

대한교통학회 28회 학술발표회

도시고속도로 Network의 교통제어에 관한  
방법론적 연구

K A I S T  
김 주 현

## 도시고속도로 Network의 교통제어에 관한 방법론적 연구

A Study on Traffic Control Method for Urban Expressway Network

### 目 次

- I. 序 論
- II. BP流入制御手法의 構築과 實用的 解法의 開發研究
- III. 經路選擇原則과 BP流入制御의 關係에 관한 研究
- IV. 운전자의 經路選擇行動을 고려한 動的流入制御 Model의 開發
- V. 靜的流入制御手法과 動的流入制御手法의 비교
- VI. 結 論

# I. 序 論

고도 정보화 사회에 있어서 도시고속도로의 중요성은 점점 더 높아지고 있다. 도시고속도로의 한정된 교통처리능력에 비하여 과대한 수요로 인하여, 고속도로상에서의 교통체증이 일상화하고 있는 것이 현상이다. 고속도로에 있어서의 교통체증은 이용자의 시간적 손실을 증가시켜 안전성, 쾌적성의 면에서 지장을 초래하고, 고속도로의 기능저하를 현저하게 하기 때문에 이용자에게 교통정보 제공과 자연체증의 예방을 목적으로 한 유입제어가 병행하여 실시되고 있지만, 그 개량이나 효율적인 운용방법의 개발에 대한 사회적인 요구는 점점 더 높아지고 있다.

그리고 기존 교통시설의 효율적인 이용을 위한 교통운용 수법으로써 최근의 교통정보 시스템은 화상처리 수법에 의한 교통정보의 Monitor, Simulation에 의한 교통상황 예측, 시각정보와 더불어 路側방송·전용방송에 의한 이용자에게 정보제공, Dynamic Navigation System과 같은 車車間, 路車間 통신 시스템 등이 개발되고 있다. 또한, 계측기술, 정보·통신기술의 급속한 발전에 의해 시시각각의 교통상태를 관측하여, 그것을 Data화하는 것도 가능하게 되고 있다. 따라서, 이러한 정보제공을 활용한 교통제어 수법의 개발이 요구되고 있다.

한편, 효과적인 유입제어를 실행하기 위해서는 제어정보 등에 의한 이용자의 교통행동의 변화 예측이 필요하지만, 평상시 자연체증의 예방을 목적으로 한 종래형의 LP(Linear Programming) 제어는 OD間의 이용 가능 경로가 하나로 한정된 소규모로, 단순한 Network를 전제로 하고 있기 때문에 OD Pair 사이에 복수의 경로가 존재하는 경우의 대응이 충분하지 못하였다. 가까운 장래에 도시고속도로 Network는 대규모화 및 복잡화하는 것이 예상되어져 종래와는 다르게 OD間에 복수의 경로가 이용 가능하게 되어지고 있다. 또한, 교통정보제공 시스템도 충실하게 될 것이므로, 그러한 경우에 대비하여 풍부한 교통정보를 가지는 이용자의 행동을 고려한 유입제어 방법의 개발이 급선무이다. 복수 경로가 존재하는 도로망에서는 이용자의 경로선택에 따라서 Link Flow가 변화하기 때문에 유입제어시에 경로선택행동의 內生的인 예측이 필요하게 된다. 이 점에 관해서는 교통정보제공 시스템의 高度化가 진행되고 있으며, 소요시간 등의 교통정보가 고속도로 이용자에게 제공되는 것을 고려한 경로선택의 예측이 필요하다.

따라서, 본 연구는 도시고속도로의 교통관리·운용의 주요한 방책 중에서 유입제어 수법에 착안해서 그 高度化를 시도하는 것을 목적으로 하고 있다. 특히, 이용 가능 경로의 복수화 및 유입 수요·교통상태의 시간변동을 감안하면서 적절한 유입제어 Pattern을 설정하기 위한 방법론에 관한 연구를 행한다. 구체적인 연구목적은 이하의 5가지로 정리할 수 있다.

- 1) Network상에서의 이용자의 경로선택 행동을 기술하기 위하여, 교통정보를 제공된 이용자의 경로선택 행동은 이용자균형(User Equilibrium)이론으로 기술된다고 가정하고, 종래의 LP형의 유입제어 문제와 결합된 제어방식을 새롭게 구축한다.
- 2) 현실 도로망을 대상으로 한 실용화를 도모하기 위하여, 대규모 Network에 적용 가능한 유입제어 문제에 대한 효율적인 Algorithm을 계산시간의 단축에 중점을 두고 근사계산법에 의거하여 개발한다.
- 3) 이용자의 경로선택 행동이 도시고속도로의 유입제어에는 어느 정도 영향을 미치는가에 대해서 파악한다.
- 4) 高度 교통정보 시스템(Advanced Traffic Information System)의 도입을 전제로 하고, 유입 수요 및 교통상태의 시간변동을 고려한 動的 유입제어 수법을 개발한다.
- 5) 정적(Static) 유입제어 수법과 동적(Dynamic) 유입제어 수법의 비교와 각각의 제어 수법의 운용 방책에 관하여 검토한다.

## II. BP流入制御手法의 構築과 實用的 解法의 開發研究

본 장에서는 OD間에 複數의 경로가 존재하는 경우에 적용 가능하도록 종래 사용되어지고 있는 LP제어를 확장해서 새로운 BP제어 방식을 제안한다. BP제어는 경로선택을 內生化하고 있기 때문에 LP제어에 비하여 求解가 어렵다. 그러므로 BP제어의 실용적 해법으로써 Complex법을 제안한다. 또한 Network의 규모가 數値計算法의 適用性에 영향을 미치기 때문에 실제 규모의 도시고속도로 Network에의 적용을 가능하게 하는 실용적 해법을 개발한다.

### 1. BP제어 모델의 定式化

定式化에 있어서는 2 Level 최적화(Bilevel optimization) 문제의 Framework를 응용한다. 다시 말해서 이용자의 경로선택 행동을 기술하는 모델인 이용자 균형 문제를 下位問題로 하고, LP제어의 개념을 계승한 유입제어 문제를 上位問題로 위치시켜 下位問題를 上位問題의 제약의 하나로써 취급한다. 이렇게 해서 운전자의 경로선택 행동을 內生化한 유입제어 문제가 定式化된다. 본 연구에서는 이것을 BP제어(Bilevel Programming Control)라고 부르기로 한다.

상위문제는 도시고속도로 시스템의 操作변수를 결정하는 문제이다. 다시말해서 도로의 계획·운영자의 의사결정 Process를 記述하는 것이다.

하위의 최적화문제는 주어진 ramp 유입량에 대한 Network Flow를 記述하기 위한 것이다. 유입제어 시스템의 운영자는 ramp 유입량을 결정하는 것은 가능하지만 이용자의 경로선택 행동을 직접적으로 제어하는 것은 불가능하므로 Network Flow는 이용자의 자유로운 경로선택 행동을 집계한 것이다.

#### 【上位問題】

$$\begin{aligned} \max \sum_{i \in I} U_i \bar{d}_i \\ \text{s.t. } \sum Q_{ia}^* U_i \leq C_a \quad a \in A \\ 0 \leq U_i \leq U_i^d \quad i \in I \end{aligned}$$

#### 【下位問題】

$$\begin{aligned} \min \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(x) dx \\ \text{s.t. } \sum_{k \in K_{ij}} h_{ijk} = U_i P_{ij} \quad i \in I, j \in J \\ X_a = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{aijk} h_{ijk} \quad a \in A \\ h_{ijk} \geq 0 \quad k \in K_{ij}, i \in I, j \in J \end{aligned}$$

$U_i$  : ramp  $i$ 로 부터의 유입 교통량(제어 변수)

$U_i^d$  : ramp  $i$ 로 부터의 유입 수요량

$\bar{d}_i$  : ramp  $i$ 로 부터의 유입차의 평균 이동거리

$C_a$  : link  $a$ 의 용량

$Q_{ia}^*$  : 영향계수(유입ramp  $i$ 로부터 유입한 1대의 차가 link  $a$ 를 이용하는 비율)

$$Q_{ia}^* = \sum_j X_{ija} / U_i$$

$P_{ij}$  : 목적지 선택 확률(유입ramp  $i$ 로부터 유입한 차가 유출ramp로 유출하는 확률)

$$\sum_{j \in J} P_{ij} = 1$$

$X_a$  : link  $a$ 의 교통량

$t_a(x)$  : link  $a$ 의 주행시간 함수(link flow에 대한 單調 增加 函數)

$h_{ijk}$  : OD pair  $i, j$  간의 경로  $k$  간의 교통량

$K_{ij}$  : OD pair  $i, j$  간의 이용가능 경로의 집합

$\delta_{aijk}$  : 경로행렬( $i, j$  간의 pass  $k$ 가 link  $a$ 를 통과할 때 1, 그렇지 않으면 0)

