

이산선택모형을 이용한 최적경로 탐색 알고리즘¹⁾

An optimal-path searching model using discrete choice model

한진석

(서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정)

전경수

(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

목 차

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

2. 연구의 범위 및 방법

II. 통행자 경로선택 모형

1. 독립변수 선정

2. 경로선택 모형 구축

III. 최적경로 탐색 알고리즘

1. 기존 Dijkstra 알고리즘 한계

2. 최적경로 탐색 알고리즘

3. 가상 네트워크 적용

4. 실제 네트워크 적용 및 검증

IV. 결론 및 향후 연구과제

참고문헌

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최적경로 문제는 네트워크 이론에서 가장 기본적이고 중요한 문제 중의 하나이며, 최근에 연구가 활발한 지능형 교통체계(Intelligent Transportation System : ITS) 분야 중 첨단 여행자 정보체계(Advanced Traveler Information System : ATIS)에서 효율적인 경로정보를 제공하기 위하여 필수적인 기법이다.

최적경로는 정해진 기점과 종점을 연결하는 다수의 경로들 중 통행자의 목적을 최적으로 하는 경로이다. 일반적으로 최적경로를 탐색하는 기준으로 통행시간, 통행비용 또는 경로길이 등 하나의 목적만을 고려하며, 통행자는 자신의 목적에 맞는 경로를 최적경로로 선택한다. 그러나 실제로 통행자가 단일 목적만을 고려하여 경로를 선택하는 경우는 드물며, 통행시간이나 경로길이 또는 통행자의 개인적인 선호 등과 같은 다양한 목적들을 종합적으로 고려하여 선택한다. 그러므로 최적경로를 탐색하기 위해서는 이와 같은 다중목적 고려할 필요가 있다.

기존의 최단경로 탐색 알고리즘으로는 Dijkstra 알고리즘, Moore 알고리즘 등 다양한 기법들이 개발되었으며, 특히 다중

목적용을 이용한 최적경로 탐색 알고리즘으로는 파레토 최적을 이용한 "A bicriterion shortest path algorithm"(Climaco, Martins, 1982)과 "On Finding dissimilar paths"(V.Akgun, E. Erkut, 2000), "On finding dissimilar Pareto-optimal paths"(Paolo Dell'Olmo, 2004) 등이 있다.

그러나 일반적으로 파레토 최적해는 무수히 많기 때문에 파레토 개념을 적용한 알고리즘은 과도한 최적경로가 산출된다는 단점이 있으며, 또한 2가지 이상의 목적을 고려하지 못하는 한계를 가진다.(E.Q.V. Martins, J.L.E. Santos, 1999)

2. 연구의 범위 및 방법

본 논문에서는 다중목적 고려하기 위하여 이산선택모형을 사용하여 최대의 효용을 가지는 경로를 탐색한다. 경로선택에 영향을 미치는 요소들은 통행시간, 지체시간, 경로길이, 신호교차로수, 회전수, 전용도로의 포함비율 6가지로 선정하고, 모형의 모수를 추정하기 위한 현시선택 자료를 구하기 위하여 서울시 및 인접 신도시의 기종점 5개에 대한 경로를 선정하여 설문조사를 실시하였다.

경로선택 모형으로는 다항로짓모형을 사용하였으며, 경로탐색 알고리즘으로는 도심부에서 유-턴(U-turn)과 회전제한의 반영이 가능하도록 Dijkstra 알고리즘을 변형한 덩굴망 알고리즘(vine building algorithm)을 사용하였다.

1) 본 논문은 2002년 한국과학재단 목적기초 특정연구과제 지원연구의 일부로 수행되었음.(과제번호 R01-2002-000-00233-0)

II. 통행자 경로선택 모형

1. 독립변수 선정

경로선택에 영향을 미치는 요소들은 여러 가지가 있을 수 있으나, 이들 가운데 계량화가 어렵거나 현실적으로 자료수집 가능성이 적은 요소들을 제외한 다음의 6가지 요소들을 독립변수로 선정하였다.

