

Characteristic Analysis on Urban Road Networks Using Various Path Models

Bee Geum[†] · Hwan-Gue Cho^{††}

ABSTRACT

With the advancement of modern IT technologies, the operation of autonomous vehicles is becoming a reality, and route planning is essential for this. Generally, route planning involves proposing the shortest path to minimize travel distance and the quickest path to minimize travel time. However, the quality of these routes depends on the topological characteristics of the road network graph. If the connectivity structure of the road network is not rational, there are limits to the performance improvement that routing algorithms can achieve. Real drivers consider psychological factors such as the number of turns, surrounding environment, traffic congestion, and road quality when choosing routes, and they particularly prefer routes with fewer turns. This paper introduces a simple path algorithm that seeks routes with the fewest turns, in addition to the traditional shortest distance and quickest time routes, to evaluate the characteristics of road networks. Using this simple path algorithm, we compare and evaluate the connectivity characteristics of road networks in 20 major cities worldwide. By analyzing these road network characteristics, we can identify the strengths and weaknesses of urban road networks and develop more efficient and safer route planning algorithms. This paper comprehensively examines the quality of road networks and the efficiency of route planning by analyzing and comparing the road network characteristics of each city using the proposed simple path algorithm.

Keywords : Shortest Path, Quickest Path, Simple Path, Road Network

다양한 경로 모형을 이용한 도시 도로망의 특성 분석

금 비[†] · 조 환규^{††}

요 약

최신 IT 기술의 발달로 자율주행 자동차의 운행이 현실화되고 있으며, 이를 위해 경로 탐색은 필수적이다. 일반적으로 경로 탐색에서는 이동 거리를 최소화하는 최단거리 경로와 이동 시간을 최소화하는 최단시간 경로가 제시된다. 그러나 이러한 경로의 품질은 도로망의 그래프 위상적 특성에 따라 달라진다. 도로망의 연결구조가 합리적이지 않으면 라우팅 알고리즘의 성능 개선에 한계가 있다. 실제 운전자들은 회전 횟수, 주변 환경, 교통체증, 도로 품질 등의 심리적 요소를 고려하며, 특히 회전이 적은 경로를 선호한다. 본 논문에서는 도로망 특성을 평가할 때 최단거리와 최단시간 경로뿐 아니라 회전이 가장 적은 경로를 찾는 단순 경로 알고리즘을 제시한다. 이를 통해 국내외 20개 주요 대도시 도로망의 연결 특성을 비교 평가하고, 도로망의 강점과 약점을 파악하여 효율적이고 안전한 경로 탐색 알고리즘을 개발할 수 있다. 제안된 단순 경로 알고리즘을 활용하여 각 도시의 도로망 특성을 비교 평가함으로써 도로망의 품질과 경로 탐색의 효율성을 종합적으로 검토한다.

키워드 : 최단거리 경로, 최단시간 경로, 단순 경로, 도로망 네트워크

1. 연구 동기

실제 도로망에서 운전자들이 출발지부터 목적지까지 경로를 탐색할 때, 최단거리 경로나 최단시간 경로와 같이 수학적

해, 우리나라 또는 해외의 플랫폼 회사들에서 제공하는 지도 애플리케이션의 경로 찾기(Path Finding)에서는 최단거리 경로(Shortest Path)와, 최단시간 경로(Quickest Path)가 빈번히 제공되고 있다. 하지만 이는 그다지 중요한 정보가 아니다. 왜냐하면 도심에서 실제 운전자들은 목적지까지 도달할 때 다양한 주변 환경적 요소에 의해 영향을 받는다. 예를 들어 교통체증, 도로의 품질, 주변 환경(예, 경치, 주변 상점, 편의시설, 전 기차 충전소) 등이 있으며, 이는 도심의 운전자들이 단지 수학적으로 최선의 경로가 아닌 심리적으로도 편안한 경로를 선호한다는 것을 보여준다. 현재 심리적으로 편안한 경로를 찾는

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

† 준 회 원 : 부산대학교 정보컴퓨터공학부 학사과정

†† 정 회 원 : 부산대학교 정보컴퓨터공학부 교수

Manuscript Received : April 23, 2024

Accepted : May 22, 2024

* Corresponding Author : Hwan-Gue Cho(hgcho@pusan.ac.kr)

관련 연구가 부족한 상태이며 이는 매우 중요하고 새로운 주제이다. 자율주행 자동차가 실제 도로 상황에서 최적의 경로를 선택하기 위해서는 심리적 요소를 통합적으로 고려하는 복잡한 알고리즘이 필요하다. 자율주행 자동차 기술이 발전함에 따라, 단순히 최단거리나 최단시간을 기준으로 하는 경로 탐색 방법에서 벗어나, 운전자의 심리적 안정과 만족을 고려한 경로를 밝히는 것이 실제 도로망에서 자율주행 자동차의 운행 안정성을 보장할 수 있는 중요한 의미를 가진다. 이를 실현하기 위해서 전통적인 경로 탐색 알고리즘을 넘어서, 심리적인 안정성, 경로의 단순성, 주변 환경 등 다양한 요소를 고려하는 복합적인 접근 방식이 필요하다. 운전자에게 심리적으로 편안함을 제공하는 경로의 선택은, 덜 복잡하고 회전(turn)이 적은 경로나 교통이 혼잡하지 않은 경로를 통해 이루어져야 하며, 이는 목적지까지의 경로를 운전자가 쉽게 기억하고 따를 수 있도록 하는 단순성과, 교통체증, 도로의 품질, 주변 경치, 상점, 편의시설 및 전기차 충전소 등의 주변 환경을 고려하여 제안되어야 한다.

본 연구에서는 우리나라의 대표적인 10개 도시와 해외 10개 도시에 대하여 (출발(s), 도착(t)) 정점 쌍에 대하여 최단거리 경로(shortest path), 최단시간 경로(quickest path), 직선거리(drone distance), 단순 경로(simple path)를 비교하여 이를 기준으로 도로망의 안정성과 효율성을 비교하고자 한다. 단, 이 계산에서 각 교차로의 대기시간은 모두 동일한 조건으로 계산하였다. 즉 주말, 주중 오전, 오후 퇴근 시간에 따른 차이는 고려하지 않았다.

단순 경로(Simple Path)는 운전자 또는 자율주행 자동차가 목적지까지 이동할 때 회전의 횟수를 최소화하여 경로를 결정하는 방식이다. Table 1과 Fig. 1은 어느 한 도로망 G_1 의 출발, 도착 정점 쌍 (s, t)에 대하여 단순 경로(a), 최단거리 경로(b), 최단시간 경로(c)를 보여준다. 그리고 Fig. 1의 (d)는 (s, t)의 위도, 경도로 측정한 직선거리를 나타낸다.

