

□ 論 文 □

## 最適制御理論을 이용한 動的 通行配定 模型의 適用에 關한 研究

An Application of Dynamic Route Choice Model Using Optimal Control Theory

全 京 秀

(서울大 都市工學科)

吳 世 炫

(서울大 都市工學科)

---

目 次

I. 序 論

II. 瞬間 動的 使用者最適 通行配定模型

III. 動的 通行配定模型을 위한 링크

通行時間 函數의 導出

IV. 模型의 適用 및 評價

V. 結論

VI. 後記

---

ABSTRACT

Advanced Traveler Information Systems(ATIS), as a subsystem of ITS, influence the travel choices of drivers by providing them with historical, real-time and predictive information to support travel decisions and consequently improves the speed and quality of travel. For the successful accomplishment of ATIS, the time-dependent variations of traffic in a road network and travel times of vehicles during their journey must be predicted. The purpose of this study is to evaluate the past developments in the dynamic route choice models and to apply the instantaneous dynamic user optimal route choice model, recently formulated with flow propagation constraints by Ran, Boyce and LeBlanc, to the real transportation network of Seocho-Ku in Seoul. As input data for this application, the time-dependent travel rates are estimated and the link travel time function is derived. The model is validated from three view points: the efficiency of model itself, the ability to predict traffic volume and travel time on links, and the optimal traffic control.

---

## I. 序 論

交通問題 解消을 위한 方案으로 地下鐵 및 道路建設 事業에 대한 持續的인 投資가 이루어지고 있다. 그러나 이는 財源 確保上의 限界性 및 工事 期間의 長期化로 단시일 내에 成果를 期待하기 어려운 실정이다. 이러한 限界性的의 克服 및 交通 投資의 生産性 增大를 위해서 最新의 컴퓨터 및 전자.통신 技術 등을 活用하여 現在 發生中인 그리고 潛在的인 交通 需要를 時間的 및 空間的으로 分散시키고 아울러 交通 施設을 效果的으로 利用할 수 있도록 交通의 흐름을 誘導할 수 있는데 이러한 技術을 尖端 道路交通體系(ITS, Intelligent Transportation Systems)라 부르고 있다.

이러한 ITS를 使用하면 車輛과 交通 施設은 막대한 量의 情報를 交換하게 되며, 이에 따라 交通狀況의 事前 豫告 및 警告, 最適 經路選擇, 自動 通行料 徵收, 貨物 및 大衆 交通의 效率의 配分 그리고 安全이나 그 밖의 여러 가지 側面에 있어서 상당한 改善이 可能하다.

ITS의 틀 내에 있어서, 특히 道路交通情報體系(ATIS, Advanced Traveler Information Systems)는 通行 決定을 도와주는 實時間(real time)의 豫測的 情報를 提供하여 通行의 速度와 質을 向上시키는 것으로서, 이는 街路上에서의 事故나 混雜을 初期에 感知하여 利用가능한 手段과 經路間에 交通을 再分配할뿐만 아니라, 만약 道路容量上의 餘裕가 없을 때는 混雜을 피하기 위하여 通行者의 出發 時間을 調整하는 機能도 內包하고 있다(Ran, 1993).

이를 위해서는 尖頭時 混雜한 街路網과 같이 通行 需要가 時間과 空間에 따라 變化하는 경우에, 매 순간마다 街路網에 配定되는 交通量을 豫測할 수 있는 動的 通行配定模型(dynamic route choice model)의 開發이 先行되어야 한다.

그러나 現在 交通計劃에서 利用되고 있는 通行配定模型의 大部分은 需要가 時間에 따라 一定하다고 假定하는 靜的 通行配定模型(static traffic assignment model)으로서, 이는 長期 交通計劃을 위해 開發되었다. 따라서 이러한 模型은 實時間에 交通 問題를 解決하고자 하는 道路交通情報體系(ATIS)를 위해서 使用하는 것은 不適合하다.

이에 따라 지난 20여년간 動的 通行配定模型의 開發을 위한 많은 研究가 이루어져 왔다. 最近에는 交通量 傳播 制約條件(flow propagation constraint)을 包含시켜 以前의 여러 研究를 發展시킨 Ran, Boyce, 그리고 LeBlanc(1993)의 瞬間 動的 使用者 最適 通行配定模型(instantaneous dynamic user optimal route choice model)이 開發되었으며, Ran(1993) 그리고 Ran과 Boyce(1994)는 이를 體系的으로 정리하였다.

本 研究는 上記 Ran(1993) 그리고 Ran과 Boyce(1994)의 瞬間 動的 使用者 最適 通行配定模型을 考察하고, 이를 實際 街路網에 適用해보아 窮極的으로 이러한 動的 通行配定模型이 ITS 構築에 따른 道路交通情報體系(ATIS)의 核心 소프트웨어로서 使用되었을 때, 이의 有用性을 分析.評價해 보고자 한다.

## II. 瞬間 動的 使用者 最適 通行配定 模型<sup>1)</sup>

1980年代 後半 Wie(1988)와 Friesz 等(1989)은 動的 通行配定模型에 最適制御理論을 導入하여 動的 使用者 最適 通行配定 模型을 提示하였다. 즉, 通行配定을 連續時間 最適制御 問題로 構成하고 Pontryagin의 maximum principle을

1) 本 章은 Ran과 Boyce(1994)의 基本理論을 소개하는 것임

利用하여 最適性 條件을 誘導하였다. 또한 Omar Drissi-Kaitouni와 Abdelhamid Hamed-Benchekroun(1992)은 하나의 링크를 時間帶 數만큼 擴張하여 서로 다른 링크로 생각하는 時間-空間 街路網 擴張技法과 靜的 平衡配定模型에 利用되는 Frank-Wolfe 技法을 利用한 動的 通行配定模型을 提示하였다. 이어서 Ran, Boyce 그리고 LeBlanc(1993)은 交通量 傳播 制約條件(flow propagation constraints)을 가지고 以上の 여러 研究을 發展시킨 새로운 瞬間 動的 使用者 最適 通行配定模型(instantaneous dynamic user optimal route choice model)을 提示하였으며, Ran(1993) 그리고 Ran과 Boyce(1994)는 이를 體系의으로 整理하였다. 이를 要約하면 다음과 같다.

## I-1 基本 定義

### I-1-1 使用者 最適

動的 通行配定模型에서는 하루하루의 通行 平衡(traffic equilibrium)은 고려할 필요가 없으며, 대신에 正確한 交通情報(通行時間과 같은)와 效果의인 交通制御를 통하여 通行者들의 交通 및 通行 行態를 最適으로 制御하고, 그에 따라 影響을 미칠 수 있어야 한다. 그러므로 動的 通行配定에서는 더 이상 使用者 平衡(user equilibrium)이라는 말을 使用하지 않고 使用者 最適(user-optimal)이라는 말을 使用한다.

### I-1-2 瞬間 動的 通行選擇

現在 位置에서 特定 目的地로 通行하거나, 特定한 時間에 出發 또는 到着하고자 하는 通行者는 通行을 위한 交通手段, 出發時間 그리고 經路選定이 필요하다. 이러한 必要性에 대해 瞬間 動的 使用者 最適 通行選擇은 다음과 같이 假定한다.

\* 각각의 運轉者는 特定한 出發時間을 가지며, 現在 交通狀況에 대한 完備한 情報를 가지고 각 交叉路마다 순간 순간 最上의 經路를 찾고자 한다.

이러한 形態의 經路選擇은 瞬間 通行時間(instantaneous travel time)의 最小化라고 定義할 수 있다.

### I-1-3 瞬間 動的 使用者 最適 狀態의 定義

動的模型에서 問題를 定式化하는 것은 각 通行者가 起點이나 中間 노드에서 그들의 終點으로 갈때, 그의 瞬間 通行時間(instantaneous travel time)을 最小化하는 經路를 使用한다는 選擇 領域에 基礎한다. 이에 따라 전형적인 靜的 使用者 平衡 狀態를 動的으로 一般化시키면 다음과 같다.

\* 링크 通行時間에 基礎한 瞬間 動的 使用者 最適 狀態: 만약 각 순간, 각 意思決定 노드(decision node)에서의 각 O/D쌍에 대해, 使用되고 있는 모든 經路에 대한 瞬間 通行時間이 最小 瞬間 經路 通行時間과 같다면 네트워크상의 動的 交通流는 링크 通行時間에 基礎한 動的 使用者 最適 狀態에 있다.

### I-1-4 動的 通行時間의 定義

道路交通情報體系(ATIS)에서는 通行者에게 필요한 두가지 情報, 즉 現在와 未來의 通行時間 情報가 있다. 現在의 通行時間 情報는 現在 狀況에서의 순간적인 링크 通行時間으로 부터 얻어지며, 未來의 通行時間 情報는 豫測된 링크 通行時間으로 부터 얻어진다.

#### 가) 瞬間 通行時間(instantaneous travel time)

어떤 時間  $t$ 의 瞬間 링크 通行時間은 그 時間의 狀況을 가장 잘 나타내는 交通 狀況이 변하지 않고 남아 있을 때에 링크를 通過하는 車輛이 經驗하는 通行時間으로 定義된다.

### 나) 實際 通行時間(actual travel time)

實際 링크 通行時間, 또는 將來 링크 通行時間은 車輛이 실제로 링크상에서 經驗하는 通行時間이다.

## II-2 模型 構成을 위한 制約 條件

### I-2-1 狀態 方程式

#### 가) 링크에 대한 狀態方程式

$x_a(t)$ 를 時間  $t$ 에 링크  $a$  상의 車輛數,  $x_{ap}^j(t)$ 를 時間  $t$ 에 起點  $i$ 로 부터 終點  $j$ 를 향하는 經路  $p$  상의 링크  $a$ 에 대한 車輛數라 하자. 또한  $u_a(t)$ 가 時間  $t$ 에 링크  $a$ 로 流入되는 流入量(inflow rate, vehicles/hour), 그리고  $v_a(t)$ 를 時間  $t$ 에 링크  $a$ 에서 流出되는 流出量(exit flow)이라 하면, 링크  $a$ 에 대한 狀態方程式은 다음과 같다.

$$\frac{dx_a^j(t)}{dt} = u_{ap}^j(t) - v_{ap}^j(t) \quad \forall a, p, i, j \quad (2-1)$$

#### 나) 終點에 대한 狀態方程式

起點  $i$ 를 出發하여 어떤 時間  $t$ 에 經路  $p$ 를 利用하여 終點  $j$ 에 到着하는 瞬間 交通量(instantaneous flows)을 制御變數  $e_p^j(t)$ 로 定義하고, 起點  $i$ 를 出發하여 經路  $p$ 를 통해 時間  $t$ 에 終點  $j$ 에 到着하는 累積車輛臺數를  $E_p^j(t)$ 로 나타내면, 終點에 대한 狀態方程式은:

$$\frac{dE_p^j(t)}{dt} = e_p^j(t) \quad \forall p, i, j \neq i \quad (2-2)$$

### I-2-2 交通流 保存 制約 條件

#### 가) 中間 노드에서의 交通流 保存

O-D쌍  $i, j$ 間的 經路  $p$ 상에 있는 노드  $n$  ( $n \neq i, j$ )에서의 交通流 保存 方程式(flow conservation equation)은 다음과 같이 표현될 수

있다.

$$\sum_{a \in B(n)} v_{ap}^j(t) = \sum_{a \in A(n)} u_{ap}^j(t) \quad \forall n \neq i, j; p, i, j \quad (2-3)$$

여기서,  $A(n)$ 은 노드  $n$ 을 始點으로 하는 링크의 集合이며,  $B(n)$ 은 노드  $n$ 을 終點으로 하는 링크의 集合을 나타낸다.

