

2021년도 연구보고서 (공동1)

축 기반 교통 신호 연동 모델 개발

- 신호 연동 모델 보고서 -

2021. 12.

한국과학기술원



1. 연구 개요

1.1. 연구 배경 및 목적

- 딥러닝 기반 스마트교차로 시스템이 구축되어 교차로 교통정보를 수집·관리되고 있음
- 스마트교차로 시스템 도입을 통한 교통정보 기반의 체계적 교통관리체계 마련이 필요함
- 실 수요 기반의 교통관리체계를 위해 교차로 통행 수요를 분석하고, 기존 신호 현시의 비효율성 및 교통 혼잡을 개선함

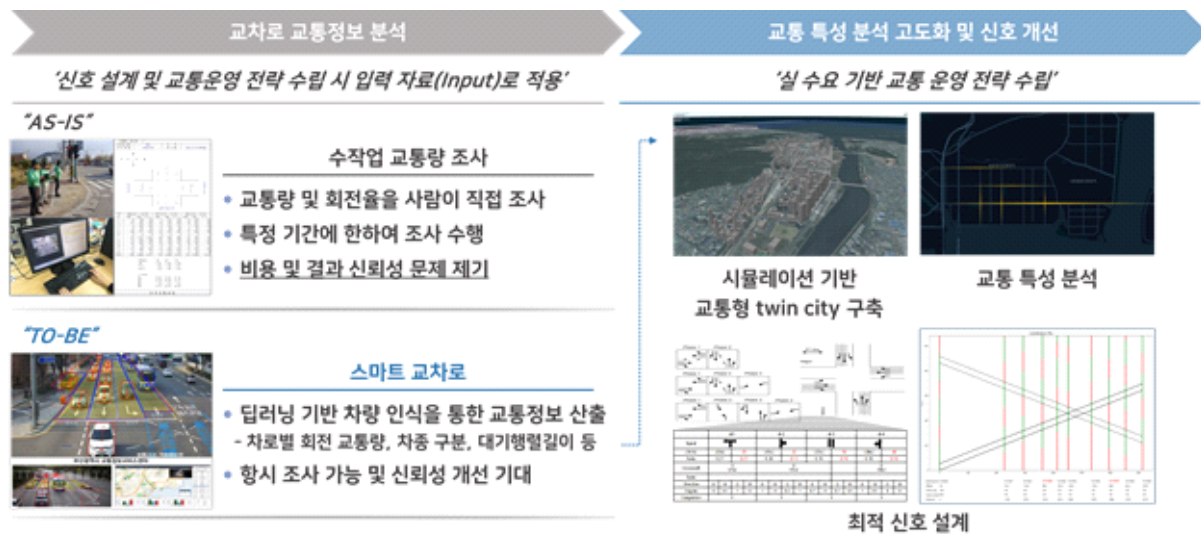


그림 1 스마트교차로 시스템 기반 교통관리체계 마련

2. 스마트교차로 데이터

2.1. 스마트 교차로 데이터 개요

- 스마트 교차로 시스템은 교차로 진입방향마다 설치된 CCTV 영상정보로부터 5분 단위 차선, 차종, 진출 방향에 따른 교통량 데이터를 제공함
 - 지점형: 지점에 대한 집계 값으로 교통 특성 정보가 수집됨
 - 경로형: 개별 통행 또는 차량에 대한 연속된 시간-공간 통행정보가 수집됨

신호 연동 모델 보고서

컬럼명		속성명	컬럼명		속성명
1	OCCUPY_RATE	점유율	16	LEFT_VAN	좌회전 VAN
2	TR_VOL	총 교통량	17	LEFT_TRUCK	좌회전 트럭
3	TRVL_SPD	통행 속도	18	LEFT_BUS	우회전 버스
4	QUEUE	초기대기열	19	RIGHT_BIKE	우회전 오토바이
5	WALKER	보행자	20	RIGHT_CAR	우회전 승용차
6	WALKER_ILLEGAL	불법보행자	21	RIGHT_SUV	우회전 SUV
7	GO_BIKE	직진 오토바이	22	RIGHT_VAN	우회전 VAN
8	GO_CAR	직진 승용차	23	RIGHT_TRUCK	우회전 트럭
9	GO_SUV	직진 SUV	24	RIGHT_BUS	우회전 버스
10	GO_VAN	직진 VAN	25	UTURN_BIKE	유턴 오토바이
11	GO_TRUCK	직진 트럭	26	UTURN_CAR	유턴 승용차
12	GO_BUS	직진 버스	27	UTURN_SUV	유턴 SUV
13	LEFT_BIKE	좌회전 오토바이	28	UTURN_VAN	유턴 VAN
14	LEFT_CAR	좌회전 승용차	29	UTURN_TRUCK	유턴 트럭
15	LEFT_SUV	좌회전 SUV	30	UTURN_BUS	유턴 버스