단순 경로는 운전 중 복잡한 조작을 줄이고, 운전자의 인지 부담을 경감시켜 주행의 편안함과 안전성을 증진하는 데 목적이 있다. 실제 운전에서 운전자는 불필요한 회전이나 복잡한 경로보다는 직관적이고 간단한 경로를 선호한다. 이러한 경로는 운전자가 효율적이고 안전하게 목적지까지 도달할 수 있게 한다.

Fig. 2는 실제 도심 도로망인 맨해튼에서의 실제 출발, 도착 정점 쌍 (s, t)에 대하여 단순 경로와 최단거리 경로를 보여준다. 단순 경로(빨간색)는 총 3번의 회전(turn)이 있었으며, 최단거리 경로(파란색)는 총 15번의 회전이 있었다.

Table 1. Path Object (a), (b) and (c) in Road Network G_1

Path	Time	Dist.	Turns
(a)	110	210	2
(b)	90	120	5
(c)	60	150	3

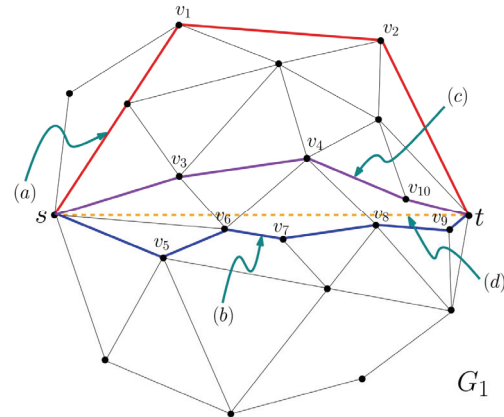


Fig. 1. Road Network G_1 Example.

- (a) A Simple Path(Red) $[s, v_1, v_2, t]$,
 (b) A Shortest Path(Blue) $[s, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, t]$,
 (c) A Quickest Path(Purple) $[s, v_3, v_4, v_{10}, t]$, and
 (d) A Drone Distance(Orange-Dashed) $[s, t]$.

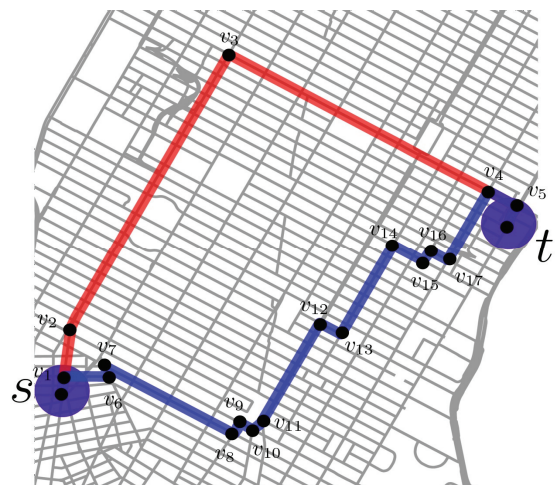


Fig. 2. A Simple Path(Red) $[s, v_2, v_3, v_4, v_5, t]$, A Shortest Path(Blue) $[s, v_1, v_6, \dots, v_{17}, v_4, v_5, t]$ in Manhattan. The Number of Turns in Simple Path(s, t) is 3, and the Number of Turns in the Shortest Path(s, t) is 15.

2. 도로망 특성 분석에 관한 이전 연구

도심에서 최단거리 경로와 최단시간 경로를 찾는 많은 수학적 알고리즘에 기반을 둔 연구가 진행되어 왔는데, 이러한 접근법은 실제 도로 상황, 교통 흐름, 운전자의 선호도 및 심리적 요소를 고려하지 못하는 한계를 가지고 있다. 실제 사람들은 최단거리나 최단시간 이외에도 다양한 주변 환경적 요소에 의해 경로를 선택하는 경향이 있다[1, 11]. 예를 들어 사람들은 회전(turn)이 적은 경로, 넓은 폭의 도로를 통해 이동할 수 있는 경로[2, 3, 12]를 선호하거나 교통체증을 피하려고 우

회하는 경로를 선택할 수 있다. 또한 일부 운전자는 고속도로를 이용하는 것보다 시내 도로를 통해 운전하는 것을 더 즐길 수 있다. 이것은 실제 사람들이 단지 수학적으로 가장 짧은 경로보다는 심리적으로 편안하고 선호하는 경로를 선택한다는 것이다[4].

GIS(Geographic Information Systems)를 활용한 도로망 네트워크에 대한 연구[5]는 지리적 정보와 기술을 통합하여 도로 인프라 계획, 분석을 지원한다. 이 분야의 연구는 주로 도로의 기하학적 특성, 도로망의 구조적 속성, 그리고 도로 사용 패턴에 중점을 둔다. 도로의 폭, 밀도, 연결성과 같은 기본적인 도로망 특성을 분석한다. 그러나 도로망 네트워크에 관한 이러한 연구는 경로 선택의 복잡성을 충분히 다루지 못한다.

너비 우선 탐색(Breadth-First Search)를 이용한 최소 회전 경로(Fewest Turn Path) 알고리즘[2]은 적은 회전수를 통해 목적지에 도달하는 경로를 찾는 데 유용할 수 있지만, 경로의 전체 길이가 길어지면 처리해야 할 노드의 수가 기하급수적으로 증가하여 메모리 사용량과 처리 시간이 심하게 증가하는 단점이 있다. 이는 특히 대규모 네트워크에서 경로를 찾을 때 비효율적일 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 대안적 접근 방식이 제안되고 있다. 예를 들어 A* 알고리즘[6]은 휴리스틱을 사용하여 탐색을 가이드하고 불필요한 경로를 조기에 제거함으로써 메모리 사용량과 계산 시간을 줄일 수 있다.

어느 경로를 자연재해나 공사 등 특정한 이유로 이용하지 못할 때, 대안의 경로를 찾아주는 균형 경로에 대한 개념도 생겼다[7]. 균형 경로란 최단거리 경로에서의 거리와 시간, 최단 시간 경로에서의 거리와 시간의 사잇값을 보장하는 경로이다.