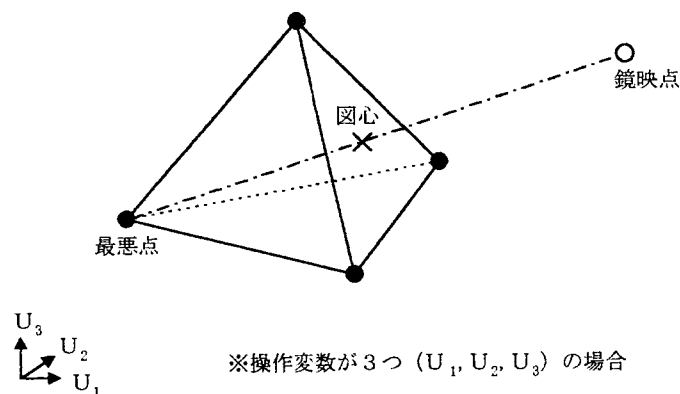
## 2. 數理 最適化 問題로서의 數值計算法

앞절에서 定式化한 BP제어 문제는 최적화 문제(이용자 균형 문제)를 제약조건으로 가지는 2 Level 최적화 문제의 형태로 정식화되어져 제약조건식이 비선형이므로 비선형계획 문제가 된다. 이 문제를 풀기 위하여 본 연구에서는 Complex법(Constrained Simplex Method)을 응용한다. Complex법은 목적함수의 구배를 이용하지 않는 探索法으로 制約領域內를 單體(simplex)라고 하는 기하학적 圖形을 이용하여 試行 探索하여 最適解에 收束시키는 방법이다.

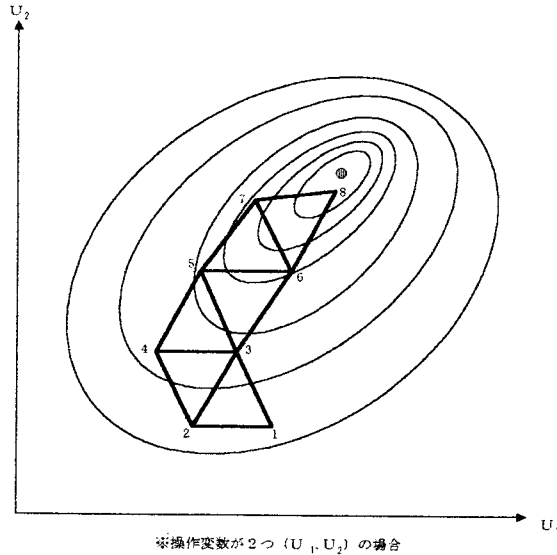
### (1) Complex법의 개요

Simplex의 각 頂点의 대응 시켜서 계산되어지는 목적함수의 값에 따라 頂点을 最惡点  $W$ 와 그 외의 점  $\bar{W}$ 으로 나누어  $\bar{W}$ 에 의해 형성되어지는 圖形  $S'$ 의 圖心에 대해서 最惡点  $W$ 를 鏡映하면 鏡映되어진 점  $W'$ 에 대응하는 목적함수의 값은  $W$ 보다도 개선되어지는 것이 기대된다.

이 기대가 맞다면 이 鏡映의 Process를 계속해 가는 것에 의해 Simplex를 最適解에 근접시키는 것이 가능하다. <그림 1>은 3차원 공간의 Simplex와 鏡映點을 圖示하고 있다. <그림 2>는 이와같은 Simplex가 最適點에 收束해 가는 모양을 나타내고 있다.



<그림1> Simplex와 鏡映點



〈그림 2〉 Simplex에 의한 解의 探索

(2) BP제어에의 Complex법의 적용

BP제어 문제에 Complex법을 적용하는 것을 검토한다. 제어 대상으로 하는 유입ramp의 수를  $n$  개로 한다면 Simplex의 頂點은 문제의 操作 變數인 ramp 유입교통량의 조합  $U(U_1, U_2, \dots, U_n)$ 로 주어진다. 頂點은  $n$ 개의 조작 변수에 의해 결정되어지는  $n$ 차원 공간에 있는 點으로 생각할 수 있으므로  $(n+1)$ 개 이상의 유입교통량의 조합을 고려하는 것에 의해 Simplex를 형성하는 것이 가능하다.

또한, 유입수요량을 넘지않는 임의의 유입교통량의 조합에 대해서 하위문제를 풀면 이용자 균형 Flow를 구하는 것이 가능하다. 이것이 상위문제의 제약조건, 다시말해서 균형 Link 교통량이 Link 용량제약을 만족하는지 어떤지 조사하는 것에 의해 頂點인 유입교통량의 조합의 실행가능성이 판정가능하다.

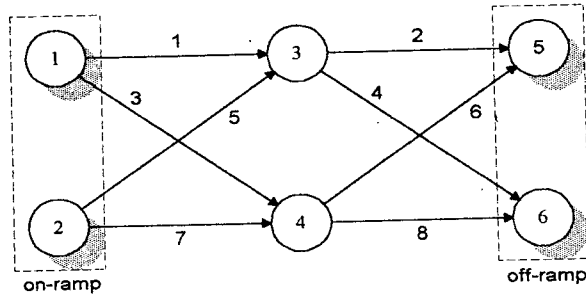
이러한 방법으로 상위문제의 目的函數值  $f(U)$ 를 증가시키는 방향으로 Simplex를 갱신하여 最適 解에 收束하는 것을 기대한다.

3. Network 規模와 流入制御 問題

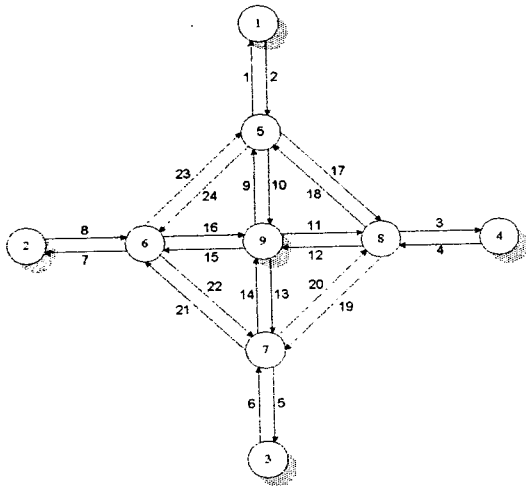
교통량배분 문제를 하위문제로 가지는 2 Level 최적화 문제로서의 유입제어 문제(BP제어 문제)를 푸는 경우 그 해법은 多數回の 반복을 가지는 數値解法이 되지 않을 수 없다. 그 때문에 유입제어 문제를 적용하는 Network의 규모에 따라서 解의 精度 및 計算時間이 크게 달라질 가능성이 충분히 생각되어진다. 따라서 제안한 유입제어 문제의 實用性を 높이기 위해서는 Network 규모와 解의 精度 및 필요로 하는 計算時間의 관계를 명확히 하여 본 유입제어 문제의 실제 규모의 도시고속도로 Network에 대한 적용 가능성에 대하여 검토해 둘 필요가 있다.

Complex법에 의한 해법의 實用성은 하위문제의 해법에도 크게 의존한다. 따라서 하위문제인 이용자 균형 Flow를 구하기 위해서는 Frank-Wolfe법, IA(Incremental Assignment)법, 勾配射影法의 3종류의 近似解法을 試用하여 이것들의 實用성을 비교한다.