표 1 스마트 교차로 수집 데이터 개요

2.2. 교통량 데이터 기반 교통 특성 분석

2.2.1. 분석 대상 지역



그림 2 시범 분석 구간

- 도안대로 충대정문오거리 ~ 원골네거리를 대상으로, 2020년 5월 8일 ~ 2020년 7월 13일에 대한 시범 분석을 수행함
- 스마트교차로 데이터를 기반으로 요일 특성에 따른 시간대별 교통량 및 교차로 회전율을 분석함
- 분석 대상 지역 스마트교차로

신호 연동 모델 보고서

- 방향별 교통량 및 대기행렬길이 검지
- 충대오거리, 유성네거리, 진터네거리, 원골네거리
- 분석 대상 지역 일반교차로
 - 스마트교차로 간 소요시간을 거리비례로 나눠서 자유흐름 소요시간 산정
 - 온천교네거리, 홍인장네거리, 유성온천네거리, 도안1단지(단), 도안1단지네거리, 도안5단지네거리

2.2.2. 분석 대상 지역 연동 그룹 (SA) 현황



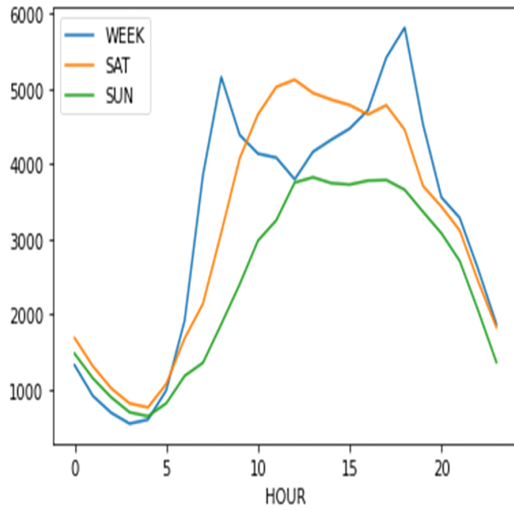
그림 3 시범 분석 구간 연동 그룹

- 전통적인 교통 신호 연동은 최소제어단위(SA : Sub-Area) 기반으로 이루어짐
- 최소제어단위(SA)를 구성하는 교차로는 중요교차로, 준중요교차로, 비중요교차로가 있으며 중요교차로(CI : Critical Intersection)에서 최적의 주기와 녹색시간이 결정되고 읍셋 기준을 결정

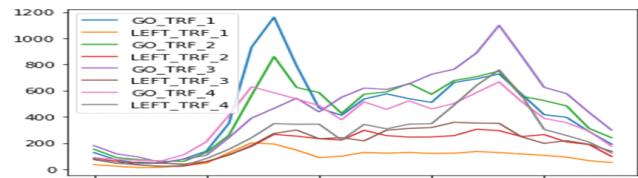
2.2.3. 중요교차로 (CI : Critical Intersection) 교통량 특성 분석

- 분석 대상 지역 중요교차로, 유성네거리에 대한 시간대별 회전 교통량 특성 분석
 - 진터네거리의 경우 진터지하차도를 통해 통행하는 교통류가 대다수임

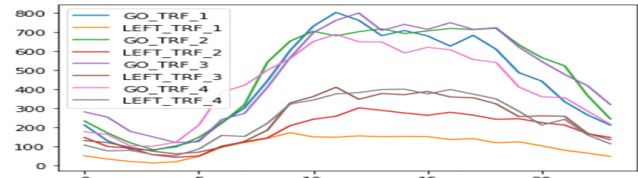
신호 연동 모델 보고서



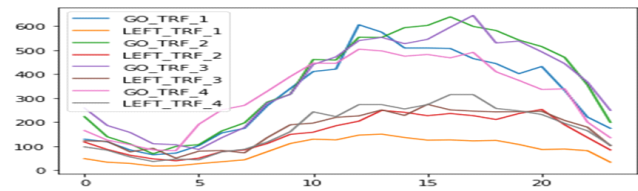
(a) 평일, 토/일요일 시간별 교통량



(b) 평일 시간별 회전 교통량



(c) 토요일 시간별 회전 교통량



(d) 일요일 시간별 회전 교통량

그림 4 유성네거리 교통량 개요

2.2.4. 분석 대상 지역 교통량 특성 분석

- 스마트 교차로(충대오거리, 유성네거리, 진터네거리, 원골네거리)의 방향별 회전 교통량을 분석함 (9:30 AM ~ 10:30 AM)

교차로	방향	회전 방향		
		GO	LEFT	RIGHT
충대오거리	충대도서관방면	148	241	30
	한빛아파트방면	100	376	294
	월평방면	86	14	153
	궁동방면	37	37	10
	온천교방면	0	150	53
유성네거리	온천교방면	159	34	53
	만년교방면	159	58	11
	봉명동방면	148	72	53
	구암역방면	145	93	94
진터지하차도	만년교방면	243	29	45
	봉명중학교방면	14	71	24
	도안고등학교방면	199	31	57
	인삼골네거리방면	12	42	36
원골네거리	유성온천역2번출구방면	165	19	6
	원신흥동방면	28	35	30
	도안고등학교방면	153	28	20
	유성온천역7번출구방면	30	14	31