이와 비슷하게 k개의 최단거리 경로, 즉 최단거리 경로에서의 거리를 오름차순으로 찾아주는 k-shortest path[8] 알고리즘에 관한 연구도 진행되어 왔다. 하지만 k-shortest path의 경우, k가 증가함에 따라 필요한 계산량도 증가하기 때문에, 매우 큰 네트워크(도로망 네트워크)에서 많은 수의 경로를 찾으려 할 때 한계가 존재한다. 또한, 여러 경로가 공통된 구간을 많이 포함할 수 있다. 이는 경로의 다양성을 제한하고, 실질적으로 다른 경로라고 할 수 없는 경우를 포함할 수 있다. 즉, 운전자에게 실제로 다양한 대안을 제공하지 못할 수 있다. 또한, 실시간 교통 상황, 도로 유형, 운전자의 선호도 및 심리적 요소를 반영할 수 있는 기계 학습 기반의 경로 추천 시스템이 개발되고 있다. 이러한 시스템은 운전자에게 맞춤형 경로를 제공함으로써 운전 경험을 향상하고 운전자의 만족도를 높일 수 있다.

3. 단순 경로(Simple Path) 기반의 도로 특성 분석

3.1 단순 경로(Simple Path)의 정의(definition)

단순 경로란, 출발점 s 에서 도착점 t 까지의 회전(turn)의 수를 최소화하는 경로를 탐색함으로써, 최대한의 직진성을 보

장하는 경로를 의미한다. 이는 기존의 최단거리 경로나 최단 시간 경로 기준과는 다르게, 도심과 같이 복잡한 도로 조건에서 이러한 경로 탐색은 운전자의 심리적 안정감에 긍정적으로 영향을 끼칠 뿐만 아니라, 운전 경험이 적은 사람이나 승객들에게도 안정감을 줄 수 있다. 또한 두 지점 (s, t) 간의 가장 직선적인 경로를 제공함으로써, 운전자 또는 자율주행 시스템이 주변 환경에 대한 복잡한 판단을 최소화할 수 있도록 한다. 더 나아가, 단순 경로 접근법은 도로망 네트워크와 교통 시스템의 효율성을 개선하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 직선적이고 효율적인 경로의 선정은 차량 흐름을 개선하고, 교통 혼잡을 감소시킬 수 있다. 이 방식은 운전자 및 자율주행 시스템이 다양한 도로 조건과 교통 상황에 효과적으로 대응할 수 있게 함으로써, 전반적인 도로 사용자의 만족도를 향상할 수 있다.

3.2 도로망에서 Simple Path(s, t) 탐색 알고리즘

단순 경로를 구하는 방법은 첫째, Fig. 3처럼, 출발점 node s 의 모든 첫 번째 이웃 node에 대해 s 를 시작점으로 하고 모든 첫 번째 이웃 node를 끝점으로 하는 단위 벡터들 $A_i = \overrightarrow{su_i} / \|\overrightarrow{su_i}\|, i \in \mathbb{N}$ 을 구한다. 그다음, 첫 번째 모든 이웃 node를 시작점으로 하고, 두 번째 모든 이웃 node를 끝점으로 하는 단위 벡터들 $B_{ij} = \overrightarrow{u_iv_{ij}} / \|\overrightarrow{u_iv_{ij}}\|, i, j \in \mathbb{N}$ 을 구한다. 직진성이 최대인 시작이 되는 두 edge를 찾기 위해서는 모든 가능한 A_i 와 B_{ij} 벡터 쌍에 대해 내적을 최대화하는 것이다. 최대 내적 값을 가지는 A_i 와 B_{ij} 를 찾기 위해 모든 i 와 j 에 대해 $\max_{i,j} (A_i \cdot B_{ij})$ 를 구한다.

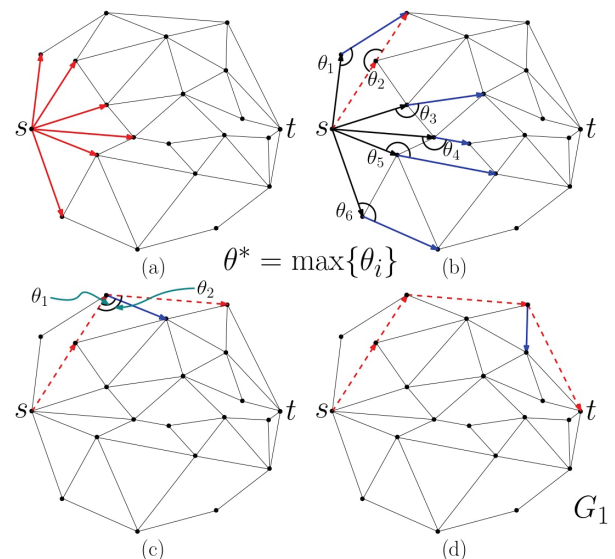


Fig. 3. Simple Path Algorithm in G_1 . In (a), Find All Neighbor Nodes of s . After in (b), (c), and (d), Find the Edge with the Maximum θ Value Among the Neighbors. Blue Edges are Non-selected Edges, and Red Edges are Selected Edges.

둘째, $\max(A_i \cdot B_j)$ 를 만족하는 $\overrightarrow{u_i v_{ij}}$ 와 j 를 시작으로 하고 j 의 모든 이웃 노드를 끝점으로 하는 단위 벡터들을 구하고 내적값을 구한다. 그다음 내적값을 수식 $Weight = -(\vec{a} \cdot \vec{b}) + 1$ 에 대입한다(\vec{a} 와 \vec{b} 는 각각 앞에서 구한 두 벡터이다). 모든 $Weight$ 값 중 가장 작은 값을 구하고, 가장 작은 값에 해당하는 node를 다음 node로 택한다. 앞선 둘째 과정을 다음 node에 대해서 반복한다.

4. 국내외 10개 거대 도시 도로망 실험

4.1 도심 도로망 데이터 특성

도심 도로망 품질 평가를 위해, Python 모듈 중 하나인 Osmnx[9, 10]를 이용하여, 국내 10개 도심과 해외 10개 도시의 도로망 데이터를 얻었다.

도로에서 걸리는 시간을 구할 때, 우리는 현실에서 교차로에서의 신호 대기시간을 반영하기 위해 아래 Equation (1)을 제안한다.

$$time(v) = t_w + k_o \cdot (d_G(v) - 2) \quad (1)$$

$time(v)$ 은 총 걸린 시간, t_w 는 도로에서의 평균 대기 시간을 20초로 설정했다. $d_G(v)$ 는 교차로(vertex)의 차수(degree)를 나타내며, degree가 2보다 작은 경우에는 $(d_G(v) - 2)$ 를 0으로 설정했다. k_o 는 교차로에서 기다리는 평균 대기 시간으로, 10초, 20초, 30초로 비교하여 실험하였다. 모든 도로에서의 이동 시간은 Osmnx에서 제공하는 데이터의 travel time 메소드를 이용했다. 이 데이터는 각 도로(edge)마다 travel time이 정해져 있어, 이동 시간을 더욱 정확하게 구할 수 있다.

