

□ 論 文 □

에너지節約을 위한 相互連結된 半保護左廻轉  
 交叉路의 信號時間設計

Traffic Signal Timing at Interconnected and Semi-Protected-Left-Turn Intersections for Energy Saving

金 京 煥

(慶尙大學校 都市工學科)

目 次

- |               |                 |
|---------------|-----------------|
| I . 序 論       | IV . 電算프로그램의 開發 |
| II . 關聯研究의 考察 | V . 結 論         |
| III . 模型의 開發  |                 |

ABSTRACT

This study was undertaken to develop a traffic signal timing method for interconnected and semi-protected-left-turn intersections(the intersections which have left-turn signal but not exclusive left-turn lanes) on four-lane streets for energy saving and to computerize the method for the practical use.

For this study, a probability model which could estimate the utilized time of the shared left-turn lane by through traffic during green period was developed based on field studies. The two left-turn treatments, leading and lagging left-turns, were tested for the intersections, and it can be concluded that the leading left-turn was more efficient for the normal urban streets on which through traffic is major traffic. Adopting the leading left-turn macro-models to estimate vehicular average delay and proportions of vehicles stopped at the intersections were developed. Using the two models as well as the idling fuel consumption rate and the excess fuel consumption per stop-go speed change, a traffic signal timing method for the intersections for energy saving was developed and computerized. The method can be used for more than four-lane streets and for other measures of effectiveness such as minimum delay, minimum stop rates, etc.

## I. 序 論

現在 大都市의 副都心이나 中小都市의 다수의 신호교차로가 左廻轉信號는 있으나 左廻轉車線은 없는 특이한 半保護左廻轉 交叉路 및 定週信號로 운영되고 있다. 既存車線에 여유가 있는 경우 차선을 좁혀 左廻轉車線을 設置함으로써 교차로에서의 交通運營改善을 꾀하고 있으나 일반적 4車線道路의 경우 1個 차선을 추가로 수용할 만한 여유가 없으며 市街地에서의 道路擴張에 소요되는 막대한 예산으로 半保護左廻轉 交叉路의 운영은 불가피한 실정이다. 이러한 교차로에서의 信號時間設計는 左廻轉專用車線을 전제로한 信號時間設計의 適用이 制限되므로 새로운 신호시간설계법의 開發이 요구된다.

獨立 半保護左廻轉 交叉路의 信號時間設計法에 대하여는多數의 研究가 있었다. 國內에서도 半保護左廻轉交叉路에서 先行左廻轉信號方式을 前提로 直進車輛의 左廻轉車線(多車線道路에서 左廻轉車輛과 直進車輛이 共同으로 이용하는 中央線쪽 차선) 利用率推定 模型을 利用하여 교차로 接近路의 飽和交通量을 調整하는 信號時間設計法이 提案되었다. 이 設計法에 의해 都哲雄 教授은<sup>1)</sup> 實用的인 遲滯最小과 容量最大의 信號時間設計法을 開發하였다. 參考文獻(2)에서는 차량의 遲滯時間과 整地率 產出을 위한 巨視的數理模型이 開發되어 차량의 에너지消耗을 最少化하는 信號時間設計法을 電算化하였다. Akcelik<sup>3)</sup>은 非保護左廻轉이 許容된 共同車線에서의 左廻轉車輛에 의한 遮斷時間을 損失時間으로 처리한 直接模型法(direct modeling method)에 의한 信號時間設計法을 開發하였다.

그러나, 일부 接近路를 除外하고 幹線道路上的 信號燈은 相互 連結되어 있어 獨立 半保護左廻轉 交叉路의 信號時間設計法의 이용이 制限되며, 독립 半보호좌회전 교차로에서는 先行左廻轉 信號方式이 效率的인 것으로

밝혀졌으나<sup>1)</sup> 相互 連結된 半保護左廻轉 交叉路에서는 先行左廻轉과 後行左廻轉 信號方式에 대한 새로운 檢討가 필요하다. 國內에서 相互 連結된 信號交叉路에서의 신호시간설계에 이용되고 있는 TRANSYT-7F<sup>4)</sup> 電算프로그램은 同時綠色信號가 주어지는 共同車線만을 다루고 있으며 過度한 人力資料 등으로 利用에 어려움이 있다. 國內 中小都市의 實情에 비추어 主幹線道路의 直進交通의 運動에 優先權을 주며 입력자료가 간소한 信號時間設計法의 開發이 要求된다.

本 研究의 目的은 相互 連結된 半保護左廻轉 交叉路에서의 車輛의 遲滯, 停止率, 待機行列을 推定할 수 있는 數理模型을 開發하고 이들을 利用하여 에너지소모를 最少化하는 信號時間設計用 電算프로그램을 開發하는데 있다. 交通에너지를 全적으로 外國에 의존하고 있는 국내 실정으로는 에너지消耗을 最少化하는 信號時間設計가 要望되나, 本 研究에서 開發될 信號時間設計法은 遲滯時間 最少化, 停止率 最少化 등을 위한 信號時間設計에도 이용될 수 있다.

위의 目的을 위하여 相互 連結된 半保護左廻轉 交叉路에서의 先行左廻轉과 後行左廻轉의 두 信號方式에 대한 效率性이 檢討되었다. 이를 위해 後行左廻轉 信號方式에서의 直進車輛의 左廻轉車線 利用率 推定 模型이 實測資料에 기초하여 設定되었다. 交通信號의 運動化는 赤色 및 綠色信號에서의 交通流率의 差를 의미하므로, 적색신호 동안의 車輛到着比의 赤色時間比에 대한 比率 및 左廻轉信號時間에 따른 두 信號方式에서의 車輛의 遲滯 및 停止率을 비교하여 효율적인 信號방식이 決定되고 이 信號方式에 의한 最適信號時間設計法이 研究되었다.

本 研究에서는 半保護左廻轉 交叉路의 運營上的 問題가 심각한 4車線 幹線道路上的 信號交叉路에 기초한 研究가 수행되었으나, 본 연구에서 개발된 信號時間設計法은 4車線 以上の 道路에도 利用될 수 있다.

