

# 통행료체계에서의 경로기반 통행배정모형 개발과 적용에 관한 연구

## Development and Application of a Path-Based Trip Assignment Model under Toll Imposition

서울대학교 공학연구소 권용석

### 요 약

이용자의 경로선택 형태를 모사하는 통행배정모형 결과의 정확도는 교통계획에 상당한 영향을 미친다. 이용자의 경로선택 결정과정에서 가장 중요한 판단기준은 통행시간과 통행요금이다. 그런데 통행요금은 이용자의 경로거리에 따라 다양한 방식으로 부과되므로, 링크를 분석단위로 하는 기존의 통행배정모형은 현실적인 통행요금 반영이 힘들었고 또한 수요예측 결과를 이용한 다양한 분석에서 제약을 받아 왔다.

본 연구는 이러한 배경에서 경로교통량을 도출할 수 있는 경로기반 통행배정모형을 구축하였고, 또한 경로거리에 따라 결정되는 현실적인 통행요금을 반영할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 경로기반 배정모형에서는 GP(Gradient Projection) 알고리즘을 이용하였고, 계산상의 효율성 제고를 위해 K-최단경로 알고리즘 중 MPS(Minimal Path Search) 알고리즘을 이용하였다. 개발된 배정모형은 현실적인 통행요금을 반영할 수 있으므로 통행배정 결과의 정밀도를 향상시켰을 뿐만 아니라 기존 배정모형에 비해 최적해로의 수렴속도도 개선되는 것으로 나타났다.

본 논문의 배정모형은 경로교통량이 도출되고 통행요금을 반영할 수 있으므로, 통행요금과 통행거리 관계에 따른 목적함수의 규명과 그에 따른 효과척도를 계량화할 수 있다. 따라서 본 모형은 통행배정에서 실제상황을 보다 현실여건에 맞도록 규명할 수 있고, 기존의 제한적인 효과분석의 문제점을 해결할 수 있으므로 그 활용범위가 넓다.

또한 본 논문은 개발된 배정모형의 적용사례로서 고속도로 수요관리 요금체계 개선방안을 제시하였다. 기존의 고속도로 통행요금 산정 방법은 이론적 근거가 미약했던 반면, 본 논문에서 개발된 배정모형과 고속도로 수요관리 요금체계 개선방안은 고속도로 통행료 결정에 대한 과학적이고 합리적인 분석방법을 제공하였다.

### 차 례

- 제 1 장 서 론
- 제 2 장 Gradient Projection 알고리즘
- 제 3 장 통행요금을 반영한 경로기반 통행배정모형 개발
- 제 4 장 고속도로 수요관리 요금체계 결정방안
- 제 5 장 모형적용을 통한 고속도로 수요관리 요금체계 구축
- 제 6 장 결 론
- 참고문헌
- 부록

## 제 1 장 서 론

전통적인 통행배정모형은 구간의 교통량과 지체함수로 구성된 수학적 모형에서 통행배정문제의 해를 구하므로 구간기반 통행배정(Link-Based Assignment : LBA)이라 할 수 있다. LBA모형은 그 해가 구간교통량에 있어 안정적이고 유일함이 증명되었으므로 범용적으로 사용되어 왔다.

최근 연구되고 있는 경로기반 통행배정(Path-Based Assignment : PBA)모형은 기종점간 경로 교통량을 결정변수로 하여 배정문제의 해를 도출한다. 교통운영 측면에서 통행자의 기종점간 경로 배정결과의 필요성이 높아지고 있는 현실에서 이 분야의 연구가 진행되고 있다.

통행배정모형은 기종점간 통행량이 주어져 있을 경우 구간 또는 경로교통량을 예측하는 것으로, 이는 다른 측면에서 보면 이용자의 경로선택행태 모사를 의미한다. 이용자가 경로를 결정할 때의 중요한 판단기준은 시간과 요금이다. 따라서 통행배정모형은 이러한 시간과 요금을 모형내에서 정확히 반영하는 방향으로 개발되어야 한다.

그런데 교통시설물을 이용할 때 금전적으로 지불하는 비용 즉, 통행요금은 그 종류와 실제 운영에서 다양한 형태의 구조로 집행되고 있다. 이렇게 다양한 구조의 통행요금을 통행배정모형에 반영하기 위해서는 이용자의 총 주행경로거리가 도출되어야 하지만, 기존의 배정모형에서는 구간교통량을 도출할 뿐 통행자의 기종점간 경로에 대한 정보를 전혀 제시하지 못하고 있어 통행요금 역시 편법적인 방법으로 반영하여 왔다.

현실적인 통행요금을 통행배정모형에 반영하기 위해서는 경로통행요금이 고려되어야 한다. 따라서 배정모형도 경로교통량을 도출할 수 있는 경로기반 통행배정모형을 활용하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 배경을 전제로, 경로통행시간과 경로통행요금이 고려된 경로기반 통행배정 알고리즘을 구축하고, 궁극적으로 현실적인 통행요금을 반영할 수 있는 경로기반 통행배정모형을 개발하는데 일차적 목적이 있다.

한편 현실적인 통행요금이 반영되는 경로기반 배정모형의 검증을 위한 사례연구는 고속도로를 대상으로 수행하되, 본 모형을 적용하여 고속도로의 수요관리 요금체계까지 검토하였다. 현재 고속도로 통행요금은 고속도로 본래의 기능 확보를 위해 단거리통행 억제, 장거리통행 유인이라는 수요관리 개념을 도입하여 최저요금제와 장거리할인제를 시행하고 있다.

그런데, 시행중인 최저요금제와 장거리할인제는 제도 도입과정에서 고속도로와 대체도로간의 수요관리를 고려한 분석적 방법을 사용하지 않고 상황 대응적 총 원가보상 측면에서 정책적으로 결정되었다. 따라서 단거리, 장거리의 구분이나 할인을 등의 산정이 합리적이고 과학적이지 못하여 단거리 억제, 장거리통행차량의 고속도로 유인과 전환교통에 따른 대체도로의 소통분석 등 수요관리 효과분석에 대한 다각적 측면의 근거와 기준을 제시하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 고속도로에서 시행중인 최저요금제와 장거리할인제에 대한 문제점을 검토·분석하고 이의 합리적이고 과학적인 개선방안을 수립시킬 수 있는 수요관리를 위한 고

속도로 요금체계 결정방안을 구축하고자 한다. 고속도로에서 단순 단거리통행 감소와 장거리통행 증가로 교통망전체의 소통개선에 따른 사회·경제비용의 최소화를 위한 방법론을 제시하며, 또한 여기서 도출된 결과를 현재 고속도로 요금체계 기준과 비교·검토하여 시행중인 최저요금제, 장거리할인제 등의 기준거리 산출방법론을 개선한 새로운 고속도로 통행료 결정 방법론을 제시하는데 본 연구의 이차적 목적이 있다.

## 제 2 장 Gradient Projection(GP) 알고리즘

GP 알고리즘은 가능해 영역의 방향 탐색을 이용한 최적화 기법의 하나로서 최적경로 배정문제를 풀기 위해 사용된다. 이 알고리즘은 반복계산에서 각각의 O/D에 대한 최단경로 알고리즘과 최소 일차미분거리에 기반하고 있으며, 반복계산마다 각 경로에서의 교통량의 변화는 각 경로 비용함수의 이차미분에 근거하여 계산된다. 물론 그 변화가 너무 커서 흐름이 음수가 나온다면 그 값은 0으로 투영(projection)된다.