#### 나) 起點에서의 交通流 保存方程式

$$\sum_{a \in A(i)} \sum_p u_{ap}^j(t) = f^j(t) \quad \forall i \neq j, j \quad (2-4)$$

여기서,  $f^j(t)$ 는 어떤 時間  $t$ 에 起點  $i$ 로 부터 終點  $j$ 를 향하는 瞬間 交通量

#### 다) 終點에서의 交通流 保存方程式

$$\sum_{a \in B(j)} \sum_p v_{ap}^j(t) = e^j(t) \quad \forall i, j \neq i \quad (2-5)$$

### I-2-3 交通量 傳播 制約 條件

링크상의 交通量 뿐만 아니라 流入 및 流出 交通量 모두는 링크를 통과하는데 걸리는 時間이 링크 通行時間과 一致하여야 한다. 靜的 네트워크 模型의 경우에는 交通流가 起點으로부터 終點까지의 全 通行經路에 대해 瞬間적으로 傳播된다고(propagate) 假定하기 때문에 링크상에 待期行列이 발생하지 않으며 이러한 交通量 傳播 制約條件은 필요가 없다.

經路  $p$ 상의 中間 노드  $n \neq i$ 에 대해, 部分 經路(subroute)  $\tilde{p}$ 를 노드  $n$ 으로 부터 終點  $j$ 까지의 經路  $p$ 의 일부분으로 定義하자. 또한  $\tau_a(t)$ 를 링크  $a$ 상의 實際 通行時間이라 하면, 時間  $t$

에 經路  $p$ 를 使用하는 링크  $a (\in B(n))$ 上的 車輛은 다음 結果中 하나가 된다.

1. 時間  $[t + \tau_a(t)]$ 에 部分經路  $\tilde{p}$ 上的 下流 (downstream) 링크에서 增加된 車輛,
2. 時間  $[t + \tau_a(t)]$ 에 終點에서 流出된 車輛의 증가분 따라서 이를 定式化하면 다음과 같다.

$$x_{ap}^{\ddot{u}}(t) = \sum_{b \in \tilde{p}} \{x_{bp}^{\ddot{u}}[t + \tau_a(t)] - x_{bp}^{\ddot{u}}(t)\} + \{E_p^{\ddot{u}}[t + \tau_a(t)] - E_p^{\ddot{u}}(t)\} \quad \forall a, n, p, i, j; n \neq i; a \in B(n) \quad (2-6)$$

### II-3 模型의 定式化

링크  $a$ 에 대한 瞬間 通行時間  $c_a[x_a(t), u_a(t), v_a(t)]$  또는 단순히  $c_a(t)$ 는 다음과 같이 構成된다.

$$c_a(t) = g_{1a}[x_a(t), u_a(t)] + g_{2a}[x_a(t), v_a(t)] \quad (2-7)$$

여기서,  $g_{1a}[x_a(t), u_a(t)]$  : 링크  $a$ 에 대한 瞬間 巡行時間(cruise time)

$g_{2a}[x_a(t), v_a(t)]$  : 링크  $a$ 에 대한 瞬間 待期行列 遲滯

$g_{1a}[x_a(t), u_a(t)]$ 와  $g_{2a}[x_a(t), v_a(t)]$ 는 음수가 아니며, 각각  $x_a(t), u_a(t)$  그리고  $x_a(t), v_a(t)$ 에 대해 微分 可能하다고 假定한다.

最適制御理論을 使用하면, 瞬間 動的 使用者 最適 通行配定模型에 相應하는 最適化 模型은 다음과 같이 定式化 된다.

$$\min_{u, v, x, e, E} \int_0^T \left\{ \int_0^{u_a(t)} g_{1a}[x_a(t), \omega] d\omega + \int_0^{v_a(t)} g_{2a}[x_a(t), \omega] d\omega \right\} dt \quad (2-8)$$

여기서,

- 각 링크  $a$ 상의 交通量과, 각 終點의 累積 到着車輛에 대한 狀態方程式:

$$\frac{dx_{ap}^{\ddot{u}}(t)}{dt} = u_{ap}^{\ddot{u}}(t) - v_{ap}^{\ddot{u}}(t) \quad \forall a, p, i, j$$

$$\frac{dE_p^{\ddot{u}}(t)}{dt} = e_p^{\ddot{u}}(t) \quad \forall p, i, j \neq i \quad (2-9)$$

- 起點과 終點을 包含한 각 노드의 交通流 保存 制約條件:

$$f^{\ddot{u}}(t) = \sum_{a \in A(i)} \sum_p u_{ap}^{\ddot{u}}(t) \quad \forall i, j$$

$$\sum_{a \in B(n)} v_{ap}^{\ddot{u}}(t) = \sum_{a \in A(n)} u_{ap}^{\ddot{u}}(t) \quad (2-11)$$

$$\forall n, p, i, j, n \neq i, j \quad (2-12)$$

$$\sum_{a \in B(n)} \sum_p v_{ap}^{\ddot{u}}(t) = e^{\ddot{u}}(t) \quad \forall i, j, j \neq i$$

- 交通量 傳播 制約條件:

$$x_{ap}^{\ddot{u}}(t) = \sum_{b \in \tilde{p}} \{x_{bp}^{\ddot{u}}[t + \tau_a(t)] - x_{bp}^{\ddot{u}}(t)\} + \{E_p^{\ddot{u}}[t + \tau_a(t)] - E_p^{\ddot{u}}(t)\}$$

$$\forall a, n, p, i, j; n \neq i; a \in B(n) \quad (2-14)$$

- 變數의 定義에 따른 制約條件:

$$\sum_{op} x_{op}^{\ddot{u}}(t) = u_a(t),$$

$$\sum_{ip} v_{ip}^{\ddot{u}}(t) = v_a(t), \quad \forall a \quad (2-15)$$

$$\sum_{op} x_{op}^{\ddot{u}}(t) = x_a(t), \quad \forall a \quad (2-16)$$

$$\sum_p x_{ap}^{\ddot{u}}(t) = x_a^{\ddot{u}}(t), \quad \sum_j x_a^{\ddot{u}}(t) = x_a(t),$$

$$\sum_p e_p^{\ddot{u}}(t) = e^{\ddot{u}}(t) \quad (2-17)$$

- 非陰 制約條件:

$$\begin{aligned} x_{ap}^{\ddot{u}}(t) &\geq 0, \quad u_{ap}^{\ddot{u}}(t) \geq 0, \\ v_{ap}^{\ddot{u}}(t) &\geq 0 \quad \forall a, p, i, j \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$e_p^{\ddot{u}}(t) \geq 0, \quad E_p^{\ddot{u}}(t) \geq 0, \quad \forall p, i, j \quad (2-19)$$

- 初期條件:

$$E_p^{\ddot{u}}(t) = 0, \quad \forall p, i, j \quad (2-20)$$

$$x_a^{\ddot{u}}(t) = 0, \quad \forall a, p, i, j \quad (2-21)$$

上記 問題의 制御變數는  $u_{ap}^{\ddot{u}}(t)$ ,  $v_{ap}^{\ddot{u}}(t)$ , 그리고  $e_p^{\ddot{u}}(t)$  이며, 狀態變數는  $x_a^{\ddot{u}}(t)$ 와  $E_p^{\ddot{u}}(t)$ 이다. 이 模型은 時間을 分離하여 非線形 問題가 되도록 하고, 그리고 反復의인 對角化(diagonalization) 形態로 각 링크 通行時間  $\tau_a(t)$ 를 推定하여 ( $\bar{\tau}_a(t)$ ) 풀 수 있다.

또한 이 問題는 最適制御理論을 利用하여 問題의 解가 通行時間에 기초한 瞬間 動的 使用者 最適 條件이라는 것이 立證될 수 있다.

## II-4 模型의 알고리즘

### II-4-1 離散時間 動的 使用者 最適 通行配定模型

瞬間 動的 使用者 最適 通行配定模型을 非線形 問題로 變形시키기 위해, 時間間隔  $[0, T]$ 를  $K$ 개의 작은 時間帶로 나눈다.

그러면, 最適制御 問題는 다음과 같이 離散時間 非線形 問題로 再定式化 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_{u, v, x, E} Z = & \sum_{k=1}^K \sum_a \left\{ \int_0^{x_a(k)} g_{1a}[x_a(k), \omega] d\omega \right. \\ & \left. + \int_0^{v_a(k)} g_{2a}[x_a(k), \omega] d\omega \right\} \end{aligned} \quad (2-22)$$

여기서,

$$\begin{aligned} x_{ap}^{\ddot{u}}(k+1) &= x_{ap}^{\ddot{u}}(k) + u_{ap}^{\ddot{u}}(k) \\ &- v_{ap}^{\ddot{u}}(k) \quad \forall a, p, i, j, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (2-23)$$

$$\begin{aligned} E^{\ddot{u}}(k+1) &= E^{\ddot{u}}(k) + \sum_{a \in B(n)} \sum_p v_{ap}^{\ddot{u}}(k) \quad \forall i, j \\ &\neq i, j, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (2-24)$$

$$\sum_{a \in A(i)} \sum_p u_{ap}^{\ddot{u}}(k) = f^{\ddot{u}}(k) \quad \forall i \neq j, k=1, \dots, K \quad (2-25)$$

$$\begin{aligned} \sum_{a \in B(n)} v_{ap}^{\ddot{u}}(k) - \sum_{a \in A(n)} u_{ap}^{\ddot{u}}(k) &= 0 \quad \forall n, p, i, j, n \\ &\neq i, j, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (2-26)$$

$$\begin{aligned} x_{ap}^{\ddot{u}}(k) &= \sum_{b \in p} \{ x_{bp}^{\ddot{u}}[k + \bar{\tau}_a(k)] - x_{bp}^{\ddot{u}}(k) \} \\ &+ \{ E_p^{\ddot{u}}[k + \bar{\tau}_a(k)] - E_p^{\ddot{u}}(k) \} \\ &\forall a \in B(n); n \neq i; p, i, j, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (2-27)$$

$$\begin{aligned} x_{ap}^{\ddot{u}}(k+1) &\geq 0, \quad u_{ap}^{\ddot{u}}(k) \geq 0, \quad v_{ap}^{\ddot{u}}(k) \geq 0 \\ &\forall a, p, i, j, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (2-28)$$

$$E_p^{\ddot{u}}(k+1) \geq 0, \quad \forall p, i, j, k=1, \dots, K \quad (2-29)$$

$$E_p^{\ddot{u}}(1) = 0, \quad \forall p, i, j, \quad x_{ap}^{\ddot{u}}(1) = 0, \quad \forall a, p, i, j \quad (2-30)$$

### II-4-2 對角化 및 Frank-Wolfe 알고리즘

副問題(subproblem) 變數  $p, q, y, G$ 를 主問題(main problem) 變數  $u, v, x, E$ 에 對應되는 變數라 하자. 分割된 動的 使用者 最適 通行配定 프로그램의 最小化에 대해 Frank-Wolfe 알고리즘을 適用하는 것은 각 反復遂行에서 다음과 같은 線形 프로그램(LP)의 解를 필요로 한다:

$$\begin{aligned} \min_{p, q, y, G} \hat{Z} = & \sum_{k=1}^K \sum_{i,j} \left[ \frac{\partial Z}{\partial u_{ap}^{\ddot{u}}(k)} p_{ap}^{\ddot{u}}(k) \right. \\ & + \frac{\partial Z}{\partial v_{ap}^{\ddot{u}}(k)} q_{ap}^{\ddot{u}}(k) + \frac{\partial Z}{\partial x_a^{\ddot{u}}(k+1)} y_{ap}^{\ddot{u}}(k+1) \Big] \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{i,j,p} \frac{\partial Z}{\partial E_p^{\ddot{u}}(k+1)} G_p^{\ddot{u}}(k+1) \end{aligned} \quad (2-31)$$

st.