II. 關聯研究의 考察

1. 信號時間設計法

定週信號의 信號時間設計의 代表的인 技法은 交叉路에서의 車輛의 遲滯를 最少化하는 Webster<sup>5)</sup>法和 交叉路의 모든 接近路 車輛들의 교통서비스를 非飽和狀態를 유지토록 하는 最大車線交通量法(critical lane method)<sup>6)</sup>이다. 본 연구에서와 같이 交叉로에서의 차량의 遲滯와 停止率을 고려하여 에너지消耗를 最少化하는 信號時間設計를 위하여는 Webster法이 選好된다.

Webster法에서의 한 접근로의 車輛 台當 平均遲滯, d(秒/台)는

$$d = \frac{c(1-f)^2}{2(1-fx)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65\left(\frac{c}{q}\right)^{1/3}x^{(2+5f)} \dots\dots\dots(1)$$

여기에서

- f : 有效綠色時間比(g/c)
- x : 飽和度(q/fs)
- g : 有效綠色時間(秒)
- c : 週期(秒)
- q : 交通量(台/秒)
- s : 飽和交通量(台/秒)

(式 1)은 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \dots\dots\dots(2)$$

여기에서 d<sub>1</sub>은 均一한 車輛到着에 對한 遲滯이고 d<sub>2</sub>는 確率의 到着에 대한 지체이며 d<sub>3</sub>는 理論의 曲線을 實測值에 보다 접근시키기 위한 半經驗的 調整要素이다.

Webster의 式은 交叉路의 交通量이 過飽和 狀態일 때는 그 適用이 제한되므로, Robertson<sup>4)</sup>은 Webster의 均一한 차량도착에 대한 지체는 그대로 두고 確率의 到着에 대한 지체와 調整요소는 다음의 하나의 數式으로 代치하였다.

分析時間을 60分으로 假定하면 分析期間 동안의 總遲滯(台一時間), D<sub>ro</sub>는

$$D_{ro} = \left[ \left( \frac{B_n}{B_d} \right)^2 + \frac{x^2}{B_d} \right]^{1/2} - \frac{B_n}{B_d} \dots\dots\dots(3)$$

여기에서

$$B_n = 2(1-x) + xz$$

$$B_d = 4z - z^2$$

$$z = (2x/v) * (60/T)$$

T = 分析期間(分 : 일반적으로 60分)

x = 飽和度

그러므로, Robertson式에 依한 定週信號 交叉路에서의 車輛의 台當 平均遲滯時間, d<sub>ro</sub>(秒/台)는 다음과 같다.

$$d_{ro} = \frac{c(1-f)^2}{2(1-fx)} + D_{ro}/q \dots\dots\dots(4)$$

相互 連結된 定週交通信號의 信號時間設計法에 있어서는, 다수의 技法들<sup>7,8,9,10)</sup>이 均一 車輛到着의 假定下에 最大밴드幅, 遲滯 및 停止, 臨界交叉에서의 最小影響에 기초하여 最適化하였다. Robertson<sup>4)</sup>은 한 신호交叉로에서 다음 신호交叉로까지의 차량대열의 흠어짐을 고려한 車輛隊列分散模型(platoon dispersion model)을 提案하였으며, 이 模型은 TRANSYT-7F<sup>4)</sup> 交通網研究 電算프로그램에 이용되었다.

2. 半保護左迴轉 交叉路의 信號時間設計

都哲雄 教授<sup>1)</sup>는 (式 5)의 한 直進信號 동안 直進交通의 左迴轉車線 利用率, UF(Utilization Factor)을 利用하여 飽和交通量을 調整 함으로써, 半保護左迴轉 交叉路에서의 서비스 水準을 고려한 交通需要 充足 및 遲滯時間 最少化를 위한 實用的 信號時間設計法을 開發하였다.

$$UF = Q_1 \times Q_2 \dots\dots\dots(5)$$

(式 5)에서 Q<sub>1</sub>은 直進信號의 始作時點에서 左迴轉車線에 待機中인 左迴轉車輛이 한 대

도 없을 확률이며,  $Q_2$ 는 그 직진신호 동안 좌회전차량의到着台數가  $n$ 일 때의 平均利用率이다.

參考文獻(2)에서는 正常交通流의 先行左廻轉(leading left-turn) 信號方式의 半保護左廻轉 交叉路에서의 車輛의 平均遲滯模型으로는 (式 4)의  $x$  代身  $x_0$ 를 使用한 (式 6)이 사용되었으며, 停止率模型으로는 (式 7)이 사용되었다.

$$d_{ur} = \frac{c(1-f)^2}{2(1-fx_0)} + Dr/q \dots\dots\dots(6)$$

$$p_{ur} = \min[q(r+q_2)/qc, 1] \dots\dots\dots(7)$$

여기에서

$$x_0 = \frac{qc}{gs_0}$$

$$s_0 = \{s_1g_1 + s_2(g_2 - g_1)\} / g_2$$

$$g_2 = \{g_1(s_1 - s_2) - qr\} / (q - s_2)$$

$$g_1 = g \times uf$$

$s_1$  = 接近路 2個 車線의 飽和交通量(台/秒)

$s_2$  = 接近路 1個 車線의 飽和交通量(台/秒)

$r$  = 有效赤色信號時間(秒)

其他  $c, f, g$ 는 (式 1)에서 定義되었으며,  $uf$ 는 한 直進信號 동안의 直進交通의 左廻轉車線 利用率 推定 模型으로 (式 5)의  $Q_2$ 로 부터 誘導한 (式 8)을 사용하였다.

$$UF = (1 - e^{-u}) / u \dots\dots\dots(8)$$

여기에서  $u$ 는 그 直進信號 동안의 左廻轉車線의 平均到着台數이다.

### III. 模型의 開發

#### 1. 左廻轉車線 利用率

本 研究에서는 半保護左廻轉 交叉路에서 直進車線과 左廻轉車線이 共同으로 이용하는 中央線쪽 車線, 즉 直進車線과 共同으로 이용하는 左廻轉車線(shared left-turn lane)을 左

廻轉車線으로 칭하였으며, 이는 左廻轉車線이 이용할 수 있는 左廻轉專用車線과는 구별된다. 參考文獻(2)에서는 先行左廻轉(leading left-turn) 信號方式에서의 直進車線의 左廻轉車線 利用率이 연구되어 (式 8)의 模型이 提案되었다. 先行左廻轉 信號方式에서는 左廻轉信號 동안 좌회전차량들은 對向車線을 利用하여 좌회전을 하므로, 左廻轉車線에서의 直進車線과의 相對的인 位置에 관계없이(앞의 待機車線이 直進車線이라 하더라도) 大部分의 左廻轉 待機車線이 左廻轉을 完了하게 된다. 이로 因하여 直進信號 동안 직진차량의 좌회전차신 利用時間을 增加시킬 수 있었다.