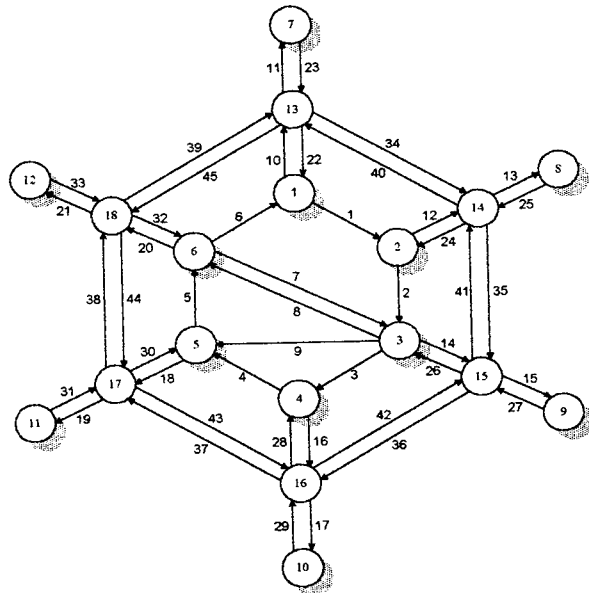
(1) 數値計算의 諸 條件



〈그림 3〉 Network A (소규모)



〈그림 4〉 Network B (중규모)



〈그림 5〉 Network C (대규모)

	Frank-Wolfe法 收束基準(○)				I A法 分割数(□)			勾配射影法 收束基準(△)				
	0.5%	1.0%	3.0%	5.0%	50	30	10	0.5%	1.0%	3.0%	5.0%	
complex法	0.5%	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
收束基準	1.0%	5	6	7	8	4	5	6	5	6	7	8

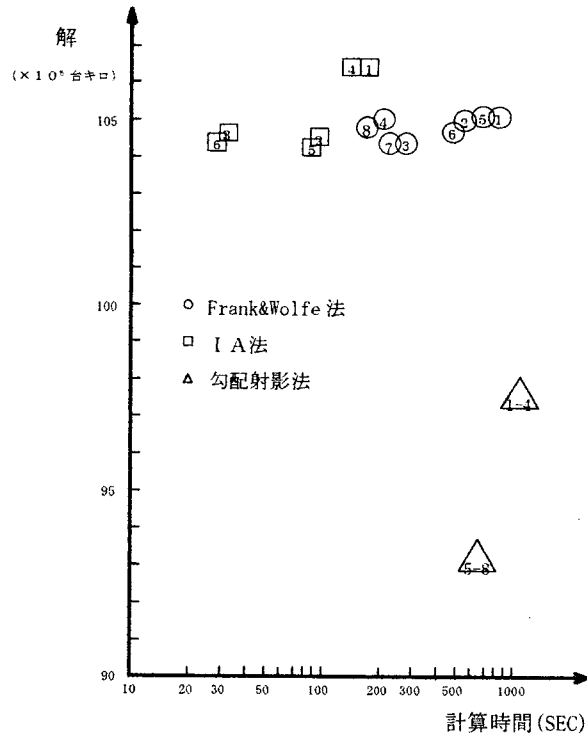
〈표1〉 下位問題의 解法 · 收束基準과 計算 Case 번호

(2) 數值解法의 차이가 미치는 영향

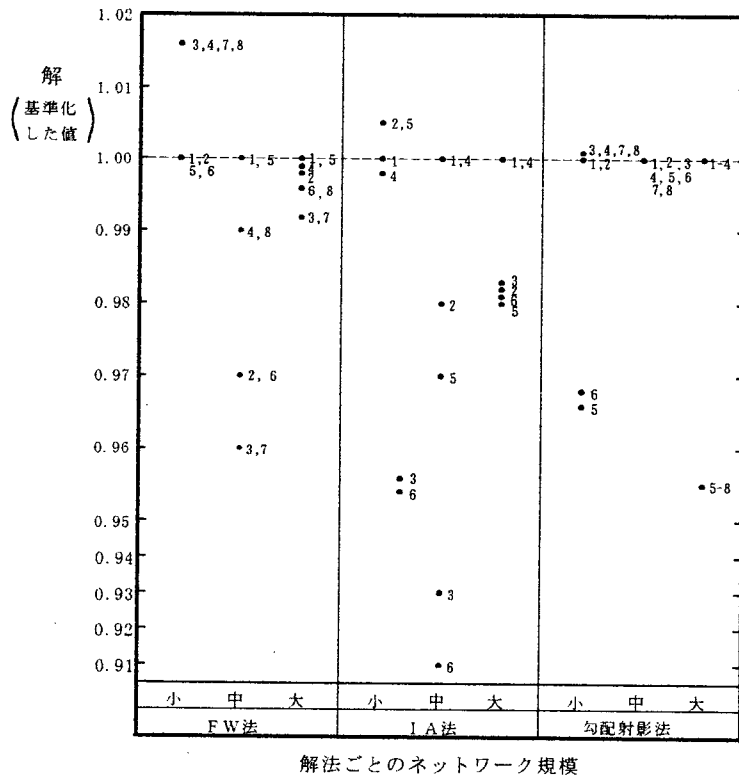
① 數值解法과 制御解 · 計算時間의 관계

〈그림 6〉은 대규모 Network C를 대상으로 했을 때의 解(目的函數值)와 계산시간의 관계를 나타내고 있다. 수치계산의 결과에 의해 상위문제 및 하위문제의 수치해법이 유입제어 문제의 解 및 計算時間에 미치는 영향에 대하여 다음과 같이 정리할 수가 있다.

Frank-Wolfe법, IA법을 하위문제의 해법으로써 이용한 경우에는 解 · 計算時間에 대해서 Complex법의 收束 判定基準 보다는 Frank-Wolfe법 또는 IA法の 收束 判定基準에 의해 미치는



〈그림 6〉 數値計算法과 유입 제어 모델의 舉動의 관계 (Network C에 적용)



〈그림 7〉 Network 규모 · 數値解法마다 解의 安定性



영향이 크다. 勾配射影法을 적용한 경우는 상위문제의 해법인 Complex법의 收束基準에 의해 制御解 및 計算時間이 결정된다고 생각된다.

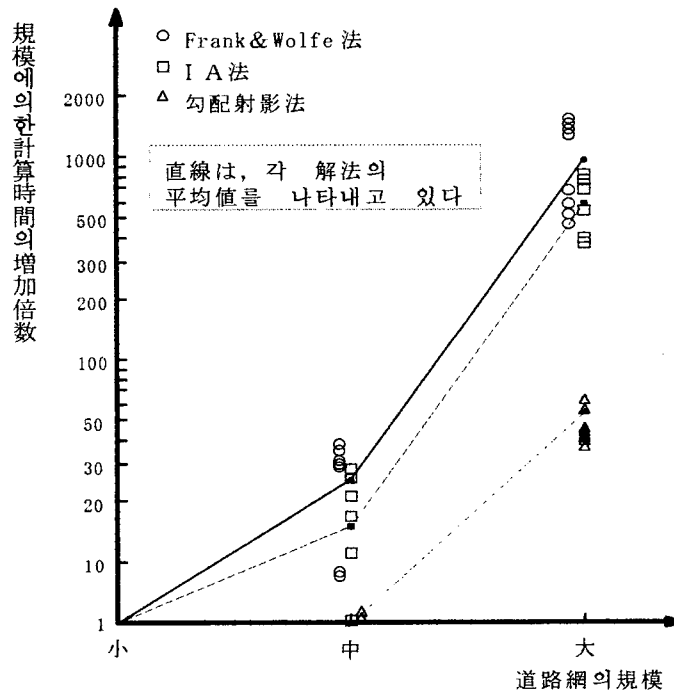
② Network 규모와 制御解의 관계

<그림 7>은 Network 규모와 制御解의 安定性的의 관계를 나타내고 있다. 그림 중의 종축에는 해법 및 각 Network 규모마다 收束基準이 가장 엄격할 때의 目的函數值를 1로써 基準化 한 각 case의 解(目的函數值)를 나타내고 있다.

③ Network 규모와 計算時間의 관계

제안한 유입제어 문제를 실제 규모의 Network에 대해서 적용가능 여부를 검토하는 경우에는 계산시간도 중요한 factor이다. 여기에서는 Network 규모와 계산시간의 관계에 대한 분석을 행한다. 아무리 이론적으로 우수한 유입제어 모델을 제안했다고 하더라도 實規模 Network에 적용했을 경우에 계산이 불가능하면 그 유입제어 모델의 價値는 격감 해 버릴 것이다.

<그림 8>은 Network 규모의 확대가 계산시간의 증가에 미치는 영향의 정도를 나타내고 있다. 여기에서는 소규모 Network(도로망)에 유입제어 문제를 적용했을 때의 계산시간을 基準으로 해서 중규모(도로망) 및 대규모 Network(도로망)에 적용했을 때의 계산시간의 比를 종축에 잡고 있는 것을 나타내고 있다. 下位問題의 求解에 이용하는 각 數値解法마다 Network 규모의 확대가 계산시간에 미치는 영향의 파악을 시도한다.



<그림 8> Network 규모 · 數値解法과 計算時間

### III. 經路選擇原則과 BP流入制御의 關係에 관한 研究

#### 1. BP流入制御에 있어서의 經路選擇原則

유입제어에 의해 각 Link의 원활한 주행상태를 확보하기 위해서는 운전자의 경로선택을 예측하는 것이 필요로 한다. 운전자의 경로선택에 따라서 Link flow가 변화하여 도시고속도로의 制御方策을 나타내는 목적함수(예, 총유입대수 최대화, 총주행거리 최대화)值가 영향을 받아서 제어 Parttern이 달라질 가능성이 생각되어진다. 이 때문에 경로선택을 內生化한 實用的인 유입제어 모델을 구축하는 것이 前章 및 本章에서의 목적의 하나이다.

