들은 매칭되지 않는다.
3	전 단계에서 매칭되지 못 하거나 새로운 남자에 의해 거절된 남자들에 대해 그 다음 높은 선호도를 갖고 있는 여자에게 프로포즈를 한다.
4	모든 남성이 매칭될 때까지 2-3의 과정을 반복한다.
5	매칭이 완료된다.

이는 남자가 여자에게 프로포즈를 하는 방식으로, 남자의 경우는 단계별로 매칭이 된 상태에서도 끊어질 수가 있지만, 여자의 경우는 한 번 매칭이 되면 절대로 매칭이 끊어지지 않는다. 또한, 이러한 상태에서 남자는 최적의 타당한 파트너와 짝이 맺어지며(men optimality), 여자의 경우는 최악의 타당한 파트너와 매칭이 된다(women pessimality).[11] 따라서 남자 입장에서의 최적의 결과는 여자의 입장에서 최악의 결과가 될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 GS 알고리즘에 대해 D2D 페어의 경우를 남자에 대응하여 생각하고 셀룰러 유저의 경우를 여자에 대응하여 생각한다. 또한, 프로포징 유저를 바꿔서 셀룰러 유저가 D2D 페어 유저에게 프로포징하는 상황에서 전체 시스템 성능이 어떻게 변화하는지에 대해서 논한다. 이 점에 대해서 셀룰러 유저의 개수와 D2D 페어의 개수가 일치하지 않는 경우가 발생할 수 있는데, 이러한 경우에 대해서도 GS 알고리즘이 적용될 수 있다는 것을 [12]에서 증명하였다.

### 3.4 임의 자원 할당 방식(Random RA)

본 논문에서 고려하는 임의 자원 할당 기법은 각각의 전력 할당 방식에 대해 셀룰러 유저  $c_i$ 와 D2D 페어 유저  $d_j$ 의 전력의 순서쌍이 (5),(6),(9),(10) 조건을 만족하는  $A$ 의 집합의 원소일 때,  $\rho_{i,j} = 1$ 이 될 수 있으며 이에 대해 각각의 유저들은 (7), (8)에 의해 상대 유저에 대해 일대일로 대응되어야 하므로, 이 조건을 만족하는 유저들의 순서쌍을 임의로 할당하는 방식을 제안한다. 즉 D2D 페어 유저  $d_j$ 가 셀룰러 유저  $c_i$ 의 자원을 할당받는 모든 경우에 대하여 D2D 페어 유저  $d_j$ 는 다른 셀룰러 유저의 자원을 할당받을 수 없으며 셀룰러 유저  $c_i$ 는 다른 D2D 페어 유저에게 자원을 할당해줄 수 없다.

## IV. 실험 결과

본 논문에서는 표 2와 같이 실험 환경을 구성하였다.

표 2. 파라미터 테이블  
Table 2. Parameter table

파라미터(parameter)	값(value)
셀 환경	R=1000m, 단일 셀(uni-cell)
시스템 환경 상수 (K, system environment constant)	0.01
다중경로 페이딩 효과 (Multipath fading effect)	지수 분포, $\lambda = 1$
슬로우 페이딩 효과 (Slow fading effect)	로그 정규 분포, $\sigma = 8$
셀룰러 유저의 수 ( $N$ , The number of CUs)	50
D2D 페어의 수 ( $M$ , The number of D2D pairs)	15-50
경로손실 멱지수 ( $\alpha$ , pathloss exponent)	4
D2D 페어간 거리 (proximity of D2D)	(60,100)m
시스템 환경 상수 (K, system environment constant)	0.01
상향 링크 대역폭 ( $W_u$ , uplink bandwidth)	0.5MHz
가우시안 백색소음( $N_0$ , AWGN)	-144dBm
셀룰러/D2D 유저의 최대 송신 전력	24dBm
기지국의 최소 SINR 요구조건 (the minimum of SINR for BS)	(15,20)dB
D2D Rx의 최소 SINR 요구조건 (the minimum of SINR for D2D Rx)	13dB

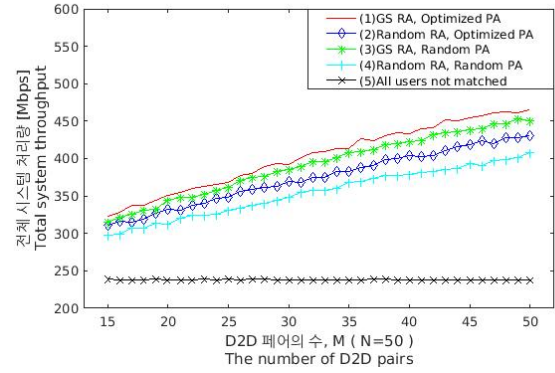


그림 2. 적용된 알고리즘에 대한 전체 시스템 처리량 비교  
Fig 2. Total system throughput comparison by PA algorithm and RA algorithm