<표 1> 독립변수의 선정

통행시간	지체시간
경로길이	신호교차로수
회전수	전용도로의 포함비율

통행시간은 각 통행자가 인지하고 있는 통행시간을 의미하며, 지체시간은 인지한 통행시간에서 자유류 통행시간(free-flow travel time)을 뺀 값을 사용하였다. 여기서 자유류 통행시간은 운전자의 희망속도가 아닌 제한속도로 주행했을 때의 통행시간으로 간주하였으며, 정지나 지체없이 교차로를 통과하는 경우도 자유류 통행시간으로 보았다.

신호교차로수는 통행시간과 마찬가지로 운전자가 인지하고 있는 신호교차로수를 의미한다. 단, 모수추정을 위한 독립변수로는 단위길이(km)당 신호교차로수를 사용하여 경로길이의 차이로 인한 편의를 제거하였다.

2. 경로선택 모형 구축

경로선택 모형의 구축과정에서 검토된 6개 독립변수에 대한 분석결과²⁾는 <표 2>와 같다.

<표 2> 모수추정 결과

독립변수	모형		
	추정값	표준오차	t-통계량
통행시간	*	*	*
지체시간	-0.306	-0.042	-7.30
신호교차로수	*	*	*
회전수	-0.643	0.128	-4.90
전용도로비율	*	*	*
경로길이	-0.090	-0.089	-1.00
모수의수	3		
조정우도비지표	0.498		

조사된 6개의 독립변수 중에서 통행시간과 신호교차로수, 전용도로의 포함비율을 제외하고, 지체시간과 회전수, 경로길이를 가지고 모수를 추정된 결과가 통계적 유의성이 가장 높은 모형으로 도출되었다.

네트워크를 구성하는 각 노드(node)의 효용을 경로선택 모형으로 계산하고, 다음 장의 최적경로 탐색 알고리즘을 사용하여 최대의 효용을 가지는 경로를 탐색한다.

III. 최적경로 탐색 알고리즘

1. 기존 Dijkstra 알고리즘 한계

전통적인 최단경로 탐색 알고리즘이 만족하는 Bellman(1958)의 최적원리(principle of optimality)는 다음과 같다.

$$\pi_1 = 0$$

$$\pi_j = \min_{i \neq j} \{ \pi_i + d_{ij} \} \quad (j=2, 3, \dots, N)$$

π_j : 시발점 1에서부터 교점 j 까지의 최단거리

즉, 교점 j 까지의 최단경로상에서 교점 i 까지의 부분경로는 교점 1에서 i 까지의 최단경로이어야 하기 때문에 교점 i 가 어떤 교점이든지 간에 $\pi_j = \pi_i + d_{ij}$ 가 성립한다.

그러나, Bellman의 식을 만족하는 기존의 알고리즘은 도시 가로망에서 다수 존재하는 유-턴 및 회전제한을 고려하지 못함으로써 실제 최단경로를 탐색하지 못하는 문제점을 가진다. 또한 교차로에서 회전제한을 반영하기 위한 덩굴망 알고리즘 역시 경우에 따라 최적해를 구하지 못하는 한계를 가진다.(노정현, 남궁성, 1995)

이와 같은 문제를 해결하기 위한 지금까지의 접근 방법은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다.

첫 번째 방법은 도로망의 표현방식에 의한 것으로 기존의 알고리즘을 그대로 사용하면서 도로망에 가상노드와 링크(link)를 추가하는 방법이다. 그러나 이는 노드와 링크가 현저하게 증가하기 때문에 탐색 속도의 저하를 야기한다.

두 번째 방법은 기존의 알고리즘을 바탕으로 알고리즘 내 적용 자료의 구조적인 변형에 의한 것인데 이 역시 대부분 지나치게 알고리즘이 복잡해지는 단점을 가진다.(노정현, 1995)

2. 최적경로 탐색 알고리즘

본 논문에서는 Bellman의 최적원리를 만족하는 기존 덩굴망 알고리즘의 문제점인 “하나의 노드가 최단경로 상에 두 번 이상 포함될 수 없다.”라는 기본적인 특성을 보완하기 위하여 알고리즘 내에서 모든 노드별로 들어오는 방향별 노드를 고려하도록 수정하였다.