운전자의 경로선택 행동을 내포한 유입제어 모델에서는 운전자의 경로선택 행동의 표현 방법에 따라 最適의 유입제어 Parttern이 달라질 가능성이 높기 때문에, 또한 今後 도시고속도로에 있어서 交通情報 제공의 高度化도 예상되므로 운전자가 어떠한 判斷基準에 따라서 경로선택을 행하고 있는지, 그 결과 어떠한 교통상태가 이루어지는지 등의 경로선택에 영향을 미치는 요인과 行動規範에 대하여 보다 상세한 검토를 행하여 交通情報와 配分 모델과의 관계를 파악할 필요가 있다. 정보와 교통의 관계에 관해서는 최근 활발한 연구가 행해지고 있으나 현시점에서는 情報提供와 交通行動과의 관계 법칙이 명확히는 분석, 파악되어 있지 않는 것이 현실이다.

그러므로, 현재 실용적으로 사용되어지고 있는 각종 配分原則과 流入制御問題를 결합시켜서 검토한다. 배분 원칙의 相違는 운전자의 行動原理 및 情報量의 차이와 대응 시켜서 생각하는 것도 가능하다. 여기에서는 數值計算의 결과를 토대로 운전자의 經路選擇行動의 취급이 도시고속도로의 유입제어에 대하여 어느 정도 영향을 미치는가에 관해서 파악하는 것이 또 다른 하나의 목적이다.

따라서, 下位問題에는 時間比 配分(travel times ratio assignment), 等時間 配分(equal travel times assignment), 總走行時間 最小化 配分(total travel time minimizing assignment), 시스템 最適 配分(system optimizing assignment)이라고 하는 다른 배분 원칙을 도입하여, 상기의 배분 원칙을 적용할 경우의 計算可能性을 확인함과 동시에 배분 원칙과 유입제어와의 관계를 밝힌다. 또한, 각종 배분 원칙을 적용한 유입제어 모델의 평가에 대하여 논하고, 交通運用의 視點에서 배분 원칙의 적용성에 관해서 검토한다.

운전자의 경로선택에 영향을 미치는 情報提供의 방법에 따라서는 도시고속도로의 效率性이 달라질 것이 예상된다. 여기에서는 유입제어 모델을 적용했을 경우 어느 배분 원칙으로 記述되는 交通狀態가 最適인가를 目的函數值에 의거해 推測하여 그와같은 交通狀態를 얻기 위한 情報提供의 방법을 考案하는 실마리로 이용하는 것도 생각하고 있다.

#### 2. 經路選擇原則의 差異를 考慮한 流入制御問題

##### 【上位問題】

$$\max \sum_{i \in I} U_i d_i$$

$$\text{s.t. } \sum Q_{ia}^* U_i \leq C_a \quad a \in A$$

$$0 \leq U_i \leq U_i^d \quad i \in I$$

【下位問題】

단,  $T_{ij} = U_{ij}P_{ij}$

- ① 時間比原則 配分 (확률 배분 : SA)
- ② 時間比原則 配分 (확률 균형 배분 : SUE)
- ③ 等時間原則 配分 (UE)
- ④ 總走行時間 最小化原則 配分 (SO)

3. 配分原則의 差異에 의한 BP流入制御의 比較分析

(1) 分析의 視點

4개의 배분 원칙(確率 配分, 確率 利用者均衡 配分, 利用者均衡 配分, 시스템 最適 配分)이 포함된 유입제어 문제를 풀고, 다음의 계산 결과에 의거하여 비교 분석한다.

① 配分 原則과 총주행거리 및 총유입대수의 관계

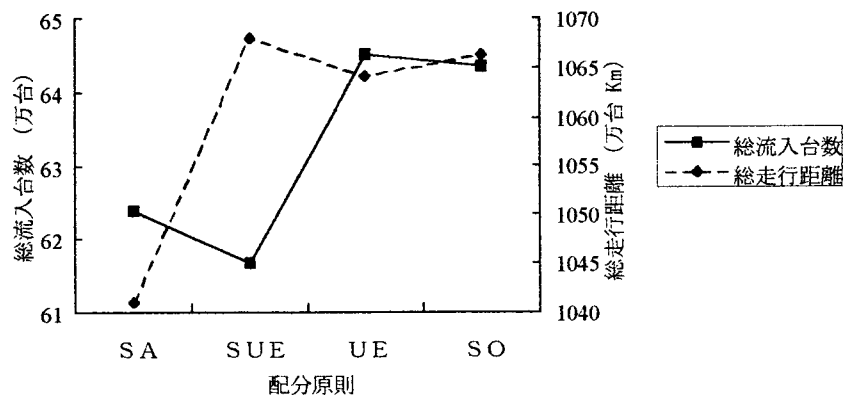
② 配分 原則과 OD로 부터 본 交通 流動 特性마다의 制御率의 관계

①의 결과는 都市部에서의 도로교통 시스템으로서의 「效率性」의 觀點으로 부터 制御解를 검토하기 위한 指標라고 해석 가능하다.

②는 유입제어 문제 중에서의 경로선택의 記述 方法(배분 원칙)에 따라서 OD Pair마다의 制御率에 差異가 있는지 없는지를 나타내는 指標이다. 이것은 「公平性」을 나타내는 指標라고 생각하는 것도 가능하다.

(2) 배분원칙과 총주행거리 · 총유입대수

배분원칙이 다르면 최적화 문제의 제약영역도 달라지기 때문에 最適解도 크게 다르게 되어 있다. 또한 동일한 Network 구성과 동일 유입수요의 경우 도시고속도로의 운영이념, 다시말해서 교통혼잡을 일으키지 않고 대량의 교통을 원활하고 신속하게 통행이 가능하게 하는 조건에 합치하는 制御解는 이용자균형 또는 시스템 최적 배분에 의해 운전자의 경로선택을 記述하는 유입제어 문제로 부터 얻어지고 있다고 생각된다.



〈그림 9〉 배분원칙과 총주행거리 · 총유입대수

(3) 배분원칙과 OD별 유입제어율

〈그림 10〉은 OD별 유입제어율을 적용한 배분원칙마다 정리하여 나타내고 있다. 유입제어가 실시된 경우에 도시고속도로를 이용하는 Trip의 특성을 개략적으로 파악하기 위하여 대상지역을 2개 Zone(외곽 환상선을 경계로 해서 그 내측을 도심부 Zone, 외측을 교외 Zone)으로 나누어 Zone간의 교통 유동을 검토한다. 여기에서는 대체적인 경향을 파악하기 위하여 4개의 OD Pair에 대해서 그 유입제어율의 평균치를 구한다.

(4) 배분원칙과 노선별 혼잡율

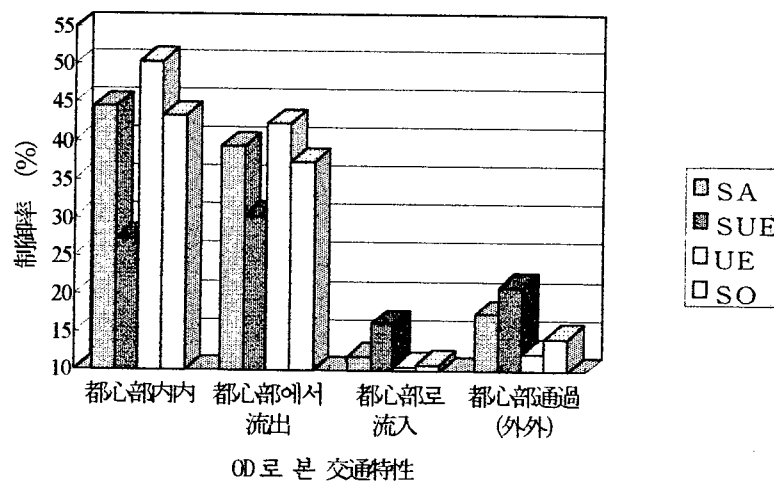
〈그림 11〉은 배분원칙과 노선별 혼잡율을 나타내고 있다. 혼잡율은 각 노선별 교통량을 용량으로 나눈 것으로 이 指標는 Network내의 노선의 이용효율로 보는 것도 가능하다. 많은 교통이 이용되어도 혼잡율이 매우 높으면 효율적이라고는 말할 수 없다. 노선은 그 존재 위치와 이용교통의 방향에 의해 도심방향을 상행 방사선이라고 하면 하행 방사선, 도심 환상선, 외곽 환상선으로 분류가 가능하다.

