

□ 논 문 □

# 系統交通信號體系에서의 遲滯特性和 最適信號週期에 관한 研究

(Optimum Cycle Time and Delay Characteristics in Signalized Street Networks)

李 光 勳

(서울市政開發研究院 都市交通研究部)

## 목 차

I. 序 論

II. 研究에 사용된 시뮬레이션技法

III. 系統信號路線에서의 交通流 遲滯特性

IV. 系統信號의 最適信號週期

V. 結 論

## ABSTRACT

The common cycle time for the linked signals is usually determined for the critical intersection, just because the capacity of a signalized intersection depends on the cycle time. This may not be optimal since the interactions between the flow and the spatial structure of the route or the area are disregarded in this case.

It is common to separate the total delay incurred at signals into two parts, a deterministic or uniform delay and a stochastic or random delay. The deterministic delays and the stochastic delays on the artery particularly related to signal cycle time. For this purpose a microscopic simulation technique is used to evaluate deterministic delays, and a macroscopic simulation technique based on the principles of Markov chains is used to evaluate stochastic delays with over flow queue.

As a result of investigating the relations between deterministic delays and cycle time in the various circumstances of spacing of signals and traffic volume.

As for stochastic delays the results of comparisons of the macroscopic simulation and Newell's approximation with the microscopic simulation indicate that the former is valid for the degree of saturation less than 0.95 and the latter is for that above 0.95.

Newell's argument that the total stochastic delay on an arterial is dominated by that at or caused by critical intersection is certified by the simulation experiments.

The comprehensive analyses of the values of optimal cycle time with various conditions lead to a model. The cycle time determined by this model shows to be approximately 70% of that calculated by Webster's.

## I. 서 론

信號交差路의 交通容量이 信號週期(cycle)에 지배되어지는 것과 마찬가지로, 系統信號制御體系에서도 共通信號週期(common cycle)는 重要交差路(critical intersection) 단독의 最適信號週期가 기본이 되는 경우가 일반적이다.<sup>1)2)</sup>

그러나 이렇게 결정되는 共通信號週期는 系統制御를 구성하는 링-크와 교통류의 관계를 무시한 것으로, 고시(越)<sup>3)</sup>는 系統制御되는 交差路를 대상으로 遲滯 및 停止臺數와 信號週期와의 관계를 규명함으로써, 系統信號制御下에서의 最適信號週期가 單獨交差路의 경우와는 다르다는 것을 보여주었다.

한편, 信號로 인한 遲滯에는 赤色信號에 의해 정지되어짐으로서 발생하는 確定的遲滯(以下, 이것을 均一遲滯라함)와, 到差交通流의 랜덤(random)성에 의해 발생하는 過剩待機行列(overflow queue)에 기인하는 確率的遲滯(以下, 이것을 랜덤遲滯라함)가 있어, 兩者는 信號週期와의 관계에 있어 서로 상반되는 성질을 지니므로써, 最適信號週期는 兩者의 相互作用에 의존하게 된다<sup>2)</sup>. 그런데 도시가로망 信號체계에서의 교통류는 信號에 의해 整流되어지기 때문에 到差패턴의 랜덤성은 적어지고 거의 均一交通流에 가깝다고 하고 있으나<sup>3)</sup>, 이것이 랜덤遲滯에 또, 最適信號週期 결정에 어느정도 관여하는가에 대해서는 아직 아는 바가 별로 없다.

본 연구는 이점을 명확히 하여 系統信號에서의 最適信號週期에 대해서 검토한 것이다.

본 연구는 다음의 假定下에서 진행되었다.

- ① 過飽和狀態는 아니다.
- ② 直進交通만이며, 車輛群의 擴散은 무시했다.
- ③ 하나의 重要交差路와 複數의 交差路로 구성되는 1方向路線을 對象單位로 하였다.
- ④ 重要交差路 이외의 交差路에 대해서는, 交差道路側의 遲滯는 고려하지 않았다.

또, 본연구에서 자주 사용하고 있는 記號는 다음과 같다.

C : 信號週期(秒)

g : 有効녹색信號時間(秒)

L : 損失時間(秒)

X :  $C \cdot q / S \cdot G$  : 流入部飽和度

S : 飽和交通流率(台/秒)

q : 交通流率(台/秒)

y : 流量比(q/s)

I : 1신호주기中 到着臺數의 分散 / 1신호주기中 到着臺數의 平均

T : 링-크 往復旅行時間(秒)

## II. 研究에 사용된 시뮬레이션 技法

### 1. 마이크로(micro) 시뮬레이션

信號로 인한 車輛의 遲滯를 구하기 위한 시뮬레이션 技法의 하나로 車輛1台1台的 到着과 出發행태를 취급하는 방법을 이용했다. 이러한 방법을 본 연구에서는 마이크로 시뮬레이션이라고 한다.

車輛의 움직임은 等速走行 또는 停止의 어느 하나이고, 信號로 인한 待機行列은 正지선에서의 垂直待機行列(vertical queue)이다<sup>6)</sup>.

마이크로 모델에서는, 車輛發生을 均一分布(uniform distribution)로 발생시킬 경우에는, 系統信號體系에서의 均一遲滯가, 또 指數分布 혹은 偏移(shifted)指數分布로 發生시켰을때는 均一遲滯 이외에도 랜덤遲滯가 더해진 遲滯가 계산되는 것으로부터, 나중에 설명하게 될 랜덤遲滯모델의 檢證과, 系統信號體系에서의 均一遲滯의 檢討 등에 필요한 기초데이터를 얻을 목적으로 마이크로 시뮬레이션을 사용했다.

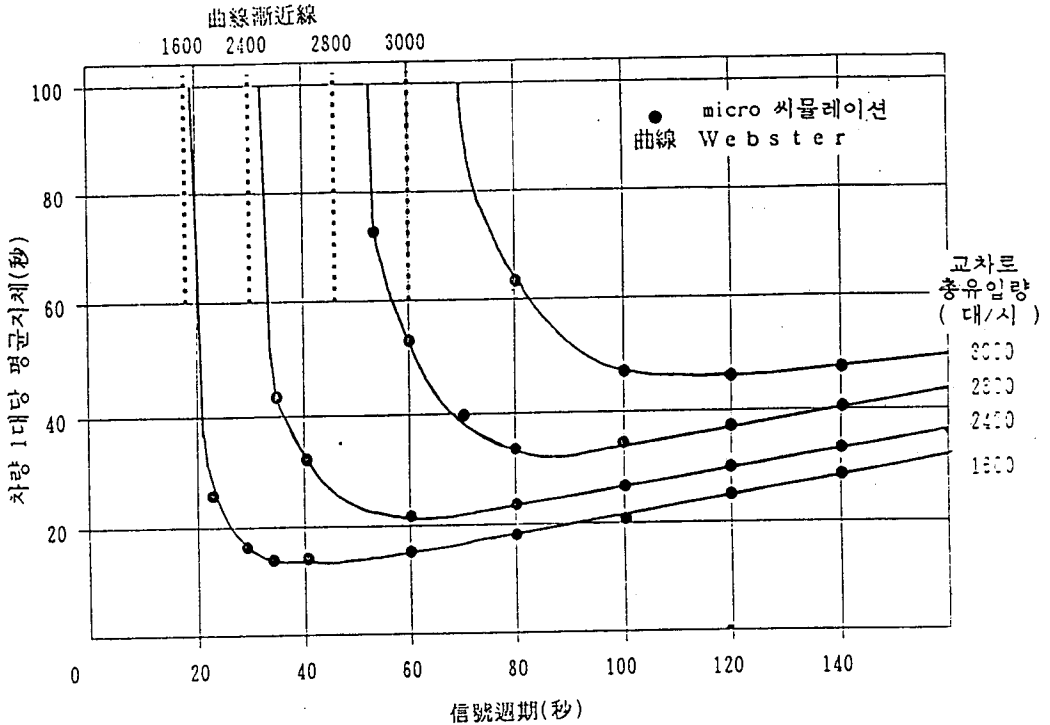
마이크로 모델을 사용하기에 앞서, 妥當性검증을 잘 알려진 Webster<sup>7)</sup> 모델과의 비교에 의해 행하였다.