식 (2-23)~식 (2-30)

制御 및 狀態 變數  $u, v, x, E$ 에 대한  $Z(u, v, x, E)$ 의 gradient 構成要素는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z(u, v, x, E)}{\partial u_a(k)} &= g_{1a}[x_a(k), u_a(k)] \\ &\quad \forall a, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (2-32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z(u, v, x, E)}{\partial v_a(k)} &= g_{2a}[x_a(k), v_a(k)] \\ &\quad \forall a, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (2-33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z(u, v, x, E)}{\partial x_a(k)} &= \int_0^{u_a(k)} \frac{\partial g_{1a}[x_a(k), w]}{\partial x_a(k)} dw \\ &+ \int_0^{v_a(k)} \frac{\partial g_{2a}[x_a(k), w]}{\partial x_a(k)} dw \\ &\quad \forall a, k=2, \dots, K \end{aligned} \quad (2-34)$$

$$\frac{\partial Z(u, v, x, E)}{\partial x_a(K+1)} = 0 \quad \forall a \quad (2-35)$$

$$\frac{\partial \hat{Z}(u, v, x, E)}{\partial E^u(k)} = 0 \quad \forall i, j; k=2, \dots, K+1 \quad (2-36)$$

上記의 目的函數와 制約條件은 각 O/D쌍에 따라 分離될 수 있으며, 이는 다시 각 時間間隔  $1, \dots, K$ 에 대해 細分化 될 수 있다.

각 O/D쌍  $(i, j)$ 間的 交通量을 각 時間間隔  $1, \dots, K$ 으로 細分化한 線形의 副問題는 人爲的인 起點을 使用한 時間-空間 擴張 네트워크에서의 일대일(하나의 起終點間) 最小 費用 經路 問題로 看做될 수 있다. 이것은 人爲的인 起點에서 super-destination으로의 最小 費用 經路를 決定하고 all-or-nothing 配定을 遂行함으로써 解決될 수 있다.

이러한 결합된 알고리즘에서, 對角化 過程을 外部 反復遂行(iteration)으로 Frank-Wolfe 過程을 内部 反復遂行으로 定하여 해를 도출할 수 있다.

### II-4-3 模型의 알고리즘

瞬間 動的 使用者 最適 通行配定模型을 풀기 위한 알고리즘은 (그림 2-1)과 같으며, 다음과 같이 要約될 수 있다.

[段階 0] 初期化(Initialization)

初期 實行可能解  $\{x^0(k)\}, \{u^0(k)\}, \{v^0(k)\}, \{E^0(k)\}$ 를 찾는다. 外部 iteration 數를  $m = 1$ 로 놓는다.

[段階 1] 對角化(Diagonalization)

實際 링크 通行時間  $\bar{\tau}_a(k)$ 의 새로운 推定值를 찾고 瞬間 動的 使用者 最適 프로그램을 푼다:

<段階 1-1> Update. 式 (2-32)~(2-34)를 계산한다. 内部 itera 數를  $n = 1$ 로 놓는다.

<段階 1-2> Direction Finding. <단계 1-1>의

값과 交通量 傳播 制約條件으로 부터, 각 O/D쌍  $(i, j)$ 에 대해 擴張된 街路網에서 各 人爲的 起點으로 부터 super destination으로의 最小 費用經路를 찾는다.

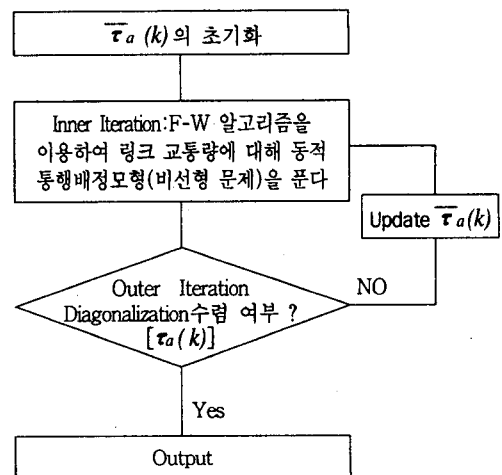
all-or-nothing 通行配定을 遂行하여 副問題解  $\{p_a(k)\}, \{q_a(k)\}, \{y_a(k)\}, \{G^u(k)\}$ 를 구한다.

<段階 1-3> Line Search.  $d^m$ 의 값을 구하여, 一次元 探索問題를 푼다.

<段階 1-4> Move.  $\{u_a(k)\}, \{v_a(k)\}, \{x_a(k)\}, \{E^v(k)\}$ 와  $\{p_a(k)\}, \{q_a(k)\}, \{y_a(k)\}, \{G^v(k)\}$ 를 結合하여 새로운 해를 찾는다.

<段階 1-5> 内部 反復遂行의 收斂 判定. 만약  $n$ 이 미리 정해진 수와 같으면 [段階 2]로 간다; 그렇지 않으면  $n = n + 1$ 이 되어 <段階 1-1>로 간다.

[段階 2] 外部 反復遂行에 대한 收斂 判定 만약  $\{\bar{\tau}_a^m(k)\} \approx \{\bar{\tau}_a^{m+1}(k)\}$ 일 경우 멈춘다; 현재의 해  $\{u_a(k)\}, \{v_a(k)\}, \{x_a(k)\}, \{E^s(k)\}$ 는 瞬間 動的 使用者 最適 狀態 근처에 있다; 그렇지 않을 경우  $m = m + 1$ 로 하고 [段階 1]로 간다.



(그림 2-1) 알고리즘의 흐름도

II-5 時間-空間 擴張 네트워크

時間-空間 네트워크의 擴張에서, 각 物理的 노드는 단지 時間帶 數 만큼의 노드로만(즉, 어떤 여분의 링크도 導入되지 않는다) 擴張된다. 그러나 각 링크는 3개의 分離된 變數( $x_a(k)$ ,  $u_a(k)$ ,  $v_a(k)$ )가 있기 때문에, 각 링크는 3개의 링크로 擴張되며 따라서 이에 따른 附加의인 노드도 필요하다. 線形 프로그램은 모든 O/D쌍에 대해 각 起終點雙으로 分解될 수 있으므로, 一對一 네트워크(하나의 O/D)만을 고려하면 된다.

時間-空間 擴張네트워크에서 각 노드와 링크는 다음과 같이 擴張된다.

- ▶노드 : 각 노드  $n$ 은 각 時間帶마다 하나씩  $K$ 노드로 擴張된다.
- ▶링크 : 각 링크에 대해 3개의 變數가 있으므로, 각 링크  $a=(l, m)$ 은  $K$ 개의 노드와 3  $K$ 개의 링크로 擴張된다.
  - a)  $K$ 노드  $n_a(k)$ ,  $k=1, \dots, K$
  - b)  $K$ 링크  $(l(k), n_a(k))$ ,  $k=1, \dots, K$
  - c)  $K$ 링크  $(n_a(k), m(k))$ ,  $k=1, \dots, K$
  - d)  $(K-1)$  링크  $(n_a(k), n_a(k+1))$ ,  $k=1, \dots, K-1$
  - e) 1 링크  $\hat{a} = (n_a(K), S)$
- ▶起點 : 각 起點  $i$ 는 각 時間帶마다 하나씩  $K$ 개의 起點,  $i(k)$ ,  $k=1, \dots, K$ 로 擴張된다.
- ▶終點 : 각 終點  $j$ 는 다음과 같이 擴張된다:
  - a) 하나의 super destination  $S$
  - b)  $K$ 노드  $j(k)$ ,  $k=1, \dots, K$
  - c)  $K$ 링크  $\hat{a} = (j(k), j(k+1))$ ,  $k=1, \dots, K$ 와  $\hat{a} = (j(K), S)$

이상에 따라 擴張된 時間-空間 네트워크는

$[(3A+1)K]$  개의 링크와  $[(N+A)K+1]$  개의 노드를 가지게 된다.

다음 (그림 2-2)는 起點이 4개 이고 終點이 3개인 假象네트워크의 5개 時間間隔에 따른 擴張 네트워크를 例示한 것이다.

II-6 最小費用經路 探索에서의 交通量 傳播 制約條件

각 人爲的 O/D쌍 ( $i(k), S$ )간에 最小費用經路를 찾는데 있어서, 交通量 傳播 制約條件은  $2K$ 개의 人爲的 링크 [ $\hat{a} = (n_a(k), n_a(k+1))$ ,  $k=1, \dots, K-1$ ,  $\hat{a} = (n_a(K), S)$  그리고  $\hat{a} = (n_a(k), m(k))$ ,  $k=1, \dots, K$ ]에 대한 費用을 一時的으로 調整함으로써 만족시킬 수 있다.

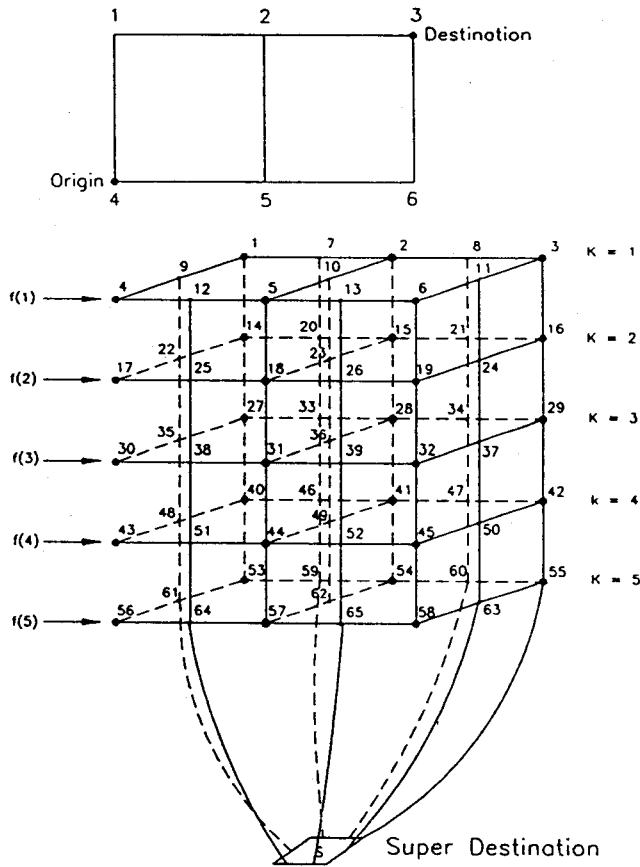
一時的 費用調整 過程은 人爲的인 노드  $l(k)$ 로부터 最小費用經路를 探索할 때 이루어지며, 이러한 過程을 要約하면 다음과 같다:

만약  $\kappa - 0.5 \leq \bar{\tau}_a(k) < \kappa + 0.5$  ( $k = (\kappa, 0, 1, \dots, K)$ ) 이면,

擴張된 時間-空間 부네트워크에서 可能的 經路는 링크  $\hat{a} = (l, m)$ 의 通行時間에 의해  $[l(k), n(k), \dots, n(k+\kappa), m(k+\kappa)]$  가 된다.

이러한 經路는 時間-空間 네트워크(上記 經路上的의 링크를 除外하고)에서 다른 人爲的인 링크의 費用을 一時的으로 無限大로 놓음으로써 이 經路가 最小費用을 가지게 할 수 있다. 이러한 費用調整 過程은 각각의 人爲的인 O/D 쌍 ( $i(k), S$ )에 대해 遂行되어 져야 한다.





(그림 2-2) 링크擴張例

### Ⅲ. 動的 通行配定模型을 위한 링크 通行時間 函數의 導出

動的 通行配定에서의 重要한 問題點은 傳統的인 BPR式(交通量-遲滯 函數)이 時間에 따라 變하는 交通 네트워크에 利用될 수 없다는 것이다. 즉, BPR 函數는 交通流를 靜的 狀態로 假定하고 있으며, 이러한 假定은 時間에 따라 交通量이 變하는 交通 네트워크에서는 妥當하지 않다. 따라서 動的 通行配定模型을 爲해 時間에 따라 變하는 링크 通行時間 函數를 開發하는 것은 매우 重要하다. 이에 따라 Ran과

Boyce(1994)는 링크 通行時間 函數의 開發에 대한 接近方法을 提示하였다. 本章에서는 Ran과 Boyce(1994)의 基本的인 接近 틀을 基礎로 하여 링크 通行時間 函數를 導出하고자 한다.

