

# 交叉路에서의 交通統制方法 選定基準에 關한 研究\*

(A Study on the Criteria for an Optimal Traffic Control at an Intersection System)

車 東 完\*\*  
柳 春 蕃\*\*  
盧 亨 鳳\*\*  
張 錫 權\*\*

## Abstract

This paper presents a practical guidance for determining an optimal traffic control system at intersections in the urban areas in Korea. Two alternative systems, unsignalized and signalized, are considered. For analyzing the unsignalized system, two kinds of simulation model are developed; gap acceptance model and first-in-first-out model. For the signalized system the total delay function for general arrival distribution is developed under the assumption that departure time is constant and it is used to find an optimal cycle time. Finally, the results in these two alternative systems are compared under the minimum average delay criterion and an optimal traffic control system is determined. This approach supports the decision making whether to install a traffic signal system in an intersection with given traffic flows and, if installed, determines what is the optimal cycle time and how the traffic signal phases are divided. And it also gives upper bounds of traffic flows to be passed in the unsignalized and the signalized system, which can be effectively used whenever an intersection is designed.

## I. 序 論

國內의 道路事情 및 交通量 增加 趨勢를 考慮하면 道路의 效率的 活用이라는 面에서 交叉路에서의 交通統制方法의 適正化가 매우 重要的 것이 된다. 그러나 車輛의 크기, 車種別 構成比 및 그 運行 行態가 歐美諸國과 相異하므로 外國의 資料 및 模型을 國內에서 그대로 使用하기에는 困難한 點이 많다. 그러므로 國內, 特히 서울市內에서 車

輛運行 行態를 實測한 資料를 根據로 하여 國內 實情에 適合한 交叉路에서의 最適 交通統制方法 選定 및 信號燈 設置時 最適信號週期와 Phase Split 을 決定하는 것이 必要하게 된다.

一般적으로 交叉路에서의 交通統制方法으로는 No-control, Priority control, Fixed time signal control, Adaptive signal control, Progressive signal control 및 On-line real time computer control 등이 있으나 本 研究

\* 本 研究는 國土開發研究院의 支援에 依한 것임

\*\* 韓國科學技術院 經營科學科

에서는 現實的인 制約뿐만 아니라 獨立的인 交叉路가 國內에서의 比重이 높으며, 單一 交叉路의 信號體制 自體가 上記 列擧된 他 方法의 基本이 될 수 있으므로 No-control 과 Fixed time signal control 方式에 對해서 比較 研究하여 交通統制方法 選定基準을 提示하였다.

따라서 本 研究은 첫째, 信號燈이 없는 交叉路에서의 平均待期車輛數 및 平均待期時間을 算出하는 Simulation 模型으로서 先着車輛에 優先權이 있는 境遇 (First-In-First-Out model) 와 連續車輛에 優先權이 있는 境遇 (Gap Acceptance model) 두가지를 考察하였다. 先着車輛優先權 模型은 平均待期時間의 面에서 볼때, 交通量이 比較的 적은 경우에는 他 Simulation 方法보다 적은 待期時間을 내므로 信號燈 設置基準의 上限을 제공하나 實際狀況을 잘 表現하고 있는 것은 連續車輛 優先權 模型이라고 할 수 있다.

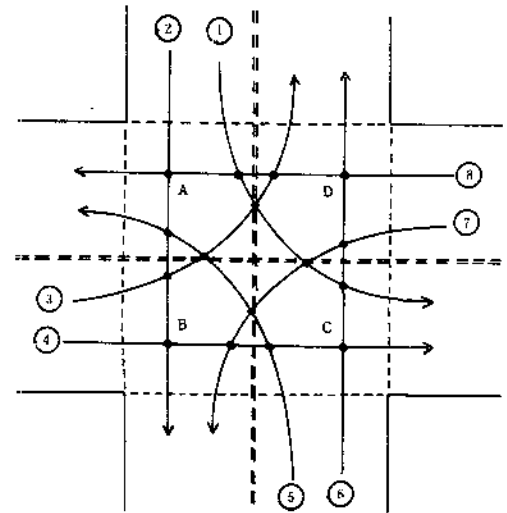
둘째로 信號燈이 있는 境遇에서는 國內實情에 適用 가능한 2, 3, 4 phase 各各의 System 에 對해서 最適信號週期, phase split, 平均待期車輛數 및 平均待期時間을 算出하는 解析的 模型을 設定하였다. 여기서는 一般的으로 널리 쓰이고 있는 到着分布가 poisson 일때를 假定한 Webster의 模型<sup>1)</sup>을 使用하지 않고 直前 交叉路의 影響을 받아서 거의 Uniform 分布로 물려서 오는 경우에도 適用 가능한 Darroch의 模型<sup>2)</sup>을 채택하였다.

끝으로 上記 Simulation 및 解析的 方法에 依해서 算出된 平均待期車輛數 및 平均待期時間을 分析함으로써 交通量增加에 따른 信號燈 設置時期를 決定할 수 있으며 信號燈 設置時 最適信號週期, phase split 및 交叉路 容量算定을 할 수 있는 一般的 模型을 提示하였는데 이는 效率的 交通統制方法 選定 및 運營의 實用的 指針이 될 것이다.

## II. 無信號 交叉路의 分析模型

信號燈이 없는 交叉路의 體系는 일종의 待期行列模型으로서, 每 時點의 交叉路 通過率이, 車輛의 到着率과 현재의 交叉路 通過狀態에 影響

을 받는 매우 複雜한 特性을 갖는다. 따라서 解析的 方法의 適用이 그 特性上 거의 不可能하며, 또한 實際體系를 比較的 正確히 묘사하는 模型이 要求된다는 點을 勘案하여 Simulation을 통한 分析方法을 채택하였는데 이 Simulation 模型의 言及에 앞서 信號燈이 없는 交叉路의 分析에 必要한 몇가지 基本概念을 說明하면 다음과 같다.