그림1은 單獨信號에서 信號週期和 遲滯와의 관

계에 대하여 마이크로 모델을 이용, Webster의 결과를 재현한 것이다.

이는 어디까지나 마이크로 모델의 妥當性 입증

을 위한 것으로 본연구에서는 논하고자하는 系統 信號週期와는 무관한 것이다.



(그림 1) Webster의 信號週期和 지체도와의 관계를 micro 시뮬레이션에 의거 再現

## 2. 매크로 (macro) 시뮬레이션과 Newell 모델

(1) 본 연구에서는 均一遲滯 이외에도 랜덤遲滯를 다룰 필요가 있고 매우 중요하다. 랜덤遲滯는 到着交通流의 랜덤성에 의해 녹색신호時間이 끝난 직후에 過剩待機行列(overflow queue)이 남음으로서 생기게 되며, 그 크기는 到着교통류의 랜덤성에 지배된다.

본 연구에서는 랜덤성의 정도를 나타내는 파라메타로 I 값(到着臺數의 分散/到着臺數의 平均)을 이용하여 여러 케이스에 대하여 Markov 연쇄

에 의해 계산된 過剩待機行列臺數로부터 랜덤遲滯를 구하였다.

이러한 과정을 본 연구에서는 매크로(macro) 시뮬레이션이라 하였다.

(2) 녹색신호時間이 끝난 직후의 過剩待機行列臺數의 계산에 대하여 그 개념과 방법을 설명하면 다음과 같다.

어느 신호주기n에 있어서 過剩待機行列臺數를 i라고 할 때, 다음 신호주기 n+1에서의 過剩待機行列臺數가 j일 확률  $P_j(n+1)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_0(n+1) = P_0(n)P_{00} + P_1(n)P_{10} + \dots + P_m(n)P_{m0}$$

$$P_1(n+1) = P_0(n)P_{01} + P_1(n)P_{11} + \dots + P_m(n)P_{m1}$$

$$P_m(n+1) = P_0(n)P_{0m} + P_1(n)P_{1m} + \dots + P_m(n)P_{mm}$$

여기서  $P_i(n)$ 은 신호주기  $n$ 에서 過剩待機行列臺數가  $i$ 일 확률  $P_{ij}$ 는 過剩待機行列臺數가  $i$ 로부터  $j$ 로 바뀔 遷移확률, 遷移확률  $P_{ij}$ 는,  $j=0$ 일 경우는  $(i + \text{到着臺數}) \leq \text{出發可能臺數}$  또  $j \neq 0$  일 경우는  $(i + \text{到着臺數}) = (j + \text{出發可能臺數})$  가 성립 될 수 있도록, 到着臺數와 出發可能臺數의 모든 케이스에 대하여 각 到着臺數 확률과 出發可能臺數 확률의 積의 합으로서 구하여진다. 또, 여기서는 出發可能臺數 =  $S \cdot G$ 로 일정하게 하였다.

遷移確率  $P_{ij}$ 의 매트릭스를 구하는 방법과 過剩待機行列臺數의 定常狀態(steady state)에서의 분포를 구하는 방법은 다음과 같다. 시스템으로의 到着 패턴 入力 매트릭스  $A$ , 출발 패턴 出力 매트릭스  $D$ 를 각각 다음과 같이 나타낸다.

$$A = \begin{matrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \cdots \\ 0 & a_0 & a_1 & a_2 \cdots \\ 0 & 0 & a_0 & a_1 \cdots \\ 0 & 0 & 0 & a_0 \cdots \end{matrix}$$

여기서,  $a_i$ 는  $i$ 台的 車輛이 1신호주기중에 到着하는 확률로, 실측된  $I$  값에 의해 二項分布를 갖는다.

$$D = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \cdots \\ 1-d_0 & d_0 & 0 & 0 \cdots \\ 1-d_0-d_1 & d_1 & d_0 & 0 \cdots \end{matrix}$$

여기서,  $d_i$ 는  $i$ 台的 車輛이 1신호주기중에 出發할 수 있는 확률로

$$d_i = \begin{matrix} 1 & i = S \cdot G \text{인 경우} \\ 0 & \text{그외의 경우} \end{matrix}$$

두 入出力매트릭스로 부터, 過剩待機行列臺數에 관한 遷移確率 매트릭스  $P$ 는, 다음과 같이 얻어진다.

$$P = A \cdot D$$

$$P_{1,1} \quad P_{1,2} \cdots \quad P_{1,m}$$

$$P_{2,1} \quad P_{2,2} \cdots \quad P_{2,m}$$

$$P =$$

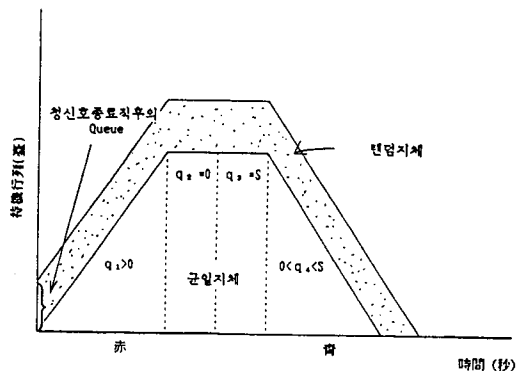
$$P_{m,1} \quad P_{m,2} \cdots \quad P_{m,m}$$

여기서,  $P_{ij}$ 는 1신호주기 동안에 待機行列臺數가 初期상태  $i$ 로부터 最終상태  $j$ 로 변화할 확률  $n$ 번째 신호주기에서의 過剩待機行列臺數 확률을 벡터  $P^{(n)}$ 이라 하면

$$P^{(n+1)} = P^{(n)} \cdot P$$

이 되고, 이것을  $P^{(n+1)} = P^{(n)}$ 으로 풀면 임의의 신호주기에서의 녹색신호時間이 끝난 직후의 過剩待機臺數分布가 얻어진다.