#### Ⅲ-1 接近 方法

링크상의 通行時間은 두 가지의 主要素로 構成된다고 看做한다. 첫째는 링크상의 混雜하지 않은 區間에 대한 通行時間(巡行時間)이며, 둘째는 交叉路에서의 混雜 通行時間, 즉 待期遲滯 時間이다.

交又路에서의 待期遲滯時間은 確定的(deterministic) 要素와 確率的(stochastic) 要素로 구성되어 있는데 前者는 均一遲滯(uniform delay)이며, 後者は 特정한 通行期間동안 到着한 車輛에 의해 經驗되는 過飽和 遲滯와 任意(random)到着의 效果를 포함하는 過負荷遲滯(overflow delay) 이다.

이들을 포함하는 링크 通行時間函數를 導出할 때, 重要的 點은 動的 通行配定の 遂行을 위해서 使用될 函數가 볼록(convex)이어야 하며, 一次 微分을 구할 수 있고 또한 連續이어야 한다는 것이다. 따라서 本 研究에서는 實際 네트워크에 適用하기 위해, 이러한 條件을 滿足하며 實際 狀況을 가장 잘 묘사할 수 있는 函數式을 使用하고자 한다.

Ⅲ-1-1 링크 巡行時間의 導出

링크 巡行時間은 流入 交通量이 待期行列에 到達하는데 까지 걸리는 時間으로서 이것은 交通流의 交通量-密度-速度 關係로 부터 구할 수 있다.

그러나, 國內의 “道路容量便覽 研究調查(第 2, 3 段階, 韓國建設技術研究所, 交通開發研究院, 1992. 10)”에 의하면 巡行速度는 交通量和 無關하며 주로 區間길이와 側面 摩擦 程度(裏面道路 交通量, 버스 停車臺數 등)에 影響을 받는 것으로 調查되었다. 즉, 巡行速度는 對象 네트워크의 道路 與件과 地域 與件에 따라 左右된다 는 것을 意味한다. 따라서 巡行速度에 의한 링크 通行時間은 다음과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$g_{la}(k) = 3600 \frac{l_a}{\bar{w}_a} \quad (3-1)$$

여기서,  $g_{la}$ 는 링크 巡行時間(초),  $l_a$ 는 링크 길이(km),  $\bar{w}_a$ 는 道路與件과 地域與件에 따른

巡行速度(km/h)를 나타낸다.

Ⅲ-1-2 交又路 遲滯時間의 導出

時間間隔  $k$  동안, 링크  $a$ 의 下流 交又路에 到着하는 車輛에 대한 車輛當 平均遲滯,  $g_{2a}(k)$ 는 두 가지 遲滯項의 疊으로 表現될 수 있다.

$$g_{2a}(k) = g_{2a1}(k) + g_{2a2}(k) \quad \forall a \quad (3-2)$$

여기서  $g_{2a1}(k)$ 는 均一遲滯이며,  $g_{2a2}(k)$ 는 過負荷遲滯(overflow delay) 이다.

가) 均一遲滯式의 導出

$\rho_a(k)$ 를 時間間隔  $k$  동안에 링크  $a$ 의 流出部에서 飽和度(degree of saturation)로 定義하면 다음과 같다.

$$\rho_a(k) = \{v_a(k)\}/Q_a \quad (3-3)$$

여기서,  $Q_a$ 는 링크  $a$ 의 流出部 容量

信號週期 동안 일정한 率로 到着하는 하나의 綠色週期에 대한 均等遲滯(uniform delay) 公式는 Webster 公式(1958)의 첫번째 항과 같다.

$$g_{2a1}(k) = \frac{0.5 C [1 - g_e/C]}{1 - \rho_a(k) g_e/C} \quad (3-4)$$

여기서  $C$ 는 信號週期(sec)이며,  $g_e$ 는 時間間隔  $k$ 동안의 有效 綠色時間이다.

그러나 上記 式에서  $1 - \rho_a(k) g_e/C \geq 0$ 인 경우, 즉  $v_a(k) \geq s$ (포화교통류율)인 경우(이러한 狀況은 通行配定時 發生될 수 있음)에는 使用할 수가 없다. 즉  $v_a(k) = s$ 일 때 無限히 增加하는 값을 가지며,  $v_a(k) > s$ 인 경우는 음의 값을 가진다. 따라서 函數式이 볼록(convex)하지 않고, 微分값도 存在하지 않으며 또한 連續도 아니다.

그러므로 이 식은 動的 通行配定問題를 解決하는데 使用될 수 없다.

이와 같은 制約點을 解消하기 위해, 上記 式을 Taylor's series를 利用하여 展開하면 다음과 같다.

$$g_{2a1}(k) = A[1+(\lambda\rho(k))+(\lambda\rho(k))^2 + (\lambda\rho(k))^3 + (\lambda\rho(k))^4 + \dots]$$

여기서,  $A = C(1-\lambda)^2/2$ ,  $\lambda = g_c/C$  (3-5)

式 (3-5)를  $\rho_a(k)$ 가 一般的으로 갖을 수 있는 값의 範圍 ( $0 < \rho_a(k) < 2$ )에서 式 (3-4)와 類似하도록 變形하면, 다음 式 (3-6)과 같다.

$$g_{2a1}(k) = 32 + 1.13 \times A [1 + (\lambda\rho(k)) + (\lambda\rho(k))^2 + (\lambda\rho(k))^3 + (\lambda\rho(k))^4] \quad (3-6)$$

上記 式은 飽和도가 2.5인 경우 最大 4초 정도의 誤差를 나타내는 것으로 나타났으며, 따라서 이 式을 動的 通行配定模型의 適用에 使用하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

나) 過負荷遲滯式의 導出

過負荷遲滯模型式들로는 HCM, Australia, Canada, 그리고 TRANSYT-8 模型 등을 들 수 있으며 Akcelik(1988)은 이러한 遲滯模型들을 一目요연하게 表現하기 위해 媒介變數들에 適切한 값을 代入하여 다음과 같은 一般化된 遲滯式을 提示하였다.

$$g_{2a2}(k) = 900 \Delta k (\rho_a(k))^n \left\{ (\rho_a(k) - 1) + \sqrt{(\rho_a(k) - 1)^2 + \frac{m(\rho_a(k) - \rho_{a0}(k))}{Q_a \Delta k}} \right\} \quad (3-7)$$

國內의 “道路容量便覽 研究調查(第 2, 3 段階, 韓國建設技術研究所, 交通開發研究院, 1992. 10)”에서는 實測資料에의 近接性, 模型結果의 合理性, 그리고 計算의 容易性 等の 原則에 따라 上記 (3-7)式의 媒介變數를 調整하여 다음과 같은 KOTI 式을 提案하였다.

$$g_{2a2}(k) = 900 \Delta k [(\rho_a(k) - 1) + \sqrt{(\rho_a(k))^2 + \frac{3\rho_a(k)}{Q_a \Delta k}}] \quad (3-8)$$

上記 公式은 國內 現實을 잘 반영하며, 微分 可能하고 또한 一次微分이 連續이므로 이를 使用하고자 한다.

따라서 交叉路 遲滯 函數는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_{2a} = g_{2a1}(k) + g_{2a2}(k) = 32 + 1.13 \times A [1 + (\lambda\rho(k)) + (\lambda\rho(k))^2 + (\lambda\rho(k))^3 + (\lambda\rho(k))^4] + 900 \Delta k [(\rho_a(k) - 1) + \sqrt{(\rho_a(k))^2 + \frac{3\rho_a(k)}{Q_a \Delta k}}] \quad (3-9)$$

IV. 模型의 適用 및 評價

IV-1 模型 適用을 위한 基礎資料 構築

IV-1-1 分析 對象 交通網 構成

分析對象 交通網은 瑞草區 南側 地域 9個洞 (瑞草 1, 2, 3, 4 洞, 방배 2, 3, 4 洞, 반포洞, 반포 1 洞)을 中心으로 (그림 4-1)과 같이 構成하였다. 構成된 交通網은 東西道路인 사평로, 사당로, 서초로, 사임당길, 효령로, 남부순환도로와 南北道路인 강남대로, 우면로, 방배로, 동작대로가 構成하는 格子形의 네트워크이다.

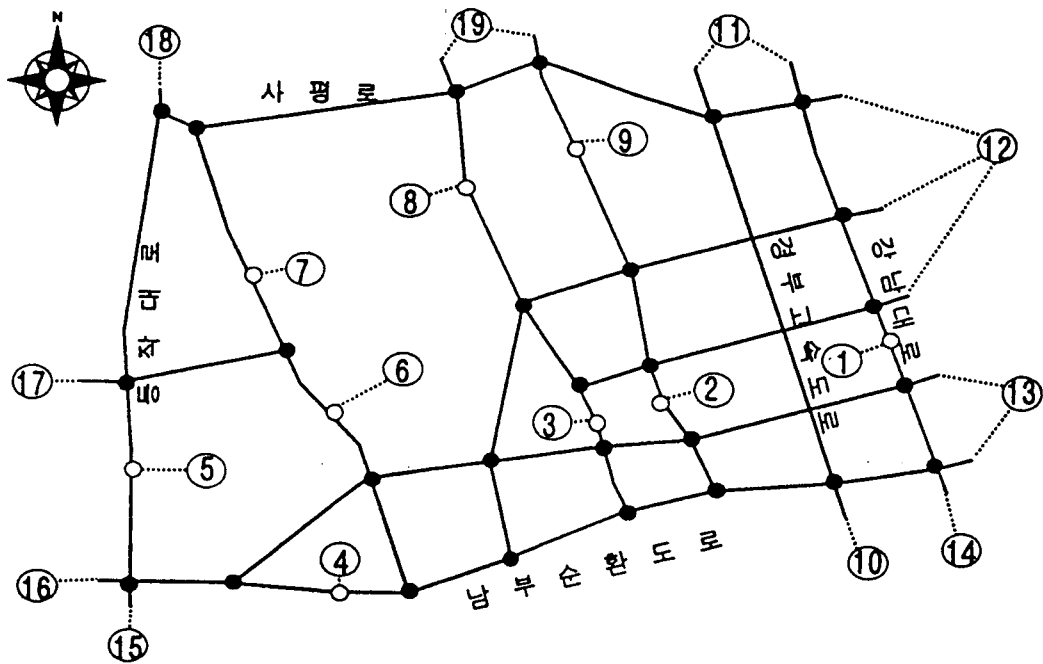
여기서 南北으로 이어지는 高速道路의 경우

本 對 象 交 通 網 에 서 는 瑞 草 IC 와 반 포 IC 에 서 만 流 出 入 이 이 루 어 지 며, 이 의 外 廓 은 zone centroid 로 處 理 하 였 다. 設 定 된 交 通 網 의 外 廓 은 gateway 로 處 理 하 였 으 며, 動 的 經 路 選 擇 이 이 루 어 질 수 있 도 록 같 은 方 向 의 近 接 gateway 는 합 쳐 서 하 나 의 gateway 를 形 成 하 도 록 하 였 다.

따 라 서 本 交 通 網 에 서 의 車 輛 流 出 入 이 發 生 하 는 起 終 點 은 서 초 지 역 9 개 동 에 瑞 草 IC 를 포 함 한 zone centroid 10 개 소 와 gateway 9 개 소 합 하 여 總 19 개 소 이 다.