그러나, 後行左廻轉(lagging left-turn) 信號方式이나 非保護左廻轉 交叉路에서의 直進車線의 左廻轉車線 利用率은 좌회전-직진에서의 利用率과 큰 差가 있을 것으로 예측된다.

스웨덴의 道路容量便覽<sup>11)</sup>에서는 非保護左廻轉 交叉路에서 左廻轉車線으로 因해 共同車線이 遮斷되기 前 통과할 수 있는 直進車線台數를 결정하기 위하여 다음의 確率模型이 사용되었다. “ $n$ ”는 飽和綠色信號 동안 통과할 수 있는 直進車線의 수이며 “ $l$ ”이 共同車線에서의 左廻轉車線의 比率일 때, 그 車線이 左廻轉車線으로 遮斷되기 前에 통과할 수 있는 平均直進車線台數 “ $n_k$ ”는 다음과 같다.

$$n_k = l \sum_{i=1}^{n-1} i l (1-l)^i + n (1-l)^n \dots\dots\dots(9)$$

左廻轉車線 比率을 “ $t$ ”라 하면  $t$ 는  $1-l$ 로 (式 9)에서  $1-l$  代身  $t$ 를 代入하고 고쳐쓰면

$$n_k = l \sum_{i=1}^{n-1} i t^i + n t^n \dots\dots\dots(10)$$

$t < 1$ 일 때,

$$\sum_{i=1}^{n-1} i t^i = \frac{t - n t^n + (n-1) t^{n+1}}{t^2}$$

으로 (式 10)은 다음과 같이 고쳐쓸 수 있다.

$$n_k = \frac{t}{l} (1-t^n), t < 1.0 \dots\dots\dots(11)$$

$$n_k = n, t = 1.0 \dots\dots\dots(12)$$

直進의 飽和交通量을 0.5台/秒, 飽和綠色信號(saturated portion of the green period)를  $g_s$ 라 하면 HCM<sup>12)</sup>에서의  $g_r$  즉 左廻轉車輛이 共同車線을 遮斷하기 前 직진차량이 그 공동차선을 이용하는 時間은 다음과 같다.

$$g_r = 2 \frac{t}{l} (1-t^{0.5g_s}) \dots\dots\dots(13)$$

(式 5와 8)의 先行左廻轉 信號方式에서의 左廻轉車線 利用率 推定 模型의 檢定을 위한 現場調査에서는 좌회전차량에 의한 直進車輛의 左廻轉車線 이용이 遮斷되는 始點이 飽和綠色時間 以後인 點을 고려하여 利用時間(直進信號의 始點부터 左廻轉車輛에 의한 遮斷時點까지)을 측정하였다. 그러나, 後行左廻轉 信號方式에서는 大部分이 隊列에 대기중인 左廻轉車輛에 의하여 그 車線의 直進車輛 利用이 제한되므로, (式 11)의 模型檢定을 위해서는 研究車線에서의 各 週期別, 方向別 交通量 및 實際의 左廻轉車線 이용 直進車輛 台數가 조사되어야 한다.

全國의 信號交叉路가 先行左廻轉 또는 同時信號도 運營되고 있으므로, 本 研究에서는 정주 同時信號로 運行되고 있는 晋州市 驛前交叉路가 研究交叉路로 選定되었다. 同時信號에서의 直進車輛의 左廻轉車線 利用台數는 後行左廻轉에서의 利用台數보다 多少 큰 값을 가질 것으로 예상된다. 研究交叉路에서의 總 291個의 左廻轉車線 交通量資料를 直進交通의 左廻轉交通에 대한 比率를 階級으로 분류하면 <表 1>과 같으며, 全體直進交通量중 左廻轉車線을 利用하는 直進交通量의 比率은 57%로 조사되었다.

<表 1> 共同左廻轉車線 利用 直進車輛台數( $n_k$ )

資料의 數	平均左廻轉 交通量(A) (veh/hr)	平均直進 交通量(B) (veh/hr)	B/A	平均 $n_k$ (veh)
27	224	341	1.52	2.11
66	180	431	2.39	2.56
63	143	485	3.39	3.10
52	125	548	4.38	3.54
40	98	520	5.31	4.80
21	81	508	6.27	4.50
11	65	533	8.20	5.55
11	65	601	9.25	7.40

豫備研究에서 (式 11)에 의한 利用車輛台數가 實測值에 비하여 過大評價되므로 (式 11)을 模型1로 하고 다른 2個의 模型을 檢討하였다.

模型 2는 左廻轉車線에서 赤色信號의 始作時點부터 綠色信號에서 待機車輛이 없어질 때까지 적어도 한대의 左廻轉車輛이 도착한다고 가정하면, 즉 (式 9)에서  $n$ 대 중 적어도 1대는 左廻轉車輛이라고 가정하면 (式 9)는 다음과 같이 고쳐쓸 수 있다.

$$n_k = \sum_{i=1}^{n-1} i(1-l)^i \dots\dots\dots(14)$$

$1-l=t$ 로 하면,

$$n_k = \frac{t}{l} \{1+nt^2(1-\frac{1}{t})-t^n\} \dots\dots\dots(15)$$

(式 15)를 模型 2로 하였다.

模型 3은 實測值에 대한 (式 11)의 回歸分析에 의한 다음 式의 模型을 設定하였다.

$$n_k = \frac{t}{l} (1-0.382 \frac{0.216n}{t}) \dots\dots\dots(16)$$

實測資料와 各 模型에 의한 計算值와의 比較는 <表 2>와 같다.  $n$ 의 값으로는 0.611g를 사용하였으며  $g_s$ 는 (式 22)에 의하여 產

出되었다.