〈그림 1〉 車輛運行 行態 및 衝突

〈그림 1〉에서 볼 수 있듯이 車輛들의 進行方向은 크게 8가지로 區分하며 그 각각을 接近流 (Flow stream)라 한다. 그림의 點線은 各 接近流의 停止線 (stop line)을 나타내는데 이는 交叉路 內部를 決定하는 境界線으로서 交叉路 內部로 進入하려는 車輛들은 이 線에서 진입여부 의 意思決定을 하는 것으로 看做한다. 또 이 停止線은 道路의 分離線과 함께 交叉路를 A, B, C, D 네 區劃으로 나누는 役割도 한다. 交叉路 內部에는 16個의 交叉相衝點 (Crossing Conflict)이 存在하며, 8가지 接近流로 進入하려는 車輛들은 交叉路의 現狀態가 交叉相衝을 若起하지 않는 狀態일때에만 交叉路 內部에 들어 갈 수 있다. 이 외에 交叉路 外部에서 發生하는 相衝으로서 合流相衝 (Merging Conflict)과 分流相

註 1) Salter [10] p. 324

註 2) Gazis [4] p. 144-160

衝(Diverging Conflict)이 있으나 이는 그 影響이 크지 않은 것으로 간주하여 本 分析對象에서 제외하였다. 그리고 交叉路 内部에서 連續적으로 지나가는 두 車輛사이의 平均時間間隔을 平均車頭間隔(Mean Headway)이라 하는데 이것의 逆數로서 飽和交通流을 定義할 수 있다.

分析에 使用된 모델로서는 優先權(Priority)에 따라 두가지, 즉 連續車輛優先權 模型(Gap Acceptance model)과 先着車輛優先權 模型(FIFO model)이 있다. 이들은 交叉路 内部로의 進入與否를 決定하는 意思決定基準에서, 그리고 여러 臺의 待期車輛들이 交叉路를 通過하는 行態등에서 다소 假定을 달리하는데 實際體系에서는 이 두가지 形態가 混合되어 나타나고 있다.

연속차량 우선권 模型에서는 進入하려는 車輛과 交叉相衝을 若起시킬 수 있는 4가지 接近流의 停止線에 도착할 車輛들이 許容時間間隔(Gap Acceptance) 以內에 있을때, 진입차량은 그러한 相衝의 可能性이 解消될 때까지 진입을 연기

한다. 그리고 相衝을 若起시킬 수 있는 두 接近流로부터의 車輛들이 同時에 交叉路 内部로 進入하려할 때는 待期車輛數가 많은 接近流의 車輛에 優先權이 주어지며, 일단 待期車輛中 첫번째 車輛이 交叉路 内部로 進入하면 待期行列內의 모든 車輛이 잇달아 交叉路 内部로 進入한다. 이와는 달리 先着車輛優先權 境遇는 交叉相衝을 若起하지 않는 條件下에서, 停止線에 到着한 順序대로 車輛들이 交叉路 内部로 進入하며 結果적으로 待期中이던 車輛들도 到着順序가 다른 一部 車輛만이 먼저 進入하고 나머지 車輛들의 進入은 到着順序에 依해 차례가 올때까지 延期된다. 8가지 各 接近流의 車輛들과 交叉相衝을 若起시키는 接近流는 4가지로서, 예로 左回轉車輛 ①에 對해서는 ⑧ ③ ⑦ ⑥, 直進車輛②에 對해서는 ⑧ ⑤ ③ ④이다. 또 實際 車輛들의 運行行態를 分析하기 위해 代表的으로 左回轉車輛①, 直進車輛②가 交叉路 内部로 進入할 수 없는 경우를 列舉하면 다음 表와 같다.

	좌회전차량①의 경우	직진차량②의 경우
1	⑧의 차량이 A 혹은 D를 점유	⑧의 차량이 A 혹은 D를 점유
2	③의 차량이 B 혹은 D를 점유	⑤의 차량이 A 혹은 C를 점유
3	⑦의 차량이 D를 점유	③의 차량이 B를 점유
4	⑥의 차량이 C를 점유	④의 차량이 B를 점유

<表1> 進入不可能한 境遇의 例

여기서 留意할 것은 연속차량우선권 模型의 境遇에는 위의 各 4가지에 追加하여 서로 停止線에 到着할 車輛들이 許容時間間隔 以內에 있을 境遇도 包含된다는 點이다.

Simulation 模型의 基本假定 및 實測資料<sup>1)</sup>를 보면 아래와 같다.

(1) 8가지 接近流로 들어오는 車輛들의 到着은 Poisson 分布를 따른다.<sup>2)</sup>

(2) 許容時間間隔은 確率變數로서 正規分布 N(2.67, 0.152)를 따른다.(單位; 秒)

(3) 交叉路 内部에서의 平均速度

直進: 26.12 km/hr

左回轉: 25.3 km/hr

(4) 平均車頭間隔(Mean Headway)

(5) 飽和交通流(Saturation Flow) = 3,600(秒) / 1.98(秒) = 1,800(臺/hr): (車線當)

(6) 出發遲延時間(Starting Delay): 2.05秒

Simulation 과정을 System Block Diagram으로 나타내면 다음 <그림2>와 같다.

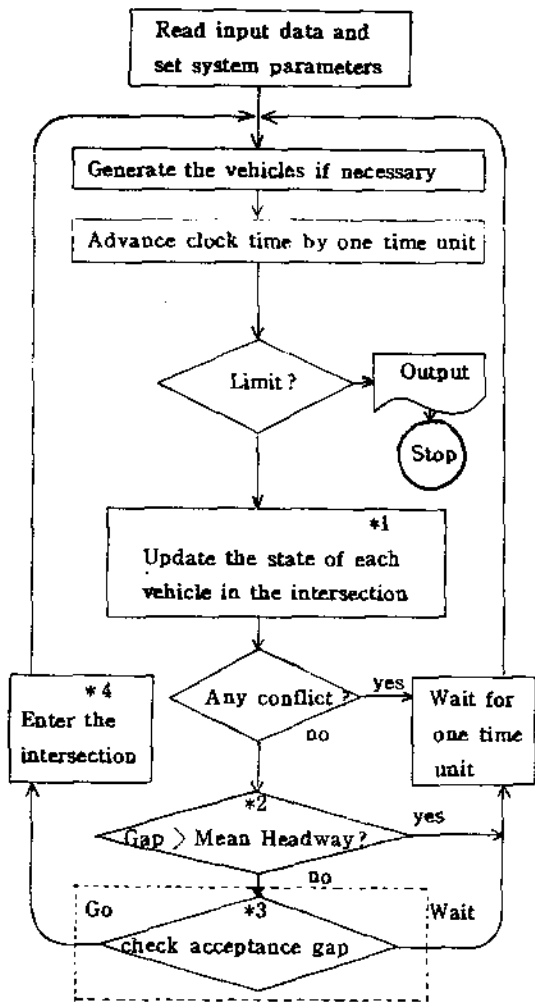
우선 블록\*1을 설명하기 위해 現在 交叉路에서 待期中이던 n臺의 車輛이 교통류②를 따라 交叉路 내부로 進入하였다고 假定하자.