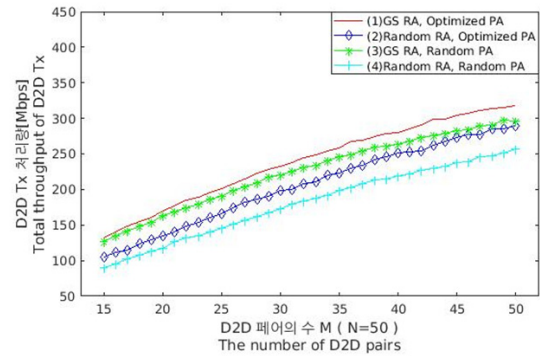


그림 3. 적용된 알고리즘에 대한 D2D Tx 처리량 비교  
Fig 3. Total D2D Tx throughput comparison by PA algorithm and RA algorithm

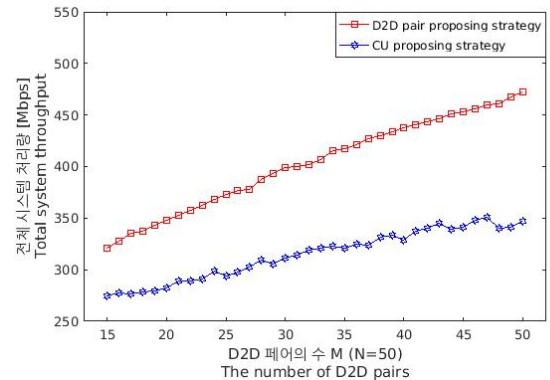


그림 4. 프로포징 유저 선정에 대한 전체 시스템 처리량 비교  
Fig 4. Total system throughput comparison by assigning proposing user in GS algorithm

본 논문은 그림 2-6에 대해 250번 반복 시행한 결과의 평균값을 측정하였다. 그림 2에서는 GS 알고리즘을 이용한 자원 할당 방식과 임의 자원 할당 알고리즘의 두 가지 경우와 최적화 전력 할당 방식과 임의 전력 할당 방식에 대한 두 가지 경우를 고려하여 총 4가지 경우에 대해 측정하였다. 이 때, 어떠한 셀룰러 자원도 공유되지 않을 때의 총 시스템 처리량은 셀룰러 유저의 총 처리량과 같으며 약 239.40Mbps로 측정되었다. 또한, 각각의 자원 할당 방식에 대해 전력 할당 방식에 대한 시스템 처리량 차이는 GS 알고리즘의 할당 방식이 평균 11.31Mbps로 임의 자원 할당 방식이 평균 19.87Mbps로 측정되었다. 각각의 자원 할당 방식은 D2D 페어의 개수가 증가함에 따라, 전력 할당 방식에 따른 시스템 성능 차이가 증가하는 추세를 보이며, GS 알고리즘의 경우 차이의 증가폭이 더 크다. 또한 각각의 전력 할당 방식에 대한 자원 할당 방식에 따른 시스템 성능

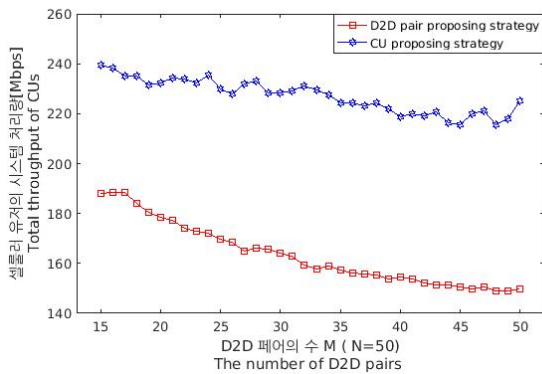


그림 5. 프로포징 선정에 대한 셀룰러 유저 처리량 비교  
Fig 5. Total cellular users throughput comparison by assigning proposing user in GS algorithm

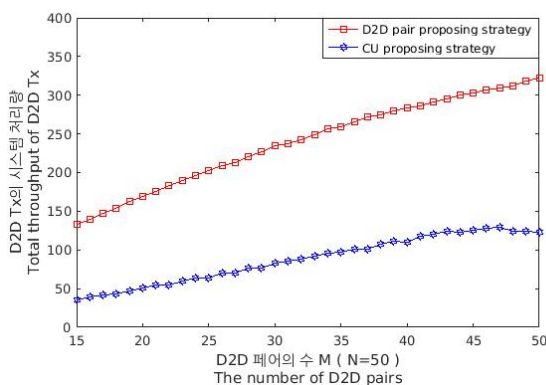


그림 6. 프로포징 선정에 대한 D2D Tx 처리량 비교  
Fig 6. Total D2D Tx throughput comparison by assigning proposing user in GS algorithm