(表 2) 共同左廻轉車線利用 直進車輛( $n_k$ )의 實測值와 計算值의 比較

No	實測值	模型 1	模型 2	模型 3
1	2.11	1.52	1.52	1.44
2	2.56	2.38	2.32	2.29
3	3.10	3.3	3.23	3.04
4	3.54	4.33	4.15	3.82
5	4.80	5.12	4.51	4.41
6	4.50	5.79	4.76	4.92
7	5.55	7.07	5.37	6.18
8	7.40	8.17	6.46	6.97

(表 2)의 各 模型別 計算值와 實測值의 差의 제곱(SSE)과 資料番號 1, 2, 3과 4, 5를 各各 合한 5個의 資料에 對한  $x^2$ 值의 比較는 (表 3)과 같다.

(表 3)  $n_k$ 의 實測值와 計算值의 統計的 比較

統計值	模型 1	模型 2	模型 3
SSE	5.72	1.86	1.51
$X^2(n=5)$	0.854	0.238	0.276

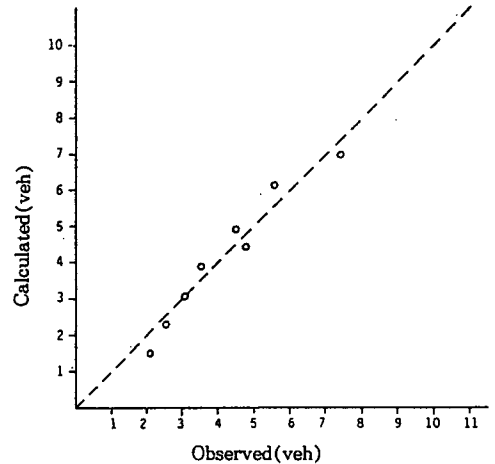
模型 2와 3의 統計值들은 類似한 값을 보이나 模型 2는  $n_k$ 가 큰 값에서 最小評價할 위험이 있다는 것과 (式 9)의  $n$ 台 중 적어도 1台는 左廻轉車輛이라는 理論的 根據가 약한 點을 고려할 때, 模型 3이 優秀한 模型으로 判斷된다. 이에 따라 本 研究에서는 模型 3을 後行左廻轉 信號方式에서의 直進信號 동안 直進車輛의 左廻轉車線 利用台數 推定 模型으로 사용한다.

信號時間設計에서는 利用時間이 사용되므로 交叉路에서의 直進의 飽和交通量을 2,200 台/時間<sup>(3)</sup>으로 산정하면, 直進車輛의 左廻轉 車線 利用時間  $g_s$ 는

$$g_s = 1.64 \frac{t}{l} \left( 1 - 0.382t^{\frac{0.216 \times 0.611g_s}{t}} \right)$$

$$= 1.64 \frac{t}{l} \left( 1 - 0.382t^{\frac{0.132g_s}{t}} \right) \dots\dots\dots(17)$$

(式 17)에 의한 計算值와 實測值의 比較는 (그림 1)과 같다.



(그림 1) 共同左廻轉車線利用 直進車輛의 實測值 對 計算值

2. 信號方式의 比較

獨立 半保護左廻轉 交叉路에서는 先行左廻轉 信號方式이 效率的인 것으로 밝혀졌으나<sup>1)</sup>, 相互連結 半保護左廻轉 交叉路에서 主道路의 直進交通을 고려할 때, 先行左廻轉 및 後行左廻轉 信號方式에 對한 새로운 檢討가 要求된다. 앞에서의 研究에 기초할 때 先行左廻轉 方式에서는 直進 車輛隊列을 일시 停止시킨 다음 增加된 容量으로 서비스를 提共하게 되며, 後行左廻轉 方式에서는 容量은 적으나 直進 車輛隊列의 進行을 일시 停止시키지 않고 서비스를 提共하게 된다.

相互 連結된 信號燈間의 交通流의 흐름은 不均一하며, 綠色信號 동안의 交通流率이 크거나 赤色信號 동안의 交通流率이 작아지도록 인접한 신호등을 상호 연결하여 連動化 시킨다. 半保護左廻轉 交叉路에서는 赤色信號 時間이 보다 分명한 基準이 되므로 本 研究에서는 有效赤色信號時間比에 對한 有效赤色信號 동안의 車輛到着比의 比率을 連動化

의 測度로 사용하였다. 이 比率를 K라 하면,

$$K = \frac{P}{\frac{r}{c}} \dots\dots\dots(18)$$

여기에서

P = 全體 到着車輛에 대한 有效赤色信號 동안 到着車輛의 比率

r = 有效赤色信號時間

c = 週期

K값이 작으면 작을수록 連動化의 상태가 양호함을 의미하며, K=1은 獨立 交叉路를 의미한다.

相互 連結된 半保護左廻轉 交叉路의 한 接近路에서의 車輛이 平均到着率을 q라 하면 有效赤色信號 동안의 到着率 q<sub>1</sub>와 有效赤色信號 동안의 平均到着率은 q<sub>2</sub>은 다음과 같다.

$$q_1 = \frac{qc p}{r} = \frac{Krp}{r} = Kp \dots\dots\dots(19)$$

$$q_2 = \frac{qc(1-p)}{c-r} = \frac{qc(10-K\frac{r}{c})}{c-r} = \frac{q(c-Kr)}{c-r} \dots\dots\dots(20)$$

그 接近路가 2車線일 때, 後行左廻轉(laging left-turn) 및 先行左廻轉(leading left-turn) 信號方式에 따른 直進車輛의 均一한 車輛到着에 대한 遲滯는 各各 (그림 2), (그림 3)과 같은 先行左廻轉방식에서 交通量이 많지 않을 경우는 (그림4)와 같다. 이들 그림에서

g<sub>r</sub> = 直進車輛의 左廻轉車線 利用時間(秒)

g<sub>s</sub> = 綠色信號始點부터 待機車輛隊列이 없어질 때까지 소요되는 時間(秒)

g<sub>1</sub> = 有效左廻轉 信號時間(秒)

s<sub>2</sub> = 接近路 2個 車線의 飽和交通量(台/秒)

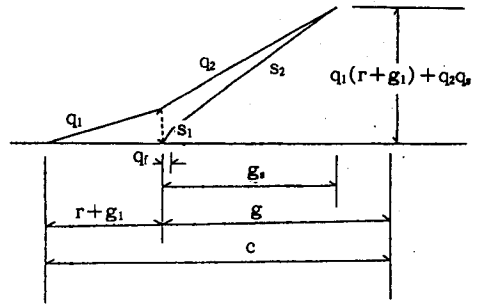
s<sub>1</sub> = 接近路 1個 車線의 飽和交通量(台/秒)

r = 有效綠色信號時間(秒)

