

2024 추계학술대회 한국시뮬레이션학회

노선 효율성 분석을 위한 버스 운영 시스템 모델링 및 시뮬레이션

Modeling and Simulation of a Bus Operation System for Analyzing Route Efficiency

김재현, 김규리, 배장원

한국기술교육대학교 산업경영학과

braincom07@koreatech.ac.kr

목 차

1. 서론

1.1 연구배경

1.2 연구목표

2. 시뮬레이션 모델링

2.1 BusSim

2.2 시뮬레이션 방법론(DEVS)

2.3 이용 데이터

2.4 결합모델, 원자모델

2.5 시뮬레이션 입출력

2.6 검증

2.7 노선조정 예시

3. 결론

3.1 연구 요약

3.2 시사점

3.3 추후 연구

1. 서론

1.1 연구 배경

- 서울시는 버스 준공영제 도입으로 버스 노선 조정을 위한 여건을 갖추었음에도 적극 노선을 조정하지 않고 있음
이는 버스노선 조정에 대한 과학적인 분석 방법론이 없기 때문(정창용, 손의영, 정연찬, 2013)
- 국내 시내버스는 높은 운송원가, 낮은 시내버스 요금 등으로 재정적자가 발생하고 있으며, 대부분의 도시에서는 시내버스 운영에 따른 적자에 대하여 재정지원을 수행하고 있음(이범규, 2019)
- 버스 준공영제 운영 지자체가 증가하는 상황에서, 버스 노선 조정 업무는 점점 중요해지고 있음
버스 노선의 합리적 조정을 통해 버스 이용자의 통행 편의성을 증진시킬 수 있으며, 버스 노선의 효율화를 통해 버스 운영에 소요되는 재정지원 수준을 유지할 수 있음(손상훈, 송혜인, 2022)

1.2 연구 목표

- 버스 노선 조정 지원을 위해 버스 노선별 효율성 분석 및 평가를 위한 시뮬레이터를 개발

정창용, 손의영, 정연찬. (2013). 준공영제에서의 서울시 버스노선 조정 개선방안. 교통연구, 20(2), 77-90.

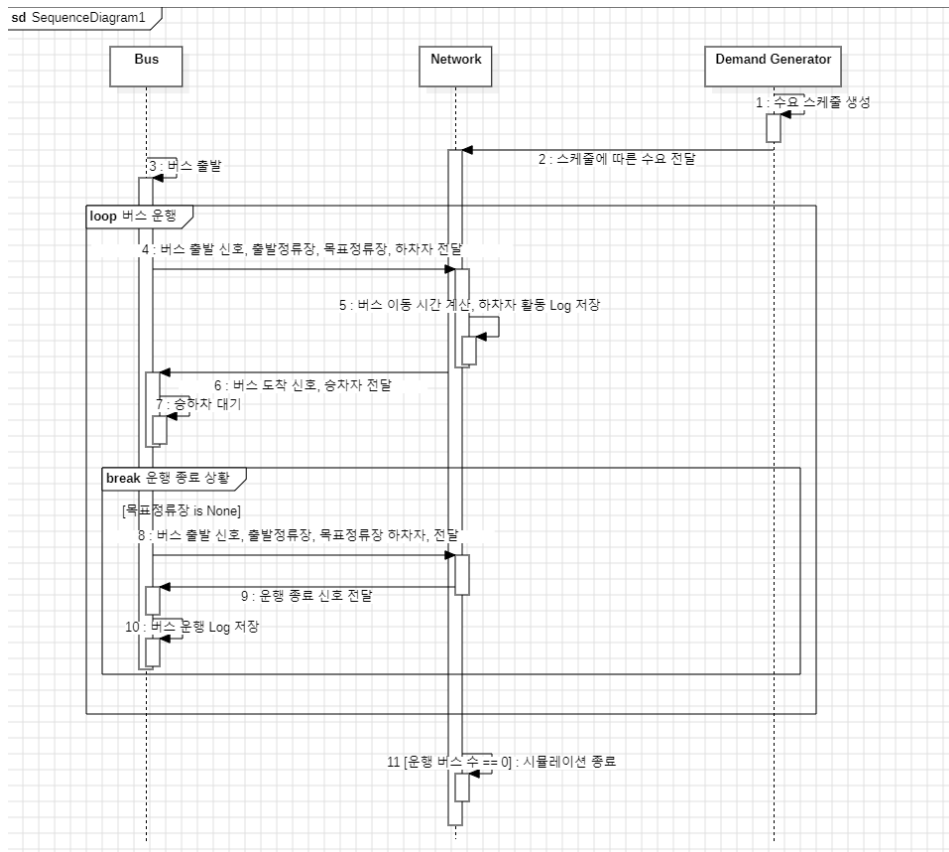
이범규. (2019-02-21). 국내 시내버스 경영 및 서비스 평가 고찰 및 개선방안. 대한교통학회 학술대회지, 서울.