GP 알고리즘은 일단 최적치에 근접하면 수렴속도가 다소 느려지게 되지만, 일반적으로 최적치 근처로는 빨리 접근한다. 실제의 경로배정 문제들에서는 적은 반복계산 안에서 빠르게 최적치 근처 즉, 오차범위 내로 수렴하는 것이 정확한 최적값을 구하는 것보다 우선이기 때문에 이러한 방법은 충분히 만족스럽다고 할 수 있다. 이러한 방법은 통상 사용하는 Frank-Wolfe(F-W)방법보다 훨씬 우수하다.

GP 알고리즘의 해풀이 과정을 F-W알고리즘과 비교하면 <그림 1>과 같다. 그림에서 보면 F-W 알고리즘은 지그재그로 진행하지만 GP 알고리즘은 효율적으로 최적해로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다.

## 제 3 장 통행요금을 반영한 경로기반 통행배정모형 개발

### 3.1 목적함수의 정의

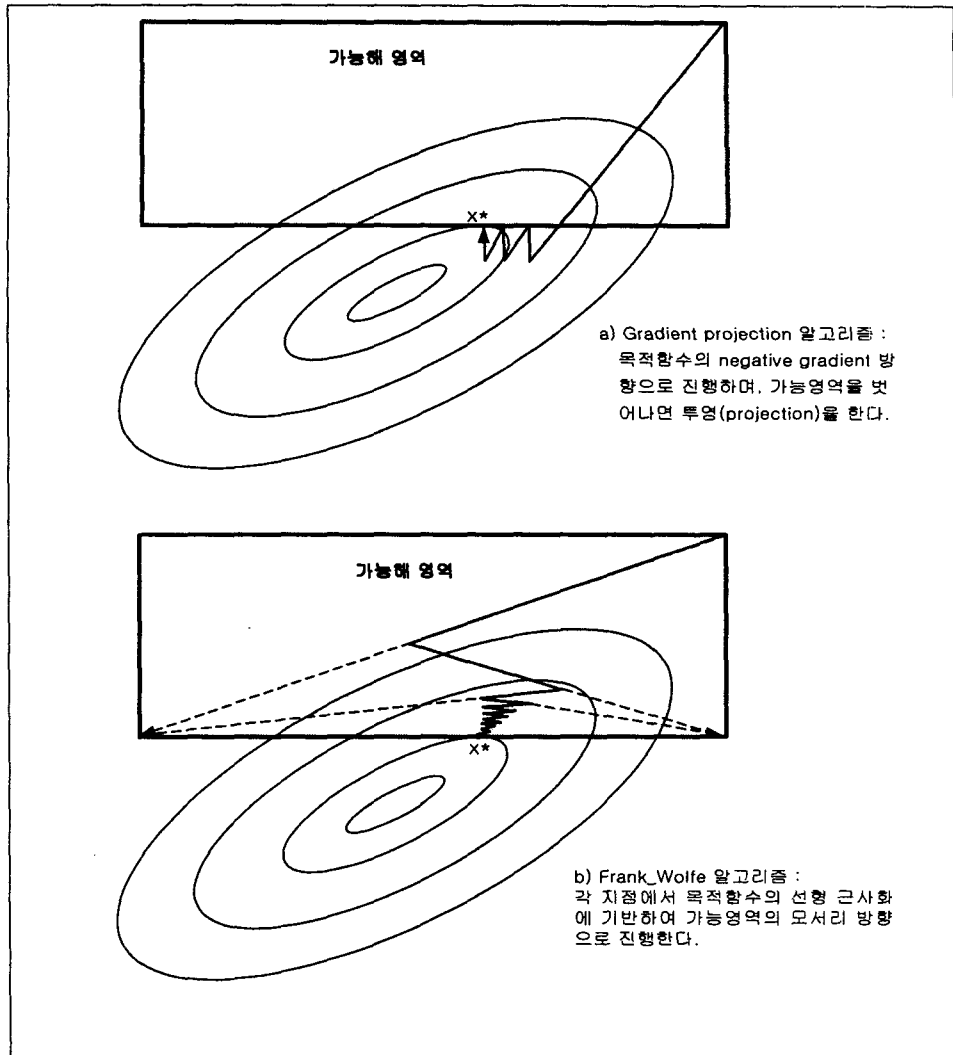
목적 함수

$$Min. \sum_{link\ a} \int_0^{V_a} S_a(x) dx + \sum_i \sum_j \sum_r T_{ijr} \cdot P_{ijr}$$

제약조건

$$\sum_r P_{ijr} = P_{ij} \quad \forall i, j$$

$$P_{ijr} \geq 0 \quad \forall i, j, r$$



<그림 1> GP 알고리즘과 F-W 알고리즘의 수렴과정 비교

### 3.2 사용 기호의 정의

본 문제를 정식화하는데 필요한 기호들의 정의는 다음과 같다.

$i$  = 기점

$j$  = 종점

$a$  = 링크

$(i, j)$  = 처리대상 O/D쌍 =  $w$

$p$  = 처리대상 경로

$$V_a = \text{링크 } a \text{의 교통량} = \sum_i \sum_j \sum_r P_{ijr} \cdot \delta_{ijr}^a$$

$P_{ijr}$  = 기점  $i$ 에서 종점  $j$ 에 이르는 경로  $r$ 의 교통량

$\delta_{ijr}^a = 1$ , 링크  $a$ 가  $i$ 와  $j$ 를 연결하는 경로  $r$ 의 일부일 경우  
0, 그 외의 경우

$P_{ij}$  = 기점  $i$ 와 종점  $j$ 간의 통행량

$P_w$  = 처리대상 O/D쌍  $w$  간의 통행량

$S_a$  = 링크  $a$ 의 지체함수

$S_a(V_a)$  = 링크  $a$ 에서의 교통량  $V_a$ 에 대한 지체비용

$T_{ijr}$  =  $i, j$  간 경로  $r$ 에 대한 통행요금의 시간환산치

$T_p$  = 경로  $p$ 에 대한 통행요금의 시간환산치

$X_w$  = O/D 쌍  $w$ 의 처리대상 경로집합

$\overline{p_w}$  = O/D 쌍  $w$ 에서의 최단경로

$L_p$  = 어떤 경로  $p$ 와 최단경로  $\overline{p_w}$ 중에 하나에만 속하는 링크의 집합

$d_p$  = 경로  $p$ 의 일차 미분거리

$d_{\overline{p_w}}$  = 최단경로  $\overline{p_w}$ 의 일차 미분거리

$H_p$  = 경로  $p$ 의 이차 미분거리

$p_{\min}$  = 총비용  $TC_p$ 를 감안한 최단 경로

$p_k$  =  $LC_p$ 만을 감안한  $k$ 번째 최단 경로

$LC_p$  = 경로  $p$ 에서 링크들의 거리와 혼잡도 만을 감안한 경로 비용

$T_p$  = 경로  $p$ 의 통행요금의 시간환산치

$TC_p$  = 경로  $p$ 의 총 통행 비용

$$= LC_p + T_p$$

$p_{st}^*$  = 출발지  $s$ 에서 목적지  $t$ 까지의 최단 경로

$c_{mn}$  = 링크 ( $m, n$ )의 통행비용

$\overline{c_{mn}}$  = reduced cost =  $\pi_n - \pi_m + c_{mn}$

$\pi_m$  =  $m$ 에서 목적지까지의 최단경로 비용

$A(v)$  = 어떤 노드  $v$ 에서 목적지  $t$ 에 이르는 경로들에 속한 링크 집합

$T_t^*$  = 모든 O/D간의 최단 경로의 집합

### 3.3 통행요금을 반영한 경로기반 배정모형 알고리즘

통행요금을 반영한 경로기반 통행배정모형의 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

1. 각각의 O/D쌍  $w$ 에 대해 통행 요금을 반영한 최단경로( $\overline{p}_w^1$ )를 구한다.