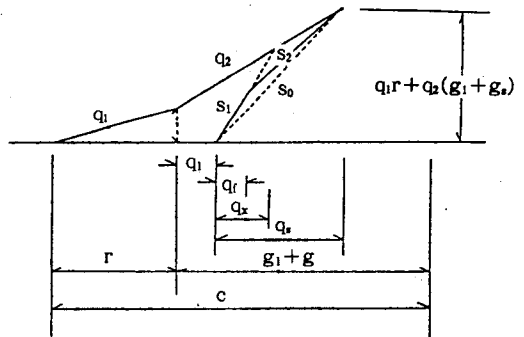
c = 週期(秒)

g = 有效綠色信號時間(秒)

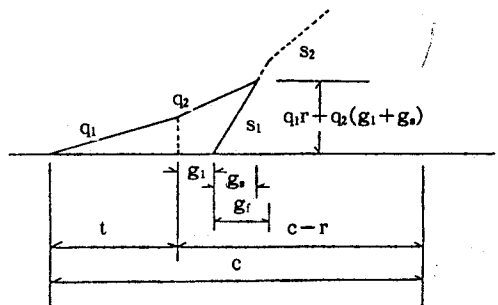
(그림 2, 3, 4)에서의 總遲滯를 各各 D<sub>u</sub>, D<sub>u'</sub>, D<sub>u''</sub>라 하면 다음과 같이 계산된다.



(그림 2) 半保護左廻轉, 2車線 接近路 待機 行列圖(後行左廻轉)



(그림 3) 半保護左廻轉, 2車線 接近路 待機 行列圖(先行左廻轉)



(그림 4) 半保護左廻轉, 2車線 接近路 待機 行列圖(低交通量, 先行左廻轉)

$$D_u = \frac{1}{2} \{ (q_1(rt g_1)(r+g_1+g_r+g_s) - s_1 g_1 g_s + q_2 q_1 q_s) \} \dots\dots\dots(21)$$

여기에서  $g_r$ 는 (式 17)에 의하여 산출되었 으며  $g_s$ 는

$$g_s = \frac{g_r(s_1 - s_2) - q_1(r + g_1)}{q_2 - s_2} \dots\dots\dots(22)$$

$$D_{it} = \frac{1}{2} \{q_1 r(r + g_1 + g_x) + g_s s_1 g_x + (q_1 r + q_2 q_1 + q_2 q_1 - s_1 g_1)(g_s - g_x)\} \dots\dots\dots(23)$$

여기에서  $g_r$ 는 (式 8)의 값에 出發遲延 2.3 秒<sup>13)</sup>를 減하여 산출되었으며  $g_x$ 와  $g_s$ 는 다음 과 같다.

$$g_x = \frac{q_1 r + q_2 g_1}{s_1 - q_2}$$

$$g_s = \frac{g_r(s_1 - s_2) - q_1 r - q_2 g_1}{q_2 - s_2}$$

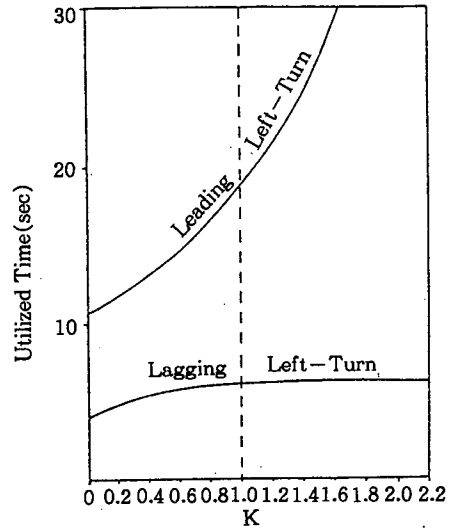
$$D_{it}' = \frac{1}{2} \{q_1 r(r + 2g_1 + g_s) + g_r q_2 (g_1 + g_x)\} \dots\dots\dots(24)$$

여기에서

$$g_s = \frac{q_1 r + q_2 g_1}{s_1 - q_2}$$

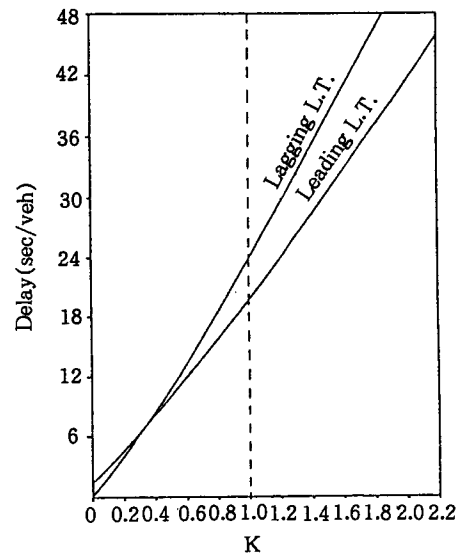
綠色信號 60秒, 赤色信號 51秒, 左廻轉信號 9秒로 週期 120秒의 한 接近路에서 直進交通 量 1,100台/時間, 左廻轉交通 量 158台/時間일 때, 두 信號方式에서의 直進信號 동안 直進車 輛의 左廻轉車線 利用時間  $g_r$ 는 <그림 5>와 같다. <그림 5>에서 先行左廻轉方式에서는 K값이 클수록 급격히 증가하는 반면 後行左廻轉方式에서는 다소의 增加를 보이다 일정 한 값을 갖는다. 先行左廻轉方式에서는 左廻轉信號 동안 左廻轉車 輛이 對向車線을 利用 하여 左廻轉을 완료하므로 절대적으로 큰 값을 가지게 된다.