손상훈, 송혜인. (2022). 버스 노선의 합리적 조정을 위한 대안 발굴 및 비교 사례 소개: 제주특별자치도 장거리 급행 노선을 중심으로. 교통기술과정책, 19(5), 28-37.

2. 시뮬레이션 모델링

2.1 BusSim

- 시뮬레이션 프로세스



- 서울시 강남구를 예시로 시뮬레이션 모델링 수행
- 시뮬레이션은 자정을 기점으로 작동 시작
- 수요 생성기(Demand Generator)에서 승하차 OD 데이터를 바탕으로 수요 생성

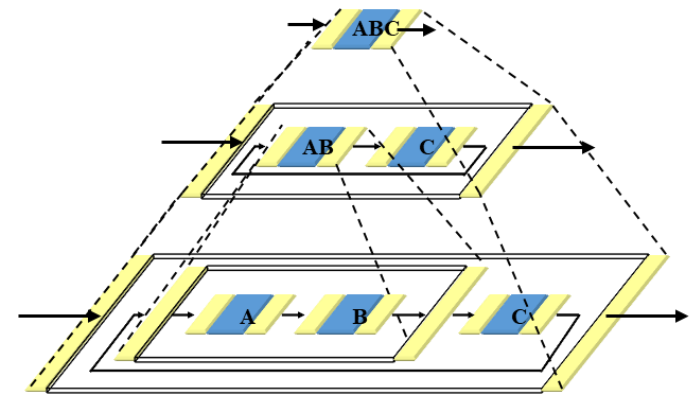
- 버스가 각 정류장에서 출발하며 네트워크에 출발 신호 송신
 - 출발 정류장, 목표 정류장, 하차자 정보
- 출발신호를 받은 네트워크는 다음 정류장까지의 이동 시간을 계산
- 각 버스의 도착시간이 될 때마다 버스에 도착 신호 송신
 - 승차자 정보
- 버스 종점 도착 시 운행 종료

2. 시뮬레이션 모델링

2.2 시뮬레이션 방법론

DEVS (Discrete Event Systems Specifications) 형식론 (Formalism) [1]

- 이산사건 시스템 기반 모델링 및 시뮬레이션 도구
- 원자 모델 (Atomic Model)과 결합 모델 (Coupled Model)로 구성
 - 원자 모델 (AM): 시스템 상의 분해 불가능한 컴포넌트 모델링
 - 결합 모델 (CM): 시스템 구성 컴포넌트 및 구조 모델링
- 구조적 모델링 (structured modeling) $\leftarrow$ AM + CM 의 조합



$M = \langle X, Y, Q, \delta_{ext}, \delta_{int}, ta, \lambda \rangle$ ← 시스템이론적 이산사건 모델 M

X : 입력사건 집합;

Y : 출력사건 집합;

Q : 상태 집합;

$Q_T = \{(q, e) \mid q \in Q, 0 \leq e \leq ta(q)\}$;

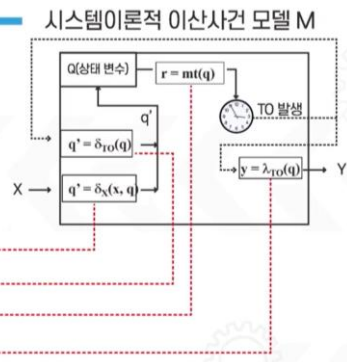
$q_T = (q, e)$: 시간 명세 상태

$\delta_{ext}: Q_T \times X \rightarrow Q$: 외부 상태전이 함수;

$\delta_{int}: Q_T \rightarrow Q$: 내부 상태전이 함수;

$ta: Q \rightarrow R(\text{실수 집합})$: 시간 전진 함수;

$\lambda: Q_T \rightarrow Y$: 출력 함수;



$DN = \langle X, Y, M, EIC, EOC, IC, SELECT \rangle$

X/Y : 입/출력사건 집합;

M : DN 내부에 있는 모든 컴포넌트 DEVS 모델;

$EIC \subseteq DN.X \times \cup_i M_i.X_i$: 외부 입력 연결 관계;

$EOC \subseteq \cup_i M_i.Y_i \times DN.Y$: 외부 출력 연결 관계;

$IC \subseteq \cup_i M_i.Y_i \times \cup_j M_j.X_j$: 내부 연결 관계;

$SELECT: 2^M - \emptyset \rightarrow M$: 우선 이벤트 선택 규칙

EIC: External Input Coupling

EOC: External Output Coupling

IC: Internal Coupling

모델들의 연결 명세(CR)

(모델명.사건명, 모델명.사건명)