→(subroutine min path)

경로 집합  $X_1, X_2, \dots, X_w$ 에 그 경로를 포함시킨다.

2. 초기량을 각각 그 O/D의 최단경로에 전부 배정한다.
3. 비용 함수를 이용해 각각의 경로의 비용을 계산한다.
4. 목적함수<sub>1</sub>을 계산한다.
5. 각 O/D쌍  $w$ 에 대해 통행 요금을 반영한 최단경로( $\overline{p}_w^{k+1}$ )를 구한다.

→ (subroutine min path)

6.  $X_w$ 에 있는 각각의 경로  $p$ 에 대해 아래의 식에 따라  $x_p^{k+1}$ 를 찾는다.

$$x_p^{k+1} = \max\{0, x_p^k - \alpha H_p^{-1}(d_p - d_{\overline{p}_w})\} \quad \text{for all } w \in W, p \in P_w, p \neq \overline{p}_w$$

7. 각각의 경로  $p$ 의 경로교통량에  $x_p^{k+1}$ 만큼을 배정한다.

각 O/D쌍  $w$ 의 최단경로에  $P_w - \sum x_p^{k+1}$ 를 배정한다.

8. 최단경로를 경로집합  $X_w$ 에 포함시킨다.
9. 경로집합  $X_w$ 에 있는 경로 중 교통량이 없어지는 경로( $x_p^{k+1}=0$ 인 경로)를 경로집합  $X_w$ 에서 제외한다.
- 5~9 까지의 과정을 각 O/D에 대해 반복한다.
10. 비용함수를 이용해 각각의 경로 비용을 계산한다.
11. 목적함수<sub>k+1</sub>을 계산한다.
12.  $(\text{목적함수}_k - \text{목적함수}_{k+1})/(\text{목적함수}_{k+1}) \leq \epsilon$ 을 검증한다.

위의 조건을 만족하면 끝내고, 그렇지 않으면, 과정5로 간다.

■ subroutine min path(고속도로 통행요금을 반영한 최단경로알고리즘)

1. Min path 알고리즘을 이용해 LC만을 감안한 최단 경로  $p_1$ 을 찾고  $LC_1$ 을 계산한다.
2.  $p_{\min} \leftarrow p_1$ .

3. 만약  $T_1 \neq 0$  이면,  $TC_1$  를 구하고,  $TC_{\min} = TC_1$  이 된다.

$T_1 = 0$  이면,  $p_{\min} = p_1$  이 되고, 과정10으로 간다.

4.  $i \leftarrow 1$

5. MPS 알고리즘을 이용해  $p_{i+1}$  을 구하고  $LC_{i+1}$  을 계산한다.

→(subroutine MPS)

6. 만약  $LC_{i+1} \geq TC_1$  이면 과정10으로 간다.

7. 그렇지 않은 경우  $TC_{i+1}$  을 구한다.

8. 만약  $TC_{i+1} < TC_{\min}$  이면,  $p_{\min} \leftarrow p_{i+1}$  이 되고,  $TC_{\min} \leftarrow TC_{i+1}$  이 된다.

9. 그렇지 않은 경우  $i \leftarrow i+1$  이 되고, 5로 간다.

10.  $p_{\min}$  를 출력하고 알고리즘을 끝낸다.

■ subroutine MPS( K번째 최단경로를 구하는 알고리즘 )

1. O/D간 최소경로  $T_t^*$  를 구한다.

2. 모든 링크  $(m, n) \in A$  들에 대해  $\overline{c_{mn}}$  를 구한다.

3. 모든 링크들을  $\overline{c_{mn}}$  의 순서에 따라 배열한다.

4.  $p_1 \leftarrow$  출발지 s에서 목적지 t로의 최단경로

$k \leftarrow 1$

$X \leftarrow \{p_k\}$

$T_k \leftarrow \{p_k\}$

5.  $k \geq K$  이거나  $X = \emptyset$  이면 과정9로 간다.

6.  $X \leftarrow X - \{p_k\}$

$v_k \leftarrow p_k$ 에서 t를 제외한 노드

7. 각각의 노드  $v \in p_{vkt}^k$  에 대해

만약  $A(v) - A_{T_k}(v) \neq \emptyset$  이면,

$(v, x) \leftarrow$  집합  $A(v) - A_{T_k}(v)$  에서 제일 처음의 링크( $\overline{c_{mn}}$  가 제일

작은 링크)

$q \leftarrow p_{sv}^k \diamond \{v, (v, x), x\} \diamond p_{xt}^*$

$$X \leftarrow X \cup \{q\}$$

$$q_{vt} \leftarrow \{v, (v, x), x\} \circ p_{xt}^*$$

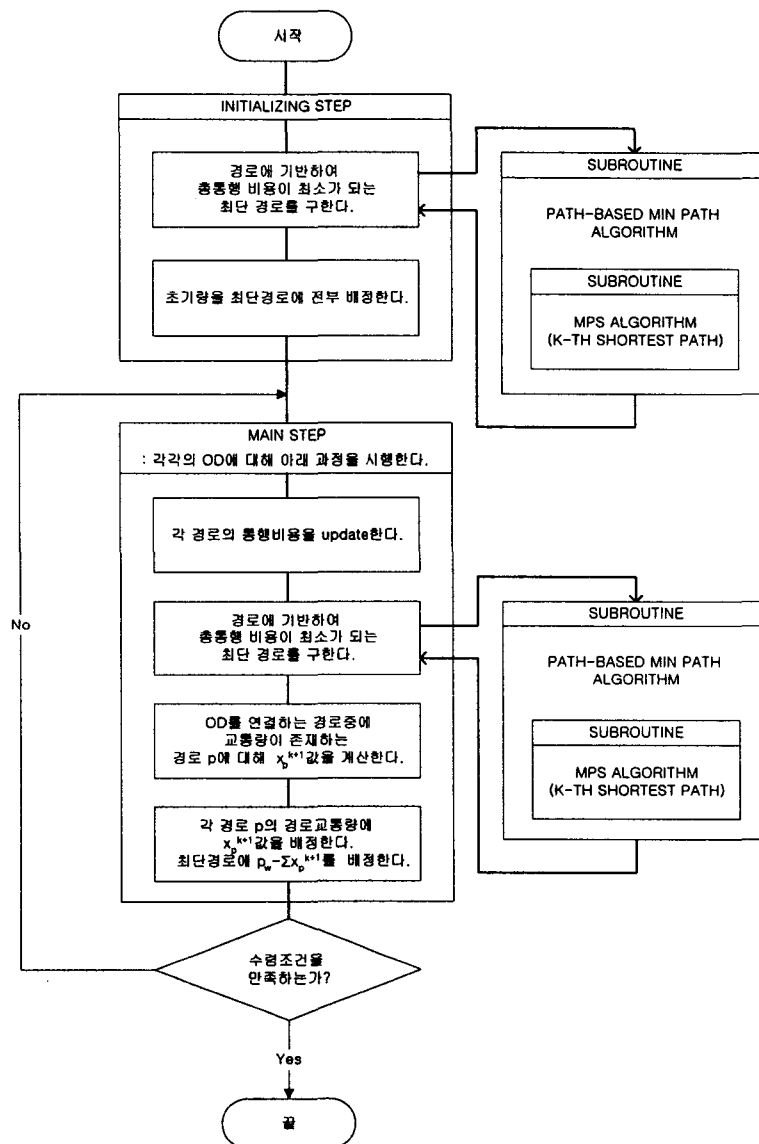
$$T_k \leftarrow T_k \cup \{q_{vt}\}$$

8.  $k \leftarrow k+1$

$p_k \leftarrow X$  에서 최소 비용 경로

$k$  번째 최단경로  $p_k$  를 출력하고, 과정 5로 간다.