또한 유-턴과 피-턴(P-turn)에서 순환이 발생하는 경우에는 한번만 순환을 하고 다른 경로를 탐색하도록 설정하였다. 왜냐하면 순환의 통행비용이 다른 경로를 선택하는 비용보다 적다고 해도 지속적인 순환은 현실적으로 발생하지 않으며, 회전제한이 없는 일반적인 회전에서 아무리 회전비용이 크다고 하더라도 유-턴과 피-턴의 비용보다는 작다고 생각할 수 있기 때문에, 유-턴과 피-턴으로 인한 지속적인 순환을 탐색하는 것은 의미가 없다고 가정하였다.

2) 교통정보제공에 따른 사용자 반응행태모델 개발, 과학기술부, 2000

또한 전 노드만을 고려하는 수형망 알고리즘(tree-building algorithm)과는 달리 전전노드까지 고려하는 덩굴망 알고리즘을 사용하기 때문에 대안경로의 탐색이 가능하다. 이는 최적 경로 상의 특정 링크에서 통행비용이 증가하면 그 링크의 전 노드에서 다른 경로를 탐색할 수 있기 때문이다. 따라서 유고 발생시 다른 경로를 탐색하거나 특정 경유지를 포함하는 경로의 탐색이 가능하다.

여기서는 효율을 가지고 경로를 탐색하기 때문에 특정 링크에서 가능한 유-턴 횟수를 조사하여 이를 회전수 변수에 반영하였다. 따라서 실제 네트워크 적용에서는 유-턴에 대한 비용을 별도로 고려하지 않았다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 흐름도와 수행단계는 <그림 1>과 같다.

s, t : 출발노드, 도착노드

i : 현재 경로탐색 대상이 되는 첫 번째 노드

j : 노드 i 와 하나의 링크로 연결된 노드, 현재 경로탐색 대상이 되는 두 번째 노드

k : 노드 j 와 하나의 링크로 연결된 노드, 현재 경로탐색 대상이 되는 세 번째 노드

$cost_{ij}$: 노드 i 에서 노드 j 로 가는데 드는 노선비용

$cost_{jk}$: 노드 j 에서 노드 k 로 가는데 드는 노선비용

$cost_{ik}$: 노드 i 에서 노드 k 로 가는데 드는 노선비용

$cost_{tp}$: 회전비용을 고려한 최종 노선비용

집합 J : 노드 i 와 하나의 링크로 연결된 노드 j 의 집합

집합 K : 노드 j 와 하나의 링크로 연결된 노드 k 의 집합

<단계 1> 네트워크 내의 모든 노드비용을 초기화하고, 기점노드와 종점노드를 선택한다.