2. 시뮬레이션 모델링

2.3 이용 데이터

데이터명	활용 목적	출처	건수	시점
버스 정류장 승하차 인원 수	승객의 노선별 정류장별 승하차 수요 샘플 제작	서울열린데이터광장	41,675개	2023.12.
버스 정류장	위경도 데이터를 활용해 강남구 내부 정류장 파악	서울열린데이터광장	626개	2024.01.01
버스 노선 스케줄	노선별 첫차, 막차, 배차간격을 확인하여 버스 출발시간 스케줄 구성	서울열린데이터광장	102개	2024.01.01
정류장 이동시간	노선별 정류장 간 이동시간 파악	서울열린데이터광장	77,415개	2024.01.01
도로별 통행속도	노선 조정 시 기존에 버스 이동 시간 기록이 존재하지 않는 경로의 이동시간을 계산	서울시 TOPIS (Transport Operation & Information Service)	5,071개	2024.01.01
강남구 GIS 정보	버스 통행을 위한 강남구 도로 네트워크를 표현해 정류장 간 거리를 계산	OpenStreetMap	Node : 3,218 Edge : 8,691	2024.10.26

2. 시뮬레이션 모델링

2.3 이용 데이터 – 버스 정류장 승하차 인원

- 버스 정류장, 노선, 시간대별 승하차 인원 정보 정류장 데이터(41,675 rows × 57 columns)

사용년월	노선번호	노선명	표준버스정류장ID	버스정류장ARS번호	역명	00시승차	00시하차	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	교통수단타입코드	교통수단타입명	등록일자		
202312	741	741번(진관차고지~현인릉입구)	100000001	1001	종로2가사	132	160	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	10	서울간선버스	20240103	
202312	N37	N37번(송파공영차고지~진관공영차고지)	100000001	1001	종로2가사	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51	서울심야버스	20240103	
202312	470	470번(상암차고지~안골마을)	100000001	1001	종로2가사	127	133	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	10	서울간선버스	20240103	
202312	N37	N37번(진관공영차고지~송파공영차고지)	100000001	1001	종로2가사	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51	서울심야버스	20240103	
202312	100	100번(하계동~용산구청)	100000002	1002	창경궁.서	0	0	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	6	10	서울간선버스	20240103	
202312	107	107번(민락동차고지~동대문)	100000002	1002	창경궁.서	0	5	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	7	4	3	6	10	서울간선버스	20240103
202312	104	104번(강북청소년수련관난나~송례문)	100000002	1002	창경궁.서	4	0	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	10	서울간선버스	20240103	
202312	8101	8101번(도봉보건소~서소문)	100000002	1002	창경궁.서	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	서울지선버스	20240103	
202312	171	171번(용마문화복지센터~월드컵파크7단	100000002	1002	창경궁.서	0	0	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	10	서울간선버스	20240103	
202312	N31	N31정류 (국민대~강동공영차고지)	100000002	1002	창경궁.서	5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51	서울심야버스	20240103	

- 승객 OD 데이터(30,905 rows × 6 columns)

승객ID	시간대	랜덤생성시간	노선번호	승차 표준 버스정류장ID	하차 표준 버스정류장ID
MEMBER_1	00시	00:15:39	123000010	100000028	100000001
MEMBER_2	00시	00:19:54	123000010	100000028	100000001
MEMBER_3	00시	00:34:44	123000010	100000028	100000001
...	...	...	...	...	...
MEMBER_30904	23시	23:44:41	124900001	124900112	124900088
MEMBER_30905	23시	23:33:20	124900001	124900112	124900088

2. 시뮬레이션 모델링

2.3 이용 데이터 – 강남구 GIS 정보 + 버스 정류장

- 버스 정류장 데이터(626 rows × 9 columns)

STDR_DE	ROUTE_ID	ROUTE_NM	STTN_SN	NODE_ID	STTN_NO	NODE_NM	CRDNT_X	CRDNT_Y
20240101	100100124	17	1	102000271	3689	청암자이아파트	126.947027	37.534535
20240101	100100124	17	2	102000204	3298	청암동강변삼성아파트	126.9493177	37.53396791
20240101	100100124	17	3	102000227	3321	청심경로당	126.950688	37.533887
20240101	100100124	17	4	102000210	3304	원효2동주민센터	126.951395	37.534494
20240101	100100124	17	5	102000212	3306	산천동	126.953643	37.535322
20240101	100100124	17	6	102000214	3308	신창동세방아파트	126.954955	37.535708
20240101	100100124	17	7	102000216	3310	남이장군사당	126.9578221	37.53660802
20240101	100100124	17	8	102000218	3312	새마을금고	126.9595338	37.53707162

- 강남구 도로 네트워크(Node : 3,218, Edge : 8,691)