차이는 최적화 전력 할당 방식의 경우 평균 28.29Mbps, 임의의 전력 할당 방식의 경우 37.05Mbps로 최적화 전력 할당 방식이 더 낮았으며, 이 경우에도 D2D 페어의 수가 증가함에 따라 성능 차이의 폭이 증가하였다. 그림 3에서 D2D Tx 처리량 차이의 폭은 자원 할당 방식에 따른 전력 할당 방식을 비교할 때, GS 알고리즘의 경우가 평균 13.89Mbps로 임의의 자원 할당 방식의 경우 25.23Mbps에 비해 더 낮게 측정되었다. 전력 할당 방식에 대하여 최적화 전력 할당 방식이 33.54Mbps, 임의의 자원 할당 방식의 경우 44.88Mbps로 더 높게 측정됐다. 그림 4-6은 GS 알고리즘에 대한 D2D 유저 집단과 셀룰러 유저 집단에 대해 프로포징 유저를 어떻게 지정하느냐에 따른 시스템 처리량을 비교한다. 그림 4에서 D2D 유저가 프로포징 유저가 되었을 때 최대 125.10Mbps의 시스템 처리량 차이가 남을 보여준다. 그림 5에서는 이에 대한 셀룰러 유저의 시스템 처리량 변화를 보여주는데 이 경우에는 셀룰러 유저가 프로포징 유저가 되었을 경우 처리량의 감소폭이 더 낮았다. 그림 6에서 D2D Tx의 처리량 증가는 D2D 유저가 프로포징 유저가 되었을 경우 더 높음을 보여준다. 그림 5, 6에 따라, D2D 유저와 셀룰러 유저 두 집단 간 프로포징 유저가 최적의 매칭을 하며 프로포징을 받는 유저는 지정된 매칭 상황에 대해 최악의 매칭을 함을 확인할 수 있다. 즉, 셀룰러 유저가 프로포징 유저가 된 경우 소유한 셀룰러 자원의 공유에 의한 손실을 줄이려 하며, D2D 유저가 프로포징 유저인 경우는 최적의 셀룰러 자원을 공유하여 처리량 값을 늘리려 한다. 종합적으로 그림 4에서 D2D 유저가 프로포징 유저로 되었을 때, 전체 시스템 성능이 높아진다.

## V. 결 론

본 논문에서는 제한된 셀룰러 자원에 대해 Underlay D2D 통신을 하는 환경에서 Gale-Shapley 알고리즘의 우수성에 대해 전력 할당 방식과 자원 할당 방식을 고려하여 시스템 성능 차이가 얼마나 나는지에 대한 수치 해석을 통해 비교하여 검증하였다. 또한 Gale-Shapley 알고리즘에서 D2D 유저가 프로포징 유저가 되어야 전체 시스템 성능을 높이는 데 효율적이라는 점을 각각의 유저가 프로포징 유저일 때 시스템에 어떠한 영향을 끼칠지에 대해 설명하고 실험 결과를 통해 검증하였다. 향후 연구는 유저 간 모빌리티 상황이 고려될 때, Gale-Shapley 알고리즘에서의 선호도는 시변성을 갖게 되는데, 이러한 경우 어떻게 알고리즘을 운용할지에 대해 논해야 한다.

## ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(B0101-16-0033,CCN 기반의 다차원 scalability를 활용한 5G 이동통신 기술 연구개발)

## 참 고 문 헌

- [1] Hwang, Insoo, Bongyong Song, and Samir S. Soliman. "A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks." *IEEE Communications Magazine* 51.6 (2013): 20-27.
- [2] Popovski, P., et al. "ICT-317669-METIS/D1. 1 Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system." *EU-Project METIS (ICT-317669), Deliverable* (2013).
- [3] Yu, Guanding, et al. "Joint mode selection and resource allocation for device-to-device communications." *IEEE Transactions on Communications* 62.11 (2014): 3814-3824.
- [4] Zhang, Ning, et al. "Energy-efficient coverage scheme for relay-assisted D2D network." *6th International Conference on Wireless, Mobile and Multi-Media (ICWMMN 2015). IET*, 2015.
- [5] Huang, Jianwei, and Lin Gao. "Wireless network pricing." *Synthesis Lectures on Communication Networks* 6.2 (2013): 1-176.
- [6] Bovet, Daniel Pierre, Pierluigi Crescenzi, and D. Bovet. *Introduction to the Theory of Complexity*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1994.
- [7] Gjendemsjo, Anders, et al. "Optimal power allocation and scheduling for two-cell capacity maximization." *2006 4th international symposium on modeling and optimization in mobile, ad hoc and wireless networks. IEEE*, 2006.
- [8] Gusfield, Dan, and Robert W. Irving. *The stable marriage problem: structure and algorithms*. MIT press, 1989.
- [9] Gale, David, and Lloyd S. Shapley. "College Admissions and the Stability of Marriage." *The American Mathematical Monthly* 120.5 (2013): 386-391.
- [10] Gale, David, and Marilda Sotomayor. "Some remarks on the stable matching problem." *Discrete Applied Mathematics* 11.3 (1985): 223-232.
- [11] Sotomayor, Marilda. "A non-constructive elementary proof of the existence of stable marriages." *Games and Economic Behavior* 13.1 (1996): 135-137.
- [12] McVitie, D. G., and Leslie B. Wilson. "Stable marriage assignment for unequal sets." *BIT Numerical Mathematics* 10.3 (1970): 295-309.