(3) 본 연구에서는 Gauss의 消去法에 의해 解를 구하였다. 매크로 시뮬레이션에서는, 均一分布車輛發生에 의해 마이크로 시뮬레이션에서 구한 각 링-크 정지선에서의 到着패턴에 대응한 確定的待機行列길이의 推移를 連續流近似로 구하고, 여기에 (2)에 의해 구해진 過剩待機行列을 추가함으로써 랜덤遲滯 및 全體遲滯를 구하였다. 그림 2는 그 概念을 나타낸 것이다.



(그림 2) macro 시뮬레이션에 의한 random지체 산출의 개념도 (系統總體의 例)

그림 2에서 밑의 적임선은 均一分布발생에 의한 系統信號體系의 각 交叉路에서의 待機行列의 時間推移이고, 그 밑부분의 면적이 1신호주기中的 총 均一遲滯를 의미한다.

격임선 윗부분 즉, 점으로 표시된 부분은 到着流의 랜덤성에 의해 바로 전 신호주기에서 빠져나가지 못한 過剩待機行列臺數로 인한 總遲滯에의 영향을 나타내고 있다. 여기서는 (2)에서 설명한 分布(二項分布)로부터 얻어진 平均過剩待機行列을 적용하였다.

(4) 매크로 시뮬레이션 모델의 妥當性을 알아보기 위하여 單獨交差路에서 poisson分布(I=1.0)로 도착하는 交通流의 遲滯를, 본 시뮬레이션에 의한 결과와 Webster의 遲滯式에 의한 결과와 비교한 바 그림3과 같이 나타났다. 포화도 0.95미만에서는 양자 잘 일치하나, 포화도 0.95 이상에서는 본 매크로 시뮬레이션에 의한 결과가 過小評價되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 markov 연쇄에서 定常確率의 계산과정에서 생기는 誤差로 포화도가 높아질 수록 그 영향이 크게 나타났다. 또 그림 3에 같이 제시한 것처럼 marco와 micro 시뮬레이션의 결과를 비교하여 보아도 이같은 사실을 잘 알 수 있다.

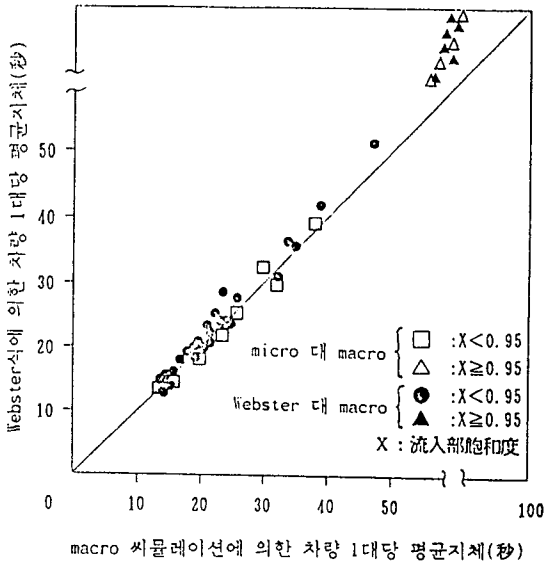


그림 3 ; macro 시뮬레이션의 타당성 (단독교차로)

(5) 랜덤遲滯에 대해서는 기존의 몇몇 이론적 모델이 있고, 그중 알려진 모델로서는 Webster<sup>7)</sup>

의  $X^2/2(1-X)q$ , Miller<sup>9)</sup>의  $(1-\lambda)(2X-1)I/2q(1-\lambda X)(1-X)$ , (여기서  $\lambda=G/C$ ), Newell<sup>10)</sup>의  $I \cdot H \cdot X/2(1-X)q$ , (여기서 H는 용량여유가 0일 경우를 1.0으로하고 이에 대한 減少함수) 등을 들 수 있다.

Webster의 식은 信號와 poisson到着流과의 사이에 均一(uniform)서비스율이 介在하는 것으로 하여, 이로 인한 待機理論에 의한 遲滯에 상당하며, 이러한 계산과정에서 생기는 過大評價 요인을 별도의 修正項을 들으로써 해결하고 있다<sup>4)</sup>. Miller는 교통류를 離散敵으로 취급하였고, Newell은 連續流로 취급하였으나 두 식 모두 過剩待機臺數의 평균을 다루는 과정에서 I를 사용하고 있다.

이 두식은 결국 X(포화도) → 1일 경우 같게 되는 성질을 갖고 있다.

한편, Newell은 X(포화도)가 1에 가까워질 경우의 대표적 近似式으로서 다음과 같은 식을 제시하고 있다<sup>11)</sup>. 이 식은 위에서 언급한 식들의 特性을 集約적으로 반영하고 있다고 할 수 있다.

$$W_s \cong \frac{I \cdot X^2}{2(1-X)} \cdot \frac{1}{q} \dots\dots(1)$$

여기서,  $W_s$ 는 車輛1台當 평균 랜덤遲滯

여기서 문제로 삼고 있는 것은 (4)에서의 결과로부터  $X \geq 0.95$ 의 영역에 적합하여야 하며, 본 연구에서는 I를 要因으로서 취급할 필요가 있다는 것. 또 모델식으로서 가능하면 간단한 형태가 바람직하다는 것으로부터 식(1)을 검토하여 사용하기로 하였다.

그림4는 식(1)에 의한 결과와 micro 시뮬레이션에 의해 구한 全體遲滯에서 均一遲滯를 뺀 값. 즉 랜덤遲滯를 다양한 I, q, X의 케이스에 대하여 비교한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 식(1)은 포화도 0.95미만에서는 過大評價되나, 포화도가 1.0에 가까워질수록 micro 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다.

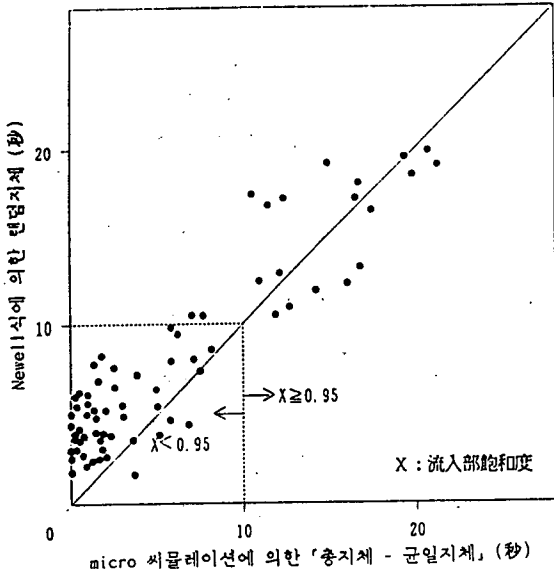


그림 4, Newell에 의한 랜덤지체식의 검증

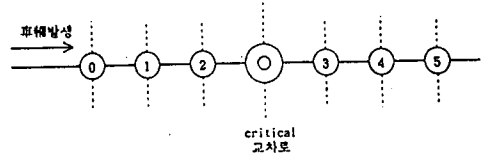
(6) (4)와 (5)에서 검토한 바와 같이, 본 연구에서는 포화도 0.95 미만에서는 Markov 연쇄를, 포화도 0.95 이상에서는 Newell의 식(1)을 사용하여 랜덤遲滯를 구하는 것으로 했다.