STDR_DE	ROUTE_ID	ROUTE_NM	STTN_SN	NODE_ID	STTN_NO	NODE_NM	CRDNT_X	CRDNT_Y
기준일	노선 ID	노선명	순번	노드 ID	ARS-ID	정류소명	경도	위도

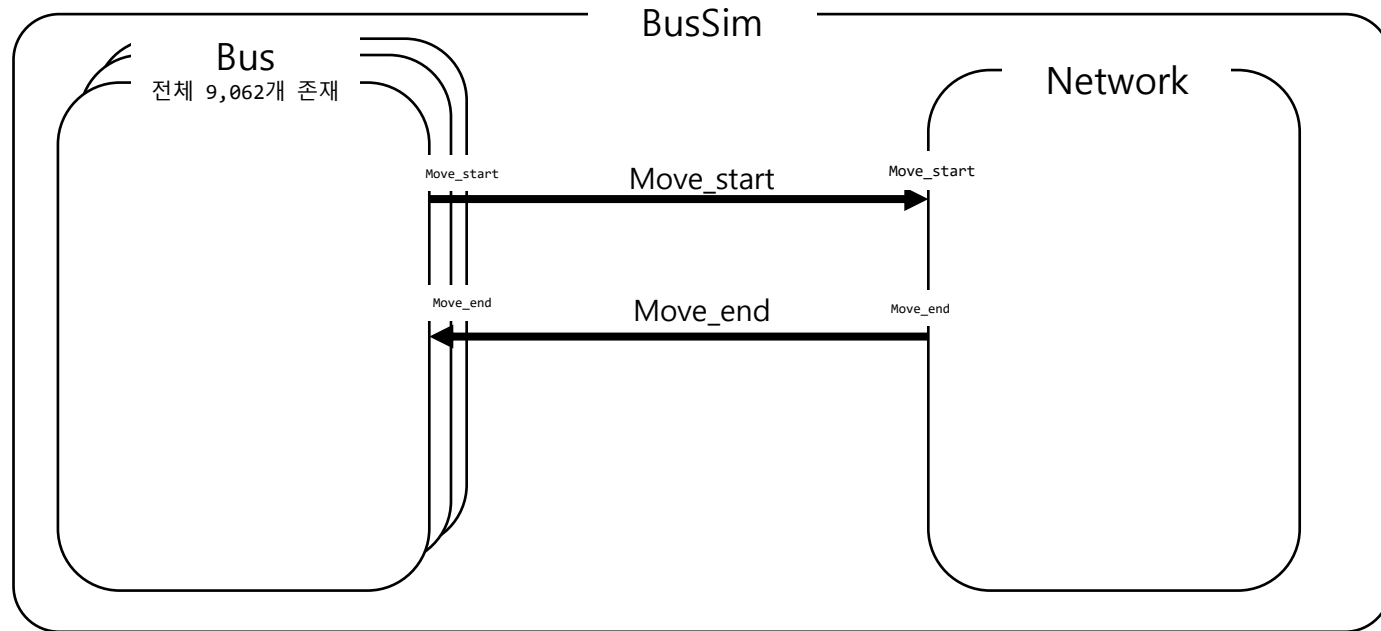
※ 노선 ID, 노드 ID : 국토부에서 제공하는 구분을 위한 ID / ARS ID : 서울시에서 제공하는 구분을 위한 ID
 노선명 : 실제 버스 노선 명 / 정류소명 : 실제 정류소 명 / 순번 : 각 버스 노선이 운행하며 정류장을 방문하는 순서



- 강남구 도로 네트워크에 버스 정류장 노드를 추가한 모습(626개 Node 추가)
 - 가장 가까운 Edge를 찾아, 그 Edge에 수직으로 접하는 선을 그어 연결함
 - 초록색 점은 도로간 교차점, 빨간색 점은 버스 정류장을 나타냄