그러면 이 n臺의 車輛이 交叉路를 占有하는 時間은 다음 <그림3>과 같다.

그림에서 點線으로 表示된 時間은 출발지연시간을, 實線部分은 平均速度로 交叉路를 通過하

註1) 실측자료는 국토개발연구원의 조사연에 의한 것임(文東周[14] 참조)

2) Cinlar [1] pp. 70-101



〈그림 2〉 System Block Diagram

는 時間을, 그리고 빗금친 部分은 區劃 A, B를 모두 占有하는 時間으로서  $n \times$  (평균차두간격)이다. 但  $n=1$  일때 狀態 2의 時間은 0으로 看做한다. 따라서 各 車輛의 狀態의 更新은 每時點에서 各 狀態에 對해 남은 時間이 0일때 이루어진다.

블록 \*2에서 Gap은 現在 出發하려는 車輛과 그 앞차와의 時間間隔(Headway)이고 블록 \*3에서 點線으로 둘러싸인 部分은 연속차량우선권 모형에만 해당된다. 그리고 블록 \*4는 연속차량우선권모형과 선착차량우선권모형에 따라 그 진입方式을 달라 하는데 그 구체적 方式은 앞에서 說明한 바와 같다.

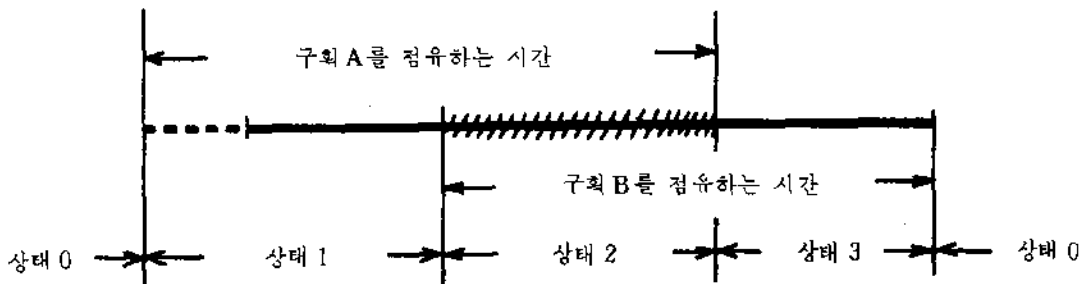
Simulation 結果, 각 8가지 接近流의 몇가지 조합에 대해 얻어진 平均待期時間을 표시하면 〈그림 4〉, 〈그림 5〉, 〈그림 6〉과 같다. 이를 平均待期時間에 影響을 미치는 세가지 要因에 대해 分析하면 다음과 같다.

1. 總 交通量에 따른 變化

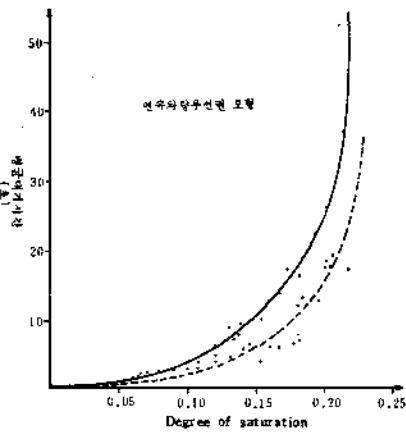
(i) 〈그림 4, 5〉에서 볼 수 있듯이

Degree of saturation ( $ds$ ) = (actual flow / saturation flow)이 증가함에 따라 平均待期時間은 指數的으로 增加하여  $ds = 0.2$  以上이 되면 無限大로 發散한다.

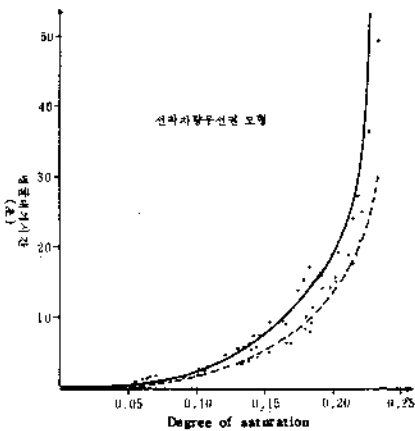
(ii)  $ds = 0.2$  以下에서 先着車輛優先權모형의 曲線은 連續車輛優先權모형의 曲線 아래에 위치하며 대체로  $ds = 0.2$  以上에서는 그 反對現象이 나타난다.