9. 알고리즘을 끝낸다.



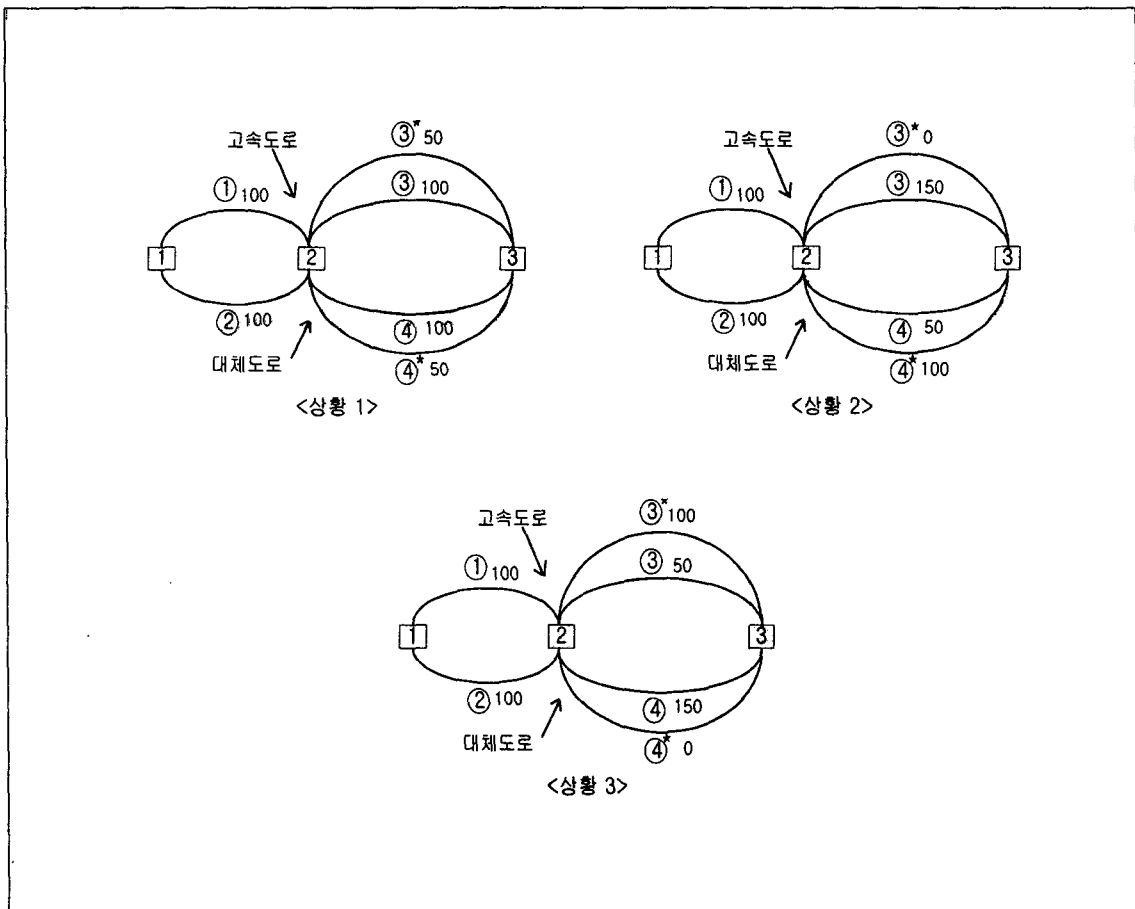
<그림 2> 통행요금을 반영한 경로기반 배정모형 순서도



### 3.4 통행요금을 반영한 경로기반 배정모형 해의 유일성문제

일반적으로, 경로기반 배정모형의 해는 링크교통량 측면에서는 유일하지만, 경로교통량 측면에서는 비록 그 해가 최적일지라도 유일하지 않다고 알려져 있다. 경로기반 배정모형 해의 유일성문제에 대하여 본 연구의 배정모형과 일반적인 경로기반 배정모형을 다음과 같은 상황에서 비교해보았다. 1번존에서 3번존으로 진행하는 교통량이 200이고, 2번존에서 3번존으로의 교통량이 100이며 ③, ④ 링크는 1번존에서 3번존으로의 경로상에 위치하고 ③\*, ④\* 링크는 2번존에서 3번존으로의 경로라고 하면, 일반적인 경로기반 배정모형에서는 다음과 같은 상황에서 경로교통량은 차이가 있지만 구간교통량과 모형의 목적함수 값은 동일하므로 같은 결과로 도출된다.

그런데 통행요금을 고려한 본 연구 배정모형은 상황 1과 상황 2는 고속도로 단거리 통행량과 장거리 통행량이 동일하여 같은 결과로 인식되므로 목적함수의 최적해도 같고 4장에서 검토하는 고속도로 단거리할증, 장거리할인 등의 수요관리 요금체계에의 적용에 문제가 없으나 상황 3의 경우는 목적함수 값이 다르기 때문에 배정결과로 발생되지 않는다.



<그림 3> 경로기반 배정모형의 유일성 문제 비교도

### 3.5 모형의 평가 및 검증

본 연구에서 개발한 통행요금을 반영한 경로기반 통행배정모형의 수행능력 및 효율성을 검증하기 위해서, 현재 범용적으로 사용되고 있는 EMME/2 프로그램의 결과와 비교하였다.

분석은 PENTIUM-133 MHz(32MB RAM) 컴퓨터에서 수행하였고, 평가척도로는 목적함수값과 계산반복회수, 수렴속도를 비교대상으로 하였다. 목적함수값의 비교는 최적해로의 접근 정도를 파악할 수 있으며, 반복회수와 수렴속도는 모형의 효율성을 판단할 수 있다.

두 모형을 비교 평가는 일반적인 교통망의 특성을 효율적으로 나타내고 있어 모형의 평가를 위한 가상교통망으로 많이 사용되고 있는 Sioux Falls Network를 대상으로 이루어졌다. 예제로 사용된 분석대상 기종점 통행량은 6개의 O-D쌍으로 설정하였으며, 교통망의 링크속성은 통행요금의 반영을 위해 고속도로와 국도의 현실적인 속성자료를 반영하였다.

예제 교통망에서 EMME/2 모형과 본 연구 배정모형의 비교는 요금미부과시와 요금부과시로 구분하여 검토하였는데 배정결과는 부록에 수록하였다.

두 모형의 평가척도 비교결과는 <표 1>과 같은데, 먼저 목적함수 측면에서 보면, 요금미부과시나 부과시 모두에 있어서 두 모형의 수렴값이 거의 일치하는 것을 보여준다. 이는 본 연구의 배정모형이 최적해로 수렴하였음을 나타낸다.