표 2 스마트 교차로 회전 교통량

2.2.5. 연동 방향 통과 교통량

- 축 기반 연동 모델의 기본 입력 수치를 마련하기 위해 축 방향 통과교통량을 정리함



그림 5 스마트교차로 연동 방향 직진 교통량

3. 신호 연동 최적화 모델, ALPHA BAND

3.1. 연동폭 기반 설계

- 단일 교차로에서 최적화된 신호를 이용하여 축 단위 교차로 간 신호 연동을 진행함
 - 연동 교차로 간 TOD 및 신호 주기가 동일해야 함
- 양방향 교통량을 고려하여 연동폭을 정하고 오프셋(Offset)을 조정함

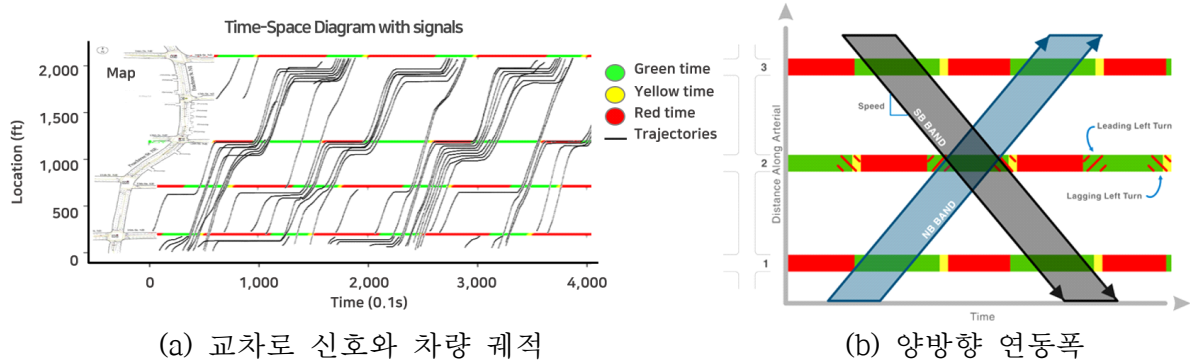


그림 6 연동폭 기반 설계 개념도

3.2. 신호 연동 최적화 모델 ALPHA - BAND

3.2.1. 신호 연동 최적화 모델 흐름도

- 스마트 교차로를 통해 검지한 데이터에서 최적 신호 모델에 대입할 데이터를 추출함
 - 교차로 간 소요 시간, 교차로 진입 방향별 교통량을 반영

신호 연동 모델 보고서

- 교통 시뮬레이션을 통해 최적 신호 모델을 검증하고 실제 교통 신호 데이터에 대입하여 검증함



그림 7 신호 연동 최적화 모델 흐름도

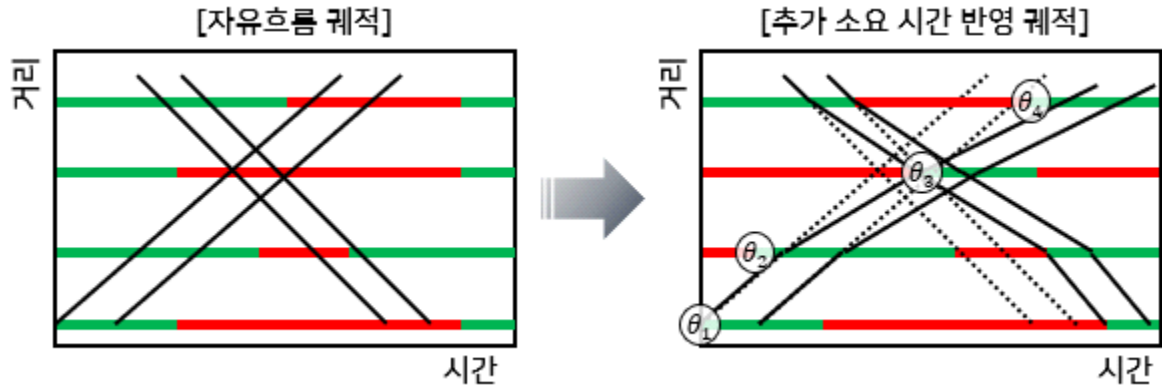
3.2.2. 최적화 모델 변수 설정

변수	설명
IS	교차로 모음, $i \in IS$
g_i	연동 방향 녹색 현시 길이
pg_i	주기 내의 연동 방향 현시 이전 녹색 현시 길이 합
C	연동 그룹 교차로 신호 주기
bw^O	진출 방향 연동폭
bw^I	진입 방향 연동폭
t_i^O	진출 방향 i_{th} 교차로에서 $(i+1)_{th}$ 교차로까지 최소 소요 시간
t_i^I	진입 방향 $(i+1)_{th}$ 교차로에서 i_{th} 교차로까지 최소 소요 시간
θ_i	교차로 오프셋
st_i^O	진출 방향 연동폭 시작 지점
st_i^I	진입 방향 연동폭 시작 지점
et_i^O	진출 방향 연동폭 종료 지점
et_i^I	진입 방향 연동폭 시작 지점
α_i^O	진출 방향 추가 소요 시간
α_i^I	진입 방향 추가 소요 시간
p^O	진출 방향 교차로 신호 주기 반복 회수
p^I	진입 방향 교차로 신호 주기 반복 회수