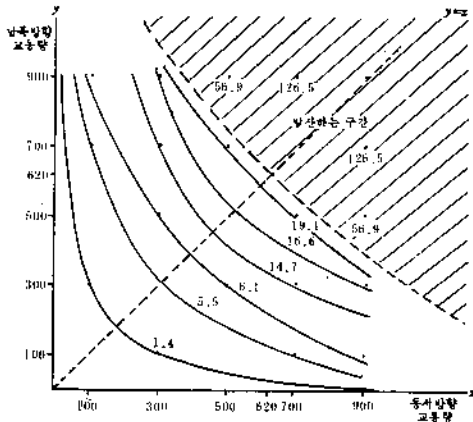
〈그림 3〉 交叉路 占有와 狀態의 變化



〈그림 4〉 交通量の 변화에 따른 待期時間 變化<sup>1)</sup>



〈그림 5〉 交通量の 변화에 따른 待期時間 變化<sup>2)</sup>



〈그림 6〉 等平均待期時間 曲線 (좌회전비율 30%, 10% 경우)

## 2. Major road flow 와 Minor road flow 의 量의 차이에 따른 影響

같은 degree of saturation 의 교통량이라도 major flow 와 minor flow 의 差異가 클수록 平均待期時間은 줄어들며 이는 〈그림 4, 5〉에서 점선으로 그려진 曲線, 그리고 〈그림 6〉에서는 원점에 對해 볼록한 (Convex) 待期時間 曲線이 이를 잘 반영하고 있다. 〈그림 6〉에서 볼록한 이유를 설명하면 만약 平均대기시간이 전체 교통량에만 影響을 받고 major flow 와 minor flow 의 差異에 影響을 받지 않는다면 待期時間 曲線은 x 축과 y 축의 같은 교통량을 연결하는 직선이 될것인데 실제에 있어서는 그 교통량의 조합이  $y = x$  直線에 가까와 질수록 平均待期時間이 길어지기 때문이다.

## 3. 左回轉 比率의 變化에 따른 效果

이는 左回轉車輛數의 直進車輛數에 對한 相對的 比率로서, major flow, minor flow 에 對한 相對比率을 (10%, 10%), (20%, 20%), (30%, 10%) 등으로 變化시켜 분석한 結果, 앞의 두 조합 (10%, 10%)와 (20%, 20%)는 총교통량의 變化를 보이고, 뒤의 두 조합 (20%, 20%)와 (30%, 10%)는 major flow 와 minor flow 의 차이에 따른 效果를 보이고 있다. 따라서 이 좌회전비율의 變化에 따른 效果는 (1) 과 (2)의 效果가 混合된 形態를 띤다.

## III. 最適信號週期の 決定模型

車輛들의 平均待期時間을 最小化하는 信號週期를 決定하기 爲해서는 車輛들의 總待期時間 函數를 우선 求하여야 하는데 이 函數는 車輛의 交叉路 通過行態 및 車輛到着分布에 따라 달라진다.

車輛들의 交叉路 通過行態를 적절히 表現할 수 있는 方法으로서는 連續的인 通過車輛들 間의 車頭間隔에 關한 分布를 들 수 있다. 固定信號週期 문제에 關한 大部分의 研究은 이 間隔이 一定하다고 假定하여 遂行하였다.<sup>3)</sup> 이러한 假定은 左·右回轉 車輛들이 直進車輛들과 함께 섞여 있을

註 1) 점들은 Simulation 結果 얻어진 平均대기시간으로서 실선은 major flow 와 minor flow 의 차이가 작은 점들로부터 얻은 곡선이고 점선은 그 차이가 큰 점들로부터 얻은 곡선임.

註 2) 〈그림 4〉의 註참조.

註 3) Gazis [4] pp. 144-145.

境遇에는 成立하지 않는데, 이의 解決을 爲해서 左回轉 境遇 左回轉車線이 別途로 設置되어 있다고 假定하여 이들의 待期時間을 直進 車輛과는 別途로 算出하였다. 또 右回轉 車輛은 道路에서 가장 右側車線만을 利用하여 交叉路를 通過한다고 하면 車輛들의 車頭間隔이 一定하다고 假定하여도 無妨할 것이다.

다음으로 車輛到着分布에 對해서 살펴보면, 이에 대한 많은 研究가 一般的으로 Poisson分布로 假定하였는데<sup>1)</sup> 이는 交通量이 매우 많거나 또는 아주 적은 境遇에는 적합치 못하다. 본 연구에서는 이를 해결하기 爲해서 Darroch<sup>2)</sup>의 模型을 채택하였는데, 이는 到着 分布의 分散指數 (Index of Dispersion), I로서 一般的인 分布을 나타낸다. 一般的인 車輛到着分布에서 t 時間 동안 到着한 車輛數<sup>3)</sup>를 A(t)라 하면 I는 式(1)과 같다.

$$I = \text{Var}[A(t)] / E[A(t)] \dots\dots\dots(1)$$

車輛到着分布가 Binomial 分布이면  $I < 1$ , Poisson 分布이면  $I = 1$ , Negative - Binomial 또는 Compound Poisson 分布이면  $I > 1$ 이다.<sup>4)</sup> 서울시內에서의 實測資料<sup>5)</sup>를 蒐集, 分析한 結果, I를 時間當 平均 到着車輛數(V)로서 表現할 수 있음을 알았다.<sup>5)</sup> 이는 式(2)와 같다.

$$I = 1.5062 - 0.0063 V \dots\dots\dots(2)$$

通過車輛들의 車頭間隔이 一定하다는 假定과 一般的인 車輛到着分布를 使用하여 車輛들의 平均待期函數를 誘導하기로 한다. 信號週期(T) 동안의 車輛들의 總待期時間(W)는 式(3)와 같다.

$$W = \int_0^T Q(t) dt \dots\dots\dots(3)$$

단,  $t = 0$  時點: 赤色信號 始作時點

$Q(t)$ : t초 경과된 時點에서의 待期車輛數

이를 赤色信號동안(R)의 待期時間  $W_1$ , 綠色信號동안 (T-R)의 待期時間  $W_2$ 로 나누어 적으면

$$W = W_1 + W_2 \\ = \int_0^R [Q(0) + A(t)] dt + \int_R^T Q(t) dt$$

여기에서 交叉路의 待期行列이 平衡狀態에 있다는 假定이 必要한데, 이것은 信號週期 동안 到着한 車輛數가 綠色信號 동안 通過할 수 있는 車輛數보다 적어야 한다는 것이다. 卽

$$\lambda T < (T - R) / S \dots\dots\dots(4)$$

단,  $\lambda$ : 秒當 平均到着車輛數

S: 通過車輛間的 平均車頭間隔

式(4)의 假定下에서 總대기시간함수를 유도하면 다음과 같다.

일반적인 도착분포에 대한 총대기시간함수를 유도하기에 앞서 우선 Poisson 도착분포에 대한 총대기시간함수를 유도하기로 한다.