노 드 의 경 우 는 각 街 路 가 만 나 는 交 叉 路 와 centroid 에 서 연 결 되 는 dummy node 로 構 成 된 다. 따 라 서 對 象 交 通 網 에 서 의 노 드 는 交 叉 路 20 개 소 와 dummy node 23 개 소 총 54 개 의 노 드 가 있 다.

링 크 는 zone centroid 에 서 街 路 링 크 에 연 결 되 는 dummy link 38 개 (兩 方 向) 와 이 로 인 해 發 生 되 는 (링 크 에 連 結 시 킴 으 로 서 發 生 되 는) 링 크 를 包 含 하 여 總 150 개 이 다.



(그림 4-1) 交 通 網 構 成 圖

#### IV-1-2 適用 O/D 資料의 構築

動的 通行配定模型은 時間에 따른 起終點(O/D) 通行量, 네트워크 그리고 링크 通行時間 函數가 주어졌을 때, 最小 時間經路를 使用하는 運轉者로 부터 나타나는 각 링크상 각 순간의 交通量을 決定하는 것이다. 따라서 時間에 따른 起終點(O/D) 通行量을 미리 構築되어 있어야 한다. 이러한 時間帶別 O/D 構築을 위해 本 研究에서는 韓國交通問題研究院에서 “서울시 交通現況 調査, 1990. 8”를 遂行하기 위해 實施한 “사람 및 車輛 起終點(O/D) 通行實態 調査(家口 通行 實態 調査)”資料를 利用하였다. 이 調査에서는 家口 構成員別로 通行手段, 出發地, 出發時間, 到着地, 到着時間 等の 內容을 包含하고 있으며, 이로 부터 앞에서 構築한 네트워크에 따라 各 時間間隔別(06:00~10:00時를 10分 間隔으로 나누었음)로, 總 24個의 時間間隔에 대한 19×19(9개의 gateway와 10개의 zone centroid) O/D를 作成하였다.

#### IV-1-3 交通網 幾何構造 및 信號體系 資料의 構築

動的通行配定模型을 適用하기 위해 Ⅲ章에서 導出한 링크 通行時間函數에서의 入力 資料로는 링크 길이( $l$ ), 信號週期( $C$ ), 有效 綠色時間( $g_e$ ), 飽和交通流率( $s$ ), 巡行速度( $w$ ), 그리고 分析時間( $\Delta k=1/6$  時間) 이다. 이들에 대한 資料는 韓國交通問題研究院에서 遂行한 “瑞草地域 交通運營改善事業 基本 및 實施設計, 1990. 10”로 부터 構築하였다.

飽和交通流率의 경우 理想的인 상황에서 통상 2200pcu/時間을 사용하나, 本 分析에서는 諸般 減少 要因을 감안하여 일괄적으로 2000pcu/時間( $s$ )을 適用하였으며, 巡行速度는 地域與件 및 道路與件을 감안하여 70km/h( $\bar{w}$ )를 適用하고자 한다.

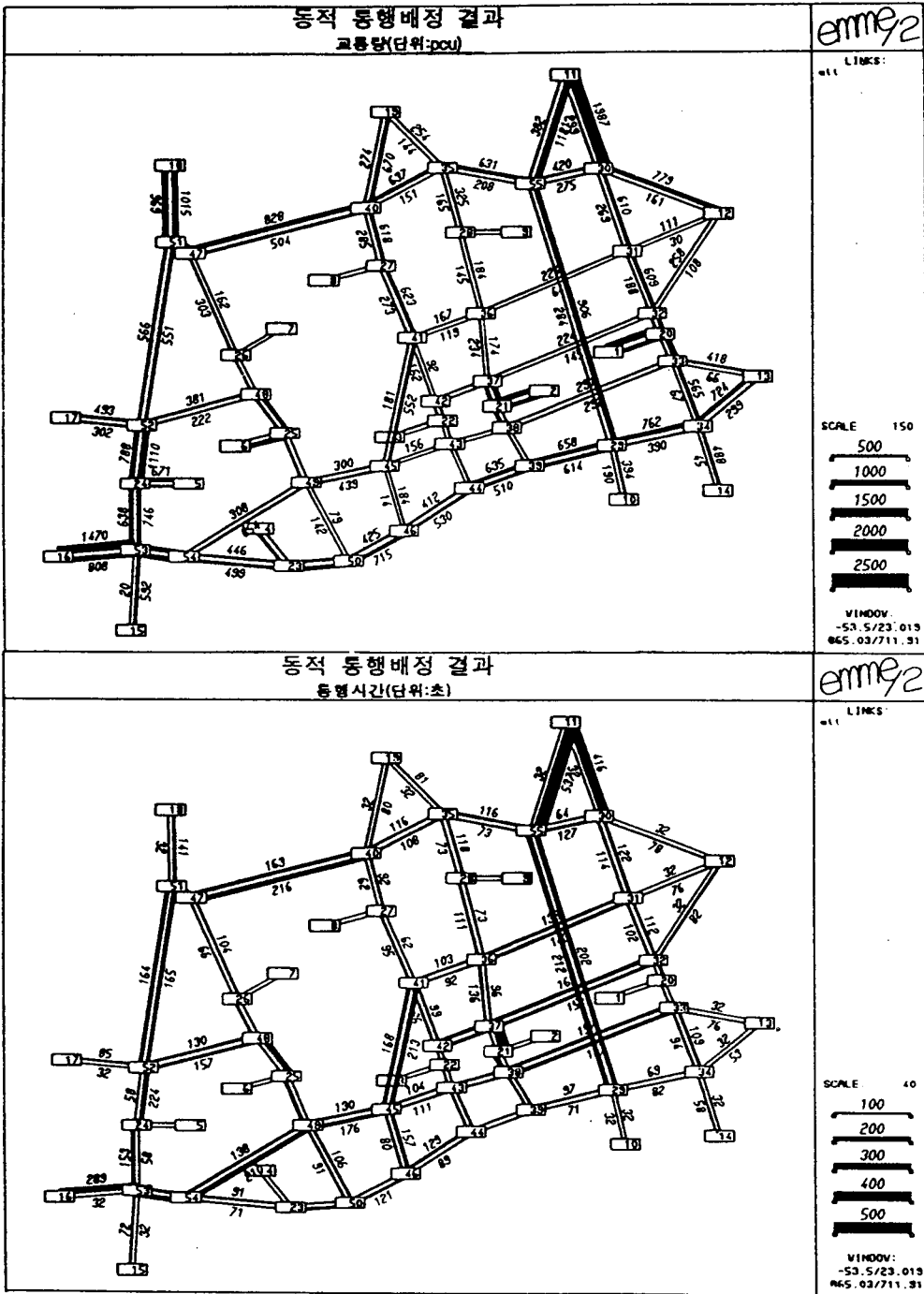
#### IV-2 模型의 適用 및 結果

動的 通行配定の 경우 莫大한 컴퓨터 容量이 必要하기 때문에, 本 對象 네트워크와 같이 小規模 地域에서도 既存의 個人用 컴퓨터(Personal Computer, 486DX2-66)로는 記憶容量이 不足하여 分析이 용이하지 않았다.

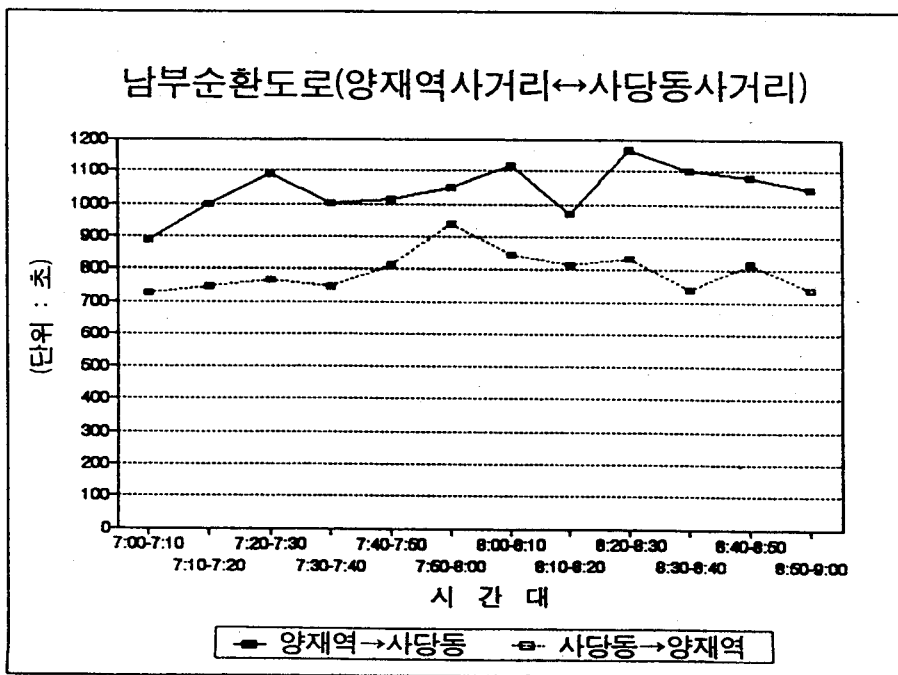
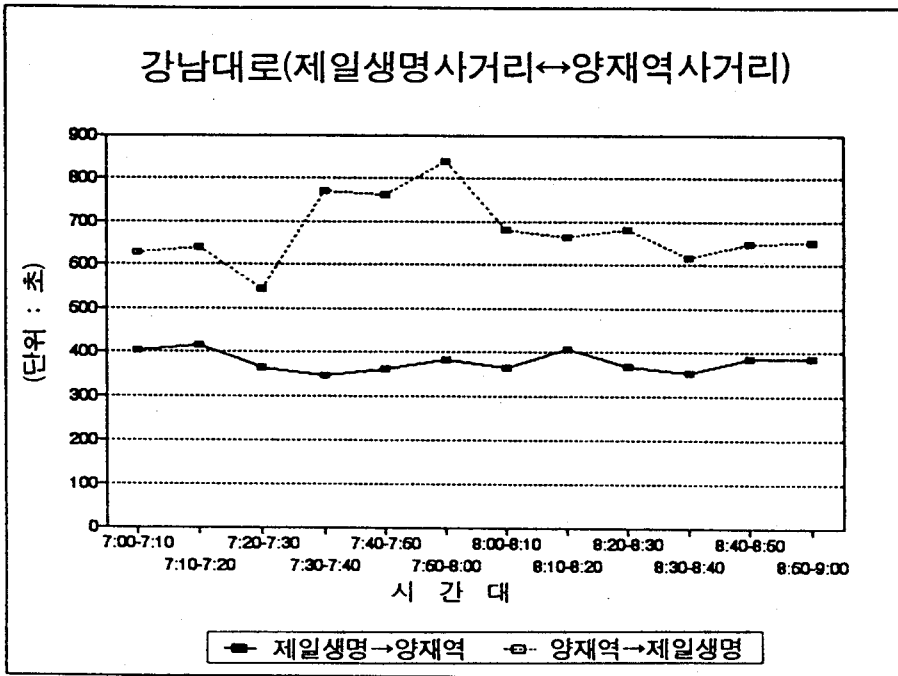
따라서, 本 研究에서는 이를 위해 OS/2(version 3.0) 環境下에서 容量을 增大시켜 分析하였으며, 이때 所要時間(CPU time)은 對角化 한번 施行時(F-W 알고리즘: 5 iteration) 약 600여초가 걸려서, 總 6회(1회는 初期化)의 對角化 遂行時 약 50여분이 所要되었다.

目的函數값의 경우는 매 對角化마다 減少하였으며, 對角化가 進行될수록 變動의 幅은 減少되는 것으로 나타났다. 즉, 매 對角化마다  $\alpha$ 값이 0에 近接하여(6번째 對角化에서 0.000218) 收斂與否를 視覺적으로 確認할 수 있었다.