同一한 條件下에서 두 信號方式에 따른 車 輛의 平均遲滯 및 停止率은 各各 <그림 6, 7>과 같다. 遲滯 및 停止率에 있어서 K값이 各各 0.40, 0.32以下일 때만 後行左廻轉



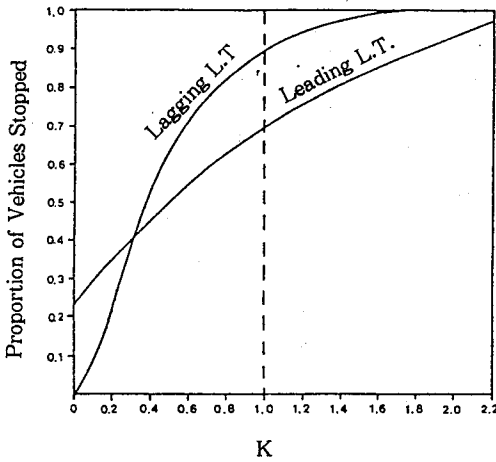
<그림 5> K값에 대한 直進車 輛의 共同左廻轉車線 利用時間

信號方式이 우수하였다. 이는 HCM<sup>12)</sup>의 車 輛隊列比(platoon ration)가 1.59~1.66으로 到着類型(arrival type) 5에 해당하며 都市部의 一般幹線道路에서 車 輛隊列條件이 가장 양호한 到着類型 5를 기대하기는 어렵다.



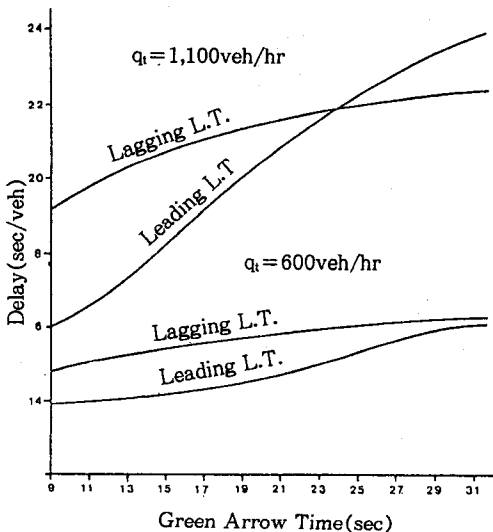
<그림 6> K값에 대한 平均遲滯



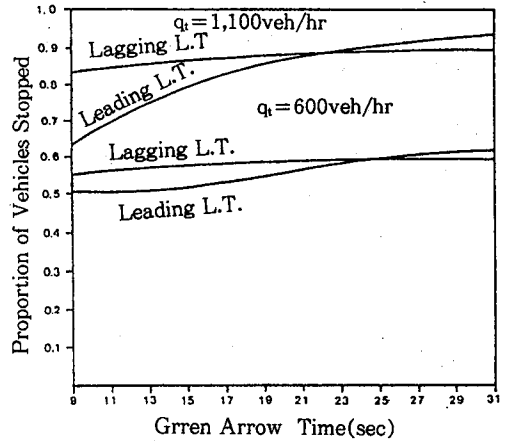


〈그림 7〉 K값에 對한 停止車輛의 比率

週期 120秒, 綠色信號 60秒에서 K값을 0.8 (HCM의 차량대열비 1.2)로 유지하면서 最低 交通量은 容量에 달한 것으로 가정할 때, 最低전신호시간에 따른 두 信號方式에서의 遲滯 및 停止率은 各各 〈그림 8, 9〉와 같다. 車輛當 平均遲滯는 直進交通이 거의 飽和狀態에 달한 1,100台/時間에서만 左廻轉信號時間 24秒 以上에서 後行左廻轉方式이 우수하다



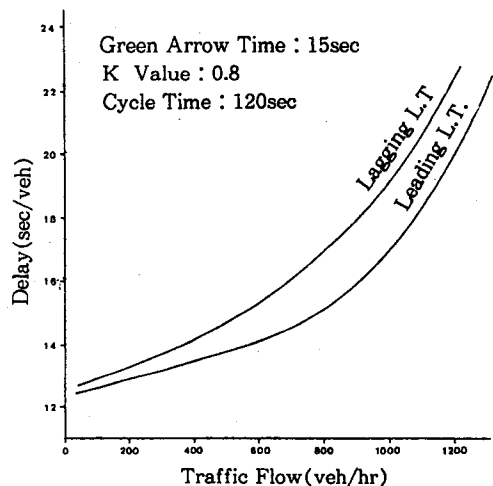
〈그림 8〉 左廻轉時間 對 平均遲滯



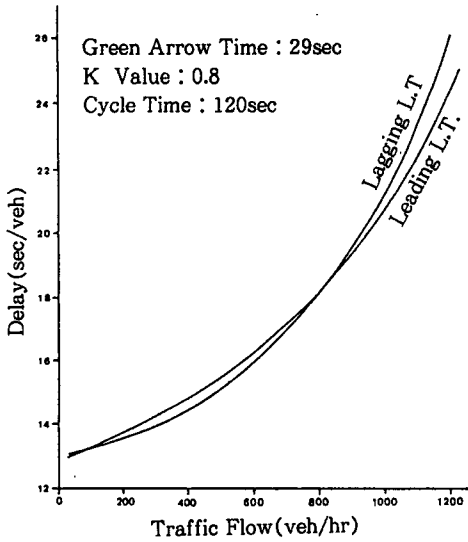
〈그림 9〉 左廻轉時間 對 停止車輛의 比率

였다. 停止率은 交通量 1,100台/時間에서는 22秒 以上에서, 交通量 600台/時間에서는 24秒 以上에서 後行左廻轉方式이 우수하였다.

〈그림 8〉에서의 左廻轉信號 15秒와 29秒에서의 交通量에 따른 遲滯時間을 圖示하면 〈그림 10, 11〉과 같다. 最低전신호 15秒에서는 전반적으로 先行左廻轉方式이 우수하며, 最低전신호 29초에는 交通量 800台/時間 이상에서 後行左廻轉方式이 多少 우수하다. 停止率의 結果도 유사할 것으로 예측된다.



〈그림 10〉 交通量 對 平均遲滯(左廻轉時間 = 15秒)



〈그림 11〉 交通量 對 平均遲滯(左廻轉時間 = 29秒)

以上の 結果로부터 4車線道路에서 左廻轉 需要가 크지 않으며(時間當 약 400台 以下) 대체로 양호한 車輛隊列條件(HCM의 到着類型 4)까지는 先行左廻轉方式이 보다 效率的인 것으로 판단된다.