최단거리 경로(Shortest Path), 최단시간 경로(Quickest Path)의 거리와 시간을 구할 때는 다익스트라 알고리즘(Dijkstra Algorithm)을 사용하였다. 또한 실험에서 한국 10개 도시와 해외 10개 도시의 각각 모든 Path의 개수 즉 $|V|^2$ 에 대해서 구하기보단, 전체 Path에서 100개를 무작위로 비복원 샘플링(sampling)하여 실험하였다.

Table 2, Table 3은 각각 한국 주요 10개 도시와 해외 주요 10개 도시의 교차로(vertex)의 수, 도로(edge)의 수, $d_G(v)$ 가 4인 node의 비율을 나타낸 표이다.

4.2 최단거리 경로와 최단시간 경로의 비교분석

도심 도로망 성능 평가에서 최단거리 경로와 최단시간 경로의 거리, 시간 차이는 중요한 문제이다. 이 두 대표적인 경로의 비교분석을 통해 각 도심 도로망이 얼마나 효율적으로 구성되어 있는지 알 수 있다.

Table 4, Table 5는 각각 한국 주요 10개 도시와 해외 주요 10개 도시에서 100개의 경로(Path)를 샘플링(sampling)하여 k_o 가 10일 때 최단거리 경로와 최단시간 경로의 거리와 시간

차이를 나타낸 것이다. T_{30} 은 최단거리 경로와 최단시간 경로의 시간 차이가 30분 이상인 것의 비율을 나타내며, D_1 은 최단거리 경로와 최단시간 경로의 차이가 1km 이상인 것의 비율을 나타낸다.

Table 2. Vertex, Edge Counts and Proportion of $d_G(v)$ (%) for 10 Korean Cities

City	Code	V	E	$d_G = 4$
서울	SEO	67454	188619	21.22
부산	PUS	20921	59453	25.87
인천	INC	12751	34539	23.07
대구	DAG	20433	58275	21.06
울산	ULS	10802	29936	23.18
대전	DAJ	15413	43562	24.62
광주	GWA	13329	37570	24.35
제주	JEU	20975	57984	17.76
창원	CHA	10756	30861	24.56
세종	SEJ	8242	20015	13.19

Table 3. Vertex, Edge Counts and Proportion of $d_G(v)$ (%) for 10 Mega Cities

City	Code	V	E	$d_G = 4$
맨해튼	MAN	4505	9707	58.51
바르셀로나	BAR	8903	16560	28.88
두바이	DUB	58118	118034	6.26
베를린	BER	28031	73052	25.58
로마	ROM	43496	90282	13.80
암스테르담	AMS	12761	29387	22.40
파리	PAR	9597	18484	23.19
하노이	HAN	147565	363002	8.31
뉴델리	NED	9958	23935	12.16
자카르타	JAK	100058	234030	8.16

Table 4. Comparison Between Time & Distance for 10 Korean Cities (%)

Code	T_{30}	D_1	Code	T_{30}	D_1
SEO	83.0	93.0	DAJ	47.0	65.0
PUS	68.0	80.0	GWA	46.0	71.0
INC	51.0	79.0	JEU	59.0	87.0
DAG	58.0	71.0	CHA	46.0	74.0
ULS	30.0	63.0	SEJ	32.0	54.0

Table 5. Comparison Between Time & Distance for 10 Mega Cities (%)

Code	T_{30}	D_1	Code	T_{30}	D_1
MAN	40.0	55.0	AMS	31.0	60.0
BAR	12.0	32.0	PAR	27.0	50.0
DUB	28.0	66.0	HAN	90.0	95.0
BER	44.0	70.0	NED	10.0	44.0
ROM	63.0	85.0	JAK	82.0	90.0

국내 도시에서는 서울시가, 해외 도시에서는 하노이가 T_{30} 과 D_1 의 비율이 가장 높았다. 서울시와 하노이 각각 Table 2, Table 3에서 보다시피 교차로(vertex)의 개수가 가장 많다. 그러므로 최단거리 경로라고 하더라도, 경로 위에 교차로가 많이 존재하기 때문에 방정식(1)에서의 $k_o \cdot (d_G(v) - 2)$ 가 비례하여 커지게 되고, 그로 인해 최단거리 경로에서 걸리는 시간이 증가할 수밖에 없다.

반면 세종시와 바르셀로나가 T_{30} , D_1 의 결맞음이 좋게 나왔다. 세종시의 경우 우리나라의 계획도시이고, 바르셀로나는 그리드 시스템(Grid System)을 기반으로 설계된 도시이다. 계획도시와 그리드 시스템을 기반으로 설계된 도시 모두 도로를 시간과 거리 측면에서 능률적이고 효과적으로 설계하였기 때문에 이러한 결과가 나오게 된 것이다.

Fig. 4는 그리드 시스템 기반의 바르셀로나 도시 중심부 도로망을 보여주었고, Fig. 5는 서울시의 오래된 도시 중 하나인 종로를 바르셀로나와 대비하여 보여준다.

또한 실험에서 설정한 교차로에서 대기하는 평균 대기 시간인 k_o 가 10초, 20초, 30초로 증가할수록, D_1 도 국내 10개 도시, 해외 10개 도시에서 모두 증가했다. 이는 교차로에서 평균 대기시간이 길어질수록, 최단시간 경로가 최단거리 경로에 비해 더 우회해 형성되어 있다는 뜻이다. Fig. 6은 해외 10개 도시 중에서 무작위로 뽑은 4개의 도시에 대한 k_o 와 D_1 의 비례 경향성을 보여준다.