표 3 신호 연동 모델 변수 설정

3.2.3. 목적 함수 설정

- 기존 연동폭 기반 최적화 모델의 짧은 연동 범위를 개선하기 위하여 승용차 궤적의 변화를 가함
- 각 교차로 구간별로 추가 소요 시간(ALPHA)을 반영하여 넓은 범위를 한 번에 연동할 수 있는 모델을 개발함



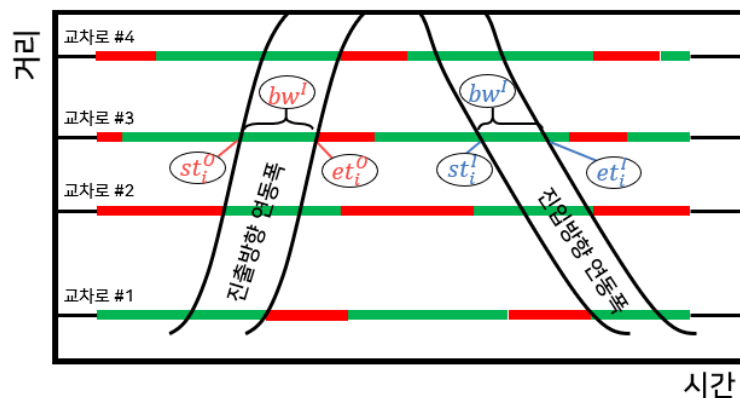
$$\arg \min_{\theta_i} \sum_i (\alpha_i^O + \alpha_i^I)$$

그림 8 추가 소요 시간을 반영한 목적 함수 설정

- 구간별 추가 소요 시간을 최소화하는 교차로별 오프셋 값을 산출함

3.2.4. 제약조건 설정

- 연동폭 시작 지점과 연동폭 종료 지점 사이의 관계를 표현함



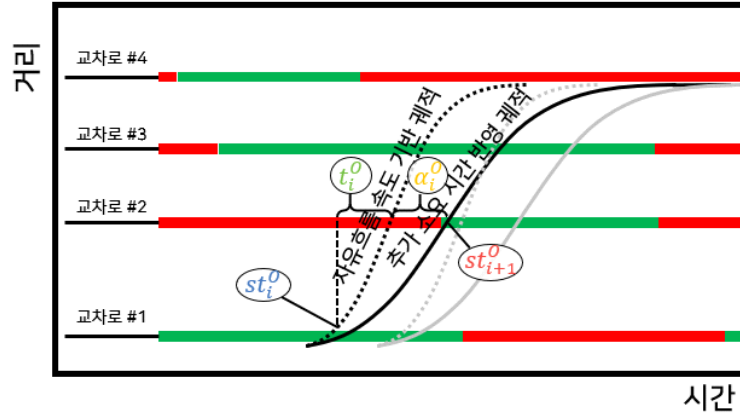
$$et_i^O = st_i^O + bw^O$$

$$et_i^I = st_i^I + bw^I$$

그림 9 연동폭 시작과 종료 관계

신호 연동 모델 보고서

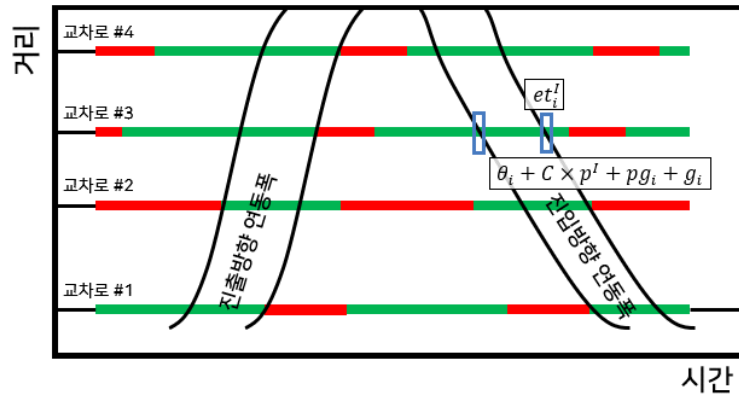
- 추가 소요 시간을 고려하여 인접 교차로 간 소요 시간을 반영함



$$\begin{aligned} st_{i+1}^O &= st_i^O + \alpha_i^O + t_i^O & st_{i+1}^I &= st_i^I + \alpha_i^I + t_i^I \\ et_{i+1}^O &= et_i^O + \alpha_i^O + t_i^O & et_{i+1}^I &= et_i^I + \alpha_i^I + t_i^I \end{aligned}$$