3. 車輛의 遲滯 및 停止率

本節에서는 第2節의 研究結果에 기초하여 4車線道路上的의 相互 連結된 半保護左廻轉 交叉路에서 先行左廻轉 信號方式에 의한 車輛의 遲滯 및 停止率 推定을 위한 模型을 設定코져 한다. 〈그림 3〉과 같은 均一한 車輛 到着에 의한 遲滯에서 飽和流率  $s_1$ 과  $s_2$  代身 平均飽和流率  $s_0$ 를 사용함에 따른 誤差는 微尠하므로,<sup>2)</sup> 4車線道路上的의 相互 連結된 半保護左廻轉 交叉路에서의 先行左廻轉方式에 의한 均一한 車輛到着에 대한 總遲滯  $D_1$ 은(〈그림 3〉 참조),

$$D_1 = \frac{1}{2} \{q_1 r(r + g_1 + g_2) + g_1 g_2 s_0\} \dots\dots\dots (25)$$

(式 19)를 대입하고 정리하면,

$$D_1 = \frac{1}{2} \{Kr q(c - g) + g_s(Kr q + g_1 s_0)\} \\ = \frac{qc \cdot c(1-f)^2}{2(1-fx_0)} \cdot \frac{(1-fx_0)}{qc \cdot c(1-f)^2} \\ \{Kr q(c - g) + g_s(Kr q + g_1 s_0)\}$$

車輛台當 平均遲滯  $d_1$ 은,

$$d_1 = \frac{c(1-f)^2}{2(1-fx_0)} \cdot \frac{(1-fx_0)}{c(1-f)^2} \\ \{Kr(1-f) + \frac{g_s}{c}(Kr + g_1 \frac{s_0}{q})\} \\ = \frac{c(1-f)^2}{2(1-f)^2} \cdot H \dots\dots\dots (26) \\ H = \frac{(1-fx_0)}{c(1-f)^2} \{Kr(1-f) + \frac{g_s}{c}(Kr + g_1 \frac{s_0}{q})\}$$

여기에서,

$$x_0 = \frac{qc}{s_0 g} \\ s_0 = s_1 \frac{g_r}{g_s} + s_2(1 - \frac{g_r}{g_s}), \quad g_s > g_r \\ s_0 = s_1, \quad g_s \leq g_r \\ g_s = \frac{q_1 r + q_2 g_1}{s_0 - q_2}$$

$f$  = 有効綠色時間比( $g/c$ )

$g_r$ 는 (式 23)에서와 같이 산출되며,  $c, r, g_1, g_2, s_1, s_2$ 는 〈그림 3〉에서 정의되었다.  $K$ 는 車輛隊列條件을 나타내며 (式 18)에 의하여 定義된다.

(式 26)과 (式 1)의 比較에서, 相互 連結된 半保護左廻轉 交叉路에서의 均一한 到着 車輛에 대한 遲滯는 獨立交叉路에서의 遲滯에 係數  $H$ 를 곱하여 계산할 수 있다. 確率的 到着에 대한 遲滯는 (式 3)을 따르는 것으로 가정하면 車輛當 總遲滯  $d_{is}$ 는

$$d_{is} = \frac{c(1-f)^2}{2(1-fx_0)} \cdot H + D_{r0}/q \dots\dots\dots (27)$$

交叉路에서의 停止한 車輛의 比率는 綠色 信號 始作時的 待機車輛들과 待機車輛이 없어질 때까지의 到着한 車輛을 그 週期 동안

의全體到着車輛으로 나눈 값이나 “1”이하 이어야 한다. 그러므로 相互連結된 半保護左廻轉 交叉路에서의 車輛停止率  $P_{is}$ 는,

$$P_{is} = \min[\{q_{1r} + q_2(g_1 + g_s)\} / qc, 1] \dots\dots\dots (28)$$

여기에서  $q$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ 는 (式 19, 20)에  $q_s$ 는 (式 26)에 정의되었으며,  $r$ ,  $g_1$ ,  $c$ 는 <그림 3>과 같다.

實用目的에서 綠色信號 始作時點에서 平均待機車輛  $N$ 은 參考文獻(5)의 (式 26)을 이용하여 推定할 수 있다.

$$N = (q_{1r}/2 + q_2 d_w) \text{ or } q_{1r} \dots\dots\dots (29)$$

위 두개의 값 중 큰 값으로 하며, 여기에서  $d_w$ 는 (式 27)의 車輛台當 總遲滯이다.

IV. 電算프로그램의 開發

本 研究에서는 信號運營分析 패키지, SOAP (Signal Operations Analysis Package)<sup>(4)</sup> 프로그램을 수정하여 相互連結된 半保護左廻轉 交叉路의 信號時間設計 電算프로그램을 開發하였다. SOAP은 獨立交叉路에서의 交通信號運營의 設計 및 評價를 위한 電算프로그램으로 美 聯邦道路局(FHWA)에서 보급하고 있다.

本 研究에서 開發된 電算프로그램의 略式 흐름圖는 <그림 12>와 같다. 信號時間 設計法은 Webster法을 사용하였으나, 車輛의 遲滯時間 算出을 위하여서는 一般的인 경우는 (式 4)를, 半保護左廻轉의 경우는 (式 27)을 사용하였다.

本 研究의 目的이 에너지消耗을 最少化하는 信號時間 設計用 電算프로그램의 開發에 있으므로, 에너지消耗量이 成果測定值로 設定되었다. 全體車輛의 時間當 遲滯(台-時間)가  $D$ , 秒當 停止回數를  $S$ 라 할 때 時間當 燃料消耗量  $FC$ 는,

$$FC = f(D + KS) \dots\dots\dots (30)$$

여기에서  $K$ 는,

$$K = \frac{3,600 \times (\text{1回의 停止} \cdot \text{出發速度變化時的 燃料消耗量})}{\text{遲滯의 台-時間當 燃料消耗量}}$$

參考文獻(2)에서 Winfrey<sup>(5)</sup>와 Claffey<sup>(6)</sup>의 研究로부터 國內 乘用車 空廻轉時的 燃料消耗量 및  $K$ 값으로 各各 0.368gallon/hr와 78.3을 제안하였으며, 디젤엔진을 사용하는 버스 및 大型貨物車의 空廻轉時的 燃料消耗量 및  $K$ 값으로 各各 0.380gallon/hr와 112를 제안하였다.