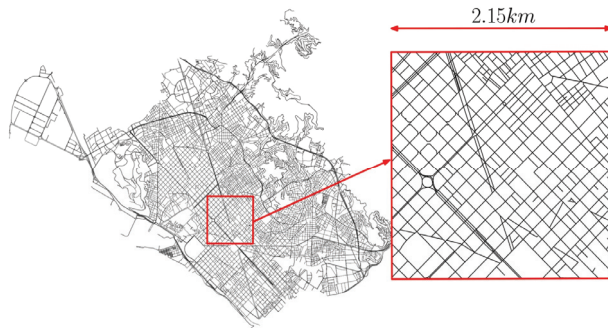


Fig. 4. City Center Roadmap in Barcelona

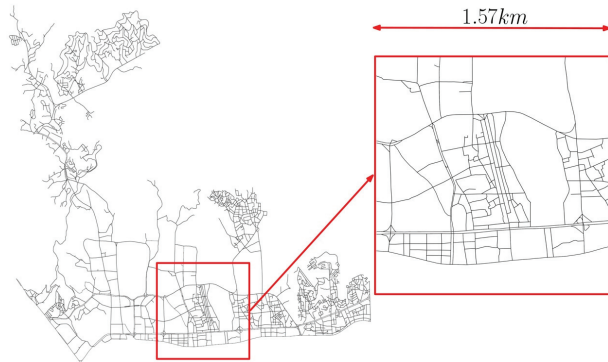


Fig. 5. Road Network in Seoul, Jongro-gu

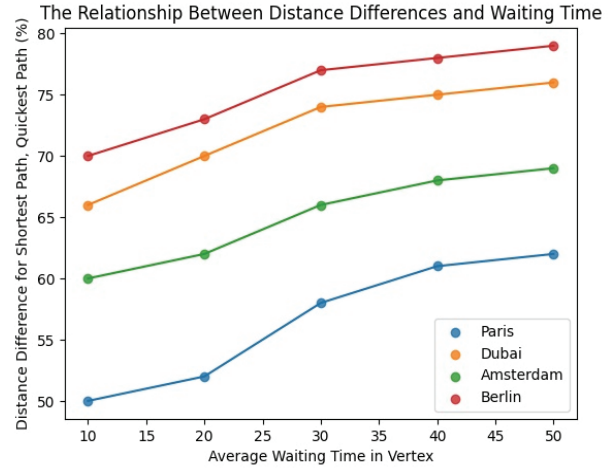


Fig. 6. The Relationship Between k_o , and D_1 in 4 Mega Cities

4.3 직선거리 대비 최단거리 경로 거리 분석

운전자가 최단거리 경로를 통해 목적지까지 도달할 때, 최단거리 경로가 직선에 가까울수록 분명 유리하다.

Table 6과 Table 7은 각각 한국 10개 도시와 해외 10개 도시에서 샘플링(sampling)한 100개의 최단거리 경로에, 이 경로에서의 두 끝점(출발점, 도착점)의 직선거리를 나눈 비율을 나타낸 것이다. 이때, 직선거리는 haversine 공식을 이용하여 구하였다. $R_{1.2}$ 는 최단거리 경로에서의 거리를 직선거리로 나눈 값이 1.2 보다 큰 비율을 의미한다.

흥미롭게도 세종시가 계획도시임에도 불구하고 $R_{1.2}$ 의 비율은 가장 좋지 못했다. 이는 최단거리 경로의 모양이 직선에 가장 가깝지 않다는 뜻이다. Table 4와 Table 6에서 세종시 결과를 보면, 최단거리 경로에서 이동할 때 교차로를 많이 지나지 않아 최단거리 경로와 최단시간 경로의 시간 차이가 작

Table 6. Comparison Between Short & Drone Distance for 10 Korean Cities (%)

Code	$R_{1.2}$	Code	$R_{1.2}$
SEO	46.0	DAJ	46.0
PUS	60.0	GWA	55.0
INC	65.0	JEU	31.0
DAG	39.0	CHA	75.0
ULS	68.0	SEJ	86.0

Table 7. Comparison Between Short & Drone Distance for 10 Mega Cities (%)

Code	$R_{1.2}$	Code	$R_{1.2}$
MAN	41.0	AMS	89.0
BAR	75.0	PAR	56.0
DUB	73.0	HAN	56.0
BER	40.0	NED	92.0
ROM	80.0	JAK	91.0



Fig. 7. Drone Distance(Red-Dashed), Shortest Path(Blue)in Sejong

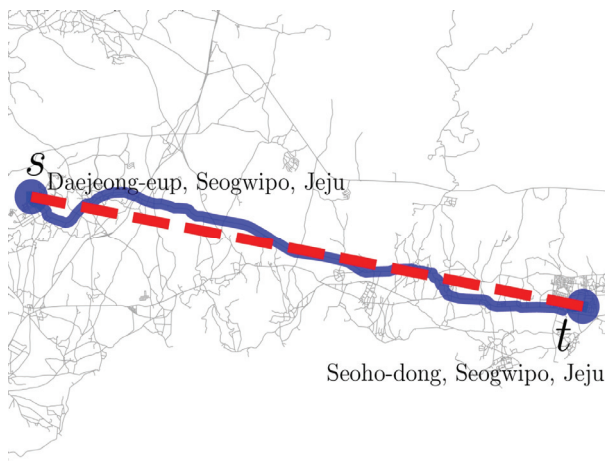


Fig. 8. Drone Distance(Red-Dashed), Shortest Path(Blue)in Jeju

은 대신, 최단거리 경로가 가장 곡선에 가깝기 때문에 $R_{1.2}$ 의 비율이 국내 10개 도시 중 가장 좋지 못한 것이다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 세종시와 제주시에서의 직선거리(빨간색 점선)에 대한 최단거리 경로(파란색 실선)을 보여준다.

해외 10개 도시 중에서는 베를린과 맨해튼의 $R_{1.2}$ 의 비율이 각각 1, 2위를 기록했다. 이는 최단거리 경로가 직선에 가장 가깝다는 의미이다. Fig. 9에서는 맨해튼의 격자 모양 도심 도로망을 보여준다. 도심 도로망이 격자 모양을 띄기 때문에, 맨해튼은 어느 출발점이나 도착점에 대하여 경로가 직선일 가능성이 높다. 반면 자카르타와 뉴델리의 $R_{1.2}$ 의 비율이 좋지 못했다. 이는 최단거리 경로가 세종시처럼 곡선 모양에 가깝다는 의미로 해석될 수 있다.

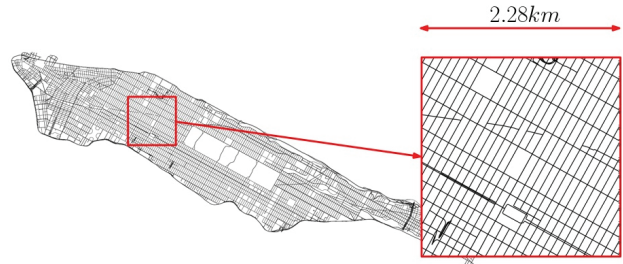


Fig. 9. Grid Shaped City Center Road Network in Manhattan

4.4 최단거리 경로와 단순 경로의 비교분석

단순 경로(Simple Path)는 운전자가 목적지까지 도달할 때 최소한의 회전(turn)을 보장하는 경로이다. 그러므로 단순 경로는 운전자의 인지적, 심리적 부담을 줄여준다. 이는 도로망의 특성을 보여주는 중요한 지표이다.