2. 시뮬레이션 모델링

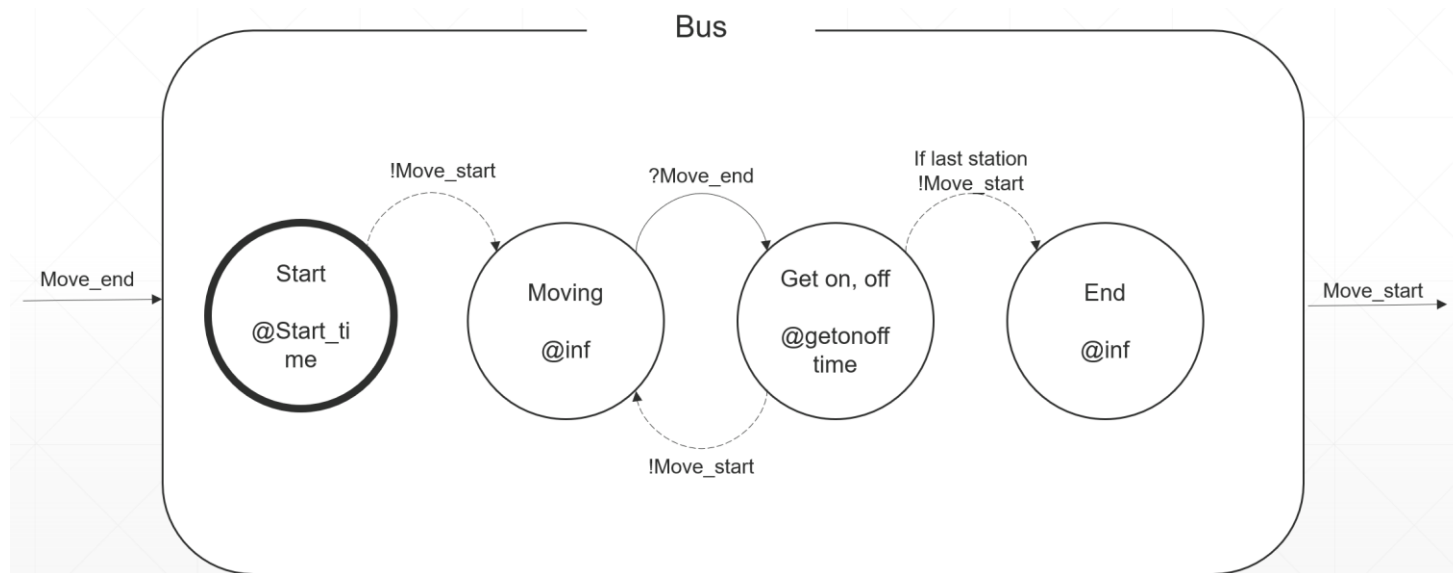
2.4 결합 모델



- 각각의 버스 원자 모델(Bus)이 네트워크 원자 모델(Network)에 Move_start 포트를 통해 출발 신호 전달
- 네트워크 원자 모델은 버스 원자 모델에 Move_end 포트를 통해 다음 정류장 도착 신호 전달
- 버스가 기점에서 출발하여 종점에 도착할 때까지 위의 과정을 반복