### Ⅲ. 系統信號路線上에서의 交通流遲滯特性

#### 1. 랜덤遲滯

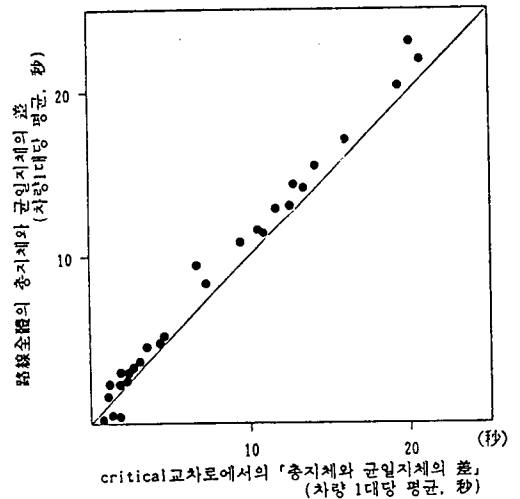
Newell<sup>11)</sup>은 信號로 제어되는 路線上에서의 랜덤遲滯는 오로지 주요(critical) 交叉路에서의 랜덤遲滯에 의한 것으로, 그 上流 및 下流信號群(녹색신호時間길이)가 critical 交叉路보다 긴 交叉路에서는 거의 발생되지 않음을 주장하였다.

이 주장을 확인할 목적으로, 그림5와 같은 對象路線上을 想定하여, 각 링-크길이를 300m, 信號週期C를 100초, 路線上의 現示率을 critical 交叉路에서는 50%, 그의 交叉路에서는 60%로 하여, q값의 다양한 케이스에 대하여 最小車頭時間을 2초로 한 偏移指數分布 및 均一分布車輛發生에 의거 각기 micro 시뮬레이션을 행하였다.



(그림 5) 시뮬레이션되오 系統信號路線上

그림6은 그 결과로부터 「critical 交叉路의 全體遲滯와 均一遲滯의 差」(車輛1台當平均) 과 「路線上全體遲滯와 均一遲滯의 差」(車輛 1台當平均)를 비교한 것이다. 路線上에서의 랜덤遲滯의 대부분이 critical 交叉路에서 발생된 것임을 알 수 있다.



(그림 6) 「信號路線上에서의 랜덤지체는 critical交叉路의 랜덤지체와 동등하다,」라고 하는 Newell論의 검증

#### 2. 랜덤遲滯의 定式化

위에서 설명하였듯이 路線上에서의 랜덤遲滯는 critical 交叉路에서의 것만을 고려하면 된다. 또 그 값에 대해서는 X가 0.95 이상에서는 Newell 식을 0.95미만에서는 Markov 연쇄를 사용함이 妥當하다는 것을 Ⅱ章에서 설명하였지만, 이러한 작업의 편리를 도모하기 위하여 랜덤遲滯를 구하는 定式化를 시도하였다.

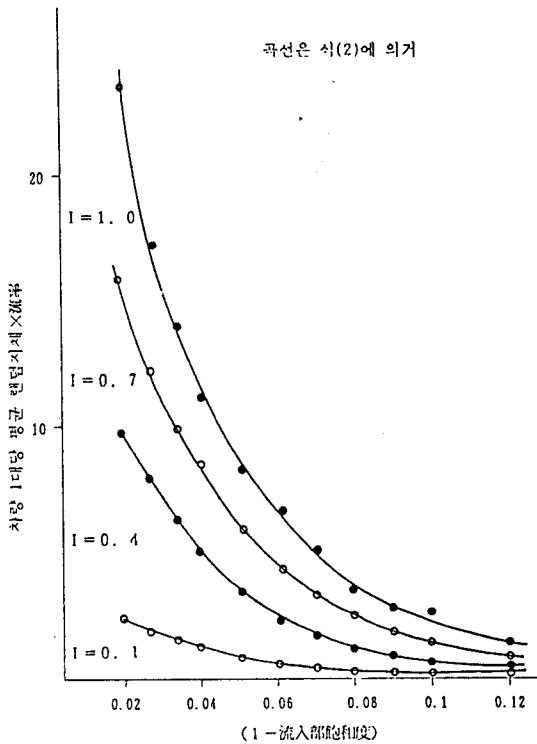
1값 別로 앞에서 설명한 방법에 의해 도출된 車

輛1台當 평균 랜덤遲滯에  $q$ 를 곱한 값과  $X$ 와의 관계는, 그림7에 제시된 바와 같다.

이러한 결과로부터  $I$ 도 說明變量으로 넣어서 回歸을 시킨 결과는 다음의 式과 같다.

$$D_r \cdot q = -4I + (0.738I - 0.057) \cdot (1 - X)^{0.1026I - 1.048} \dots(2)$$

여기서,  $D_r$ 은 車輛1台當 평균 랜덤遲滯



(그림 7) 시간당 평균랜덤지체와 포화도의 관계

이 랜덤遲滯에는, 포화도이외의 요인도 고려할 수 있기 때문에 같은 포화도에 대해서  $C$ 와  $G$ 를 변화시키면서 Markov 연쇄를 반복 계산한 결과, 평균 15% 정도의 변동이 보였으며, 그 規則性은 보이지 않았다. 또, 지면관계상 상세한 설명은 생략하지만, 실제로 30개소에서 조사된  $I$ 값은 그 대부분이 0.5~0.8의 범위에 있었다.

### 3. 均一遲滯

系統信號에서의 信號週期和 均一遲滯와의 관계를 연구한 것으로 고시(越)<sup>3)</sup>에 의한 것이 있다. 고시(越)는 系統制御되어지는 인접한 2개의 信號사이의 링-크에 대하여 다음과 같은 假定下에 생각하고 있다.

- ① 링-크 양끝의 信號週期, 스프릿, 飽和流率은 같다.
- ② 直進交通만이며, 速度는 一定하고 車輛群의 확산은 없다.
- ③ 스프릿은 系統方向에 대하여 녹색신호 50%, 赤신호 50%이며, 완전히 포화 상태이다.

본 연구에서는, 앞의 그림5에서 나타낸 對象路線의 交差路 0로부터 critical 交差路까지의 3 링-크를 대상으로해서, 非飽和系統流에서의 均一遲滯와 信號週期和의 관계를, 均一分布(uniform) 發生에 의한 micro 시뮬레이션으로 분석하였다. 이때 설정한 조건은 다음과 같다.

- ① 系統方向 現示率을 critical 交差路에 대해서는 50%, 그의 交差路에 대해서는 60%로 했다.
- ② 링-크 往復旅行時間( $T$ ) 값 이상의 實際적 범위내에서 다양한 信號週期를 선정하였다.
- ③ 각 링-크 길이에 대해서는 150m, 300m, 450m의 3종류로하여, 3개의 링-크가 전부 동일한 링-크 길이의 케이스와, 각기 다른 링-크 길이의 케이스 組合에 대하여 설정했다.
- ④ 系統方向의 飽和流率을 各交差路 公同인 0.5 台/秒로 하고 交通流率( $q$ )은 0.25, 0.2125, 0.2, 0.175, 0.125, 0.075 台/秒의 6케이스를 설정했다.
- ⑤ 링-크 走行速度는 各 링-크 모두 40km/h로 했다.