국내 10개 도시와 해외 10개 도시의 100개 (출발, 도착) 정점 쌍에 대하여 단순 경로에서의 거리에서 최단거리 경로에서의 거리를 나눈 비율을 x축, 단순 경로에서 걸리는 시간을 최단거리 경로에서 걸리는 시간으로 나눈 비율을 y축으로 하는 그림은 각각 Fig. 10, Fig. 11이다.

x축에서 1에 가깝고, y축에서 1(빨간색 점선)보다 아래에 있는 도시들의 도로망이 잘 구축되어 있다고 이해할 수 있다. 단순 경로가 최단거리 경로의 길이에 가깝고, 평균적으로 지나가는 교차로의 개수가 적어 시간이 단축되기 때문이다. 우리나라 10개 도시 중 세종이 유일하게 빨간색 점선 아래에 위치하고, 해외 도시 중에서는 암스테르담, 뉴델리, 하노이, 로마, 자카르타가 빨간색 점선 아래 위치했다.

Fig. 10에서 세종이 x축의 1에 가장 가깝고 y축에서 가장 아래에 있는 도시이며 울산, 대전, 창원, 대구, 서울 그리고 광주 부산이 각각 같은 군집(cluster)으로 묶을 수 있었다. 세종시는 국내 10개 도시 중 가장 최근에 구축된 도시이다. 이는 시간, 거리의 효율성과 운전자의 도로에서의 인지과정까지 고려해 도심 도로망을 효율적으로 구축했다고 볼 수 있다.

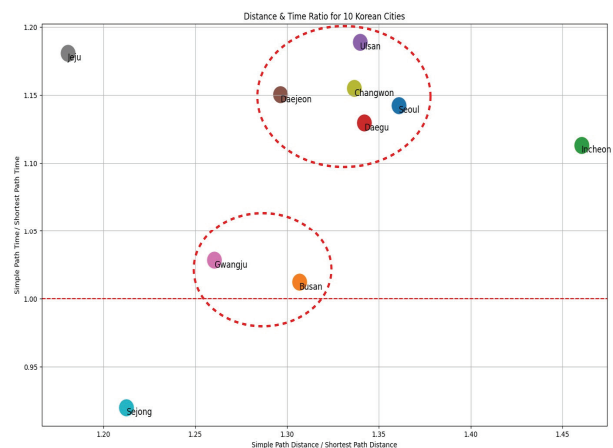


Fig. 10. Distance & Time Ratio for 10 Korean Cities

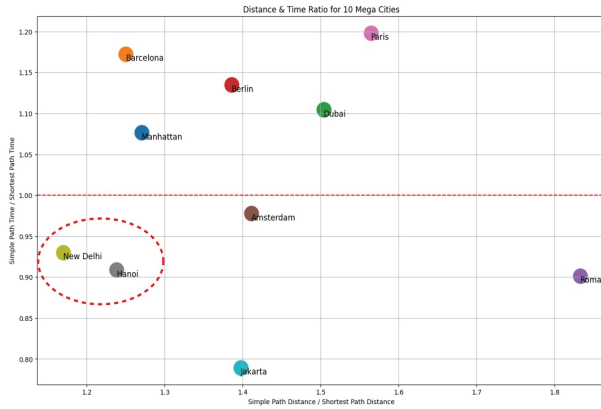


Fig. 11. Distance & Time Ratio for 10 Mega Cities

Fig. 11에서는 뉴델리와 하노이가 같은 군집(cluster)으로 묶을 수 있었다. 흥미롭게도 예상치 못한 뉴델리, 하노이, 자카르타의 결과가 좋게 나왔다. 뉴델리와 하노이는 모두 유럽의 식민지였기 때문에 유사한 도심 도로망의 패턴을 가진다. 자카르타의 방사형 도로망은 직접적이고 직선적인 경로를 제공하여 단순 경로에서의 이동시간을 단축시킬 수 있다.

4.5 단순 경로에서의 회전(Turn) 특성비교

단순 경로가 최소한의 회전(turn)을 보장하는 경로를 의미하는 것은, 운전자가 목적지까지 가장 직선에 가까운 경로를 따라 이동할 수 있음을 의미한다. 이 방식은 특히 도로망의 효율성과 사용자 경험을 평가하는 데 있어 중요한 척도로 작용한다. 회전의 횟수를 기준으로 한 평가는, 도로망이 얼마나 운전자에게 직관적이고 편리한 경로를 제공하는지를 나타낸다. 본 연구에서는 회전(turn)을 이전 도로(edge)에서 다음 edge로 넘어갈 때, 두 edge의 방향벡터가 이루는 사이 각도가 60도 이상일 때로 정의하였다.

Table 8과 Table 9는 각각 도시별 단순 경로에서 회전의 평균과 표준편차를 보여준다. 평균 회전 횟수는 도시의 도로망이 얼마나 직진성을 유지하는지를 보여준다. 낮은 표준편차는 도시의 도로망이 일관되게 직진성을 유지하고 있다는 것을 의미하고, 이는 운전자의 편의성과 효율성을 증가시킨다.

국내 도시에서는 제주시가 회전의 평균과 표준편차가 가장 낮았고, 계획도시인 창원시와 세종시에서 좋지 못한 결과가 나왔다. 제주시는 도로(edge)가 다른 도시들보다 길게 뻗어있는 특징을 가지고 있다. 평균적인 edge 길이도 국내 10개 도시를 통틀어 약 184m로 가장 길었다. 그래서 출발지부터 도착지까지 이동할 때 평균적인 회전(turn)이 가장 적게 나타날 수밖에 없다.

해외 도시에서는 맨해튼이 평균적인 회전과 회전의 표준편차가 작았는데, 이는 Fig. 9에서와 같이 맨해튼의 도심 도로망이 격자 모양이 주를 이루기 때문이다. 격자 모양 도로망의 경우 단순 경로에서 Fig. 2와 같이 회전하는 교차로가 매우 적을 뿐만 아니라, 규칙적인 도로망의 패턴 때문에 회전의 표준편차도 적게 나타난다.