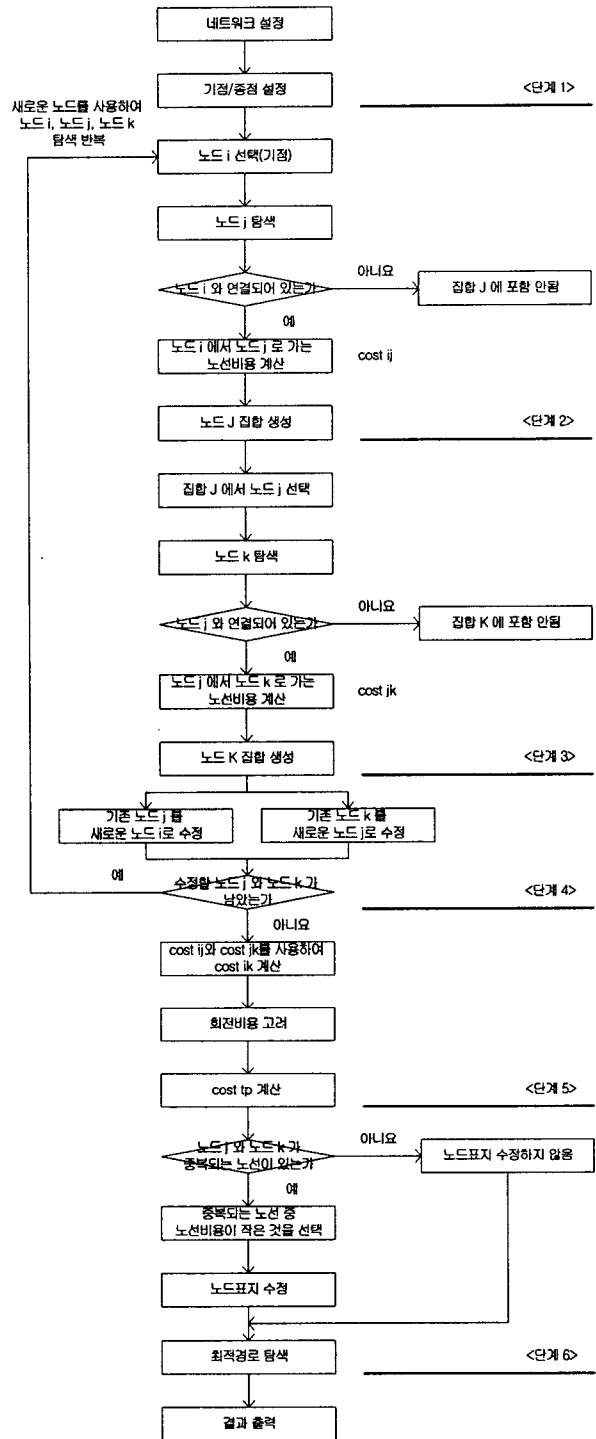
<단계 2> 선택된 기점노드(노드 i)와 하나의 링크로 연결된 노드 j 를 탐색한다. 노드 i 와 연결되어 있으면, 노드 i 에서 노드 j 로 가는데 드는 노선비용 $cost_{ij}$ 를 계산하고, 집합 J 를 생성한다.

<단계 3> 집합 J 의 노드 j 와 하나의 링크로 연결된 노드 k 를 탐색한다. 노드 j 와 연결되어 있으면, 노드 j 에서 노드 k 로 가는데 드는 노선비용 $cost_{jk}$ 을 계산하고, 집합 K 를 생성한다.

<단계 4> 기존 노드 j 를 새로운 노드 i 로, 기존 노드 k 를 새로운 노드 j 로 수정하여 <단계 2>로 돌아간다. 만약 수정할 노드 j 와 노드 k 가 남아있지 않으면 <단계5>로 넘어간다.

<단계 5> $cost_{ij}$ 와 $cost_{jk}$ 를 사용하여 $cost_{ik}$ 를 계산한 후, 회전비용을 고려한 최종 노선비용 $cost_{tp}$ 를 계산한다.

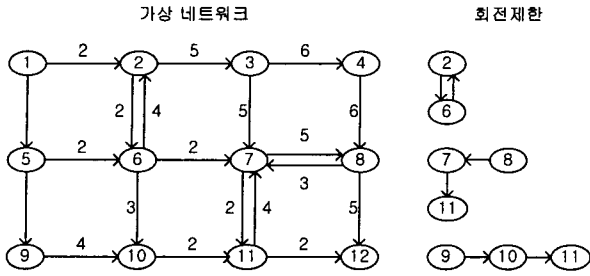
<단계 6> 경로탐색 과정에서 노드 j 또는 노드 k 가 중복되는 경로가 존재하는 경우, $cost_{tp}$ 를 비교하여 가장 작은 노선비용을 가지는 경로를 최적경로로 선택한다.



<그림 1> 최적경로 탐색 알고리즘

3. 가상 네트워크 적용

본 논문에서 제안한 덩굴망 알고리즘을 유-턴과 회전제한이 존재하는 가상 네트워크에 적용하여 검토해 본다. 가상 네트워크는 총 12개의 노드와 20개의 링크를 가지며, 각 링크의 통행비용과 유-턴 및 회전제한은 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 가상 네트워크

가상 네트워크에서 유-턴이 허용되는 노드는 2번, 6번, 7번, 8번, 11번으로 모두 5개이며, 노드 2-노드 6-노드 2, 노드 8-노드 7-노드 11, 노드 9-노드 10-노드 11의 경로에서는 회전 비용을 100으로 주어 회전을 제한하도록 하였다.