對象 네트워크에 模型을 適用한 結果를 EMME/Ⅱ를 利用하여 07:50~08:00시 까지의 時間帶에 대한 交通量과 通行時間을 圖式化한 것은 (그림 4-2)와 같으며, (그림 4-3)은 起終點間의 時間帶別(07:00~09:00시) 經路通行時間을 나타낸 것이다. 尖頭時의 特性을 살펴보기 위해 對象 起終點을 南北道路인 강남대로와 東西道路인 남부순환도로(양재역~사당사거리)를 分析 對象 區間으로 選擇하였다. 이 그림에서 보면 강남대로(양재역~제일생명사거리)의 경우 07시 50분에서 08시 사이에 南→北 方向은 850여초, 그리고 北→南 方向은 380여초의 通行時間이 소요되는 것으로 分析되어 午前 尖頭時의 街路 特性인 都心으로의 車輛 流入에 따른 通行時間 增加가 잘 나타나 있다.



(그림 4-2) 動的 通行配定 結果 (07:50~08:00시)

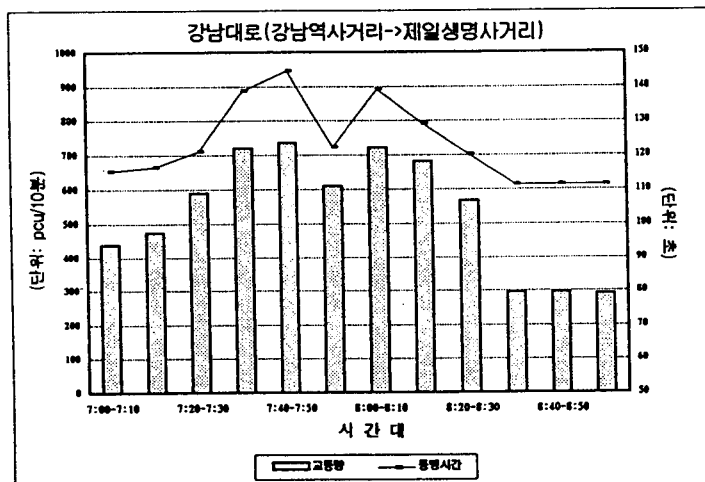
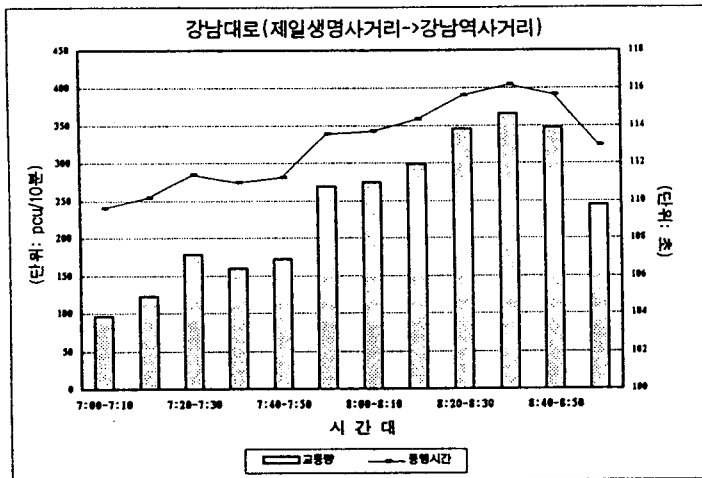


(그림 4-3) 起終點間 經路通行時間

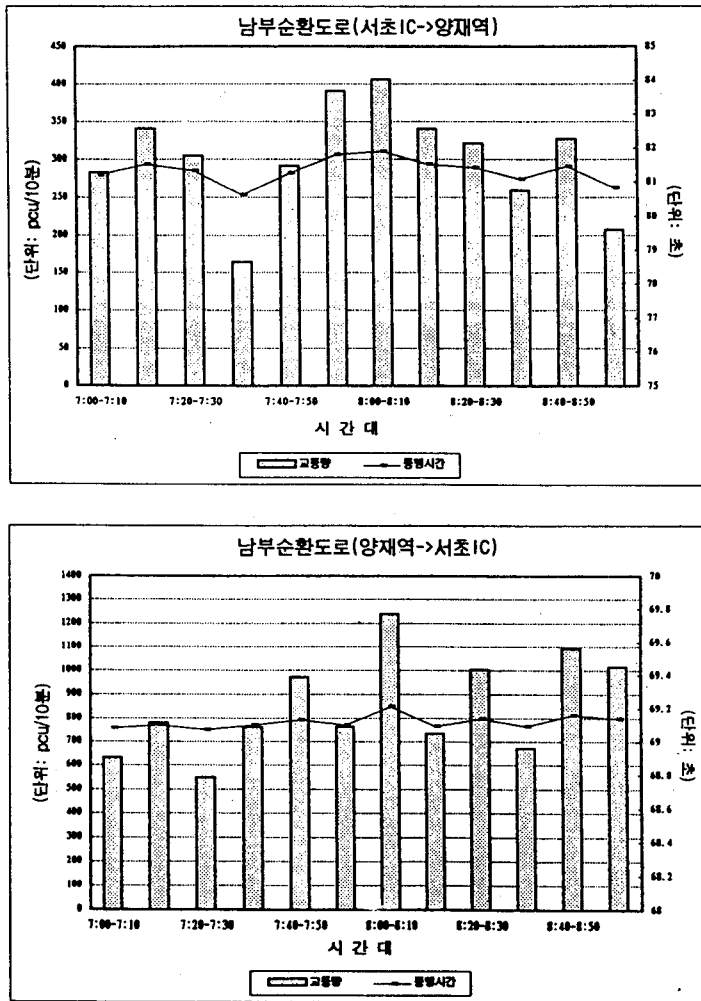
(그림 4-4)는 각 링크별로 通行時間과 通行量을 時間帶別, 方向別로 圖示한 것이다.

그림에서 보면, 강남대로상 제일생명사거리에서 강남역 方向의 경우 8:30~8:40분 사이에 交通量 및 그에 따른 通行時間이 제일 큰 것으로 나타났으며, 반대방향의 경우 7:40~8:10분 사이에 가장 높게 나타나는 것으로 分析되었다. 이는 尖頭時 都心 方向으로의 交通量 集中으로 인해 發生하는 狀況으로서 本 動的 通行配定模型의 狀況 豫測性을 다소나마 보여주는 것이다.

또한, 東西道路인 남부순환도로의 경우 兩方向 모두 07:00~09:00시에 걸쳐 通行時間에 있어서는 큰 差異가 없는 것으로 分析되었다. 이는 動的 模型의 特性上 瞬間 瞬間 最適制御에 따른 交通量의 效率的인 街路 配分에 기인한다. 즉, 東西道路인 남부순환도로의 特性上 午前 尖頭時라 할지라도 交通量이 過度하게 集中되지 않으며, 또한 代替經路라 할 수 있는 효령로와 交通量이 效率的으로 配分되어 通行時間의 變動은 미미한 것으로 判斷된다.







(그림 4-4) 街路別 時間帶別 交通量 및 通行時間

### IV-3 模型의 評價

動的 通行配定模型(dynamic route choice model)은 尖頭時 混雜한 街路網과 같이 通行需要가 時間과 空間에 따라 變化하는 경우에서 때 순간마다 街路網에 配定되는 交通量을 豫測하는 것이다. 이는 通行決定을 도와주는 實時間(real time)의 豫測的 情報를 提供하여 通行의 速度와 質을 向上시키고자 하는 道路交通情報

體系(ATIS)의 核心의인 要素이며, 또한 ITS를 評價할 수 있는 道具이기도 하다.

이러한 動的 通行配定模型은 道路交通情報體系에서의 豫測 模型으로서 交通混雜을 事前에 感知하고 이에 대한 實時間 最適制御方案을 提供하므로 實際 交通 네트워크의 效率性을 提高시킬 수 있다.

따라서 動的 通行配定模型을 評價하기 위해서는 實時間 分析 能力을 포함하는 模型自體의

效用性, 實時間 最適制御 能力, 그리고 道路交通情報體系下에서의 交通量 및 通行時間 豫測 能力 등이 綜合的으로 檢討되어야 한다.

#### 가) 模型自體의 效用性

動的 通行配定の 遂行上 가장 큰 短點은 分析 時間(computer running time)이 오래 걸리며, 大規模의 容量을 필요로 한다는 點을 들 수 있다.

本 研究와 같이 노드 54개 및 링크 150개를 가진 네트워크에서 24개의 時間帶를 個人用 컴퓨터로 分析하는데 50여분이 소요되었다. 보다 큰 規模의 보다 큰 分析 時間帶數를 가진 네트워크의 경우에도 컴퓨터의 記憶容量이 解決된다면 分析이 可能하며, 만약 大型 컴퓨터를 使用한다면 分析時間은 大幅 短縮될 수 있다. 그러나 實時間(real time)의 運用能力 역시 必要로 하는 動的 通行配定模型에서는 分析時間의 短縮이 必要하다. 특히 서울시와 같은 大規模의 네트워크를 단시간에 處理할 수 있는 能力은 現 時點에서는 不可能하다고 볼 수 있다. 이를 위해서는 컴퓨터 能力의 增大와 보다 改善된 模型 定式化가 必要하다. 그러나 本 模型의 計算的인 能力은 現 技術發展 段階에서 볼때 고 무적이라 할 수 있다.

目的函數값의 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 매 對角化마다 減少하였으며, 對角化가 進行될수록 變動의 幅은 減少되는 것으로 나타났다. 즉, 매 對角化 마다  $\alpha$ 값이 0에 接近하여(6번째 對角化에서 0.000218) 收斂與否를 視覺的으로 確認할 수 있었다. 따라서 模型의 安定性 및 解에 대한 信賴性이 立證될 수 있었다.

#### 나) 道路交通情報體系(ATIS)下에서의 交通狀況 豫測 能力

動的 通行配定模型은 前述한 바와 같이 道路交通情報體系(ATIS)의 核心的인 소프트웨어이

며, 同時에 道路交通情報體系(ATIS)下에서 여러가지 政策에 대한 評價를 할 수 있는 도구이기도 하다. 따라서 動的 通行配定模型은 豫測 模型으로서의 機能을 가져야 한다. 이를 위해서는 現實에 보다 適合한 模型의 定式化와 적절한 링크 通行時間函數(遲滯 函數)의 導出 등이 必要하다. 특히 링크 通行時間函數의 경우는 實際 狀況을 보다 잘 묘사할 수 있어야 한다. 따라서 廣範圍한 交通量 資料가 必要하며, 이러한 資料의 蒐集은 검지기(detector)와 탐측차량 등으로 부터 얻을 수 있다.

그러나 現 時點에서는 以上과 같은 資料로부터의 正確한 評價는 容易하지 않다. 즉, 動的 通行配定을 통하여 豫測된 交通量과 通行時間은 模型의 假定上(使用者 最適, 瞬間 動的 通行選擇, 그리고 完全 制御 등) 實際 交通 狀況이라고 볼 수 없다. 따라서 動的 通行配定을 통하여 豫測된 結果를 實際 交通 狀況과 比較하여 模型의 豫測 能力을 評價하는 것은 困難하다. 그러나 前 節의 分析 結果로부터 나타난 起終點間 通行時間 分布 및 尖頭時 通行特性 등으로 부터 動的 模型의 交通 狀況 豫測 能力을 間接的으로 立證할 수 있다.

더불어 現在 提示되고 推進中인 道路交通情報體系(ATIS)에서의 여러가지 政策 施行은 動的 模型에 必要한 廣範圍한 入力 資料 및 파라미터 整算 資料의 入手를 可能하게 해준다. 따라서 動的 模型의 豫測 能力은 이러한 資料들의 持續的인 調査와 데이터베이스의 構築으로부터 크게 向上될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 다) 實時間 最適制御

ATIS는 交通네트워크에서 事故와 混雜을 初期에 感知하여, 過度한 容量이 있을 때 利用 可能한 手段과 經路間에 交通을 再分配한다. 따라서 순간 순간 전반적인 道路.交通體系의 效率을

增加시켜 遲滯을 最小化시키며, 이에 따라 全體의인 通行時間이 最小化 된다.