Table 8. Comparison Between Mean & STD of Turns for 10 Korean Cities (%)

Code	Mean	STD	Code	Mean	STD
SEO	3.68	1.66	DAJ	3.71	1.90
PUS	3.43	2.06	GWA	3.45	1.68
INC	3.89	1.96	JEU	3.14	1.58
DAG	3.25	1.66	CHA	4.06	2.06
ULS	3.62	1.61	SEJ	3.99	2.33

Table 9. Comparison Between Mean & STD of Turns for 10 Mega Cities (%)

Code	Mean	STD	Code	Mean	STD
MAN	2.94	1.10	AMS	4.60	2.26
BAR	3.46	2.47	PAR	3.28	2.11
DUB	3.61	2.46	HAN	6.05	2.91
BER	4.24	2.00	NED	5.97	3.51
ROM	5.12	2.67	JAK	5.73	3.09

4.6 도심 중심-외곽 경로 비교분석

도시의 중심부($City_C$), 외곽부($City_O$), 중심과 외곽을 잇는($City_{CO}$) 경로에 대해 최단거리 경로, 최단시간 경로, 단순 경로, 직선거리의 비교분석은 중요한 연구 주제이다. $City_C$ 와 $City_O$ 는 각각 약 1,000개의 교차로(vertex)를 만족한다. Fig. 12, Fig. 13은 각각 국내 10개 도시와 해외 10개 도시 $City_{CO}$ 에 대해 최단시간 경로와 단순 경로의 거리 비율과 시간 비율을 나타낸 것이다.

x축에서 1에 가깝고, y축에서 1(빨간색 점선)보다 아래에 있는 도시들의 도로망이 잘 구축되어 있다고 이해할 수 있다. 최단거리 경로에서의 거리보단 길지만, 최단거리 경로에서의 시간보다는 짧기 때문이다. 국내 10개 도시의 경우 $City_{CO}$ 에 대하여 제주, 부산, 서울, 창원에서 좋은 결과가 있었고, 해외 10개 도시의 경우 $City_{CO}$ 에 대하여 두바이, 뉴델리, 맨해튼, 하노이가 좋은 결과를 보였다.

Fig. 12에서 흥미로운 점은 도로망 품질이 좋지 않은 부산이 단순 경로에서 최단거리 경로 대비 좋은 결과가 나왔다. Fig. 13에서는 뉴델리, 두바이, 맨해튼을 군집(cluster)으로 묶을 수 있었고, 로마 자카르타도 cluster로 묶을 수 있었다. 뉴델리, 두바이, 맨해튼 세 도시 모두 도시 계획의 일환으로 설계된 도로망을 갖추고 있다. 뉴델리는 특히 영국의 식민지 시대에 계획된 도시이다. 로마, 자카르타는 중앙집중식 도로망이다. 자카르타 또한 네덜란드 식민지 시대의 영향을 받아 로마와 비슷한 유럽식 도로망을 띄고 있다. 또한, 하노이가 y축 가장 아래 위치했고, x축도 1에 가깝게 위치했다. 이는 하노이의 회전이 적은 외곽 순환 고속도로가 존재하여 중심에서 외곽으로 갈 때 걸리는 시간을 대폭 줄일 수 있기 때문이다.

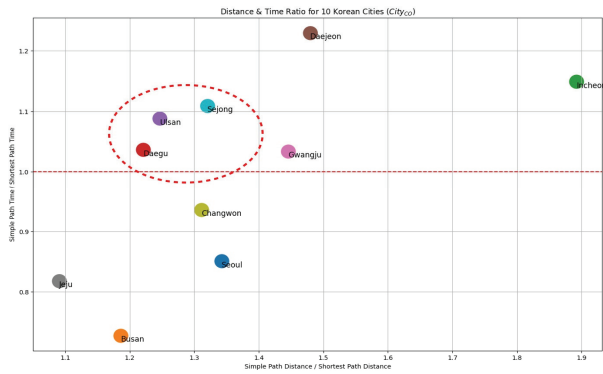
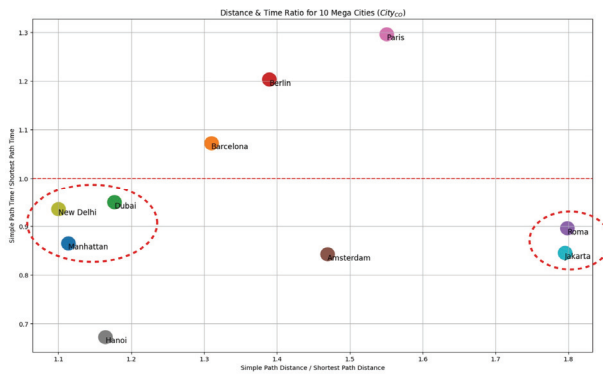
Fig. 12. Distance & Time Ratio for 10 Korean Cities ($City_{CO}$)Fig. 13. Distance & Time Ratio for 10 Mega Cities ($City_{CO}$)

Table 10. Comparison Between Time & Distance for 10 Korea Cities (%)

Code	T_{60}	D_5	Code	T_{60}	D_5
SEO	92.0	89.0	DAJ	35.0	12.0
PUS	99.0	89.0	GWA	52.0	23.0
INC	85.0	99.0	JEU	99.0	97.0
DAG	90.0	90.0	CHA	80.0	30.0
ULS	60.0	49.0	SEJ	63.0	15.0

Table 11. Comparison Between Time & Distance for 10 Mega Cities (%)

Code	T_{60}	D_5	Code	T_{60}	D_5
MAN	97.0	21.0	AMS	58.0	33.0
BAR	31.0	15.0	PAR	14.0	27.0
DUB	37.0	16.0	HAN	99.0	99.0
BER	52.0	79.0	NED	23.0	13.0
ROM	99.0	72.0	JAK	91.0	92.0

$City_{CO}$ 에 대해 최단거리 경로와 최단시간 경로의 시간 차이와 거리 차이도 비교할 수 있다. Table 10과 Table 11은 각각 국내 도시 10개와 해외 도시 10개에 대해 이 비율을 보여준다.

T_{60} 은 $City_{CO}$ 에 대하여 최단거리 경로와 최단시간 경로의 시간 차이가 60분 이상 나는 비율이고, D_5 는 최단거리 경로와 최단시간 경로의 거리 차이가 5km 이상인 비율이다.