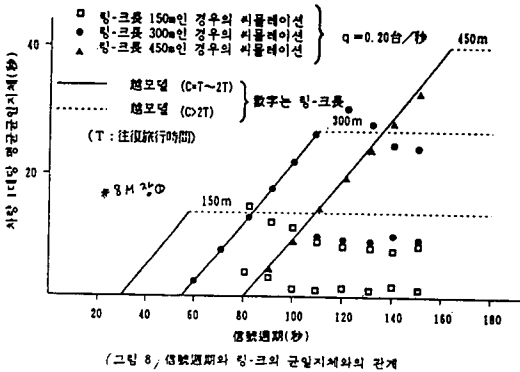
분석결과를 종합하면 다음과 같다.

3개의 링-크 길이가 똑같은 케이스에서는 車輛1台當 平均均一遲滯가 고시(越)모델과 상당히 일치하였다. 또 critical 交差路에서의 스프릿은

上流交差路의 스프릿보다 작기 때문에 通過帶의 좁혀지는 量은 그만큼 커지게 됨으로, 이러한 현상에 대해서는 고시(越) 모델을 그 量만큼 修正한 뒤에 비교했다.

3개의 링-크 길이가 다른 경우에 대해서, 그림8에 交通流率이 0.2台/秒의 케이스를 예로 나타내었다.

그림8은 3가지 링-크 거리에서 각각 車輛1台當 平均 遲滯와 信號週期와의 관계를, 고시(越) 모델과 본 시뮬레이션 결과를 함께 나타낸 것이다.



(그림 8, 信號週期와 링-크의 平均지체와의 관계)

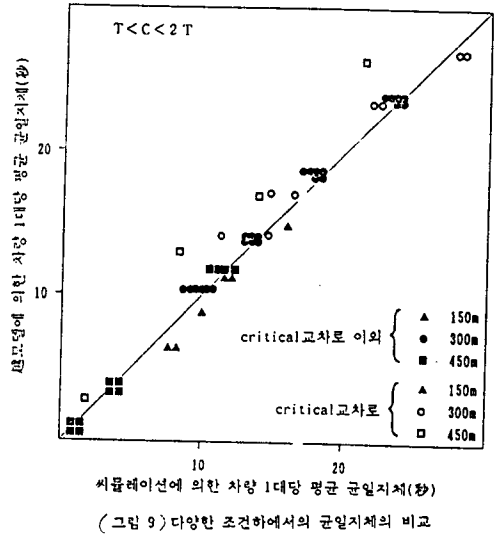
링-크 왕복여행시간을 T라고 했을때 信號週期가 T~2T 사이에 있어서는 시뮬레이션 결과는 고시(越)모델과 잘 일치한다. 그러나 信號週期가 2T 이상인 경우에는, 시뮬레이션의 결과가 작은 값을 갖게되는 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 신호주기 길이가 2T 이상의 영역에서는 同時式 윤셀이 채택되어 車輛群후미가 赤色신호에 걸리는 타잎이나, 非飽和상태에서 上流로부터 도착되는 系統流는 녹색時間 前半部分에 車輛群이 형성되기 쉬운점에 기인한 것이다.

信號週期가 T~2T의 경우에대해서, 全 케이스의 시뮬레이션 결과와 고시(越) 모델의 결과를 集約的으로 비교하면 그림9와 같다.

critical 交差路에서의 값이 양자 약간 차가 있음이 눈에 띄나 대부분의 경우에는 잘 일치하고 있다.

즉, 複數 링-크를 통과하는 系統流는 非飽和狀態에서도 車輛1台當 平均 遲滯가 고시(越) 모델과 잘 일치함으로써 고시(越) 모델의 확대 적용이 가능함을 알 수 있다.



(그림 9) 다양한 조건하에서의 平均지체의 비교

여기서 굳이 T~2T 사이의 信號週期에 집착한 이유는 다음 章에서 설명하겠지만, 이 영역에서의 特性이 最適信號週期和 깊은 관계가 있기 때문이다.

#### IV. 系統信號의 最適信號週期

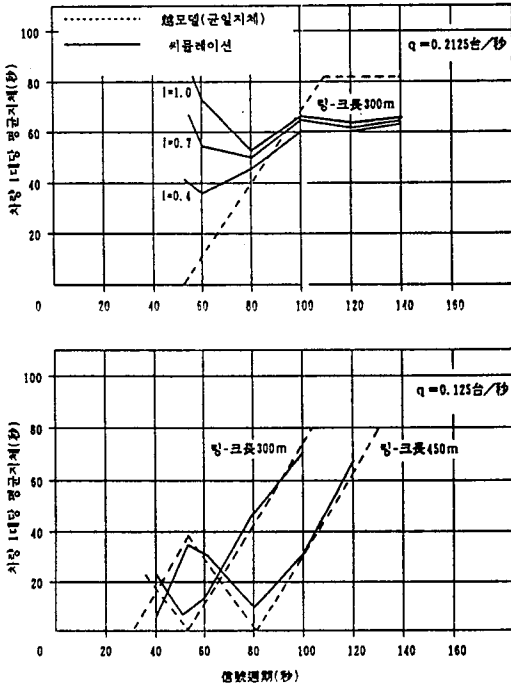
##### 1. 信號週期和 遲滯

III章 3에서 설명한 micro 시뮬레이션과 동일한 設定條件으로 또, 損失時間을 10秒로하여 다양한 I 값에 대하여 macro 시뮬레이션을 실시하였다.

그림10은 그 결과로부터 信號週期和 車輛1台當 平均遲滯(均一遲滯+랜덤遲滯)와의 관계를 나타낸 것이다. 同 그림에서 破線은 고시(越) 모델의 것을 나타내고 있다.

그림10의 윗그림은, 交通流率이 0.2125台/秒의 경우로, 信號週期가 짧아짐에 따른 포화도 증





(그림 10) 路線에서의 信號週期の 차량 1대당 평균지체와의 관계

대로 인하여 랜덤遲滯성분이 卓越하여 특정 信號週期에서 遲滯가 最小가 되는 臨界點이 존재하는 것을 보여주고 있다.

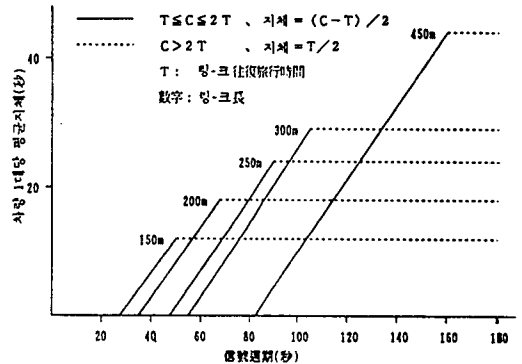
또 그러한 현상이 I 값에 의해서도 변함을 나타내고 있다.

그와 반면에 밀그림은 交通流率이 0.125台/秒의 경우로, 信號週期가 짧아져도 포화도 증대는 저조하여, 랜덤遲滯보다는 均一遲滯가 卓越함으로써 往復旅行時間에 상당하는 信號週期가 臨界點(以下, 이것을 고시(越) 모델의 臨界點이라함)이 되고 있다.