계산과정을 보면 기존의 덩굴망 알고리즘과는 달리 모든 노드마다 들어오는 방향별로 이전 경로를 가지고 있으므로, 하나의 노드가 경로 상에 중복되어 포함되더라도 계속적인 탐색이 가능하며, 위에서 살펴본 알고리즘의 수행단계 중 <단계 6>에서 노드 j 또는 노드 k 가 중복되는 경로 중 노선비용을 비교하여 가장 작은 비용을 가지는 경로를 선택하기 때문에 유-턴이나 회전제한이 존재하더라도 올바른 경로 탐색이 가능하다.

제안된 알고리즘의 경로탐색 과정은 <표 3>과 같다.

<표 3> 제안된 알고리즘의 경로탐색 과정

노드 i	노드 j	노드 k	$cost_{ik}$	$cost_{ip}$
1	2	3	7	7
		6	4	4
		6	5	5
2	6	5	7	7
		9	7	7
		3	4	13
		7	12	12
		2	8	108
3	7	4	8	19
		8	17	17
		11	14	14
4	8	7	7	22
		12	24	24
		2	9	9
5	6	7	7	7
		10	8	8
		9	10	11
6(2) ³⁾	7	2	3	13
		6	10	110
		8	11	11
		11	8	8
6(5)	7	10	11	9
		2	3	14
		6	11	11
		8	12	12
7(3)	11	7	7	20
		8	12	22
		7	18	18
		12	16	16

3) $a(i)$ 에서 i 는 a 의 전노드, $a(i,j)$ 에서 i 는 a 의 전노드, j 는 a 의 전전노드

4) $a(i,j,k)$ 에서 i 는 a 의 전노드, j 는 a 의 전전노드, k 는 a 의 전전전노드

7(6,2) ³⁾	8	7	14	14
	11	12	16	16
7(6,5)	8	7	15	15
	11	12	17	17
8(4)	7	8	27	27
	12	11	24	24
8(7,3)	7	8	25	25
	12	11	22	22
8(7,6,2) ⁴⁾	7	8	19	19
	12	11	16	16
8(7,6,5)	7	8	20	20
	12	11	17	17
9	10	11	13	113
10(9)	11	7	17	117
10(6,2)	11	12	15	115
	7	13	13	13
10(6,5)	11	7	14	14
	12	12	12	12
11(7,3)	7	8	23	23
	11	11	20	20
11(7,6,2)	7	8	17	17
	11	11	14	14
11(7,6,5)	7	8	18	18
	11	11	15	15
11(10,9)	7	8	22	122
	11	11	19	119
11(10,6,2)	7	8	18	18
	11	11	15	15
11(10,6,5)	7	8	19	19
	11	11	16	16

가상 네트워크에 대한 최종 경로탐색 결과는 <표 4>와 같다.

<표 4> 경로탐색 결과

노드 i	노드 j	노드 k	$cost_{ip}$
1	2	3	7
1	2	6	4
1	5	6	5
1	5	9	7
2	3	4	13
2	3	7	12
2	6	2	108
2	6	7	6
2	6	10	7
3	4	8	19
3	7	8	17
3	7	11	14
4	8	7	22
4	8	12	24
5	6	2	9
5	6	7	7
5	6	10	8
5	9	10	11
6	2	3	14
6	2	6	11
6	7	8	11

6	7	11	8
6	10	11	9
7	8	7	14
7	8	12	16
7	11	7	12
7	11	12	10
8	7	8	19
8	7	11	116
9	10	11	113
10	11	7	13
10	11	12	11
11	7	8	17
11	7	11	14

가상 네트워크에 대한 최적경로는 노드 1-노드 2-노드 6-노드 7-노드 11-노드 12이고, 최종 노선비용은 10이다.