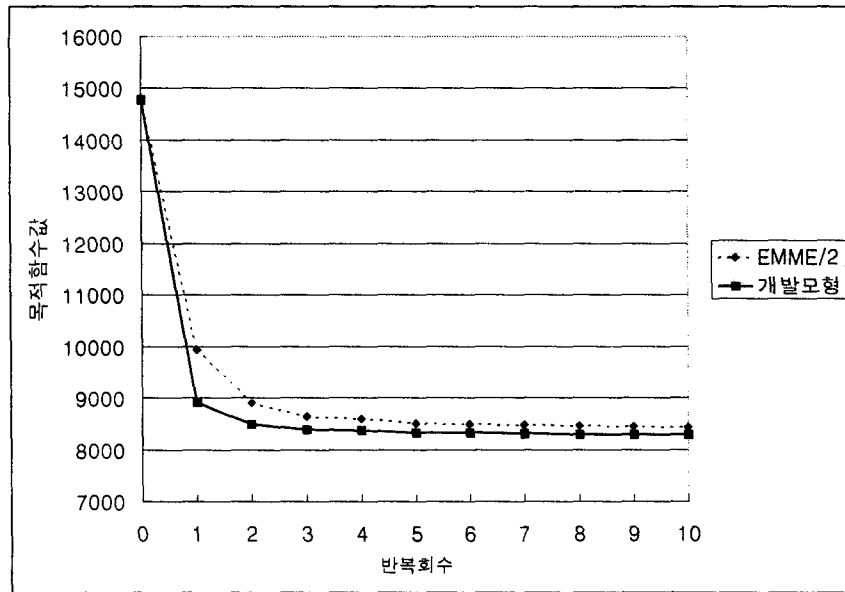
모형의 효율성을 검증할 수 있는 계산반복회수에 있어서는 본 연구의 배정모형이 EMME/2 모형에 비해 약 1/2 수준으로 단축되었음을 알 수 있다. 이는 GP 알고리즘이 F-W 알고리즘에 비해 최적해로의 진행과정이 효율적이기 때문에, F-W 알고리즘을 사용하는 EMME/2 모형에 비해 GP 알고리즘을 이용한 본 연구의 배정모형 결과가 우수하게 나타난 것으로 사료된다.

한편 최적해로의 수렴속도 측면에서도 본 연구의 배정모형 결과가 EMME/2 결과에 비해 개선되었음을 알 수 있다.

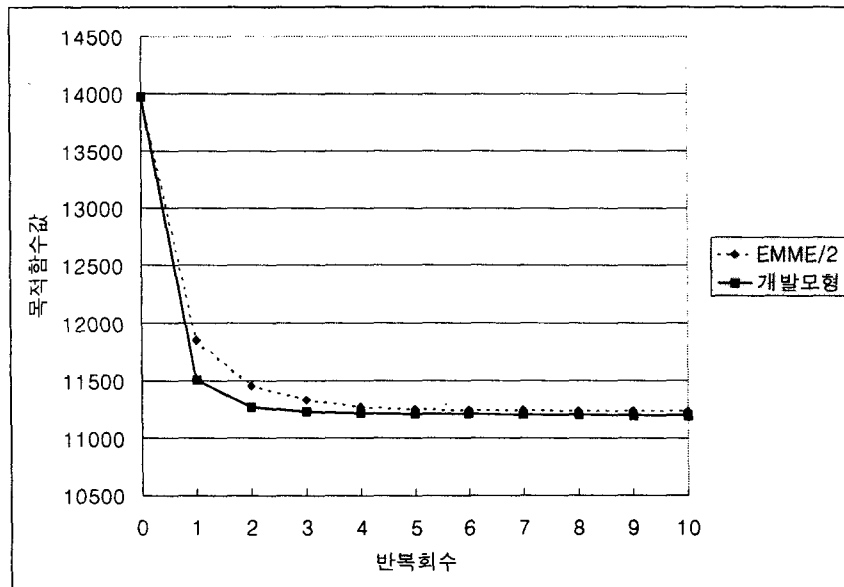
<표 1> 모형의 평가척도 비교표

구 분	요금 미부과		요금부과	
	EMME/2	개발모형	EMME/2	개발모형
반복회수	32	14	15	8
CPU계산속도 (초)	0.9	0.7	0.5	0.3
목적함수값	8,342.8	8,340.3	11,223.4	11,221.5

또 다른 평가기준으로 배정모형의 반복회수에 따른 목적함수 값의 변화그래프를 비교해 보면, 본 연구의 배정모형이 EMME/2 모형에 비해 초기단계에 최적해에 근접하는 것으로 나타났으며 이는 최적해로의 수렴능력에 있어서 보다 효율적이라 할 수 있다. 특히 반복회수의 제약조건이 있는 상황에서 본 배정모형은 보다 우수한 결과를 얻을 수 있었다.



(요금 미부과)



(요금 부과)

<그림 4> 모형의 반복회수에 따른 목적함수값 비교

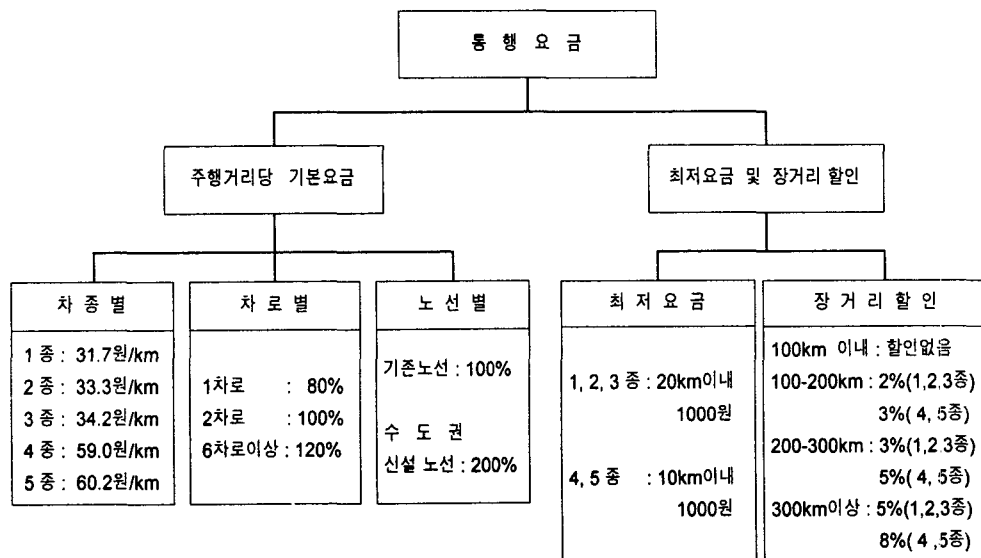
## 제 4 장 고속도로 수요관리 요금체계 결정방안

### 4.1 고속도로 수요관리의 필요성

현재 고속도로 주행거리별 이용차량 분포를 보면 전체 이용차량의 77.9%가 50km 이하를 주행하고 있고 100km 이상 장거리 주행차량은 8.0%에 불과하며, 특히 승용차의 평균주행거리가 60km에 불과한 등 현재 고속도로는 장거리 간선교통망의 기능보다 출퇴근 등 단거리 교통망으로서 그 역할을 하고 있으며 이에 따른 고속도로 기능 및 효율성 저하로 인한 사회·경제적 비용은 본래의 생산력을 크게 저해하고 있다.