Poisson process에서

$$E[A(t)] = \lambda t \text{ 이므로}$$

$$E[W_1] = R \cdot E[Q(0)] + \frac{1}{2} \lambda R^2 \dots\dots(5)$$

이다.

$E[W_2]$ 를 구하기 위해서,  $T = \infty$ 라고 가정했을 때의  $W_2$ 로  $W_2^*$ 를 정의한다.  $W_2^*$ 에 대한 기대치를 구하면 다음 식(6)과 같다.

$$E[W_2^*] = \frac{S \cdot E[Q(R)]}{2(1-\lambda S)^2} + \frac{S \cdot E[Q^2(R)]}{2(1-\lambda S)} \dots\dots\dots(6)$$

$W_2$ 는 T시점 이후의 대기행렬 체계를 무시함으로써  $W_2^*$ 로부터 구할 수 있으므로

$$E[W_2] = E[W_2^* | x(0) = Q(R)] - E[W_2^* | x(0) = Q(T)] \\ = \frac{SE[Q(R) - Q(T)]}{2(1-\lambda S)^2} + \frac{SE[Q^2(R) - Q^2(T)]}{2(1-\lambda S)} \dots\dots(7)$$

교차로의 대기행렬이 평형상태에 있다면

$E[Q(0)] = E[Q(T)], E[Q^2(0)] = E[Q^2(T)], Q(R) = Q(0) + A(R)$  이므로 다음 식들을 유도할 수 있다.

$$E[Q(R) - Q(T)] = E[A(R)] = \lambda R \\ E[Q^2(R) - Q^2(T)] = 2E[A(R)] \cdot E[Q(0)] + E[A^2(R)] \\ = 2\lambda RE[Q(0)] + \lambda^2 R^2 + \lambda R$$

註 1) Salter [10] pp. 324 - 335

註 2) Gazis [4] pp. 143-144

註 3) Passenger Car Unit (P.C.U.): 여러 유형의 도착차량수를 승용차수로 환산한 단위임.

註 4) Rohatgi [9]

註 5) 文東周 [14]

이들을 식(7)에 대입하면  

$$E[W_2] = \frac{1}{2} S(1-\lambda S)^{-2} \{ \lambda R + (1-\lambda S) (2\lambda R \cdot E[Q(O)] + \lambda^2 R^2 + \lambda R) \} \dots (8)$$

식(5)와 (8)을 이용하여 총대기시간함수를 구하면 다음 식(9)와 같다.

$$E[W] = \frac{\lambda R}{2(1-\lambda S)} \left[ R + \frac{2}{\lambda} \cdot E[Q(O)] + S \left( 1 + \frac{1}{1-\lambda S} \right) \right] \dots (9)$$

일반적인 도착분포에 대한  $W_2^*$ 의 기대치는(6)식에 대응하는 다음 식이다.

$$E[W_2^*] = \frac{S \cdot (1-\lambda S + \lambda S I) \cdot E[Q(R)]}{2(1-\lambda S)^2} + \frac{S \cdot E[Q^2(R)]}{2(1-\lambda S)}$$

단 I : Index of dispersin of the arrival process A(t)

이를 이용하여 poisson 분포의 총대기시간함수를 구하는 방법과 같은 방법으로 일반적인 도착분포에 대한 총대기시간함수를 구하면 다음식(10)과 같다.

$$E[W] = \frac{\lambda R}{2(1-\lambda S)} \left[ R + \frac{2}{\lambda} E[Q(O)] + S \left( 1 + \frac{1}{1-\lambda S} \right) \right] \dots (10)$$

그런데 식(10)에서 待期時間을 求하기 爲해서는  $E[Q(O)]$ 를 求하여야 한다.  $Q(O)$ 는 赤色信號始作 時點에서 待期行列에 있는 車輛數를 意味하는데, 交通量이 매우 적으면  $E[Q(O)]$ 는 거의 無視해도 相關없으나 그렇지 않을 경우에는 이를 求하는 것이 容易하지 않다. 그래서 대부분의 研究들이 이에 對한 便法으로  $E[Q(O)]$ 의 上·下限 또는 近似式을 求하려고 하였다. 本研究에서는 이들 중 Miller의 近似式을 利用하였다.<sup>1)</sup>

$$E[Q(O)] \sim \frac{1\lambda S}{2(1-R/T-\lambda S)} - \frac{1}{2}$$

이를 식(10)에 代入하고 S를 포함하고 있는 마지막 項을 無視하면 (거의 0에 가깝기 때문) 식(11)과 같은 總待期時間函數를 얻을 수 있다.

$$E[W] \sim \frac{\lambda R}{2(1-\lambda S)} \left( R + \frac{(2\lambda S + R/T - 1)I}{\lambda(1-R/T-\lambda S)} \right) \dots (11)$$

이 총대기시간을 최소화하는 문제를 4 phase에 대해서 정식화하면 다음과 같다.

최소화 f(C)

제약조건

$$f(C) = \sum_{i=1}^8 \frac{q_i(1-\lambda_i)}{(1-\chi_i)} [(1-\lambda_i) \cdot C + \frac{(2\chi_i - \lambda_i) \cdot 1_i}{q_i \cdot (\lambda_i - \chi_i)}] \dots (12)$$

$$LB \leq C \leq UB$$

$$\lambda_i \equiv \lambda_i(C) = \frac{C-L}{C} \cdot \frac{Y_i}{Y} \quad i = 1 \dots 4$$

$$\lambda_i = \lambda_i - 4 \quad i = 5 \dots 8$$

$$\chi_i = \frac{q_i}{\lambda_i \cdot S_i} \quad i = 1 \dots 8$$

$$L = \sum_{i=1}^4 L_i$$

$$Y = \sum_{i=1}^8 Y_i = \sum_{i=1}^8 \max \left\{ \frac{q_i}{S_i}, \frac{q_i + 4}{S_i + 4} \right\}$$

단, C : 신호주기

$L_i$  : i 번째 phase의 비가용시간

L : 신호주기 동안의 총비가용시간

$q_i$  : i 번째 접근류의 교통량

$S_i$  : i 번째 접근류의 포화교통류

$Y_i$  : i 번째 phase의 유효녹색시간 / (C-L)