그림 10 인접 교차로 소요 시간 관계

- 각 교차로의 연동폭과 녹색 현시 사이의 포함 관계를 반영함



$$\begin{aligned} \theta_i + C \times p^O + pg_i &\leq st_i^O & \theta_i + C \times p^I + pg_i &\leq st_i^I \\ \theta_i + C \times p^O + pg_i &\leq et_i^O & \theta_i + C \times p^I + pg_i &\leq et_i^I \\ \theta_i + C \times p^O + pg_i + g_i &\geq st_i^O & \theta_i + C \times p^I + pg_i + g_i &\geq st_i^I \\ \theta_i + C \times p^O + pg_i + g_i &\geq et_i^O & \theta_i + C \times p^I + pg_i + g_i &\geq et_i^I \end{aligned}$$

그림 11 연동폭 및 녹색 현시 포함 관계

신호 연동 모델 보고서

- 각 교차로의 오프셋은 0과 신호 주기 사이의 값으로 주어짐

$$\theta_i \geq 0$$

$$\theta_i \leq C-1$$

- 신호 주기 반복 회수는 음이 아닌 정수의 값으로 주어짐

$$p^O, p^I \geq 0$$

$$p^O, p^I \in \mathbb{Z}$$

- 연동폭 시작 및 종료 지점은 양의 값을 가짐

$$st_i^O, st_i^I, et_i^O, et_i^I \geq 0$$

4. 최적화 모델 기반 현시 설계 및 성능 검증

4.1. 적용 범위

- 모델 개발 및 검증을 위한 시뮬레이션 적용 범위
 - 공간적 범위 : 도안대로 충대정문오거리 ~ 원골네거리
 - 시간적 범위 : 2020년 5월 8일 ~ 7월 13일 매주 수요일 09:30 ~ 10:30
- 모델 검증을 위한 실증 적용 범위
 - 공간적 범위 : 도안대로 충대정문오거리 ~ 원골네거리
 - 시간적 범위 : 2021년 11월 24일 09:30 ~ 10:30

4.2. 실증용 현시 설계 시 고려사항

- 기존 현시 형태 그대로 유지
 - 시민들의 혼동을 최소화하여 안전을 도모함
- 방향별 최소녹색시간 고려
 - 횡단보도 보행시간을 확보하여 현시를 설계함
- TOD 삼입

신호 연동 모델 보고서

- 기존 TOD에 포함되도록 실증 시간 범위를 설정함
- 기존 TOD의 경우, 평일에 09:30 ~ 17:00 가 하나로 묶여 있음
- TOD 시작 시간 한 시간, 09:30 ~ 10:30을 대상으로 실증을 진행함

4.3. 신호 연동 최적화 모델 결과

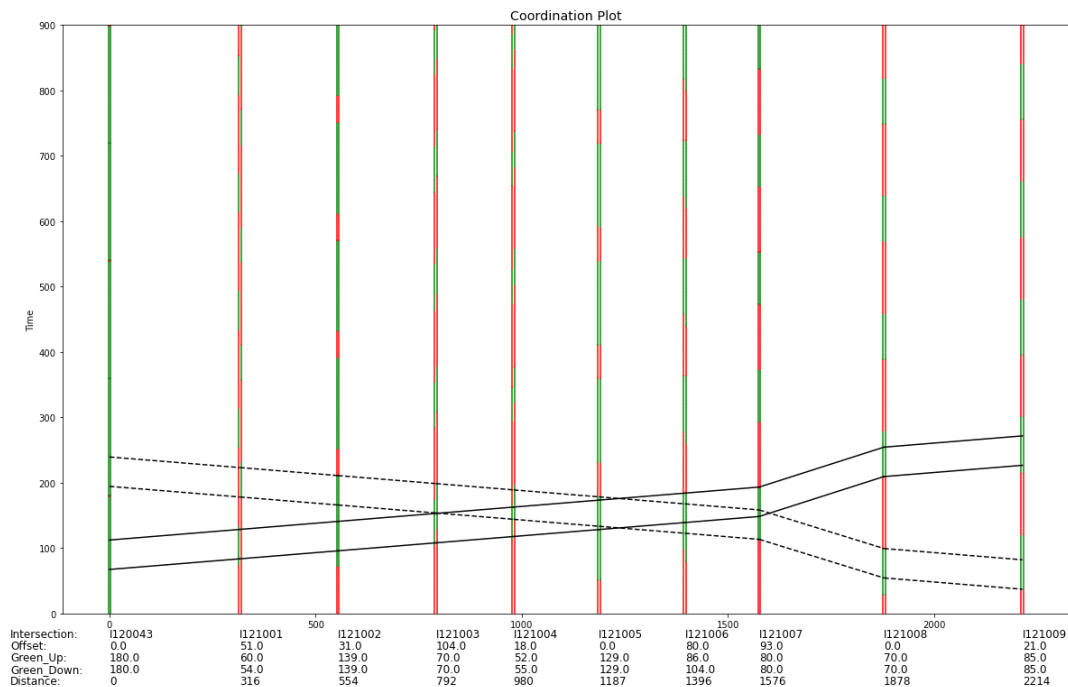


그림 12 연동 모델 및 양방향 연속 차량 궤적

- 신호 연동 최적화 모델에서 도출된 각 교차로 녹색 현시 및 오프셋을 반영하여 녹색 및 적색 선으로 표시함
- 양방향 진행 현시가 다른 경우를 대비하여 ARING PHASE와 BRING PHASE를 분리하고 각 교차로별 2개의 선을 표출함