이러한 순간 순간의 交通制御에 따른 通行時間 節減效果는 實際 交通量과 比較하여 두 가지의 全體 通行時間의 差異로 부터 導出될 수 있다. 그러나 이는 現場調査의 어려움과 模型上의 制約 등으로 容易하지가 않다. 따라서 本研究에서는 이에 대한 評價를 위해 靜的 平衡 通行配定模型을 利用하여 相對的인 比較를 하고자 한다.

動的 通行配定模型과 靜的 通行配定模型을 같은 尺度에서 比較하기 위해서는 여러가지 어려움이 있다. 즉, 靜的 模型은 需要가 分析 時間 全體에 대해 一定하다고 보며, 링크 通行時間의 경우도 交叉路 遲滯時間이 包含되어 있지 않다. 또한 動的 通行配定模型은 순간 순간 交通量의 實際 狀況을 나타내나, 靜的 模型은 起終點間의 需要를 나타낸다. 따라서, 이 두가지를 比較하기 위해 다음과 같이 假定한다.

- 靜的 模型으로 通行配定하고 이를 整算(calibration)하여 實際 交通量과 類似하다고 假定한다.
- 分析時間은 4時間(06:00~10:00시)에 局限한다.
- 靜的 模型의 全體 需要(起終點間 通行量)는 動的 通行配定模型에서의 時間帶別 O/D를 합한 量과 같다.
- 링크 通行時間을 구하기 위해 각 링크에 靜的으로 配定된 量을 時間帶別 起終點間 通行量 比率에 따라 分割한다.
- 링크 通行時間은 本 模型에서 提示한 函數式을 使用한다.

以上の 假定에 따라 07:50~08:10분 사이에 靜的 通行配定模型으로 네트워크상의 交通量과

通行時間을 分析한 結果는 다음 (그림 4-5)와 같다. 이 그림에서 보면, 앞의 動的 通行配定 結果인 (그림 4-2)와 比較해 볼 때, 全般的으로 通行時間의 폭이 크게 分析된 것으로 나타났다. 특히 代替經路라 할 수 있는 江南대로와 고속도로(起點 10, 14에서 終點 11), 남부순환도로와 효령로(起終點 14~16), 그리고 우면로와 반포로(起終點 13)의 경우 動的 通行配定에서는 兩道路間의 通行時間이 비슷하게 分析되었으나 靜的 通行配定の 경우는 代替經路間의 通行時間의 差가 매우 큰 폭으로 分析되었다.

이러한 分析結果와 더불어 動的 模型과 靜的 模型에 의한 結果를 比較해 보면 다음과 같다.

全體 네트워크 通行時間( $\Sigma$  링크 交通量  $\times$  링크 通行時間)은 靜的 模型의 경우 33,087時間으로 分析되었으며, 動的 模型의 경우 앞의 分析에서와 같이 25,011時間으로 나타나, 대략 8,000여 時間(24.4%)의 節減效果가 있는 것으로 分析되었다. 따라서 이 結果는 두가지 模型의 根本的 差異에서 發生하는 誤差를 무시한다면, 動的 模型을 利用하여 순간 순간 交通量을 最適으로 制御함에 따른 遲滯의 減少로 볼 수 있다.

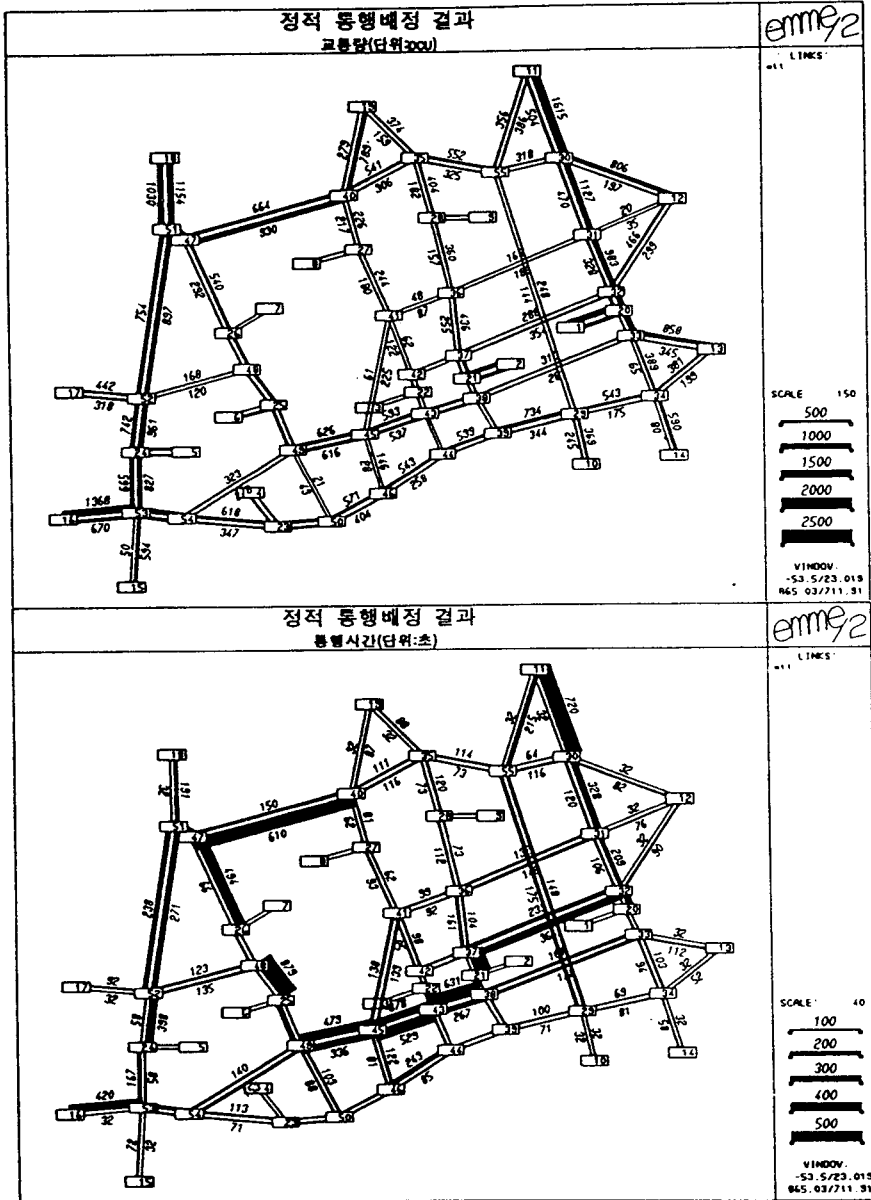
또한 動的 通行配定模型을 靜的 模型과 比較해 보기 위해 起終點間의 代替經路에 대해 通行時間 分布를 살펴보면 (그림 4-6)과 같다.

그림에서 보면 제일생명사거리에서 양재역간 두개의 代替經路(고속도로와 江南대로)의 경우 江南대로는 靜的 模型이 고속도로는 動的 模型에 의한 通行時間이 보다 높게 나타났다. 또한 양재역과 사당역간의 東西道路(남부순환도로와 효령로)의 경우도 유사한 結果가 나타났으며, 이로 부터 動的 模型이 全體의인 네트워크를 效率的으로 分配하는 것이 立證될 수 있다.

제일생명사거리에서 양재역 方向의 경우 靜的 模型과 動的 模型의 通行時間은 時間帶別로 變動이 미미한 것으로 分析된 반면에, 反對方向

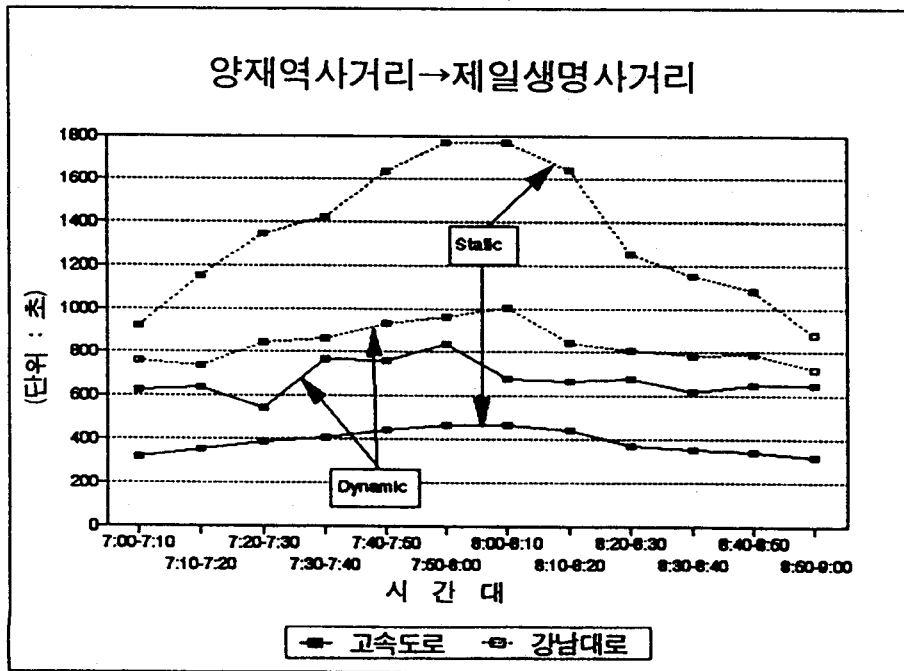
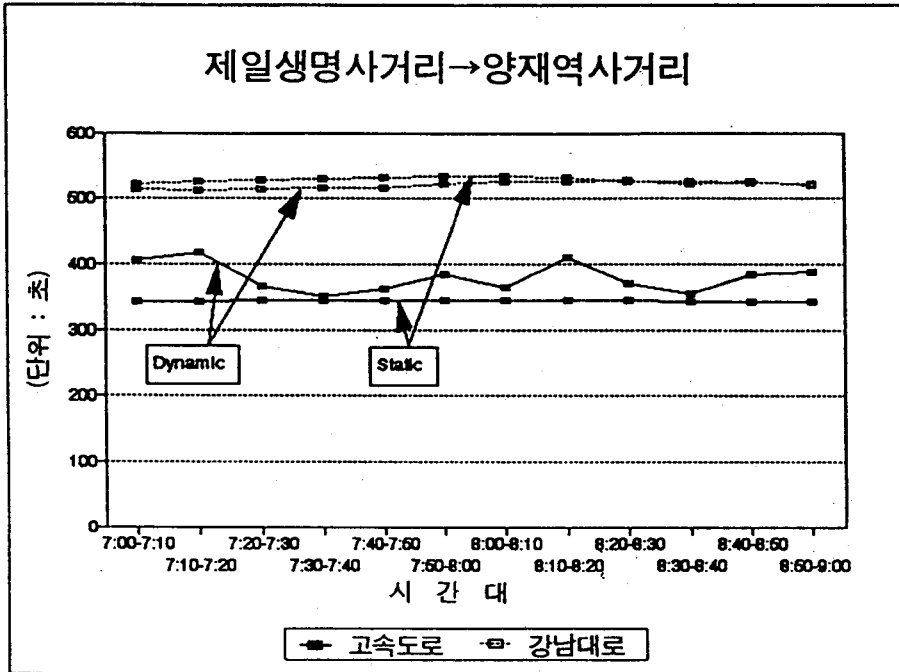
(양재역→제일생명사거리)의 通行時間은 時間帶別로 變動의 폭이 크게 나타났다. 이는 午前尖頭時의 特性을 두 模型 모두 적절히 나타내는 것을 意味하는 것으로서, 通行時間의 變動이 큰 것은 尖頭時間帶에 都心方向으로 交通量이

集中하는 것에 기인하며, 反對方向에서 通行時間의 時間帶別 差異가 적은 것은 交通量이 적어 通行時間의 主要構成要素가 交叉路 遲滯時間이라기 보다는 주로 巡行時間이기 때문인 것으로 分析된다.