따라서 고속도로는 전술한 높은 생산력과 국가경쟁력 제고를 위해서 장거리통행이 추가 되어야 하며 이를 위해 단거리통행이 고속도로 수요를 증가시키는 것과 상당량 고속도로 용량을 차지하는 것을 막는 등 단거리통행 규제의 필요성이 높다. Yager는 장거리통행의 고속도로 이용의 필요성 강조와 고속도로의 일부 용량은 장거리통행을 위해서 보호되어야 한다는 관점에서 램프미터링을 통한 단거리통행 운전자의 전환을 강조하였고, Robinson과 Doctor 등은 고속도로가 매우 짧은 통행에 대해서는 서비스할 필요가 없다고까지 하고 있다. 이는 고속도로 본래의 기능 및 효율성 그리고 생산성을 감안할 때, 고속도로에서 단거리통행의 규제가 필요함을 의미한다.

### 4.2 고속도로 수요관리 요금체계 검토



<그림 5> 고속도로 통행요금 구조

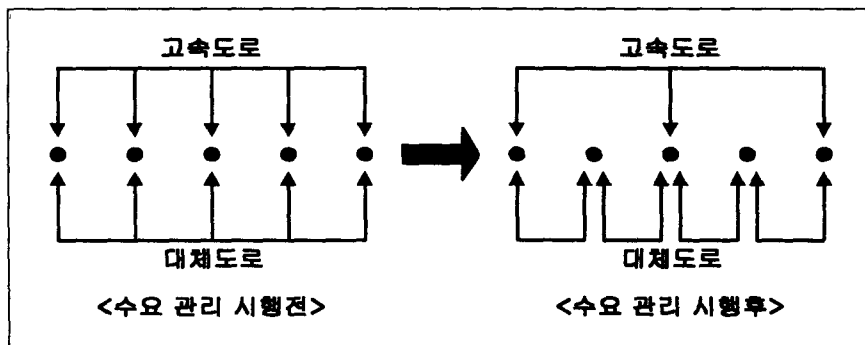
현재 시행중인 최저요금제와 장거리할인제는 제도의 검토단계에서 통행자의 효용측면이 전혀 고려되지 않았고 또한 편익개념이 반영되지 않으므로, 적용되고 있는 통행료 기준이 최적의 의미를 갖지 못한 점등이 문제점으로 지적된다. 또한 고속도로 이용으로 발생하는 편익도 초기에 조사된 고속도로 및 대체도로의 교통량만으로 계산되므로 통행료변화에 따른 고속도로 및 대체도로의 교통량 변화가 고려되지 않아 적정통행료 결정을 위한 민감도분석 및 환류(Feed Back)작업이 이루어지지 않는 실정이다.

최저요금제는 최저요금이 징수되는 기준거리와, 최저요금수준 산정과정 없이 몇 개의 대안적인 최저거리에 대한 최저요금이 제시되었을 뿐이고, 시행중인 최저요금 기준거리 20km는 정책적으로 결정되었다. 따라서 통행요금 체계의 결정에서 고속도로와 대체도로간의 수요관리 개념을 전혀 고려하지 못하고 있다.

또한 장거리할인제 역시 고속도로 건설총괄원가를 보전할 수 있는 수준에서 결정하여야 한다는 원론적 측면에서의 언급 뿐 장거리의 구분이나 할인을 등의 산정과정이 없어 장거리 통행차량의 고속도로 유인과 대체도로의 수요관리에 대한 근거를 제시하지 못하고 있다.

#### 4.3 고속도로 수요관리 요금체계 결정방안

수요관리 요금체계의 효과의 개념을 도식하면 <그림 6>과 같은데, 교통체계를 고속도로와 대체도로로 구별할 때 기존에는 두 도로 모두 단거리·장거리 통행이 혼재되어 있고 부분적으로 혼잡이 발생할 수 있다. 그렇지만 수요관리의 시행 후 고속도로에서 단거리통행은 대체도로로 전환되고 대체도로에서는 장거리통행이 고속도로로 전환되는 효과를 볼 수 있다. 수요관리 요금체계의 궁극적인 목표는 국도 등 대체도로는 단거리위주의 통행이 주를 이루고 고속도로는 장거리 통과교통이 주 이용대상이 되는 개념이다.



<그림 6> 수요관리 요금체계 효과도

#### 4.4 고속도로 수요관리 요금체계 분석의 효과척도

전술한 수요관리 요금체계의 효과분석을 위해서는 고속도로 통행요금 변화에 따라 변동되는 고속도로와 대체도로의 교통량을 사회적 비용 관점에서 검토하여야 한다. 여기서 사회적 비용이란 모든 통행자의 통행시간 합을 의미하는데 이는 체계최적해(system optimized solution)의 개념을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 통행거리관리의 효과척도로서 사회적 비용 최소화를 사용하여 체계 최적해에 근접하고자 한다.

사회적 비용 최소화에 대한 목적함수의 수리적인 표현은 다음과 같다.

$$\text{Min. } \sum_a S_a(V_a) \cdot V_a$$

또 다른 효과척도로써 총 통행료수입을 들 수 있다. 총 통행료수입은 도로공사 등의 영업수지 개선측면에서 의미 있는 결정변수지만, 특히 최근 공공시설에 대한 민자유치투자가 활발한 점을 고려하면, 운영자 입장에서 고려 대상인 결정변수이므로 이를 포함시켰다. 통행료 수입은 경로 교통량과 주행경로에 대한 통행료의 곱으로 표현된다