4.4. 시뮬레이션 기반 모델 성능 평가

4.4.1. VISSIM 기반 마이크로 시뮬레이션 구축

- VISSIM은 미시적 교통 분석 도구로 모든 도로 이용자의 행태 및 이용자 간 상호작용에 대해 분석 가능

신호 연동 모델 보고서

- 분석 지역 및 분석 지표를 직접 설정하여 해당 분석 지역의 교통량, 지체시간, 구간 통행 속도 및 통행 시간, 서비스 수준 등 다양한 분석 지표 산출 가능

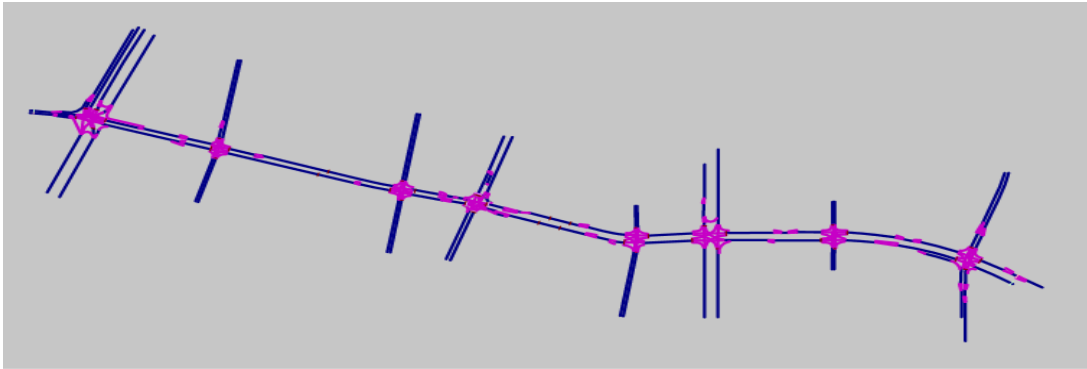


그림 13 충대정문오거리 ~ 원골네거리 시물레이션 환경

4.4.2. 마이크로 시물레이션 모델링 프로세스

- 도로망 구축
 - 실제 도로와 같은 환경을 구축하기 위해 차선 수, 차선폭, 제한속도 등을 구현함

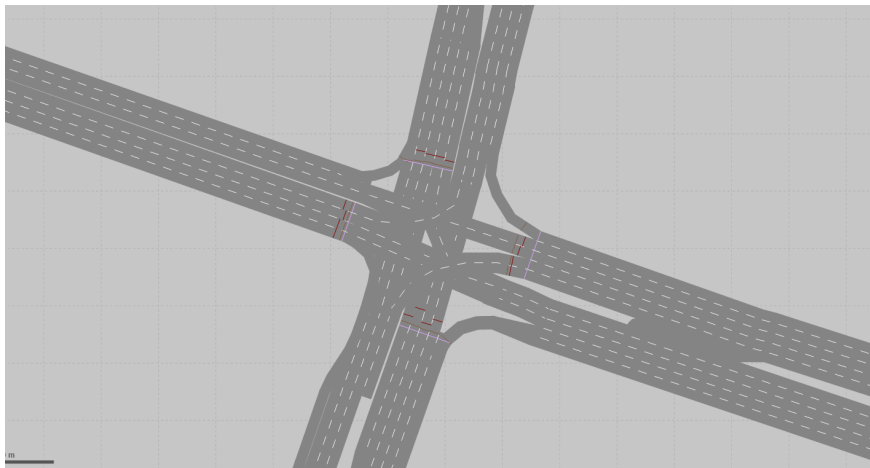


그림 14 도로망 구축

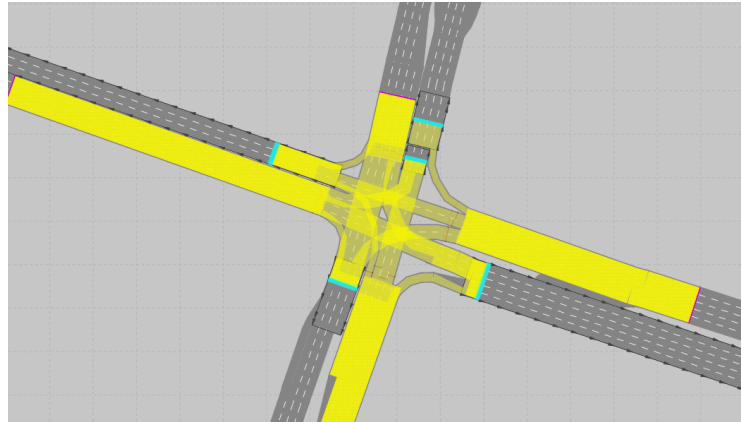
- 교통량 구축
 - Vehicle Input : 네트워크 내 통행할 차량의 수로, 분석 시간 마다 교통량 입력함
 - Vehicle Route : 교차로 진입 교통량에 대한 방향별 교통량 입력, 각 진행