(5) 배분원칙과 1대당 평균 주행시간

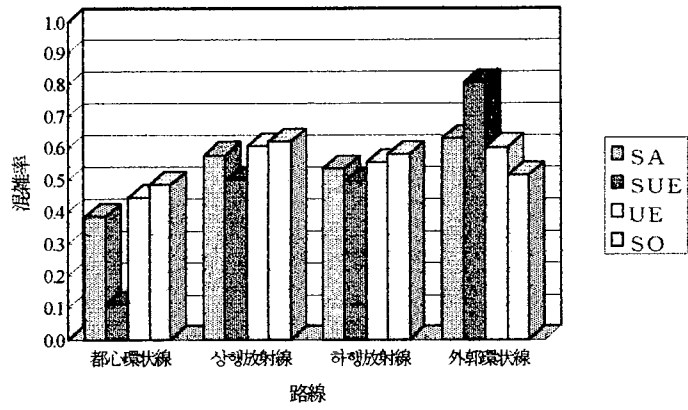
〈그림 12〉는 배분원칙과 유입차 1대당 평균 주행시간의 관계를 나타내고 있다. 이 지표에 대해서도 시간비배분(SA, SUE)을 내포한 유입제어문제와 UE 및 SO를 적용한 제어문제에서는 크게 다르다.

(6) 배분원칙과 계산시간

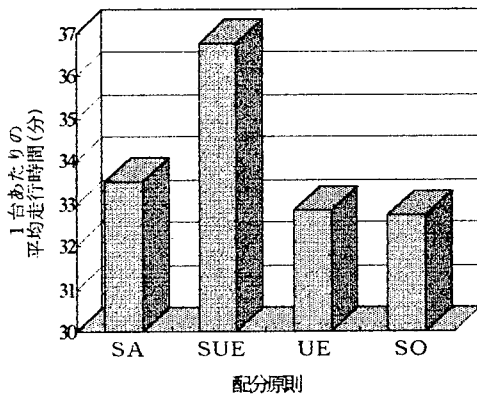
〈그림 13〉은 배분원칙과 계산시간의 관계를 나타내고 있다. 계산시간은 각종 배분원칙을 이용한 경우의 수치계산에 걸린 실시간이며 BP유입제어 문제의 실용 Level의 Network에 대한 적용 가능성을 고찰하는 것이 가능하다.



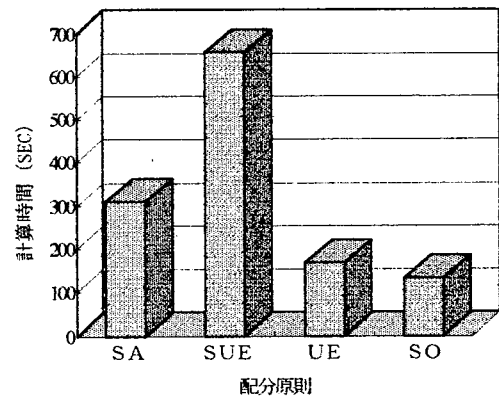
〈그림 10〉 배분원칙과 ZONE별 유입제어율



〈그림 11〉 배분원칙과 OD별 유입제어율



〈그림 12〉 배분원칙과 1대당 평균 주행시간



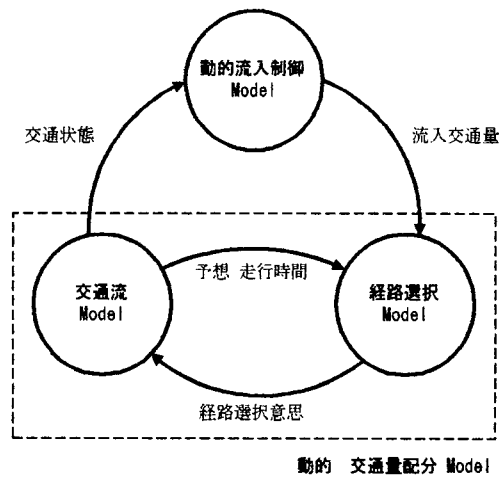
계산기종 : FACOM M-1800  
 〈그림 13〉 배분원칙과 계산시간

## IV. 운전자의 經路選擇行動을 考慮한 動的流入制御 모델의 開發

- ① 유입수요 및 Network상의 교통상태는 시간적으로 변동하고 있다.
  - ② 운전자는 도시고속도로상에서도 경로 선택이 가능하게 된다.
  - ③ 고도 교통정보 시스템 등을 이용하면 동적·상세한 교통 Data의 입수 가능.
- ↓
- LP제어를 기초로 하여 유입수요 및 교통 流動의 不定常性을 고려 가능하고 Network 규모에도 적용 가능한 실용적인 동적 유입제어 수법의 개발
  - 평상시 제어와 함께 突發 事象 발생시의 제어에의 적용 가능성도 고려해서 Simulation type의 유입제어 모델로써 개발

### 1. 모델의 전체구조

본장에서 구축하는 운전자의 경로선택을 고려한 동적 유입제어 모델은 ramp에서의 유입량을 결정하는 動的 流入制御 모델, 운전자의 경로선택(교통행동)을 나타내는 經路選擇 모델, 운전자의 경로선택으로부터 교통상태를 표현하는 動的 交通流 모델의 3 모델로 구성된다. 이것들의 3 모델의 사이에는 <그림 14> 에 나타내는 상호관계가 있고, 이것들의 관계를 명시적으로 고려하는 것을 통해서 운전자의 경로선택 행동을 반영한 최적 유입제어 Pattern을 구하는 것이 가능하게 된다.



<그림 14> 동적 유입제어 모델의 기본구조

### 2. 동적 유입제어 모델

유입제어 및 Network상의 交通流動에 따라 유입제어를 행하기 위해서는 제어대상이 되는 全時間帶(전제어시간)를 몇 개의 單位 제어 시간대로 구분하고, 각각의 단위 제어 시간대마다 유입제

어 Pattern을 구하여 이것을 각 단위 시간대마다 반복하여 구하는 방법을 취한다.

(1) 전제조건

- ① 각 ramp의 유입수요는 예측 가능하다.
- ② ramp間 OD Pattern(목적지 선택확률)은 예측 가능하다.

(2) 영향계수의 취급

본 장에서는 유입수요 및 교통유동의 非定常性을 고려 가능한 실용적인 동적 유입제어 모델을 구축하기 위하여 ①ramp수요의 시간적 변동 및 ②本線上의 교통량의 시간적 변동에 대응 가능한 모델로 한다. 이를 위해서는 영향계수에 대해서는 on ramp로부터 차량이 유입한 시간대와 그 차량이 각 link에 실제로 영향을 미치는 시간대를 명시할 필요가 있다. 동적 유입제어에서의 영향계수  $Q_{ia}^{t-k,t}$ 는 시간대  $t-k$ 에 on ramp  $i$ 로 부터 1대 유입했을 때 시간대  $t$ 에 본선상의 link  $a$ 에 존재하는 확률을 의미한다. ( $k=0,1,2,\dots, t-1$ )

(3) 동적 유입제어 문제의 구축

목적함수(총유입대수 최대화의 경우)

$$\max \sum_i U_i^t$$

목적함수(총주행거리 최대화의 경우)

$$\begin{aligned} \max \sum_i U_i^t \bar{d}_i^t \\ \text{s.t. } \sum_i \sum_k Q_{ia}^{t-k,t} \leq C_a^t \\ 0 \leq U_i^t \leq U_i^{dt} \end{aligned}$$

여기에서,

$t$  : 단위 제어 시간대( $t=1,2,\dots,T$ )

$U_i^t$  : 시간대  $t$ 에 있어서 on ramp  $i$ 로 부터의 유입 교통량 [결정 변수]

$\bar{d}_i^t$  : 시간대  $t$ 에 있어서 on ramp  $i$ 로 부터의 유입차의 평균 이동거리

$Q_{ia}^{t-k,t}$  : 시간대  $t-k$ 에 on ramp  $i$ 로 부터 1대 유입했을 때 시간대  $t$  link  $a$ 에 그 차량이 존재하는 확률 [결정 변수] ( $k=0,1,2,\dots, t-1$ )

$C_a^t$  : 시간대  $t$ 에 있어서 link  $a$ 의 용량 (所與)

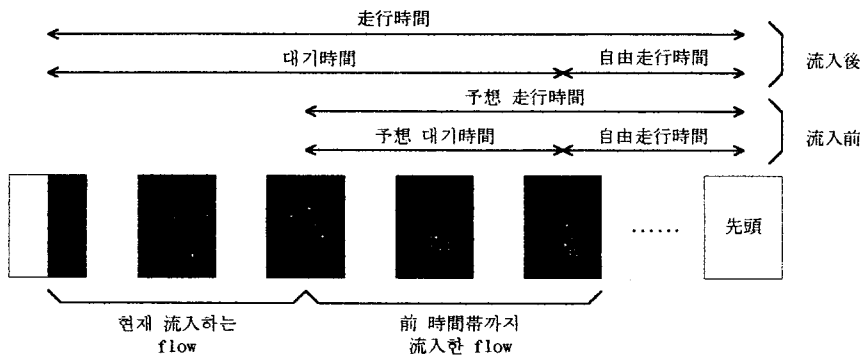
$U_i^{dt}$  : 시간대  $t$ 에 있어서 on ramp  $i$ 로 부터의 유입 수요량 (시간대마다 변동, 所與)

### 3. 동적 교통량배분 모델

동적 유입제어 문제에 있어서 동적 배분 모델의 역할은 각 ramp로 부터의 유입량을 input로써 시시각각의 영향계수  $Q_{ia}^{t-k,t}$  의 변동을 예측하는 것이다. 다시말해서 각 제어 시간대에 있어서 운전자의 경로선택과 경로상의 각 link의 교통상태의 변동을 예측하는 것이다.