$$\text{Max. } \sum_p C_p \cdot X_p$$

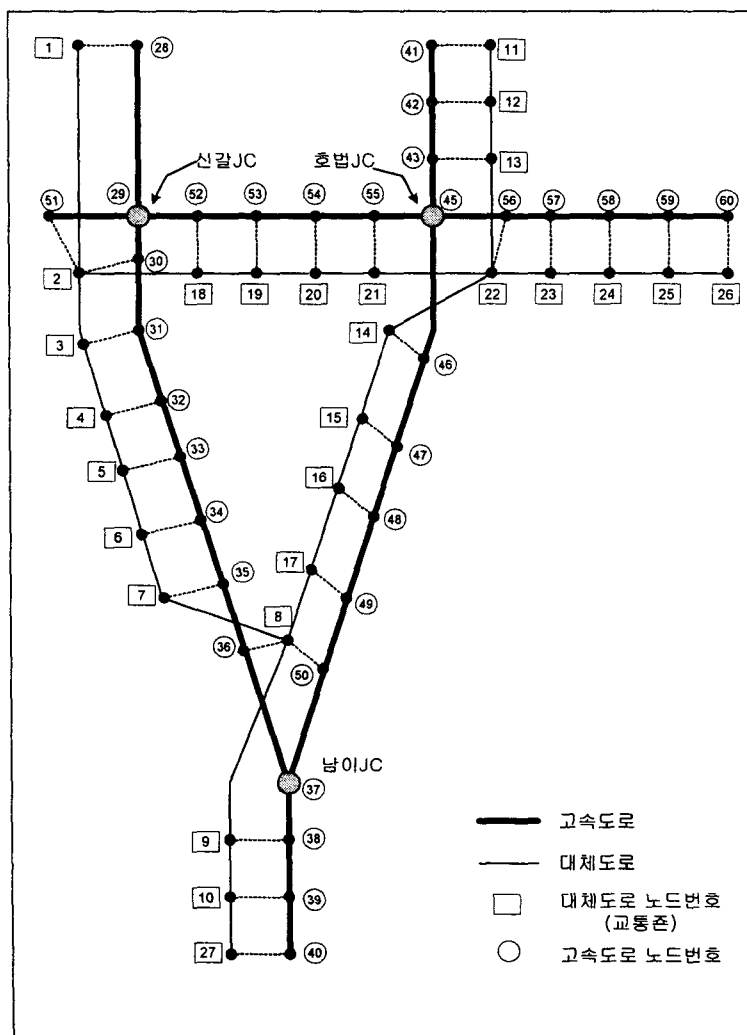
$C_p$  = 경로  $p$ 의 통행료

$X_p$  = 경로  $p$ 의 교통량

## 제 5 장 모형적용을 통한 고속도로 수요관리 요금체계 구축

### 5.1 분석 교통망의 설정

배정모형 및 수요관리방안의 사례적용은 전술한 바와 같이 실제 고속도로망과 이와 병행하는 대체도로로 구성하였는데 이는 <그림 7>과 같다. 분석대상 교통망의 구성은 <그림 7>에서 보는 바와 같이 29개의 교통존을 포함한 60개의 노드로 구성되어 있다. 각각의 노드는 고속도로 32개, 대체도로 32개의 링크로 연결되어 있고, 각 링크의 차로수와 길이는 「도로교통량통계연보, 1999」에서 제시된 값을 사용하였다. 기중점교통량은 도로공사의 통행료징수시스템(TCS : Toll Collection System) 자료를 이용하여 산출하였다.

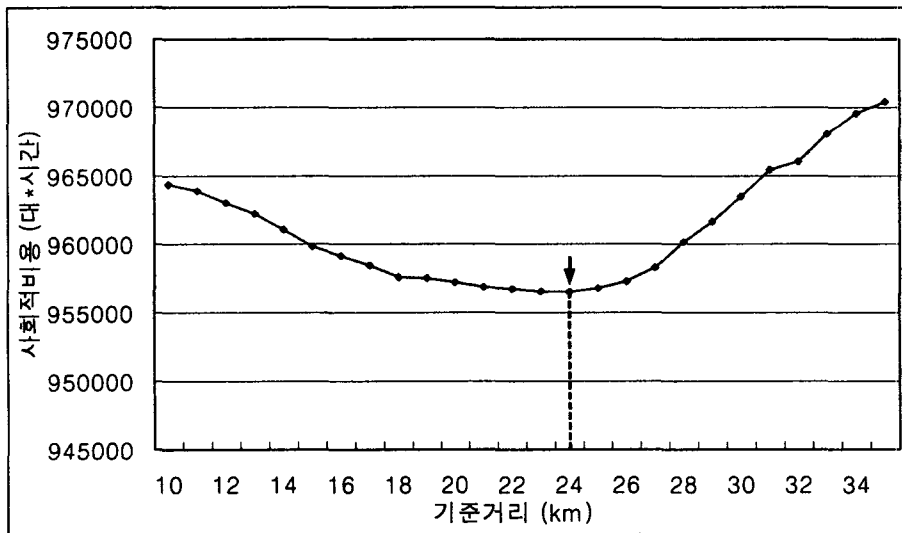


<그림 7> 사례연구 분석 교통망

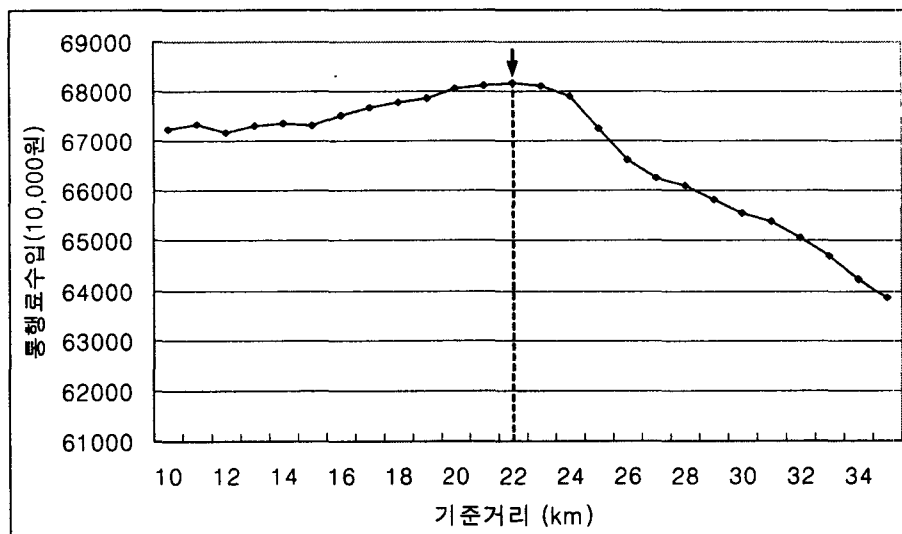
## 5.2 분석결과

### ● 최저요금 기준거리 도출

최저요금 기준거리 도출을 위한 결과는 <그림 8>에 나타난 바와 같이, 사회적 비용이 최소가 되는 최저요금 기준거리는 24km인 것으로 분석되었다. 이는 사회적 비용 최소화 관점에서 고속도로에서 승용차의 최저요금 기준거리는 24km이고 그 이하 거리에서는 최저요금 1126.8원을 징수하는 것이 교통망 전체의 운영효율화를 도모할 수 있는 것으로 도출되었다. 이 결과는 현재의 승용차 최저요금 기준거리 20km와 최저요금 1000원과 비교해볼 때 최저요금 징수구간의 연장이 4km 증가하고 최저요금이 약 130원 정도 인상되어, 단거리 이용이 좀 더 억제되어야 실제 교통망에서의 운영최적화를 도모할 수 있다는 것을 시사하고 있다. 한편 통행료수입은 기준거리 22km에서 최대값을 나타내고 있다.