2. 시뮬레이션 모델링

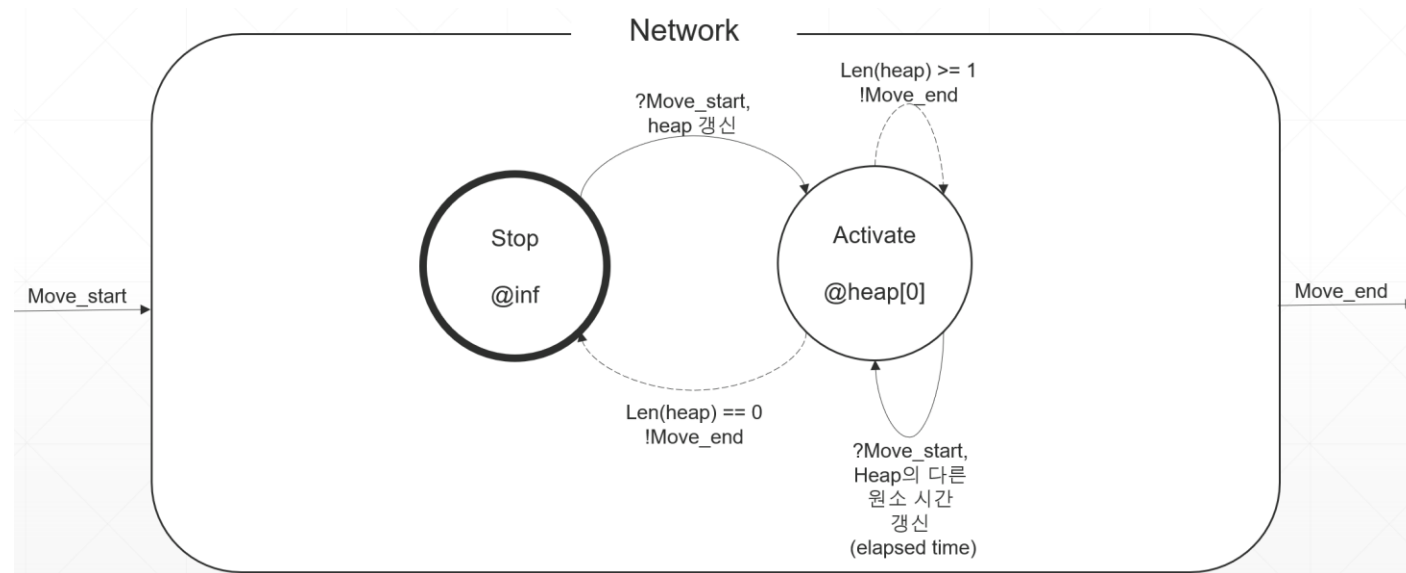
2.4 원자 모델 – Bus 모델



- 운행되는 각 버스들을 표현, 강남구 내의 운행되는 버스는 총 9,062개이기에 9,062개의 BusAtomic Model을 생성
- 버스 출발 전까지 Start 상태로 존재하다 출발하는 순간 Moving 상태로 전환
- 버스가 다음 정류장 도착 시 Get on, off 상태로 전환하여 승객 승하차 진행
 - $\text{getonofftime} = \max(\text{승차 인원 수}, \text{하차 인원 수})$
- 승하차 종료 시 다시 Moving 상태로 전환, 종점 도착 시 Moving 대신 End 상태로 전환

2. 시뮬레이션 모델링

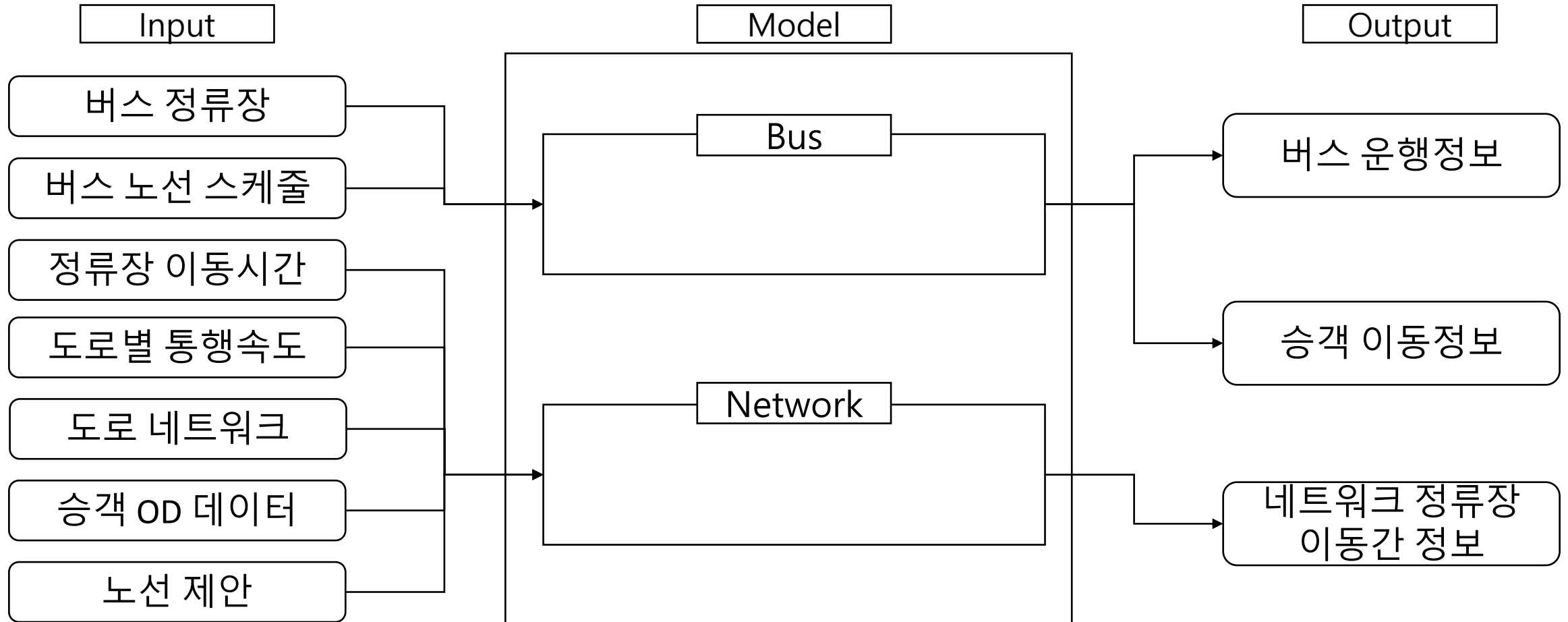
2.4 원자 모델 – Network 모델



- 강남구 도로 내 도로 네트워크와 버스의 이동, 승객 수요 관리
- 도로 네트워크에 버스 운행 시 **Activate** 상태, 모든 버스 운행 종료 시 **Stop** 상태
- 버스 출발 신호에서 받은 출발지와 목적지 정보를 바탕으로 이동 시간 계산
- 각 버스의 이동 시간을 기록한 후, 도착 시간이 되었을 때 도착 신호 전달