#### (1) 교통류 모델

Link Flow의 動態는 <그림 15> 과 같이 BOX 間的 이동에 의해 모델화 된다.



<그림 15> link 内の 모델화

발생 Node에 있어서 경로선택의 결과 얻어지는 Flow는 그 경로에 포함되는 link에 유입한다. Link에 유입한 Flow는 하류측의 교통상태에 따라 이동해 가서 Link의 선두에 도착한다. 여기에서 다시 목적지가 같은 車郡 단위로 경로선택을 행하여 하류측 Link로 유입한다. 이와같이 해서 Flow는 집중 Node를 향하여 진행하여 최종적으로 집중 Node에 도착한다.

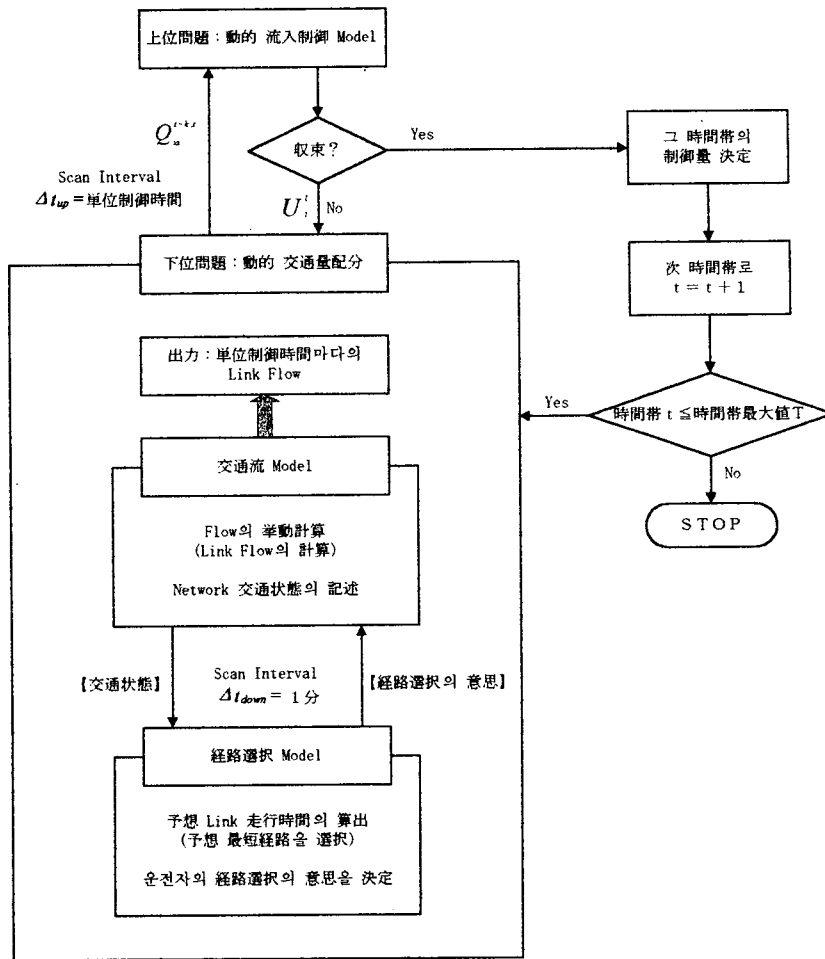
#### (2) 경로선택 모델

운전자는 경로선택을 행하는 시점에 있어서 Network상의 全 Link의 예상 주행시간을 알고 있다고 가정한다. 경로선택 및 예상 주행시간의 갱신을 반복하는 것에 의해서 시시각각 변동하는 교통상황에 대응한 운전자의 경로선택 행동을 모델화 한다.

이상의 동적 교통량 배분 모델을 정리하면 경로선택 Simulation에 있어서 각 운전자가 예상 주행시간에 의거하여 경로선택을 결정한다. Flow simulation에 있어서는 운전자의 경로선택을 집계하여 Flow로써 Network상에 흐르게 하여 교통상태를 나타내는 각 Link의 주행시간을 갱신한다. 이상의 조작을 離散化된 시간대마다 반복하여 시시각각 변동하는 동적인 Flow의 거동을 재현한다. 출력으로써 각 시간대마다의 Link flow를 얻어 이것에 의거하여 영향계수  $Q_{ia}^{t-k,t}$  를 구한다.

#### (3) 數值 Algorithm



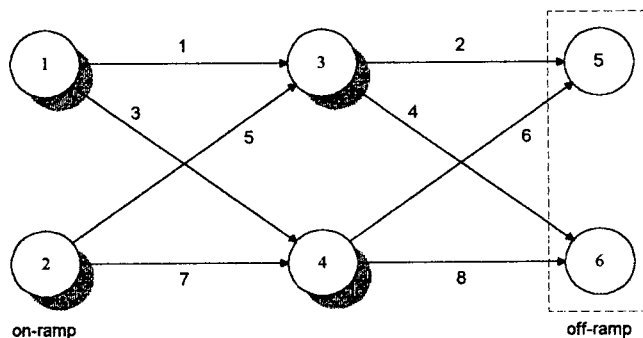


<그림 16> 동적 유입제어 모델의 계산 Algorithm

4. 복수 경로에 대한 적용 계산

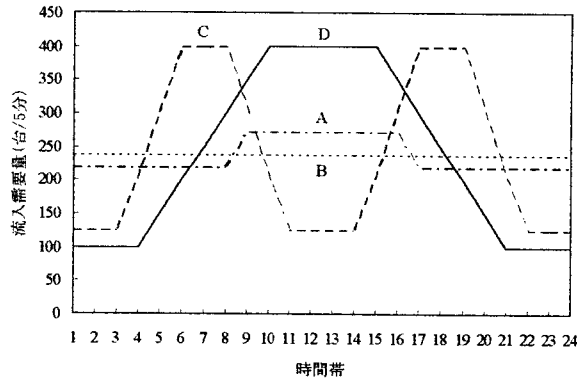
제안한 모델의 거동 확인 및 동적 유입제어의 효과·영향의 일단을 나타내기 위하여 여기에서는 이용가능 경로가 복수로 있는 간단한 Network를 대상으로 한 수치계산을 행한다. 상위문제인 동적 유입제어 모델의 단위 제어시간은  $\Delta t_{up}=5$ 분으로써 계산한다.

(1) 계산조건



<그림 17> 이용가능 경로가 복수의 예제 계산용 Network

OD 교통수요는 5분마다의 총유입수요에 대응하는 OD Pattern을 설정하여 주어진다. 유입수요의 시간 변동 Pattern이 다른 것이 제어 Pattern에는 어떠한 영향을 미치는가를 알기 위하여 <그림 18>에 나타내는 4개의 수요 partten을 사용하였다. 想定되어 있는 시간은 실시간으로 2시간분이다. 여기에서 사용된 4개의 유입수요 Pattern에서는 수요의 시간변동의 차이가 미치는 영향을 순수히 비교하기 위하여 2시간분을 모두 같게 하고 있다. 다시말해서 <그림 18>의 각각의 유입수요 Pattern과 횡축·종축으로 둘러싸여진 부분의 면적은 같다.

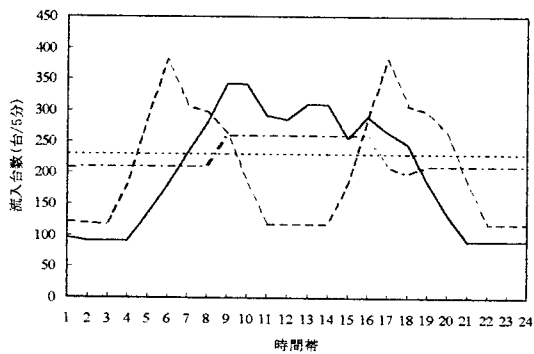


<그림 18> 유입수요 Pattern

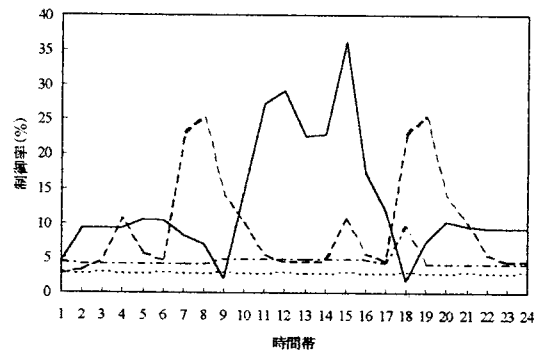
(2) 구축한 모델의 거동

<그림 19>는 총주행거리 최대화를 목적함수 사용한 경우에 얻어진, 시간대마다의 유입대수를 나타내고 있다. 이 그림에서의 유입대수는 각 시간대마다의 全 on ramp에서의 합계치이다.