$\chi_i$  : 포화교통류

$\lambda_i$  : i 번째 phase의 유효녹색시간 / C

LB(UB) : 신호주기의 하한(상한)

總待期時間函數의 값을 最小化하는 方法으로서 Fibonacci search method를 使用하였는데 이는 總待期時間函數가 Strictly Convex 函數이기 때문이다.<sup>1)</sup> 물론 식(12)를 微分하여서 0으로 놓아 방정식의 解를 求할 수도 있으나 이 方法을 쓴 理由는 Fibonacci search의 中間 計算過程의 結果로서 信號週期에 따른 待期時間 函數의 變化形態를 알 수 있을 뿐만 아니라 한개의 變數만 있는 函數의 最適解를 求할 경우에는 그 計算速

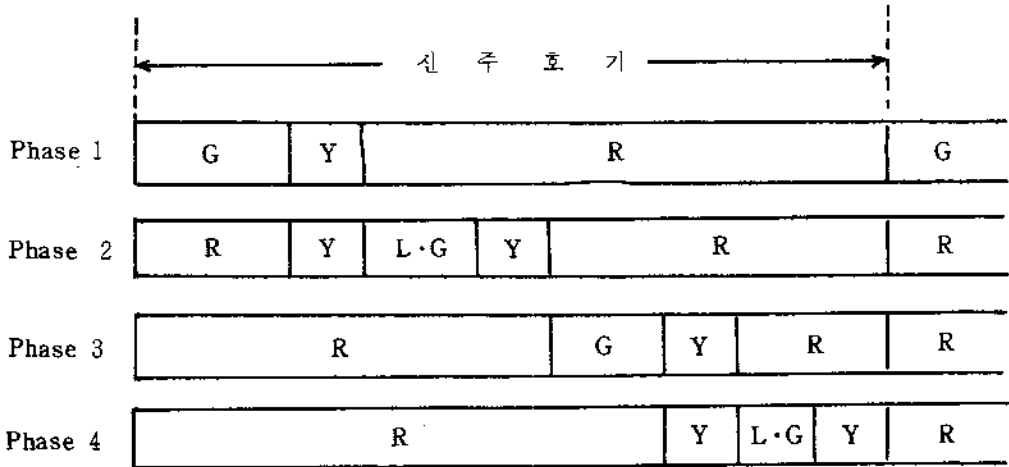
註 1) Gazis [4] pp. 160-161.

도가 빠르기 때문이다.

이에따른 最適化 節次를 簡略히 言及하면 다음과 같다.

Fibonacci sequence에 의해 生成된 信號週期, Phase別 交通量의 飽和程度係數 (Saturation rate: Y), 非可用時間 (Lost time)으로서 Phase別 有效綠色時間 (Effective green time)을 計算하고, 이에따른 總待期時間函數값을 求하여 이를 最小化하는 信號週期를 求하는 방식이다. 이는 Phase別 有效綠色時間이 信號週

期에서 總非可用時間을 빼고 이를 Phase別 Y값으로 分配하여 求해질 수 있기 때문이다. 여기서 非可用時間은 出發遲延時間 (Starting delay)과 最終車輛通過時間 (Car clearance time)의 合으로 計算하였는데 이는 理論的 非可用時間의 實際測定이 困難하기 때문에 채택된 것으로서 Martin<sup>1)</sup>이 提示한 近似計算方式이다. 이와같은 信號週期內에서의 Phase別 時間關係를, 現在 國內에서 運營되고 있는 4 Phase의 Time Diagram을 통해서 보면 다음 <그림-7>과 같다.



보기 : G : 녹색 신호 (Green)    L·G : 좌회전 신호 (Lead Green)  
 Y : 황색 신호 (Yellow)    R : 적색 신호 (Red)

<그림 7> Time Diagram

위와같이 Phase Split이 決定되면 各 接近路의 各 車線別 平均待期時間, 平均待期車輛數, 最大待期車輛數等을 求할 수 있다.

平均待期車輛數<sup>2)</sup> = 平均待期時間 × 平均到着車輛數

$$\begin{aligned} \text{最大待期車輛數}^{2)} &= E[Q(R)] \\ &= E[Q(O)] + \int_0^R A(t) dt \end{aligned}$$

信號燈 設置를 考慮할 境遇 最大待期車輛數를 勘案해야하는 理由는 待期車輛數가 最大일때 隣

接交叉路에 影響을 미치는가의 여부에 따라 信號燈 設置 및 運營方式이 決定되기 때문이다.

그런데 本 研究에서는 2, 3, 4 Phase別로 各 接近路의 交通量을 200 PCU씩 變化시킨 各 組合에 대해서 最適信號週期를 求하였는데, 本 模型에 使用된 資料는 最近 國土開發研究院에서 實測한 資料이다. 따라서 本 研究의 結果는 國內 大都市 특히 서울의 實情을 그대로 반영한 것이라고 할 수 있다. 參考로 實測된 主要資料를 簡略

註 1) Martin [8] p. 450

註 2) 車線別



히 紹介하면 다음 <表 2>와 같다.

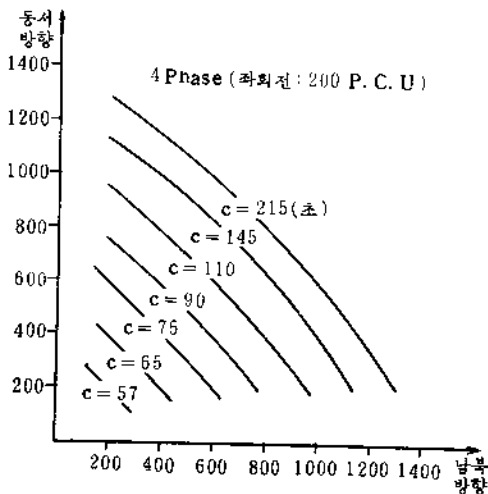
자 료 명	수 치 1)
평균 차선 폭	3.3m
평균 차량 길이	4.0m
차량 직진 속도	8.89m/sec
차량 좌회전 속도	8.47m/sec
출발 지연 시간	3 sec
황색 신호 기간	3 sec
포화 교통류	2415 P.C.U.