<그림 8> 최저요금 기준거리별 사회적 비용



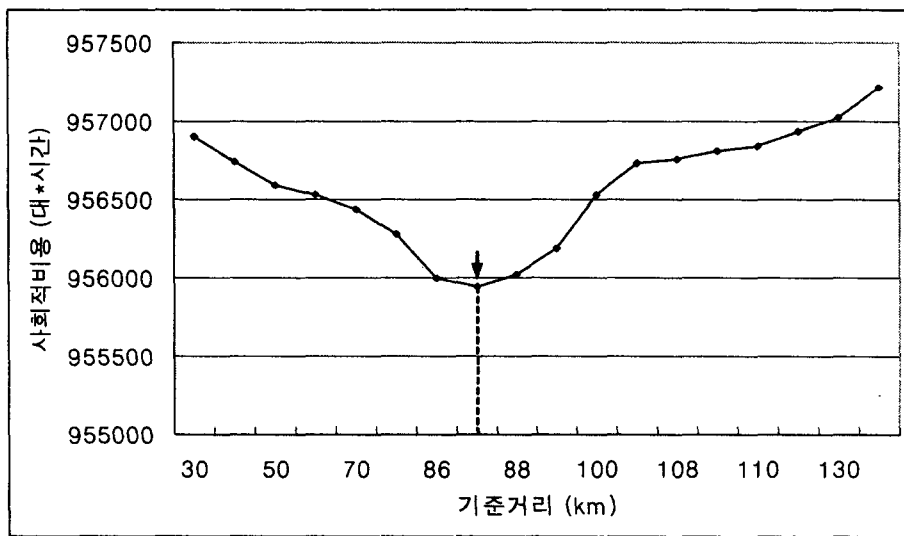
<그림 9> 최저요금 기준거리별 통행료 수입



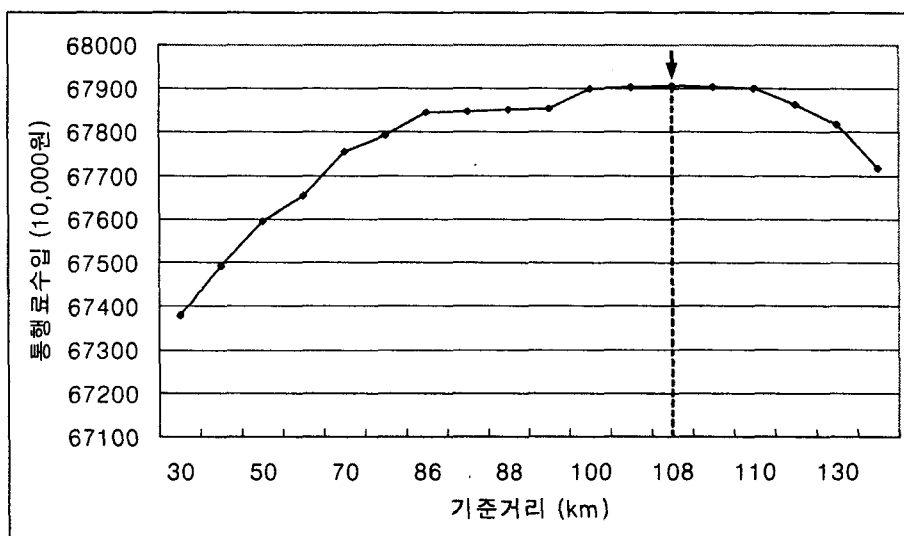
● 장거리할인 기준거리 도출

장거리할인 기준거리 도출의 그 결과는 <그림 10>과 같다. <그림 10>에 의하면 사회적비용은 장거리할인 기준거리가 100km에서 감소함에 따라 조금씩 감소하다가 87km에서 최소값을 나타내고, 기준거리가 더 감소하거나 100km이상이면 사회적비용은 증가하는 것으로 분석되었다.

따라서 사회적비용 최소화 관점에서 고속도로에서 장거리할인 기준거리는 87km이고 이 결과는 장거리할인 기준거리를 현재수준보다 더 낮추어 장거리이용자를 고속도로로 유인하는 것이 교통망 전체의 운영효율화 측면에서 바람직하다는 것을 의미하고 있다. 한편 통행료수입은 장거리할인 기준거리 108km에서 최대값을 나타내었다.



<그림 10> 장거리할인 기준거리별 사회적 비용



<그림 11> 장거리할인 기준거리별 통행료 수입

## 제 6 장 결 론

본 연구에서는 최적경로 배정문제를 풀기 위해 기 제안된 Gradient Projection(GP) 알고리즘을 발전시켜, 통행요금을 반영한 경로기반 통행배정모형을 개발하였다. 배정모형은 2단계로 구성되는데, 첫 단계는 GP기법을 이용해서 경로에 교통량을 배정하는 과정으로 기존 배정모형에서 주로 사용하는 Frank-Wolfe 알고리즘보다 빠른 수렴속도를 보인다. 두 번째 단계는 통행배정을 위한 하부구조로서 통행요금을 포함시켜 최단경로를 탐색하는 과정인데, 본 연구에서는 일반적인 경로기반 배정모형의 단점인 모든 경로의 검색문제를 해소하기 위하여, K-최단경로 알고리즘의 하나인 MPS(Minimal Path Search)알고리즘을 도입하여 계산의 효율성을 제고시켰다.

본 연구의 배정모형은 통행요금을 반영한 기종점간 경로교통량이 결과물로 도출되므로, 다양한 요금형태별 통행행태의 제반 특성과 효과를 분석할 수 있을 뿐만 아니라 교통운영 및 관리를 위한 정책분석 등 그 활용범위가 넓으므로 상당한 의의가 있다.

개발된 통행요금을 반영한 경로기반 통행배정모형의 검증 및 평가는 대표적인 가상교통망인 Sioux Falls Network에서 수행하였는데, 기존의 EMME/2 모형의 배정결과와 거의 일치함을 보여 본 연구 배정모형의 정확도를 검증할 수 있다. 또한 수렴속도나 반복계산회수 등의 측면에서는 EMME/2 모형보다 개선된 결과를 보였다.

적용사례에서는, 통행요금을 반영한 경로기반 배정모형과 고속도로 수요관리 요금체계 결정방안에 대한 효과분석 및 평가를 서울-대전간 고속도로망과 병행하는 대체도로망에서 수행하고, 최종적으로 고속도로 수요관리 요금정책의 새로운 기준거리를 도출하고자 총 사회적 비용 최소화와 통행료수입 최대화의 관점에서 최저요금 기준거리와 장거리할인 기준거리를 분석하였다.

한편 연구수행 과정에서 파악된 한계점 및 향후 연구과제는 다음과 같다.

첫째, 대규모 교통망에서의 적용 방안이 구축되어야 한다. 전국단위 교통망에서의 실행결과 등이 비교되어야 배정모형의 활용을 일반화시킬 수 있을 것으로 기대되며 보다 다양한 분석결과를 도출할 수 있다.

둘째, 경로기반 배정모형에서 발생하는 해의 다양성 문제에 대한 보다 정밀한 분석이 필요하다. 배정모형의 초기화조건 변화에 따른 경로교통량의 변화 정도를 검토하여 복수의 해 중에서 보다 현실적인 해의 도출과 아울러 복수의 해를 줄일 수 있는 기법 개발 등 배정결과에 대한 합리성과 효율성을 제고시켜야 한다.

셋째, 경로거리에 따라 통행요금이 결정되는 또 다른 대상인 대중교통 수단에 대한 배정모형의 적용방안을 마련하여, 통행요금을 반영한 경로기반 배정모형의 범용적 활용을 도모하여야 한다.

넷째, 배정모형의 활용도를 넓히고, ITS 등에서 요구하는 교통관리 및 운영기능의 다양한 효과 분석을 위해서는 본 모형과 동적통행배정모형의 결합을 통한 통합모형의 개발이 요구된다.

## 참고문헌

- [1] Bertsekas, D. P., and R. G. Gallager. *Data Networks*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1987.
- [2] Jayakrishnan, R., Wei K. Tsai, Joseph N. Prashker, and Subodh Rajadhyaksha. Faster path-based algorithm for traffic assignment. *Transportation Research Record 1443*, 1994, pp. 75-83.
- [3] Cherkassky, B. V., A. V. Goldberg, and T. Radzik. Shortest paths algorithm: Theory and experimental evaluation. *Mathematical Programming 73*, 1996, pp. 129-196.
- [4] Sun, Carlos, R. Jayakrishnan, and Wei K. Tsai. Computational study of a path-based algorithm and its variants for static traffic assignment. *Transportation Research Record 1537*, 1996, pp. 106-115.
- [5] Yagar, S. Predicting the Impacts of Freeway Ramp Metering on Local Street Flows and Queue. *ITE 1989 Compendium of Technical Papers*. 1989.
- [6] Robinson, J. and M. Doctor. *Ramp metering Status in North America, DOT-T-90-01*. Washington D. C.: Federal Highway Administration, September 1989.