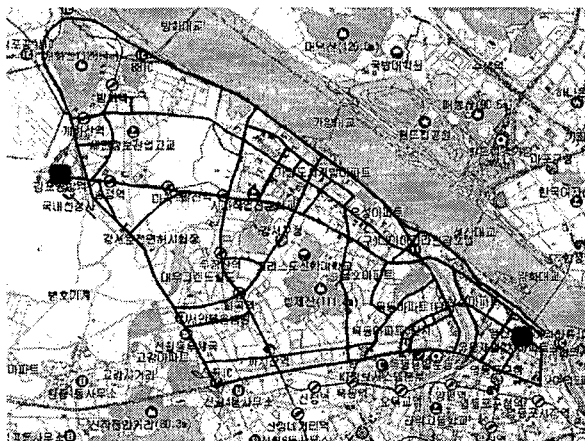
4. 실제 네트워크 적용 및 검증

유-턴과 회전제한이 존재하는 도심부의 도로망을 대상으로 본 논문에서 제안한 덩굴망 알고리즘을 적용하였다. 실험에 사용되는 도로망은 경로 간 비교가 가능하도록 간선도로와 일반도로를 적절하게 포함하여 대안경로가 명확한 지역이어야 한다. 기준점이 김포공항에서 당산역인 강서구 지역은 올림픽대로와 남부순환도로 등의 간선도로와 공항로, 노들길 등과 같은 주요도로를 적절하게 포함하여 뚜렷한 대안경로를 가지므로, 본 논문에서 실제 네트워크로 사용하였다.

그러나, 실제 도로망의 모든 도로를 고려하는 것은 어렵기 때문에 본 논문의 실험목적에 알맞도록 도로망을 간략화하여 네트워크를 설계하였다.

실험에 사용된 네트워크는 교차로와 유-턴 지점을 포함하여 총 91개의 노드를 가지며, 양방향과 일방통행을 포함하여 총 186개의 링크를 가진다. 이중 유-턴이 가능한 지점은 36개이고, 회전제한이 있는 지점은 총 64개이다.

실제 네트워크의 노드분포는 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 실제 네트워크

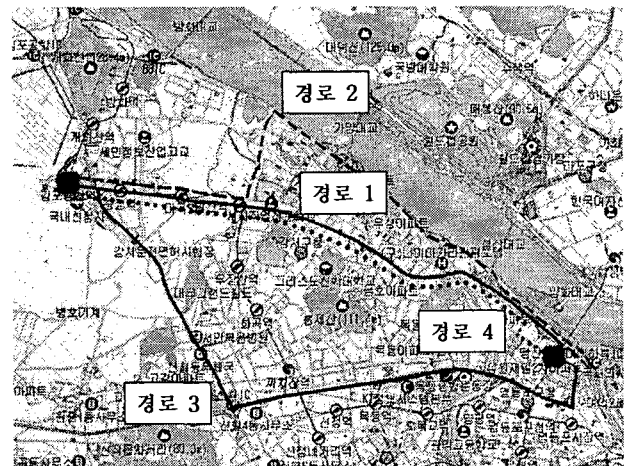
본 논문에서 제안한 최적경로 탐색 알고리즘을 사용하여 다중목적과 고려한 최적경로와 단일목적과 고려한 최적경로를 탐색한 결과는 <그림 4>와 같으며, 각 경로의 탐색기준 및 주요경유지는 <표 5>와 같다.

<표 5> 각 경로의 탐색기준 및 주요경유지

탐색 기준	경로	주요경유지
다중 목적	경로 1	김포공항→송정역→발산역사거리→강서구청사거리→도시가스앞→양화교→인공폭포→<노들길>→양화대교남단→당산역
통행 시간	경로 2	김포공항→송정역→발산역사거리→양천향교입구→<올림픽대로>→여의하류IC→당산 삼성아파트→당산역
통행 속도	경로 3	김포공항→<남부순환로>→신월사거리→신월IC→구화곡사거리→목동교→경인고속입구→영등포전화국→당산주유소→당산역
통행 거리	경로 4	김포공항→송정역→발산역사거리→강서구청사거리→도시가스앞→양화교→양평로→양평동→당산역

다중목적과 고려한 최적경로로 경로 1이 탐색되었는데, 이는 경로 1의 주요도로인 공항로와 노들길의 제한속도가 다른 경로에 포함되어 있는 간선도로의 제한속도와 큰 차이가 없고, 관측된 통행속도는 다른 경로의 도로보다 높아서 지체시간이 적게 산출되었기 때문이다.