<表 2> 基礎實測入力資料

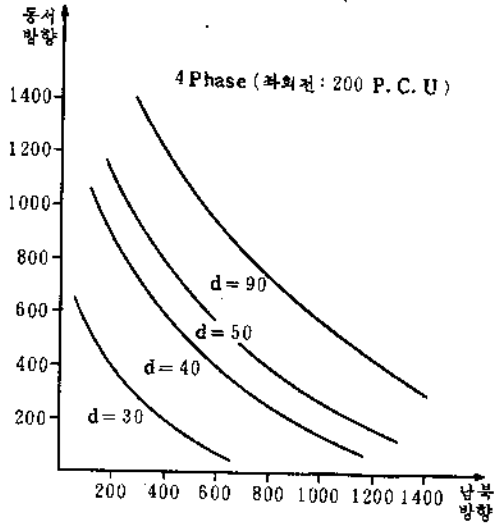
分析結果 2, 3 Phase에 對한 結果는 4 Phase의 境遇와 類似하므로 여기서는 4 Phase에 對해서만 要約 說明하겠다.

우선 交通量變化에 따른 最適信號週期 變化關係를 보면 <그림 8>과 같은데 이 예는 各 接近路에서 左回轉車輛은 모두 200 PCU이고 同일 Phase에서의 直進車輛數는 같다고 假定하였을때 兩 接近方向의 直進車輛數만을 變化시킨 境遇이다.

<그림 8>에서 볼 수 있는 바와 같이 같은 신호주기를 갖는 교통량조합을 연결한 等信號週期曲線(Iso-Cycle-Time Curve)은 凹曲線인



<그림 8> 交通量變化에 따른 最適信號週期 變化



<그림 9> 交通量變化에 따른 平均待期時間變化

을 알 수 있다. 이는 兩 進行方向의 交通量의 合이 같더라도 兩 接近路의 交通量의 差異가 크면 클수록 信號週期는 짧아진다는 것을 意味한다. 그리고 信號週期가 커질 수록 劣曲性質이 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며 어느 程度以上 交通量이 커지면 信號週期가 急激히 上昇하고 있는데 이는 이 交叉路의 交通量이 飽和容量에 거의 接近하고 있음을 暗示하는 것이다. 2, 3 Phase 역시 비슷한 結果를 보여 주지만 總非可用時間이 相對的으로 적으므로 最適信號週期가 4 Phase보다 짧게 나타났다.

다음으로 앞의 例에서의 交通量變化에 따른 平均待期時間變化를 살펴 보면 <그림 9>와 같은데 같은 대기시간을 갖는 교통량 조합을 연결한 等待期時間曲線(Iso-Waiting-Time Curve)은 凹曲線形態를 取하고 있다. 即 兩 接近路의 交通量의 合은 같더라도 그 差異가 크면 클수록 交叉路 全體의 平均待期時間은 減少한다는 것을 보여 주는 것이다. 等待期時間曲線 역시 交通量의 增加가 어느 程度以上이 되면 待期時間이 急速히 增加하며 이 점이 交叉路의 飽和容量을 가리키는 것이다.

이로서 交通量變化에 따른 待期時間 變化로서 信號燈 設置基準을 設定할 수 있을 뿐만 아니라 交叉路의 最大容量을 把握할 수 있어서 이 限界

註 1) 文東周 [14]

를 넘어서는 境遇에 對한 對策을 세울 수 있도록 하는 基準이 된다. 例컨데 이 境遇에는 特殊施設 設置(立體交叉路), 信號統制方法 變更(左回轉禁止, 一方通行) 등을 對策으로 할 수 있을 것이다. 이중 信號統制方法의 變更은 本 研究의 技法을 使用하여 最適統制方法을 求함으로써 그 變更方針을 設定할 수 있다.

#### IV. 信號燈 設置基準 選定

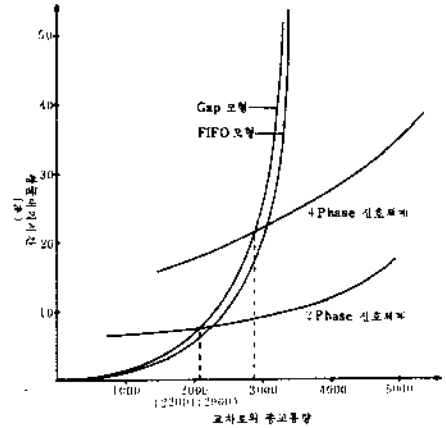
信號燈 設置基準選定을 위한 分析方法으로 첫째, 最小總待期時間 統制方法, 둘째 最小設置費用 統制方法, 셋째 接近路의 地形을 考慮한 統制方法, 넷째 事故危險地點의 수를 줄이는 方法, 다섯째 政策的인 決定 等을 列擧할 수 있는데 本 研究에서는 最小總待期時間 統制方法을 使用하였다. 이는 現實的으로 이 方法이 必須的이라는 意味보다는 信號燈 設置基準이 되는 交通量의 上限線을 提示해 준다는 意味에서 매우 重要하다.

따라서 이 方法은 無信號 交叉路의 境遇, 交通量의 增加에 따른 平均待期時間의 變化를 Simulation을 通해 구하고 信號交叉路의 境遇, 解折的으로 그 變化를 구한 후 그 값을 비교함으로써 信號체계 설치에 관한 意思決定을 하도록 하는 것이다.

이와 같은 意思決定에 대한 基礎資料로서 本 研究에서는 現實的으로 存在可能한 範圍의 交通量에 대해서 약 200대 間隔으로 Simulation 및 最適信號週期決定模型을 통해 平均待期時間을 구하였으므로 실제 適用面에서 充分한 指針이 될 것으로 본다.

실제로 無信號體系에 대한 Simulation 結果와 信號體系에 대한 解折的 方法의 結果를 綜合하여 얻은 實測曲線은 <그림 10>과 같다.