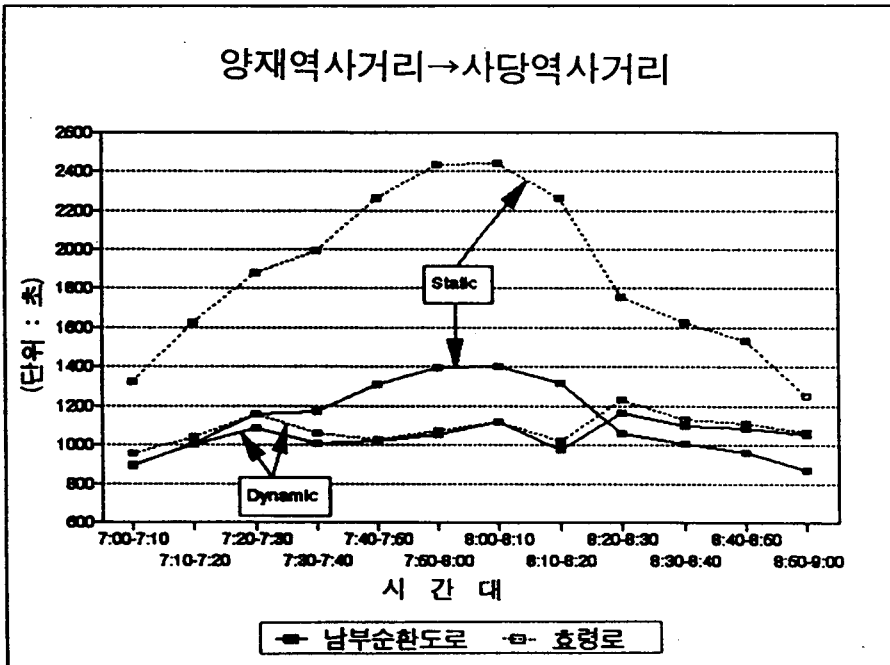
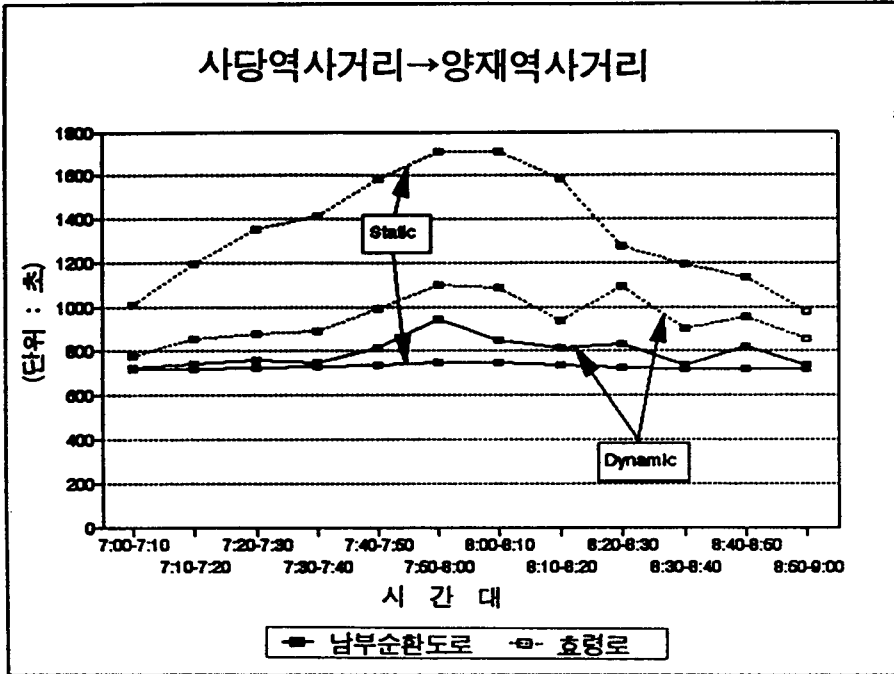
(그림 4-5) 靜的 通行配定 結果 (07:50~08:00시)

■ 남북 대체경로(강남대로, 고속도로)



(그림 4-6) 대체경로에 대한 動的의模型과 靜的의模型의 通行時間 比較

■ 동서 대체경로(남부순환도로, 효령로)



(그림 4-6) 代替經路에 대한 動的模型과 靜的模型의 通行時間 比較

## V. 結論

本 研究는 交通量 傳播 制約條件을 包含시켜 最近에 開發되고 있는 Ran(1993) 그리고 Ran과 Boyce(1994)의 瞬間 動的 使用者 最適 通行配定 模型을 實際 街路網에 適用해 보았으며, 또한 窮極의으로 이러한 動的 通行配定模型이 道路 交通情報體系(ATIS)의 核心 소프트웨어로서 使用되었을 때, 이의 有用性을 分析, 評價해 보았다. 이때 模型 適用을 위해 時間帶別 起終點 通行量을 構築하고, 模型에 適合한 링크 通行函數를 導出하였으며, 그리고 그 밖의 여러가지 模型 適用上의 制約點에 대한 代案을 提示하였다. 分析 結果는 模型 自體의 有用性, 道路交通情報體系(ATIS)下에서의 交通 狀況 豫測 能力, 그리고 最適制御 等の 側面에서 評價해 보았으며, 이를 要約하면 다음과 같다.

가) 動的 通行配定模型의 實時間 適用 可能性  
動的 通行配定の 遂行上 가장 큰 短點은 分析 時間이 오래 걸리며, 大規模의 容量을 必要로 한다는 點이었다. 그러나 本 研究과 같이 링크 150개와 24개의 時間間隔을 가진 네트워크에서 個人用 컴퓨터로 50여분이 소요되었으며, 이는 대형 컴퓨터를 사용하면 훨씬 적은 時間에 分析이 가능하다. 따라서 서울시와 같은 大規模 都市라도 將來 컴퓨터 技術의 發展에 따라 分析이 可能할 것으로 判斷된다.

### 나) 動的 模型의 交通 狀況 豫測性

動的 通行配定模型은 道路交通情報體系의 核心인 소프트웨어이며, 同時에 이를 評價할 수 있는 도구이기도 하다. 따라서 이것은 道路交通情報體系下에서의 豫測 模型으로서의 機能을 가져야 한다. 이를 위해서는 綜合的인 ITS體系가 갖추어진 상태에서의 검지기나 탐측 차량

으로 부터 蒐集된 廣範圍하고 다양한 資料로 부터의 整算(calibration)이 必要하다. 그러나 現時點에서 이러한 資料로 부터의 評價는 困難하여 假想의 네트워크와 模型 適用結果로 부터 間接的으로 評價하였으며, 이로 부터 模型의 交通狀況 豫測能力을 立證할 수 있었다.

### 다) 最適 交通制御

ATIS는 交通네트워크에서의 交通量을 效果的으로 再配定하고자 하는 것이다. 따라서 순간 순간 전반적인 道路交通 體系의 效率을 提高시켜 混雜을 最小化시키며, 이에 따라 全體的인 通行時間이 最小化된다.

이 結果를 導出하기 위해 靜的 模型을 實際 交通量과 유사하게 設定하고 動的 模型의 分析 結果와 比較해 보았다. 그 結果는 對象 네트워크內에서 總 所要 通行時間의 24.4% 정도가 節減되는 것으로 나타났으며, 代替經路間의 通行 時間 比較에서는 動的 模型이 交通 네트워크상의 交通量을 效率的으로 分配하는 것으로 分析되었다.

以上과 같이, 本 研究 結果는 動的 通行配定 模型이 將來 ITS 構築에 따라, 交通 狀況 豫測, 交通制御, 事故管理 其他 交通計劃 分野 等に 使用되어 重要한 소프트웨어로서의 機能을 할 것으로 判斷된다.

## VI. 後記

本 研究는 韓國科學財團이 支援하고 있는 1994년도 核心 專門研究支援(課題番號 : 941-1200-001-1)에 의한 結果이며, 이와 같은 研究活動이 이루어 질 수 있도록 機會를 만들어 주신 韓國科學財團에 진심으로 감사드립니다.

## 參 考 文 獻

- 1) 서울特別市, 韓國交通問題研究院, '서울시交通現況 調査'(1990. 8).
- 2) 吳世炫, '最適制御理論을 이용한 動的 通行配定模型의 適用에 관한 研究'(서울대 博士學位論文, 1995. 8).
- 3) 정경옥, '최적제어이론을 이용한 동적 통행배정모형에 관한 연구'(서울대 석사 학위논문, 1995. 2).
- 4) 韓國交通問題研究院, '瑞草地域 交通運營改善事業 基本 및 實施設計'(1990).
- 5) 韓國建設技術研究院, 交通開發研究院, '道路容量便覽 研究調査, 第3段階 最終報告書'(1992).
- 6) Akcelik R., "The Highway Capacity Manual Formula for Signalized Intersections," ITE Journal, 58(1988), pp. 23-27.
- 7) Boyce D.E., Ran B. and LeBlanc L.J., "Dynamic User-Optimal Traffic Assignment: A New Model and Solution Techniques," Presented at First Triennial Symposium on Transportation Analysis (Montreal, Canada, 1991).
- 8) Friesz T.L., Luque F.J., Tobin R.L. and Wie B.-W., "Dynamic Network Traffic Assignment Considered as a Continuous Time Optimal Control Problem," Operations Research, 37(1989), pp. 893-901.
- 9) Hurdle V.F., "Signalized Intersection Delay Models-A Primer for the Uninitiated," Transportation Research Record, 971(1984), pp. 96-105.
- 10) Kirk D.E., Optimal Control Theory: An Introduction(Englewood Cliffs, NJ. : Prentice-Hall, 1970).
- 11) Mahmassani H.S. and Chang G.L., "On Boundedly Rational User Equilibrium in Transportation Systems," Transportation Science, 21(1987), pp. 89-99.
- 12) Merchant D.K. and Nemhauser G.L., "A Model and an Algorithm for the Dynamic Traffic Assignment Problems," Transportation Science, 12(1978a), pp. 183-199.
- 13) Omar D.K. and Abdelhamid H.B., "A Dynamic Traffic Assignment Model and a Solution Algorithm," Transportation Science, 26(1992), pp. 119-128.
- 14) Ran B., "Dynamic Transportation Network Models for Advanced Traveler Information Systems," Ph.D. dissertation, University of Illinois at Chicago, Chicago, Illinois, 1993.
- 15) Ran B., Boyce D.E., "Dynamic Urban Transportation Network Models: Theory and Implication for IVHS," Lecture Notes in Economics and mathematical System, No. 417, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- 16) Ran B., Boyce D.E. and LeBlanc L.J., "A New Class of Instantaneous Dynamic User-Optimal Traffic Assignment Models," Operations Research, 41(1993), pp. 192-202.
- 17) Sheffi Y., Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods(Englewood Cliffs, NJ. : Prentice-Hall, 1985).
- 18) Wardrop J.G., "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research," Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, 1(1952), pp. 325-375.
- 19) Webster F.V., "Traffic Signal Settings," Road Research Laboratory Technical Paper, No. 39(London : HMSO, 1958).



- 20) Wie B.W., "Dynamic System Optimal Traffic Assignment on Congested Multidestination Networks," Presented at the Fifth World Conference on Transport Research(Yokohama, Japan, 1989).
- 21) Wie B.W., Friesz T.L. and Tobin R.L., "Dynamic User Optimal Traffic Assignment on Congested Multidestination Networks," Transportation Research, 24B(1990), pp. 431-442.