2. 系統信號路綫의 最適信號週期 探索

지금까지 언급하였듯이 系統信號路綫에서의 총 遲滯에 있어서, 均一遲滯에 대해서는 고시(越) 모델의 확대적용이 가능하고, 랜덤遲滯에 대해서는 critical交差路의 것만을 취급하면 된다는 것을 확인하였다.

遲滯를 最小로 하는 信號週期를 구함에 있어 그림11과 같은 고시(越)모델패턴( $T \leq C \leq 2T$ )일 경우 지체 =  $(C-T)/2$ 을 참고로 하여, 均一遲滯에 대해서는 고시(越) 모델의 臨界點 이상을 고려하면 된다.



(그림 11) 信號週期和 차량 1대당 평균지체에 관한 越모델의 패턴

信號週期가 臨界點이하인 경우에는 랜덤遲滯를 고려할 필요도 없이, 총遲滯에 대하여 信號週期の '마이너스' 관계가 탁월하기 때문에 또 이경우, 각 링-크에서의 均一遲滯合計를 고려하여야 하지만, 遲滯를 最小로하는 信號週期를 구한다는 目的으로 볼 때, 信號週期에 대해서 凸함수의 微係數를 문제로 삼고 있기 때문에, 遲滯의 絶대량이 아니라, 信號週期和 遲滯의 관계곡선 구배를 나누는 것으로 족하다. 또 이러한 관점에서, 고시(越) 모델에서는 왕복여행시간 2배이상의 信號週期에서는 遲滯가 변하지 않는다는 점에서 2배이상 부분을 취급할 필요는 없다 하겠다.

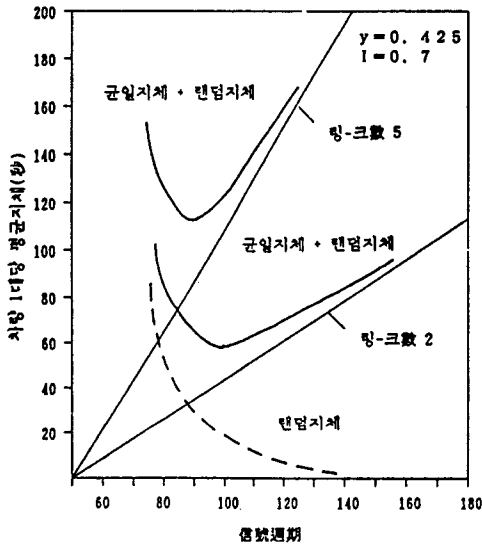
따라서, 이렇게 하여 얻어진 均一遲滯값에, C, G, q, S로부터 결정되는 飽和度에 기인한 式(2)에 의한 랜덤遲滯값을 더한 값이 最小가 되는 信號週期를 찾는 것이 된다.

따라서, 이러한 방법을 네트워크에 확대적용하면 된다.

그림12는 I=0.7 交通流量比 y=0.425, 系統方向現示率을 critical交差路 50%, 그외 交差路 60%로 하고, 走行速度는 40km/h, critical 交差路

에서의 損失時間을 10秒로하여, 2T에 의한 제약  
을 받지 않는 링-크數 n이 2인 경우와 5인 경  
우를 가정하여, 信號週期和 遲滯의 관계를 나타낸  
예이다.

링-크數가 많을 수록 均一遲滯의 영향도가 크  
게 되기 때문에 最適信號週期는 짧게되는 경향을  
 보이고 있다.



3. 最適信號週期の 近似式

IV章 2에서 설명한 방법으로 最適信號週期の  
탐색은 가능하다. 그러나 最適信號週期를 해석적  
으로 구하려고 할 경우, 遲滯와 信號週期和의 합  
수관계를 信號週期에 대하여 미분하는 것이되나,  
그 미분은 그리 간단하지 않다. 여기에서는 다양  
한 設定條件에 대해 수치계산에 의해 구하여진  
最適信號週期 값에 입각하여, 한개의 路線에서  
最適信號週期를 近似的으로 나타내는 式을 歸納的  
으로 유도하는 방법을 개발하였다.

앞서 말하였듯이, 路線의 最適信號週期는, 信號  
週期에 대해서 增加함수관계가 있는 均一遲滯를  
支配하는 路線 링-크數와, 거꾸로 減少함수관계  
에 있는 랜덤遲滯를 지배하는 I값 및 飽和도가 관

여하고 있다. 이들 중에서 링-크數가 3이상의  
경우와 I값에 대해서는, 그림13, 그림14에서 볼  
수 있듯이 最適信號週期에의 기여가 거의 없기  
때문에,

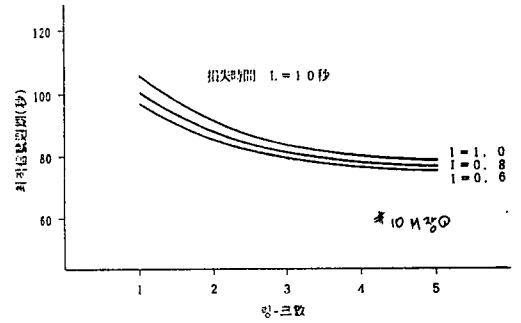


그림 13 路線 링-크數와 최적信號週期

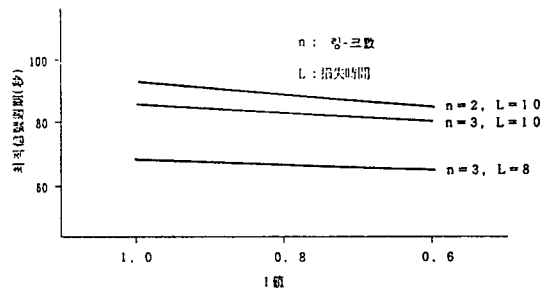
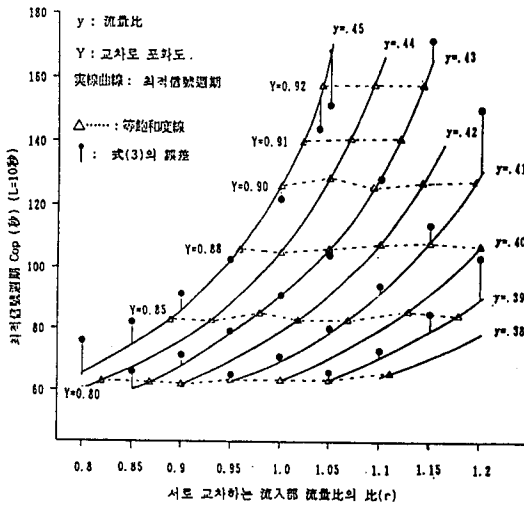


그림 14, I값과 최적信號週期

飽和度要因만으로서의 critical 交差路 對  
象流入部流量比  $y=y_1$ , 마찬가지로 해당 녹색신  
호時間에 관여하는 交差道路側 交通流量比  $y_2$ 와  
 $y_1$ 의 비  $r=y_2/y_1$ , 및 critical 交差路의 損失時間  
L만을 說明變量으로하여 검토했다.

그림15는, L=10초인 경우를 예로하여 r과 最  
適信號週期 Cop의 관계를, y를 파라메타로 実曲  
線으로 나타내고 있다.