또한 경로선택 모형의 결과를 고려하면 통행자는 회전수가 적고 거리가 짧은 경로를 선호하므로, 최적경로도 거의 직선과 같은 경로 1이 탐색되었다.



<그림 4> 경로탐색 결과

실제로 통행자들이 어떠한 경로를 선호하는지 알아보기 위하여 다중목적과 고려한 최적경로와 단일목적과 고려한 최적경로에 대해 설문조사를 통한 검증을 실시하였다.

설문은 총 300명에게 실시하였으며, 이 가운데 검증에 유의하지 않은 16부는 제외하였다. 설문결과는 <표 6>과 같다.

<표 6> 설문결과

평균연령	평균경력	경로 1	경로 2	경로 3	경로 4
32세	8년	50.3%	26.7%	4.30%	13.3%

설문결과 다중목적성을 고려한 최적경로가 단일목적성을 고려한 최적경로보다 통행자의 선택이 많은 것으로 나타났다. 이는 경로 2와 경로 3의 경우 간선도로를 포함하고 있어 통행속도가 다른 경로에 비하여 높을 것으로 예상되지만, 실제로는 간선도로를 포함하지 않는 경로 1의 평균통행속도와 큰 차이가 없고, 통행거리는 상대적으로 길기 때문에 통행자들의 선호도가 높지 않은 것으로 생각된다.

경로 4의 경우는 최적경로인 경로 1과 중첩도가 높기 때문에, 대부분의 통행자들에게 동일한 경로로 인식되었다.

본 논문에서는 경로의 탐색기준이 다름에도 불구하고, 실제 도로망에서 조사된 공항로(경로 1)의 지체시간이 올림픽대로(경로 2)나 남부순환도로(경로 3)의 지체시간과 큰 차이가 없었기 때문에, 최적경로는 통행거리가 가장 짧은 경로 4와 유사하게 탐색되었다.

따라서 실험에 사용된 실제 네트워크와 다른 기준점을 가지는 도로망을 사용하여 본 논문에서 제시한 최적경로 탐색 알고리즘을 적용해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

IV. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 다중목적성을 고려하기 위하여 효용이론을 사용하였으며, 기존의 덩굴망 알고리즘이 가지는 문제점을 수정하여 유-턴 및 회전제한이 존재하는 실제 도로망에서도 올바른 경로탐색이 가능한 알고리즘을 제시하였다. 제안된 알고리즘을 이용하여 다중목적성을 고려한 최적경로를 탐색한 결과, 일반적인 단일목적성을 고려한 최적경로보다 통행자의 선택이 많은 것으로 나타났다. 즉, 통행자의 행태를 좀 더 정확하게 반영하기 위해서는 경로탐색 시 다중목적성을 고려해야 함을 알 수 있다.

그러나, 제안된 알고리즘은 시간에 따른 네트워크 속성들의 변화를 반영하지 못하기 때문에, 교통량의 변화에 따른 시간대별 최적경로를 고려하지 못한다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 향후 연구에서는 시간의 변화를 고려할 수 있는 경로 탐색 알고리즘을 개발하고자 한다.

참고문헌

1. 강맹규, 네트워크와 알고리즘, 박영사, 1991.
2. 노정현, 남궁성, "도시가로망에 적합한 최단 경로 탐색 기법의 개발", 대한국토·도시계획학회지 국토계획 제30권 제5호, 1995.
3. 김익기, "ATIS를 위한 수정형 덩굴망 최단경로 탐색 알고리즘의 개발", 대한교통학회지, 제16권, 제2호, 1998.
4. 교통정보제공에 따른 사용자 반응행태모델 개발, 과학기술부, 2000.
5. J.C.N. Climaco, E.Q.V. Martins, "A bicriterion shortest path problem", European Journal of Operational Research, 1982.
6. E.Q.V. Martins, J.L.E. Santos, "The labeling algorithm for the multiobjective shortest path problem", 1999.
7. Vedat Akgun, Erhan Erkut, Rajan Batta, "On finding dissimilar paths", European Journal of Operational Research, 2000.
8. Paolo Dell'Olmo, Monica Gentili, Andrea Scozzari, "On finding dissimilar Pareto-optimal paths", European Journal of Operational Research, 2004.