<그림 10>에서 얻은 結論은 2次線 交叉路에 대해, 左回轉 車輛수가 많지 않아 2 Phase 信號體系로 運營하면서 左回轉을 一部 금지하는 方法을 쓰는 경우 交叉路를 通過하는 總交通量이 時間當 約 2200대 이상이 될 때 2 Phase 信號體系를 運營하는 것이 最善이며 左回轉 車輛수가 增加하여 4 Phase 信號體系로 바뀌는 경우 總交通量이 時間當 2900臺 以上일 때에 4 Phase의 信號體系를 設置하는 것이 좋다는 것이다. 여기서 <그림 10>는 左回轉 車輛수가 概略的으로 直進車輛의 20% 정도 以下인 境遇에 대한 曲線



<그림 10> 體系別 平均待期時間 變化

들이기 때문에 左回轉 比率이 20% 以上인 경우는 그 값이 점점 커짐에 따라 <그림 10>의 Gap 들은 모두 左上向 移動하여 위의 두 값은 작아진 모형 및 FIFO 모형 曲線들은 모두 左上向 移動하여 위의 두 값은 작아진다는 점을 유의해야 한다. 즉, 左回轉 比率이 比較的 큰 境遇에는 그 程度에 따라 總交通量이 1800~2000臺일 때 2 Phase 信號體系를 設置하며 總交通量이 2500~2900臺일 때 4 Phase 信號體系를 設置하는 것이 바람직하다. 또 한가지 留意할 것은 總交通量이 比較的 크고 또 左回轉 比率이 큰 境遇에는 2 Phase 信號體系로서는 많은 左回轉車輛을 消化할 수 없어 4 Phase 信號體系가 必須的으로 運營되어야 한다는 점이다.

그러나 이외에도 이 값들이 交叉路에서의 安全을 考慮하지 않고 算出된 값이라는 점을 考慮할 때 실제 適用에서는 下向調整되어 使用되어야 할 것이다.

#### V. 結 論

本 研究에서는 交叉路에서의 最適運行統制方法 設定을 爲한 基礎資料를 提供할 수 있는 模型을 開發하고, 實測資料를 利用 比較分析하여 交通統制方法選定의 基準을 提示하였으므로 國內의 交通網 및 交通施設現況을 考慮해 볼때 다음과 같은 面에서 그 應用價値가 높다고 할 수 있다.

- i) 獨立된 交叉路에서의 最適信號週期 決定 및 Phase split
- ii) 信號燈 設置基準의 上限線 提供
- iii) 交通量 變化에 따른 信號週期の 決定

iv) 交叉路 最大容量 決定 및 交叉路 構造決定의 資料提供

그러나 實際的인 觀點에서 볼때 平均待期時間을 最小로 하는 것을 基準으로 信號燈을 設置하는 것은 信號燈 設置의 上限線 卽 최소한 이때의 交通量에서는 信號燈을 設置하는 것이 待期時間을 줄일 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 따라서 이 基準은 現實的인 면에서 볼때 다음과 같은 事項이 考慮되어서 應用되어야 할 것이다.

### i) 安全性

信號燈이 設置된 경우가 設置되지 않은 경우보다 어느 交通量(本 研究에서는 約 3000 臺/時間) 以下에서는 平均待期時間이 높으나 安全性의 면에서 볼때, 特히 步行者 通行을 考慮한다면 平均待期時間이 다소 길어지더라도 信號燈을 設置하여야 하는 境遇가 있을 것이다.

### ii) 容量擴張

信號燈이 없는 境遇의 車線當 飽和交通流는 約 1800 臺/時間인 반면에 信號燈이 있는 境遇의 飽和交通流는 約 2400 臺/時間으로 實測되고 있으므로 交通量이 많은 境遇 信號燈을 設置 함으로써 交叉路의 容量을 擴張시킬 수 있을 것이다.

### iii) 政策的인 考慮事項

交通量이 그리 많지는 않으나 交叉路의 構造가 事故發生危險이 높은 形態 예컨대 勾配가 심하거나 運轉者의 視界가 나쁠 境遇 또는 最大待期時間限界等を 政策的으로 考慮하여 意思決定을 하여야 하는 境遇가 있을 것이다.

결론적으로 本 研究는 獨立된 交叉路에서의 計量的 意思決定의 基本資料를 提供할 수 있었다는 면에서 그 意義가 크다고 思料된다.

## 參 考 文 獻

1. Cinlar, Erhan, Introduction to Stochastic Processes, Prentice-Hall, Inc., 1975.
2. Drew, D. R., Traffic Flow Theory and Control, McGraw-Hill Book Co. 1968.
3. Edie, L. C., Herman, R. and Rothery,

R., "Vehicle Traffic Science," Proceedings of the third international symposium on the theory of traffic flow, New York, June 1965, American Elsevier Publishing Co. Inc.

4. Gazis, D. C., Traffic Science, John Wiley & Sons, Inc., 1974.
5. Greenberg, H., "An Analysis of Traffic Flow," Operations Research 7 (1959) pp. 79-85.
6. Haight, F. A., Mathematical Theories of Traffic Flows, Mathematics in Science and Engineering Vol. 7, Academic Press, New York, 1963.
7. Horton, T. R., Traffic Control Theory and Instrumentation, Plenum Press, New York, 1965.
8. Martin, W. D. and Martin, B. V., Traffic System Analysis for Engineers and Planners, McGraw-Hill Book Co., New York, 1967.
9. Rohatgi, V. K., An Introduction to Probability Theory and Mathematical Statistics, John Wiley & Sons, Inc., 1976.
10. Salter, R. J., Highway Traffic Analysis and Design, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1974.
11. Tanner, J. C., "A Problem of Interference between two Queues," Biometrika 40 (1953) pp. 58-69.
12. Tanner, J. C., "A Theoretical Analysis of Delays at an Uncontrolled Intersection," Biometrika 49 (1962) pp. 163-170.
13. 金秀哲, "都市幹線道路網上의 交通信號體制增進方案에 관한 研究," 서울大學校 環境大學院 碩士學位論文, 1978.
14. 文東周 外 8人, 道路容量便覽作成을 위한 基礎研究, 國土開發研究院, 1982.
15. 朴景洙, "서울市 信號體制的 適正 phase split 과 連鎖化를 위한 適正 offset," Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers 3. (1977).