여기서 交差路飽和度  $Y=y(1+r)$ 의 관계에 따  
라, 그 각 값에 대응하는 점을 구하면 同 그림에  
서 △로 표시한 것과 같은 결과로 同一 교차로포  
화도에서는 같은 결과를 나타내고 있음을 알 수  
있다.



y, r, L과 Cop의 관계를 검토한 결과, 一定한 y, r에 있어서 Cop와 L이 線型관계에 있는 것과, 一定한 L, y에 있어서 Cop와 r이 2次的인 관계에 있는 것으로 부터 r=1일 경우의 y와 Cop 관계를 기본으로 하여 다음과 같은 式을 개발했다.

$$C = \frac{1.2L + 1.5}{(1 - 1.98y) + 0.42r(1 - 0.995r)} \dots (3)$$

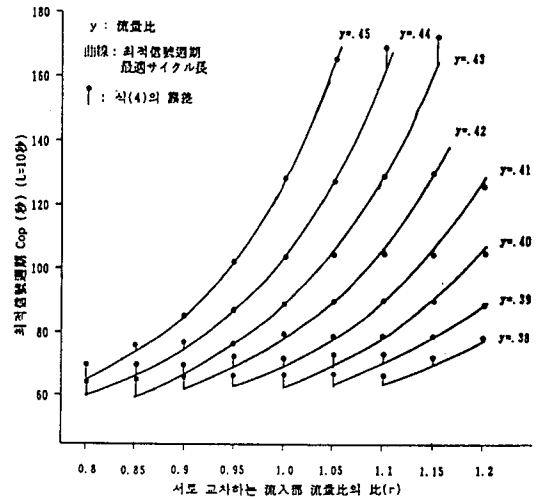
式(3)에 의한 값을 그림 15의 實曲線과 비교하면 同 그림의 ●로 표시된 것과 같아, r값이 1.0보다 멀어짐에 따라 또, 교차로 포화도가 높아짐에 따라 式(3)에 의한 誤差가 커짐을 알 수 있다.

이점을 개선하기 위하여, 一定한 교차로포화도에서는 Cop가 一定한 결과를 보이는 것과, 그림 15에서 y=0.43인 경우 式(3)의 오차가 비교적 적다는 것으로부터 y를 0.43으로 하고 式(3)의 r을 교차로포화도 Y로 변환시켜 다음과 같은 最適信號週期の 近似式을 유도했다.

$$C_{op} = \frac{1.2L + 1.5}{2.92Y - 2.26Y^2 - 0.689} \dots (4)$$

式(4)의 適合度를 알아보기 위하여, 式(4)에 의한 계산값을 그림 15의 實曲線과 비교하면 그

림 16과 같아, 가령 實用信號週期の 범위를 70~150秒로 할 경우 最大 5%의 오차가 나타남을 알았다.



또 本式을 유도함에 있어, 앞서 언급한 교시(越) 모델의 臨界點에 대한 고려가 없었기 때문에 最適信號週期를 決定할 때는 교시(越) 모델의 臨界點을 制約條件으로서 추가하여야 한다. 本式은 路線 링-크數가 3以上인 경우이나, 링-크數가 하나인 경우에는 式(4)의 결과보다 10% 큰 값을, 또 링-크數가 하나인 경우에는 20% 큰 값을 취함이 타당한 결과를 나타내었다.

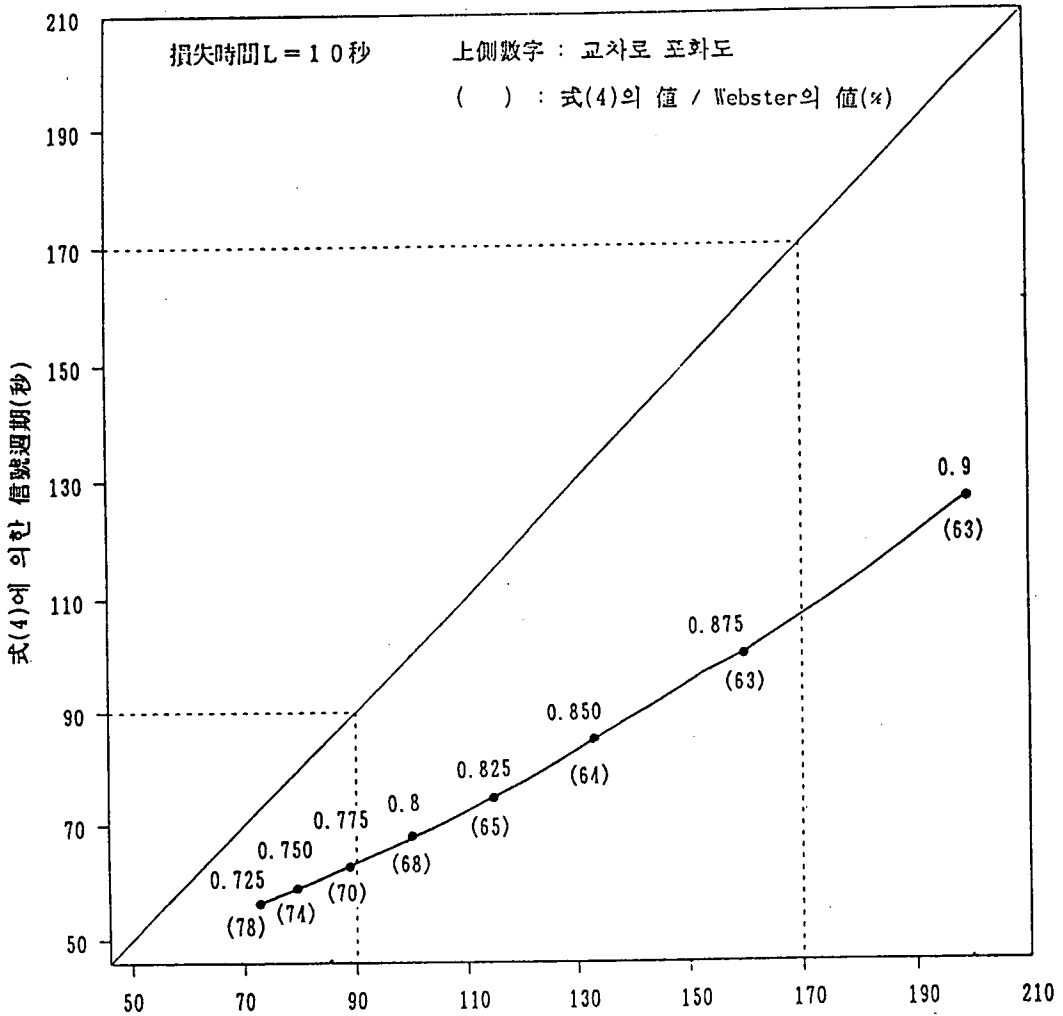
式(4)에 의한 결과를 Webster의 다음식

$$C_{op} = \frac{1.5L + 5}{1 - Y} \dots (5)$$

의 결과와 비교하면, 다양한 교차로포화도에 대하여 그림 17과 같은 결과를 보인다. (L=10秒의 경우)

본 연구에 의한 값이 Webster 값의 약 60~70% 임을 알 수 있다.