2. 시뮬레이션 모델링

2.5 시뮬레이션 입출력



2. 시뮬레이션 모델링

2.5 시뮬레이션 입출력

- 승객 OD 데이터

승객ID	시간대	랜덤생성시간	노선번호	승차 표준 버스정류장ID	하차 표준 버스정류장ID
MEMBER_1	00시	00:15:39	123000010	100000028	100000001
MEMBER_2	00시	00:19:54	123000010	100000028	100000001
MEMBER_3	00시	00:34:44	123000010	100000028	100000001

- 랜덤 생성 시간에 시뮬레이션 네트워크의 정류장에 승객을 생성
 - 승차 표준버스정류장 ID를 기반하여, 그 정류장에 승객을 생성
 - 승객 생성 시 승하차 표준버스정류장 ID를 기반으로 탑승 가능한 버스 후보군 선정
- 생성된 승객은 탑승 가능한 버스 후보군의 버스가 정류장에 도착하는 순간 해당 버스에 탑승

2. 시뮬레이션 모델링

2.5 시뮬레이션 입출력

- 버스 운행정보 출력 데이터
 - 각 버스별 최초 출발시간, 누적 탑승자 수, 누적 이동시간, 누적 이동거리 기록

Bus ID	출발시간	누적탑승자수	누적이동시간	누적이동거리
100100234	14400	28	1774	5565.443365
100100391	14400	4	717	8583.662008
100100075	15000	3	2834	24429.64124
100100596	15000	2	2034	8583.662008
100100062	14400	9	2308	24519.86514
100100068	15000	3	2991	24013.98856
100100585	6000	4	11147	29650.90848
100100409	14400	43	2871	8583.662008

- 승객 이동정보 출력 데이터
 - 모든 사람의 출발지, 도착지, 정상 도착 여부, 탑승 버스, 생성시간, 탑승시간, 하차시간, 탑승 버스 후보군 기록

ID	origin	destination	current_state	riding_bus	waiting_start_time	geton_bus_time	getoff_bus_time	want_buses
MEMBER_414	121000006	121000012	Arrived	100100585	2151	2346	2675	['100100063', '100100070', '100100073', '100100391', '100100392',
MEMBER_411	121000008	121000012	Arrived	100100585	2140	2460	2675	['100100063', '100100068', '100100070', '100100073', '100100391',
MEMBER_444	121000008	121000012	Arrived	100100585	2362	2460	2675	['100100063', '100100068', '100100070', '100100073', '100100391',
MEMBER_974	121000006	121000012	Arrived	100100409	16039	16517	16780	['100100063', '100100070', '100100073', '100100391', '100100392',
MEMBER_1000	121000008	121000012	Arrived	100100596	16651	16679	16805	['100100063', '100100068', '100100070', '100100073', '100100391',
MEMBER_998	121000010	121000014	Arrived	100100068	16630	16664	16833	['100100063', '100100068', '100100070', '100100073', '100100391',
MEMBER_1003	121000012	121000014	Arrived	100100068	16700	16830	16833	['100100019', '100100023', '100100024', '100100063', '100100068',

- 네트워크 정류장 이동간 정보 출력 데이터
 - 각 버스의 정류장 이동 기록, 이동 시간, 처음 강남구 외부에서 생성되어 내부로 들어올 때까지 걸린 시간을 기록

busID	moving_station_log	moving_TA_log	first_loading_time
100100585_0	[122000297, 122000299, 122000348,	[42, 54, 43, 205, 87, 10]	[859]
100100585_1500	[122000297, 122000299, 122000348,	[42, 54, 43, 205, 87, 10]	[859]
104000011_480	[122000093, 122000098, 122000114,	[105, 158, 69, 163, 12]	[2939]
100100585_3000	[122000297, 122000299, 122000348,	[57, 51, 36, 91, 82, 11]	[859]
100100589_600	[122000184, 122000185, 122000201,	[77, 123, 63, 115, 92, 9]	[3428]
100100589_1500	[122000184, 122000185, 122000201,	[77, 123, 63, 115, 92, 9]	[3428]
100100593_360	[121000011, 122000184, 122000185,	[132, 65, 139, 64, 159,	[4743]

2. 시뮬레이션 모델링

2.6 검증

- 노선별 방문 정류장 검증
 - 네트워크 정류장 이동간 정보 출력 데이터의 `moving_station_log`(방문 정류장 리스트)가 실제 데이터와 일치하는지 비교하였으며, 모두 정확히 방문하고 있음을 확인
- 노선별 정류장간 이동시간 검증
 - 네트워크 정류장 이동간 정보 출력 데이터의 이동시간을 정류장 이동시간 데이터 `rawdata`와 비교
 - MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 통해 확인, 정확도 99.98703%