국내 10개 도시 중에서는 대전이 결과가 가장 좋았고, 해외 10개 도시 중에서는 뉴델리와 파리가 결과가 좋았다. 또한, 이 결과에서 흥미로운 점은 Table 10과 Table 11에서 T_{60} 이 90% 이상인 도시들은 모두 최단시간 경로가 중심부와 외곽에 대해 모두 고속도로를 이용한다는 것이다. 고속도로의 경우, 거치는 교차로(vertex)가 도심 안에서 이동할 때보다 훨씬 적으므로, 방정식(1)에서 $k_o \cdot (d_G(v) - 2)$ 를 크게 줄일 수 있다.

5. 결 론

우리는 국내 10개 도시와 해외 10개 도시를 대상으로 최단거리 경로, 최단시간 경로, 단순 경로, 직선거리에 대해 거리와 시간 차이 기준으로 비교분석 했다. 주요 결과들은 다음과 같다.

- 세종시와 바르셀로나가 최단거리 경로와 최단시간 경로의 거리 차이가 가장 적었다. 이는 운전자가 목적지까지 가장 거리가 짧으면서 시간이 가장 적게 걸리는 경로로 도달할 수 있다는 것을 보여준다.
- 직선거리 대비 최단거리 경로의 거리의 비율은 세종시가 가장 낮았다. 이것은 세종시의 곡선적 도로망 형태로 인해 최단거리 경로가 곡선에 가깝기 때문이다.
- 단순 경로에서 걸리는 시간과 최단거리 경로에서 걸리는 시간을 비교했을 때, 세종시가 단순 경로에서 국내 10개 도시 중 유일하게 걸리는 시간이 최단거리 경로에서 걸리는 시간보다 적게 걸렸다.
- 도시 도로망이 격자(Grid) 모양에 가까울수록, 단순 경로에서의 회전(turn)이 적다. 이것은 운전자가 목적지까지 심리적으로 안정을 느끼면서 운전을 할 수 있을뿐더러, 길을 잘 모르는 운전자도 쉽게 목적지까지 도달할 수 있다. 가장 격자 모양에 가까운 도시는 맨해튼이다.
- 중심과 외곽을 잇는 경로에 대하여, 고속도로를 이용한 경우 최단거리 경로에서의 시간과 단순 경로에서의 시간 차이가 매우 컸다. 고속도로는 도로 위에 교차로(vertex)가 존재하지 않고 회전(turn)이 거의 존재하지 않기 때문이다. 시간 차이가 가장 큰 도시는 부산과 하노이이다.
- 유럽의 식민지 시대를 거쳤던 자카르타, 하노이, 뉴델리 모두 최단거리 경로 대비 단순 경로에서 각각 1, 3, 4위를 기록했다. 이 도시들의 도로망은 모두 서구 도시와 도로망에서 유사한 특징이 있다.

본 결과와 관련하여 추후 연구 과제는 다음과 같다. 주어진 전체 도로망의 성능을 개선하고자 할 때 어떤 도로(edge)를

추가 건설해야 하는지도 흥미로운 문제이다. 또한 다수의 자율주행 자동차들이 (s, t) 경로를 선택할 때 결정적 알고리즘(deterministic)을 사용하면 모두 동일한 경로가 제공되어 이런 결과로 오히려 도로 정체가 가중될 수 있다. 이런 경우 독립된 차량이 (s, t) 경로로 이동할 때 서로 간섭하지 않으면서 전체 효율을 최적화하는 분산 라우팅 알고리즘도 흥미로운 주제가 될 것이다.

References

- [1] R. G. Golledge, "Path selection and route preference in human navigation: A progress report," *International Conference on Spatial Information Theory*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995.
- [2] Y. Zhou, W. Wang, D. He, and Z. Wang, "A fewest-turn-and-shortest path algorithm based on breadth-first search," *Geo-spatial Information Science*, Vol.17, No.4, pp.201-207, 2014.
- [3] B. Jiang and X. Liu, "Computing the fewest-turn map directions based on the connectivity of natural roads," *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.25, No.7, pp.1069-1082, 2011.
- [4] M. Denis, F. Pazzaglia, C. Cornoldi, and L. Bertolo, "Spatial discourse and navigation: An analysis of route directions in the city of Venice," *Applied Cognitive Psychology: The Official Journal of the Society for Applied Research in Memory and Cognition*, Vol.13, No.2, pp.145-174, 1999.
- [5] D. Das, A. K. Ojha, H. Kramsapi, P. P. Baruah, and M. K. Dutta, "Road network analysis of Guwahati city using GIS," *SN Applied Sciences*, Vol.1, pp.1-11, 2019.
- [6] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, "A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths," *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol.4, No.2, pp.100-107, 1968.
- [7] B. Geum and H. G. Cho, "Time-Distance Balanced Path Finding Algorithms in Urban Road Networks," *Proceedings of the Korea Information Science Society Conference*, 244-246, 2023.
- [8] D. Eppstein, "Finding the k shortest paths," *SIAM Journal on Computing*, Vol.28, No.2, pp.652-673, 1998.
- [9] G. Boeing, "OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks," *Computers, Environment And Urban Systems*, Vol.65, pp.126-139, 2017.
- [10] G. Boeing, "OSMnx: A Python package to work with graph-theoretic OpenStreetMap street networks," *Journal of Open Source Software*, Vol.2, No.12, 2017.
- [11] N. Basu, M. M. Haque, M. King, M. Kamruzzaman, and O. Oviedo-Trespalacios, "A systematic review of the factors associated with pedestrian route choice," *Transport Reviews*, Vol.42, No.5, pp.672-694, 2022.
- [12] A. Sevtsuk, R. Basu, X. Li, and R. Kalvo, "A big data approach to understanding pedestrian route choice preferences: Evidence from San Francisco," *Travel Behaviour and Society*, Vol.25, pp.41-51, 2021.



김 비

<https://orcid.org/0009-0009-0830-7238>
 e-mail : rmaql0106@pusan.ac.kr
 2021년 ~ 현 재 부산대학교
 정보컴퓨터공학부 학사과정
 관심분야 : 계산이론, 딥러닝



조 환 규

<https://orcid.org/0000-0002-1538-548X>
 e-mail : hgcho@pusan.ac.kr
 1984년 서울대학교 계산통계학과(학사)
 1986년 KAIST 대학원 계산이론연구실
 (Theory of Computation)(석사)
 1990년 KAIST 대학원 계산이론연구실
 (박사)
 1990년 ~ 현 재 부산대학교 정보컴퓨터공학부 교수
 관심분야 : 알고리즘, 응용그래프이론, 생물정보학