또 L을 15秒로 크게하여도 같은 特性을 나타내었다.



(그림 17) 본 연구의 近似式 適用에 의한 信號週期和 Webster式에 의한 信號週期の 비교

#### 4. 本研究結果의 適用에 대하여

지금까지 설명하였듯이 系統路綫의 最適信號週期는 해당 路綫의 均一遲滯와 critical 交叉路流入部飽和度라고 하는 두 요인에 의해 支配된다.

따라서 往復路綫을 생각할 경우는, 두개의 critical 交叉路流入部를 고려하지 않으면 안된다.

또 한개의 critical 交叉路의 信號週期에 의해서

접속된 전체路綫의 遲滯가 正하여지는 것이 된다. 이렇게 함으로서 對象이 네트워크 전체로 확대되는 성질을 갖게되나, 네트워크로 확장된다 손치더라도, 본 연구에서 취급한 한개 路綫에서의 信號週期和 遲滯의 관계를 확대적용하면 된다. 결과적으로, 본 연구에서 취급한 한개의 critical 交叉路를 中心으로한 1方向路綫이 基本 unit가 된다.

이 기본 unit 개념은 시스템 취급의 自由度라는 점에서 볼때 의미가 있다 하겠다.

또 I값은 非飽和일 경우 관측은 간단하다.

실제 운용에 있어, 기본 unit마다 IV章3에서 제시한 近似式에 의거 假信號週期를 구해, 그중 가장 큰 信號週期값을 中心으로 統一信號週期를 검토하면 된다. 이 경우, 信號週期 最適値로부터

의 偏差가 遲滯에 미치는 영향을 유의할 필요가 있는데 이것에 대하여 약간의 試算을 행한 결과를 例示하면 表1과 같다. 랜덤遲滯特性으로 볼때 당연한 결과라고 생각되나, 遲滯의 증가는 信號週期가 커짐에 따라 완만하고, 줄어들에 따라 급격함을 알 수 있다.

( 表 1 ) 最適信號週期 Cop로 부터의 偏差와 遲滯增加率(損失時間 10秒의 경우)

Cop로부터의 偏差 (%)		- 1 5	- 1 0	Cop (秒)	+ 1 0	+ 1 5	+ 2 0	+ 2 5	+ 3 0
r	y								
0.944	0.45	44.5	10.3	100	3.2	5.9	9.5	13.4	17.4
1.060	0.4	40.5	12.3	72	3.1	6.1	10.4	15.3	19.0
1.125	0.4	49.7	12.8	84	3.0	6.0	9.3	14.0	18.2
0.842	0.47	41.2	9.2	100	3.2	6.4	10.0	13.6	18.0
1.214	0.35	43.9	10.7	57	4.2	7.8	12.2	17.5	22.0
平均		44.0	11.1		3.3	6.4	10.3	15.3	19.7

注) y : 유입부 流量比, r : y와 교차하는 유입부 流量比와의 비율

### V. 結論

본 연구에서는 하나의 critical 交差路를 中心으로 한 1方向路線 혹은 네트워크 信號週期를 검토함에 있어서, 기본 unit라는 개념하에 遲滯와 信號週期와의 관계를 시뮬레이션 결과에 입각하여 논하였다.

以下, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 系統信號路線에서 交通流의 確率的遲滯(랜덤

遲滯)에 관해서는 Newell의 주장대로, critical 交差路流入部에서의 確率的 遲滯만을 고려하여도 充分하다.

2) 單位時間當 랜덤遲滯를 流入部飽和도와 I 값의 함수로서 定式化 하였다.

3) 系統信號路線에서 交通流의 確定的遲滯(均一遲滯)에 대해서는, 單一飽和方形波到着 모델에 의한 信號週期和 遲滯의 관계가 링-크 길

이가 서로다른 複數 링-크 路線과 非飽和 조건에서도 확대적용이 가능하다.

- 4) 2), 3)에 입각하여 對象路線의 系統信號週期와 遲滯(確率的遲滯+確定的遲滯)의 관계를 구함으로서, 해당 路線의 遲滯가 最小가 되는 最適信號週期를 찾을 수 있다.
- 5) 다양한 케이스에 대하여 最適信號週期를 試算한 결과, 路線 링-크 구성과 I 값에 대한 感度는 무시할 수 있음을 알았으며, critical 交差路에서의 飽和度 및 信號에의한 損失時間을 파라메타로 한 最適信號週期の 近似式을 유도했다. 또 그것을 기본으로하여 네트워크의 統一信號週期를 검토함에 있어서 필요한 정보로서, 最適信號週기로 부터의 偏差와 遲滯 증가율의 관계를 나타냈다. 결국 近似式에의한 critical 交差路의 信號週期는, Webster값의 60~70%였다.

앞으로의 과제로서는, 路線交差道路와의 사이에서 流出入하는 交通流을 고려한 연구를 계속할 필요가 있다고 본다.

#### 參考文獻

- 1) (社) 交通工學研究會 : 交通信號의 制御技術, 1983.
- 2) Gartner, N.H., Little J.D.C. and Gabbay H. : MITROP : A Computer Program for Simultaneous Optimization of Offsets, Splits, and Cycle Time, *Traff. Engng. Control*, 17, pp. 355-359, 1976.
- 3) 越正 : 系統信號における サイクル 制御の研究, 土木學會論文報告集, No. 241, pp. 125-133, 1975.
- 4) Allsop, R. E. : Delay at a Fixed Time Traffic Signal. I : Theoretical Analysis, *Transp. Sci.*, 6(3), pp. 260-285, 1972.
- 5) Van S. C. As : Overflow Delay in Signalized Networks, *Transpn Res.*, Vol. 25A, pp. 1-5, 1991.
- 6) Sosin, J. A. : Delays at Intersections Controlled by Fixed-Cycle Traffic Signals, *Traff. Engng. Control*, 21(8/9), pp. 407-413, 1980.
- 7) Webster, F. V. : Traffic Signal Settings, Road Research Tech, Paper No. 39. Great Britain Road Research Laboratory, London. 1958.
- 8) Werner Brilon and Ning Wu : Delay at Fixed Time Traffic Signals under Time Dependent Traffic Conditions, *Traff. Engng. Control*, 31(12), pp. 623-631, 1990.
- 9) Miller, A. J. : Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals, *Oper. Res. Q.*, 14, pp. 373-386, 1963.
- 10) Newell, G. F. : Approximation Methods for Queues with Applications to the Fixed Cycle Traffic Light, *SIAM Rev.*, 7(2), pp. 223-240, 1965.
- 11) Newell, G. F. : Stochastic Delays on Signalized Arterial Highways, *Proc. of the 11th int. Sym. on Transpn. and Traffic Theory*, pp. 589-598. 1990.
- 12) Hutchinson, T. P. : Delay at a Fixed Time Signal II : Numerical Comparisons of Some Theoretical Expressions, *Transp. Sci.*, 6, pp. 286-305, 1972.
- 13) 李光勳 : 連動信號制御系에서의 交通流의 遲延, 大韓交通學會誌, 第9卷一號, pp47-56, 1991.