<그림 20>는 시간대별 제어율을 나타내고 있다. 이 계산결과도 총주행거리 최대화를 목적함수로 하고 있다. 제어율은 全 on ramp에서의 평균치이다



<그림 19> 시간대별 유입대수

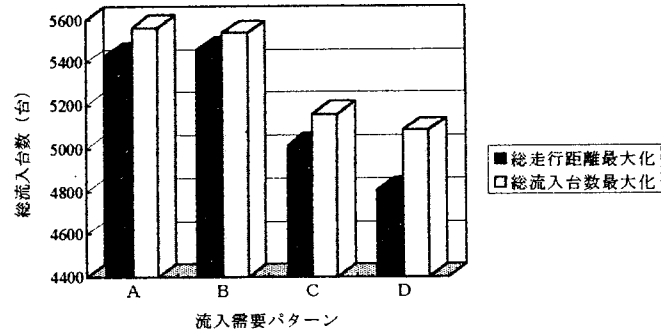


<그림 20> 시간대별 제어율

(3) 유입제어 방침의 영향

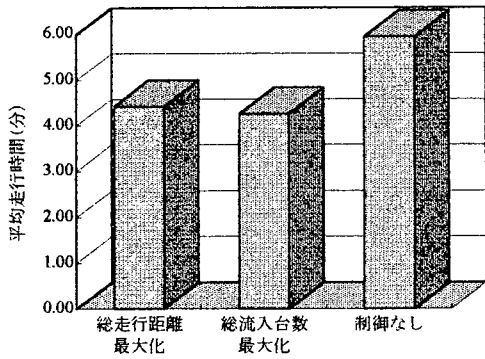
여기에서는 수치계산을 통해서 도시고속도로 운영자의 제어방침을 나타내는 목적함수의 차이가 제어 Pattern 및 network의 교통상태에 미치는 영향을 파악함과 동시에 유입제어 실시의 효과에 관해서도 함께 검토한다.

〈그림 21〉는 목적함수·유입수요 Pattern과 총유입대수의 관계에 관하여 나타내고 있다.

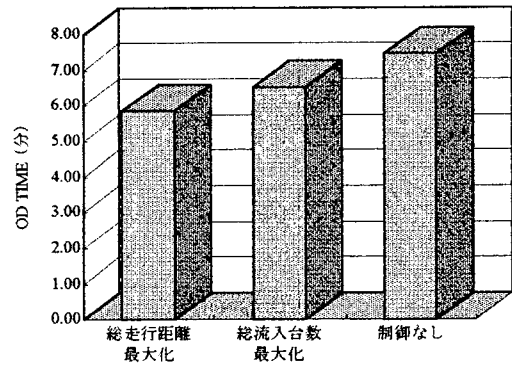


〈그림 21〉 목적함수·유입수요 Pattern과 총유입대수

다음의 〈그림 22〉 ~ 〈그림 23〉에 나타낸 계산결과를 사용하여 유입제어를 행하였을 때와 제어를 하지 않았을 때, 그리고 제어를 하였을 때는 목적함수의 다름(다시말해서 제어방침의 다름)에 의한 영향을 파악하고, 유입제어의 효과에 대하여 평가한다.



〈그림 22〉 1대당 평균주행시간  
(유입수요 Pattern D)



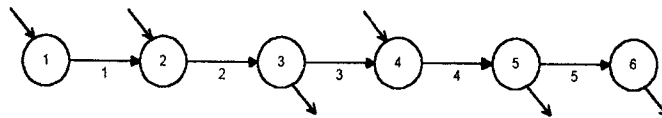
〈그림 23〉 OD間の 평균주행시간  
(유입수요 Pattern D, 시간대15, ramp①→⑤)

## V. 靜的 流入制御手法과 動的 流入制御의 비교

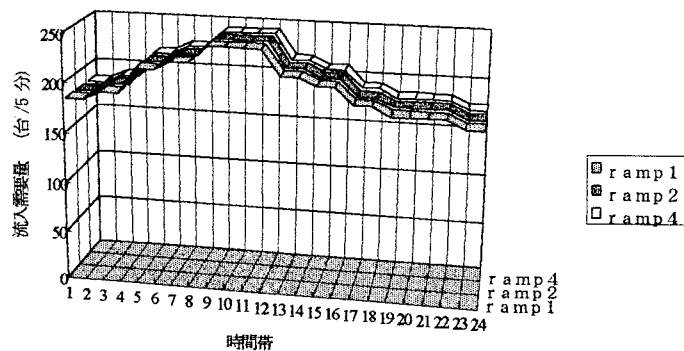
### 1. 정적 유입제어와 동적 유입제어의 비교 검토

#### (1) 계산조건

정적 유입제어와 동적 유입제어에 있어서 운전자의 경로선택 행동을 나타내는 배분원칙이 다르면 목적함수치, 유입대수, 제어 Pattern 등이 달라질 것이 예상되므로, 단순비교를 하기 위해서는 경로선택을 고려할 필요가 없는 단일 경로를 대상으로 적용하여 계산하는 것이 바람직하다고 생각된다.



〈그림 24〉 단일경로의 예제 계산의 network



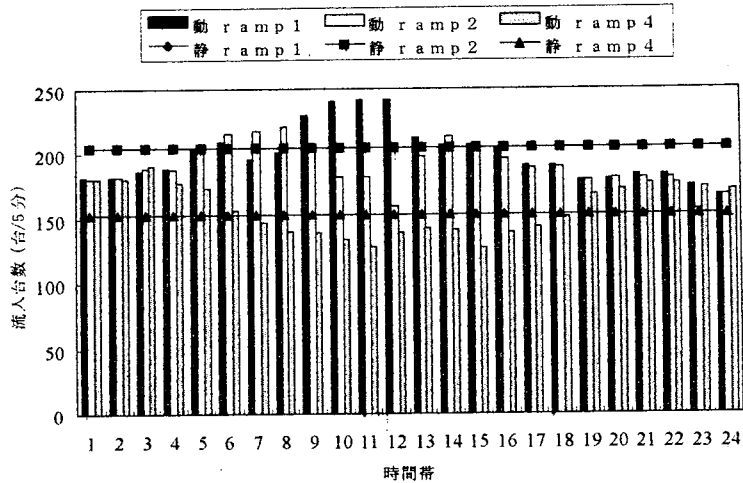
〈그림 25〉 동적제어의 유입수요 Pattern

#### (2) Peak시의 유입교통량

동적인 유입제어의 解로써 가장 제어율이 높은 on ramp 4의 결과를 대상으로 검토한다. 정적인 제어 문제로부터 얻어진 유입량을 5분당의 量으로 환산하면 약153대가 된다. 이것을 기준으로 동적 제어 문제의 유입 교통량과 비교한다. 〈그림 26〉에 있어서 시간대 7~18에서는 동적 제어 보다 정적 제어의 解가 크게 되어있다.

다음은 동적 제어 문제에서 제어율이 별로 높지 않았던 on ramp 1에 대해서 비교한다. 정적 문제의 制御解를 5분당으로 환산하면 약205대이다. 이것을 기준으로 동적 문제의 解와 비교 검토한다. 이 경우 Peak시(시간대 9~13)에는 정적 제어 문제의 解가 작게 되어있다.

이상에 의해 Peak시에 관해서는, 본래 제어율을 높이 해야 할 on ramp에 관해서는 정적 문제의 解는 그 유입량을 과대 평가하는 경향이 있으며, 제어율이 낮은 on ramp에 관해서는 정적 문제의 解는 유입량을 과소 평가하는 경향이 있다. 이와같은 검토에 의해 도시고속도로의 효율적 이용이라는 점으로 보면 유입수요의 변동이 인정되어지는 기간에 대해서는 그 변동에 대응 가능한 동적인 유입제어 문제의 적용이 바람직하다고 생각되어진다.