신호 연동 모델 보고서

방향별 시·종점을 지정하여 해당 경로 교통량을 방향별로 분배하여 입력함

No	Name	Link	Volume(0)
1	원골네거리 남쪽	36	190.0
2	원골네거리 서쪽	57	93.0
3	원골네거리 동쪽	53	75.0
4	진터네거리 서쪽	71	109.0
5	진터네거리 동쪽	67	90.0
6	유성네거리 서쪽	9	228.0
7	유성네거리 동쪽	1	332.0
8	충대오거리 서쪽	85	670.0
9	충대오거리 대학로	93	253.0
10	충대오거리 한밭대로	90	203.0
11	충대오거리 북쪽	24	84.0

(a) Vehicle Input



(b) Vehicle Route

그림 15 교통량 구축

○ 교통 신호 구축

- Signal Control을 통해 교차로 신호 운영을 위한 각 교차로 방향별 신호 현시, 주기, 연동 값 등을 입력함
- Basemap 상의 교차로 정지선에 맞춰 Signal Head를 구축함

No	Signal group	Signal sequence	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170				
1	Signal group 1	Re	0	44																	0	44		3
2	Signal group 2	Re			47																47	93		3
3	Signal group 3	Re				96															96	122		3
4	Signal group 4	Re					96														96	145		3
5	Signal group 5	Re						125													125	177		3
6	Signal group 6	Re							148												148	177		3

(a) Signal Controller



(b) Signal Head

그림 17 교통 신호 구축

4.5. 신호 연동 최적화 모델 결과 평가

4.5.1. 네트워크 전체 성능 평가

- 평균 속도, 평균 지체시간, 평균 정차 회수, 평균 정차 시간 등의 지표를 통해 네트워크의 성능을 평가함
- 연동축을 비롯하여 간선축에 수직으로 교차하는 부도로의 교통량까지 모두 반영됨

신호 연동 모델 보고서

- 평균 속도 2.43%, 평균 지체시간 3.95%, 평균 정차 회수 3.42%, 평균 정차 시간 3.88% 개선되었음을 확인함

변수	평균 속도	평균 지체시간	평균 정차 회수	평균 정차 시간
기존	27.56	73.35	1.17	58.32
최적화	28.23	70.45	1.13	56.06
개선율	2.43%	3.95%	3.42%	3.88%

표 4 네트워크 전체 성능

4.5.2. 연동측 평균 속도 및 통행 시간 변화 평가

- 간선측 신호 연동의 경우, 신호 연동의 대상이 되는 연동측을 기준으로 연동 모델의 성능을 검증함
- 교차로 구간별로 통과 교통류의 평균 통행 시간 및 평균 속도를 검지함

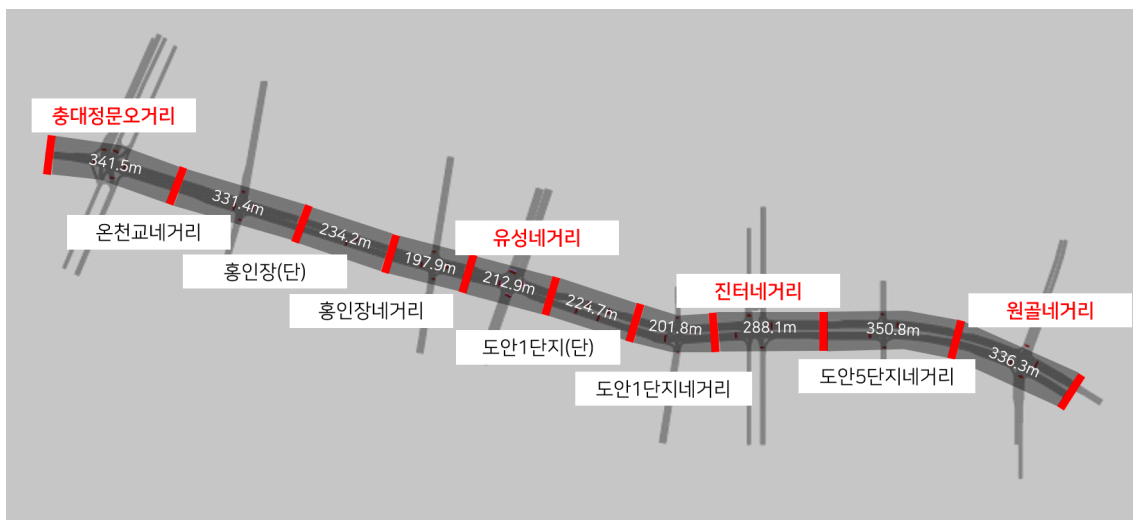


그림 18 교차로 구간 기준점

- 남 → 북 방향 : 거의 변동이 없었음
 - 구간별 속도 산술 평균 : 40.6km/h → 40.4km/h
 - 전체 평균 통행 시간 : 393.5s → 392.2s
- 북 → 남 방향 : 속도와 통행 시간 각각 26.1%, 11.2%의 개선을 보였음
 - 구간별 속도 산술 평균 : 35.6km/h → 44.9km/h, 26.1% 속도 향상
 - 전체 평균 통행 시간 : 393.1s → 349.2s, 11.2% 평균 통행 시간 감축