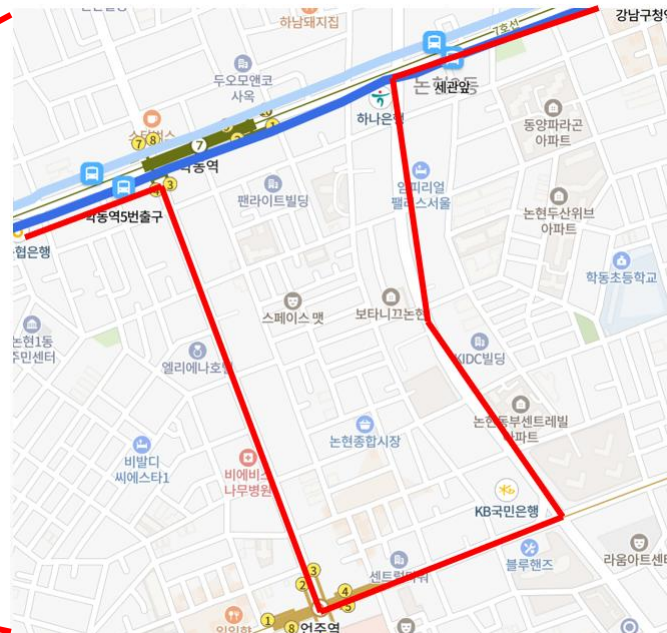
$$\frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right|$$

n : 정류장 쌍 간 이동 횟수
 Y_i : 원 데이터 상 정류장 쌍 이동 시간
 $\hat{Y}_i$: 시뮬레이션 상 정류장 쌍 이동 시간

2. 시뮬레이션 모델링

2.7 노선조정 예시

- 401번 노선 노선조정 실험



※ 파란색 : 기존 노선 / 빨간색 : 조정 노선

- 기존 직선 노선을 일부 우회하는 형태로 변경
 - 논현동 고개, 언주역2번 출구, 언주역5번 출구 정류장 추가 경유
- 조정 노선 추가 이동시간은 도로 네트워크와 도로별 통행속도 데이터를 활용하여 계산
 - 도로 네트워크에 기반하여 추가로 경유하는 정류장까지의 이동 거리 및 도로명 확인
 - 도로별 통행속도 데이터를 활용하여 추가된 경로의 이동속도 확인 및 이동시간 계산

2. 시뮬레이션 모델링

2.7 노선조정 예시

- 401번 노선 노선조정 실험

401번 기준	노선 변경 전	노선 변경 후	차이
전체 이동거리	24,159.87m	26,508.20m	+ 2,348.33m
탑승자 수	182명	267명	+ 85명
평균 운행시간	8,479.51초	8,524.54초	+ 45.03초
승객 평균 버스 대기 시간	984.61초	1,022.71초	+ 38.1초
승객 평균 버스 재차 시간	999.67초	684.56초	- 315.11초

- 정류장을 추가로 경유하며 노선이 우회되었기에 이동거리, 운행시간, 승객 버스 대기시간이 늘어난 모습을 확인할 수 있음
- 정류장이 추가되며 401번 이용자 수가 증가한 모습을 확인할 수 있음
- 승객 평균 버스 재차시간이 감소한 모습을 확인할 수 있음

	ID	origin	destination	current_state	riding_bus	want_bus	waiting_start_time	geton_bus_time	getoff_bus_time	want_buses
24057	MEMBER_30014	122000018	122000019	Arrived	100100062	NaN	83208	83499.0	83501.0	['100100062', '100100224', '100100595']
24058	MEMBER_30027	122000018	122000019	Arrived	100100062	NaN	83264	83499.0	83501.0	['100100062', '100100224', '100100595']
24441	MEMBER_30310	122000017	122000019	Arrived	100100062	NaN	84348	84768.0	84842.0	['100100062', '100100224', '100100595']

- 기존 3412번(100100224), 241번(100100595) 승객 수요를 401번이 대신 처리하는 것으로 확인되었음
- 영동시장(122000017)에서 논현동고개(122000019) 이동(두 정류장 이동), 학동역5번출구(122000018)에서 논현동고개(122000019) 이동(한 정류장 이동)을 대신 처리하는 모습이 확인됨
- 추가 탑승자들이 단거리 이동을 주로 하여, 승객 평균 재차시간이 줄어든 것으로 예상됨

3. 결론

3.1 연구 요약

- 버스 노선 조정 지원을 위한 버스 노선별 효율성 분석 및 평가를 위한 시뮬레이터 개발
- 서울시 강남구를 대상으로 실험을 진행

3.2 시사점

- 버스 노선별 효율성을 정량적으로 분석할 수 있도록 하였으며, 이는 추후 노선조정, 배차간격 조정 등의 효과를 미리 계산할 수 있도록 도울 수 있음

3.3 추후 개선점

- 승객들의 버스 선택 알고리즘 개선
- 승객들의 환승 고려

감사합니다.

본 연구는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.