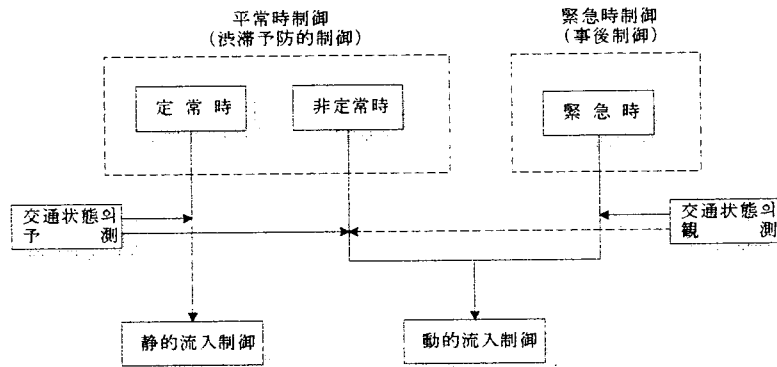


〈그림 26〉 정적제어와 동적제어의 시간대별 유입대수

## 2. 정적 유입제어 수법과 동적 유입제어 수법의 적용

### (1) 제어수법의 선택

여러 가지의 교통상황에 따라서 효율적이며 실용적인 제어 수법을 적용하기 위해서는 그 교통 상황에 적합한 제어 수법을 선택하는 것이 중요하다. 〈그림 27〉은 교통상황으로 부터 제어 수법의 선택까지의 교통제어의 Flow를 나타내고 있다.

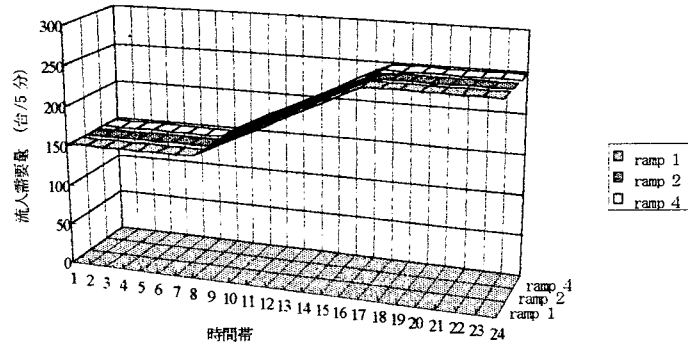


〈그림 27〉 제어수법의 선택

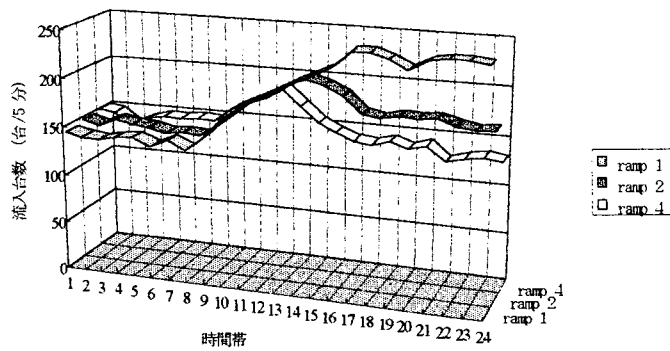
### (2) 정적 유입제어 수법의 적용

〈그림 29〉 〈그림 30〉 으로부터 판단하면 시간대 1~8, 17~24의 경우는 대체로 유입대수와 제어율이 안정되어 있다고 볼 수 있기 때문에 이와같은 경우는 정적인 유입제어 수법을 적용하여도 충분히 유효하다고 생각되어진다.

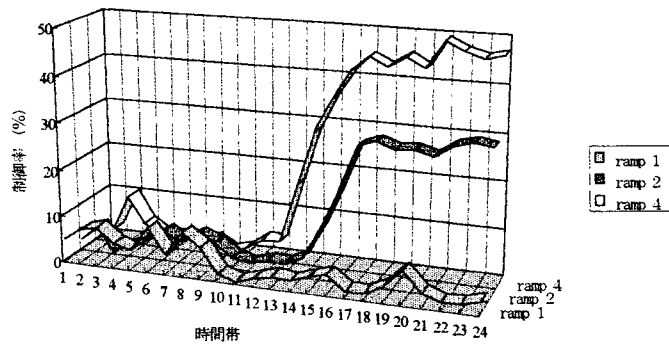
이와같이 유입교통량이 定常상태를 유지하고 있다고 보여지는 상태를 대상으로 한 경우에는 정적 유입제어 수법을 적용하면 충분히 실용적으로 감당할 수 있다고 생각되어진다.



〈그림 28〉 유입수요 Pattern



〈그림 29〉 시간대별 유입대수



〈그림 30〉 시간대별 제어율

(3) 동적 유입제어 수법의 적용

적용계산예의 〈그림 29〉 〈그림 30〉 으로부터는 시간대 9~16의 경우는 유입대수와 제어율이 급격히 증가하고 있기 때문에 이와같은 경우는 동적인 유입제어 수법을 적용하는 편이 보다 효율적이라고 생각된다.

또한, 동적 유입제어 수법은 豫知할 수 없는 원인에 의해 발생하는 체증에 대해서 그 확대를 방지 또는 가능한 한 빨리 해소를 도모하고 원활한 교통류를 회복하는 것을 목적으로써 실시하는 긴급시의 적용에도 유효할 것이다.

#### (4) 정적 유입제어와 동적 유입제어의 연계적 적용

현실의 제어에 있어서는 이것들의 수법을 단독으로 이용하는 것이 아니라 제어수법의 적절한 조합에 의해서 보다 효과를 올릴 수 있다.

예를들면, 현실의 교통류는 엄밀히는 非正常인 것을 생각하면 통상의 제어수법을 정적 유입제어로 하고, 유입교통이 증가 또는 사고 등에 의한 긴급시의 경우는 그 시점에서 동적 유입제어를 채용하는 것에 대해서도 현실적인 문제로써 검토할 필요가 있다.

## VI. 結 論

본 연구에서는 이용가능 경로의 複數化에 대응해서 운전자의 경로선택 행동을 명시적으로 모델화한 점 및 유입수요·Flow의 시간변동을 고려해서 유입제어 모델의 動的化를 도모한 점에서 본 연구의 新規性을 찾을 수 있다. 본 연구의 성과를 간략히 요약하면,

- 이용가능 경로의 복수화에 대해서는 운전자의 경로선택 행동을 等時間原則에 의해 記述 가능하다고 가정하여 이용자균형 교통배분을 포함한 2 Level 최적화 문제로써 유입제어 문제를 定式化 하였다. 이 경우 제약조건식이 비선형이 되므로 그 계산방법으로써 Complex법의 적용을 제안하고 있다. 대규모 Network에 대해 수치계산을 행하여 제안한 유입제어 모델의 실제 규모 도로망에의 적용 가능성을 확인하고 있다.
- 경로선택 행동을 나타내는 교통량배분 원칙에 관계해서 時間比原則, System 最適原則, 等時間(利用者 最適)原則의 각각에 대해서 유입제어 모델을 구축하고 모델의 求解 가능성 및 경로선택원칙과 최적 유입제어 Pattern의 관계에 대하여 검토했다. 그 결과 時間比原則보다 等時間原則 및 System 最適原則으로 이용자를 경로 유도하는 편이 도시고속도로의 교통처리 능력이 상대적으로 높아지는 것을 알 수 있었다.
- 교통 Flow의 시시각각의 변동을 고려하기 위해 동적 교통배분 모델을 내포한 유입제어 모델을 제안했다. 모델은 操作的 容易性和 Flow 記述의 現實性을 만족하기 위하여 Simulation Type의 동적배분 모델과 LP제어 모델을 통합해서 구축하였다. 가상 Network에 대해서 적용 계산을 행하여 모델 擧動의 현실성을 확인함과 동시에 유입수요가 시간적으로 변동하는 Case에서는 靜的制御보다도 動的制御가 우위인 것을 교통처리 능력의 점으로 부터 밝혔다.
- 제안한 정적 유입제어 문제와 동적 유입제어 문제에 관하여 비교 검토하여 각각 제어수법의 특성을 분석하였다. 그리고 실제의 도시고속도로에 제안한 제어수법을 적용할 때 어떠한 경우에 각각의 제어수법이 효율적이며 적합한 것인가 등의 運用 方策에 대해서 검토하였다.

끝으로, 본 연구에서 제안한 복수 경로(Network)에 적용 가능한 유입제어 수법의 후속 연구과제가 많을 것으로 생각된다. 특히 앞으로의 연구과제로는 교통정보와 관련하여 교통정보가 운전자의 경로선택에 미치는 영향 및 교통정보와 배분 모델에 대한 연구가 후속되어야 할 것이며, 첨단 교통정보 시스템에 따른 풍부한 교통 Data의 이용 가능성에 대하여, 觀測值에 의해 얻어지는 Data와 豫測值로써 Simulation으로 부터 얻어지는 Data를 명확히 구분하여 유효하게 활용하는 연구도 있어야 할 것이다.