신호 연동 모델 보고서

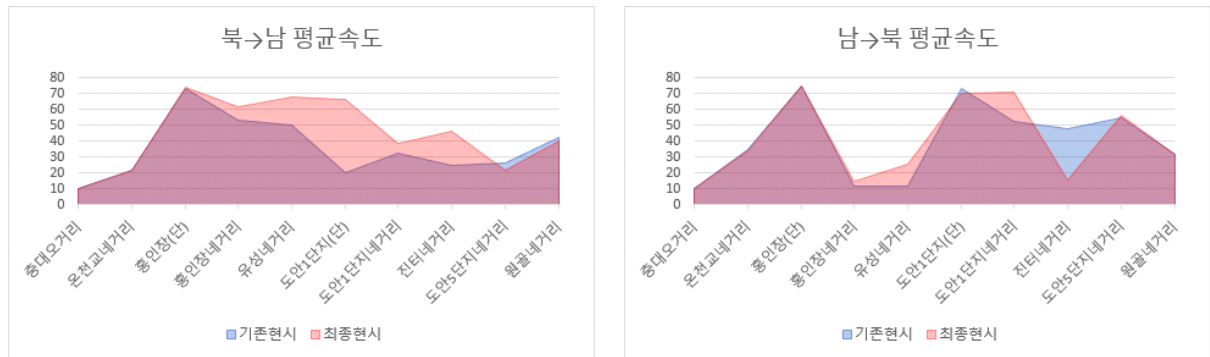


그림 19 평균 속도 방향별 비교



그림 20 평균 통행 시간 방향별 비교

방향 (남→북)		충대 오거리	온천교 네거리	홍인장 (단)	홍인장 네거리	유성 네거리	도안 1단지 (단)	도안 1단지 네거리	진터네 거리	도안 5단지 네거리	원골 네거리	전체
통행 속도	기존	10.4	34.7	74.7	12.1	12.1	73.8	52.9	48.3	55.3	31.8	40.6
	최적화	10.3	34.1	74.7	14.9	25.3	70.0	71.1	15.6	56.5	31.6	40.4
방향 (북→남)		충대 오거리	온천교 네거리	홍인장 (단)	홍인장 네거리	유성 네거리	도안 1단지 (단)	도안 1단지 네거리	진터네 거리	도안 5단지 네거리	원골 네거리	전체
통행 속도	기존	10.4	21.9	73.6	53.3	50.2	20.5	32.5	25.3	26.1	42.5	35.6
	최적화	10.2	22.0	73.8	61.7	67.7	66.7	38.5	46.7	22.1	39.9	44.9

표 5 구간별 평균 속도 (km/h)

방향 (남→북)		충대 오거리	온천교 네거리	홍인장 (단)	홍인장 네거리	유성 네거리	도안 1단지 (단)	도안 1단지 네거리	진터네 거리	도안 5단지 네거리	원골 네거리	전체
통행 속도	기존	118.7	34.4	11.3	58.9	63.3	11.0	13.7	21.5	22.8	38.0	393.5
	최적화	119.0	34.9	11.3	47.7	30.2	11.6	10.2	66.6	22.4	38.4	392.2
방향 (북→남)		충대 오거리	온천교 네거리	홍인장 (단)	홍인장 네거리	유성 네거리	도안 1단지 (단)	도안 1단지 네거리	진터네 거리	도안 5단지 네거리	원골 네거리	전체
통행 속도	기존	118.6	54.6	11.5	13.4	15.3	39.5	22.3	41.0	48.5	28.5	393.1
	최적화	120.1	54.2	11.4	11.5	11.3	12.1	18.9	22.2	57.2	30.3	349.2

표 6 구간별 평균 통행 시간 (s)

4.5.3. 시사점

- 전체 네트워크 평균 속도(28.23km/h)와 연동 방향 평균 속도(남→북 : 40.4km/h, 북→남 : 44.9km/h)가 크게 차이 나는 것은 연동축을 통행하는 통행류의 연속 흐름을 고려하여 신호 설계가 이루어졌기 때문임
 - 이는 기존 신호에서도 같은 경향성을 나타내었음
- 전체 네트워크 개선율보다 연동 방향 개선율이 높은 것은 축 기반 최적화를 시행하였기 때문임
 - 간선축 교통류가 정차 없이 통행할 수 있는 옵션으로 설계되어 부도로 진입 교통류는 간선축 진입 후 한 번의 정차가 수반되어야 함
 - 간선축 교통량 비중이 늘어나는 PEAK HOUR에 모델의 성능이 더욱 향상될 것을 시사함