한 研究交叉路에서의 乘用車와 大型車의 遲滯時間(台-時)를 各各  $D_1$ ,  $D_2$ 라 하고 秒當 停止回數를 各各  $S_1$ ,  $S_2$ 라 하면 稅金을 除外한 揮發油와 디젤유의 價格化는 1.35로 價格比에 의한 揮發油 換算 燃料消耗量  $FC$ 는,

$$FC = 0.368(D_1 + 78S_1) + (0.380/1.35)(D_2 + 112S_2) \dots\dots\dots (31)$$

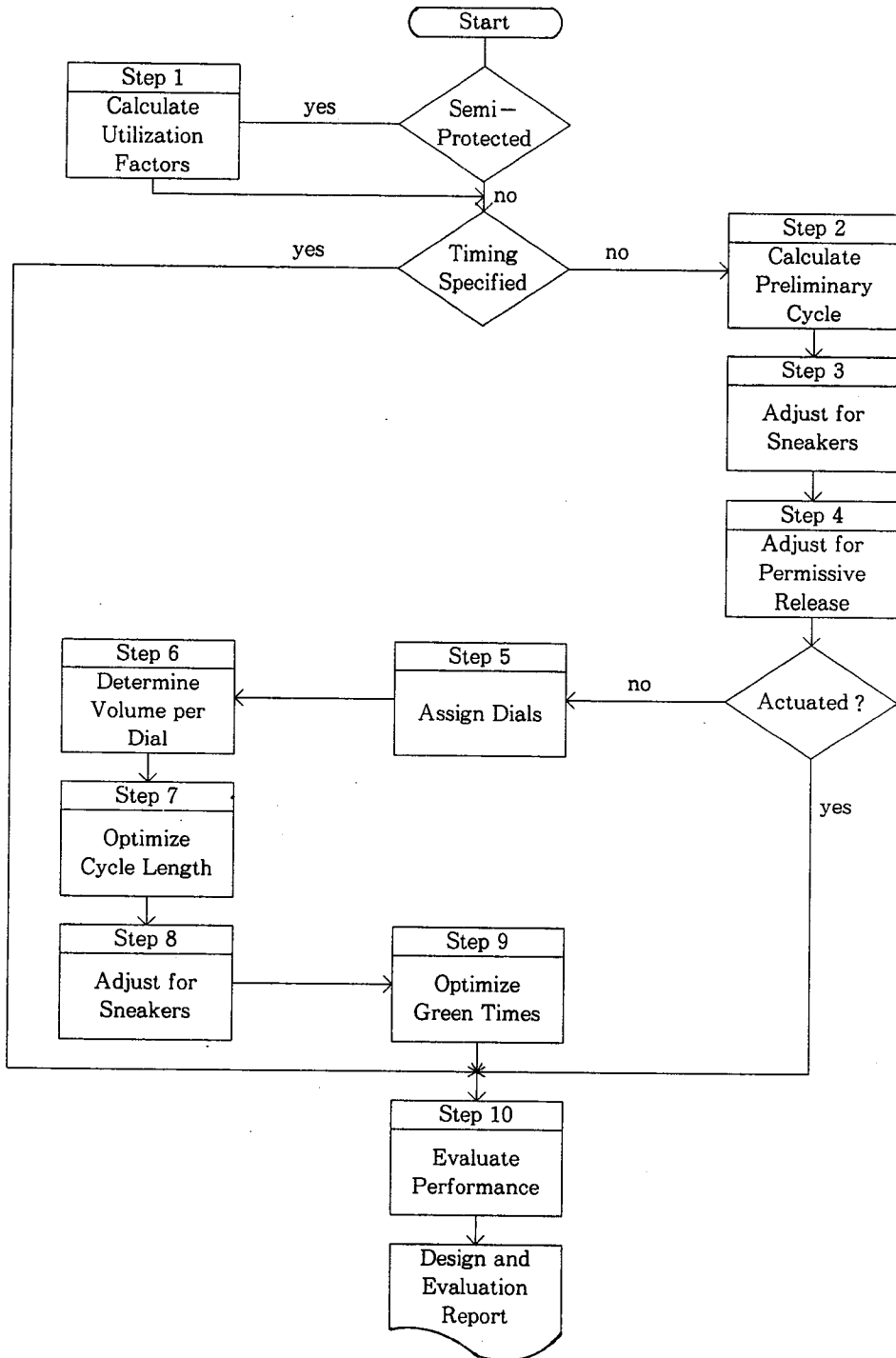
(式 31)의  $FC$ 가 本 研究에서 開發될 電算 프로그램의 成果測定值로 사용되었다.

本 프로그램에서는 여러 交通信號統制代案들의 比較를 위하여 다음의 效率測定值(MOE)들의 利用이 가능하다

飽 和 度  
遲 滯  
停 止 率  
左廻轉交通量

本 프로그램의 入力과 出力의 한 例를 附錄에 수록하였다. 入力의 첫째 카드에 Volume 카드의 交通量 入力順序에 따라 各 接近路가 半保護左廻轉이면 “1”을, 保護左廻轉이면 “0”을 入力하며, 둘째 카드에는 (式 18)의  $K$ 값을 入力한다. 仔細한 事項은 參考文獻(4)를 참조하기 바란다.

車輛隊列條件  $K$ 가 0.8이며, 交通量(大型車 混合率 16%)이 아래와 같은 한 半保護左廻轉 交叉路의 信號時間設計에 本 研究에서 開發된 電算프로그램을 利用한 結果는 다음과



〈그림 12〉 電算프로그램의 略式흐름圖

같다.

- 남쪽 接近路의 直進交通量(NBT) : 989台/時間
- 남쪽 接近路의 左迴轉交通量(NBL) : 234台/時間
- 북쪽 接近路의 直進交通量(SBT) : 1,014台/時間
- 북쪽 接近路의 左迴轉交通量(SBL) : 156台/時間
- 서쪽 接近路의 直進交通量(EBT) : 209台/時間
- 서쪽 接近路의 左迴轉交通量(EBL) : 26台/時間
- 동쪽 接近路의 直進交通量(WBT) : 48台/時間
- 동쪽 接近路의 左迴轉交通量(WBL) : 9台/時間

本 프로그램이 大型車를 乘用車로 換算한 乘用車換算交通量에 대하여 遲滯時間 및 停止率이 계산되므로 (式 31)은 大型車混合率 16%를 고려하여 다음과 같이 수정되었다.)

$$FC = 0.368(0.84D + 69S) \dots\dots\dots (32)$$

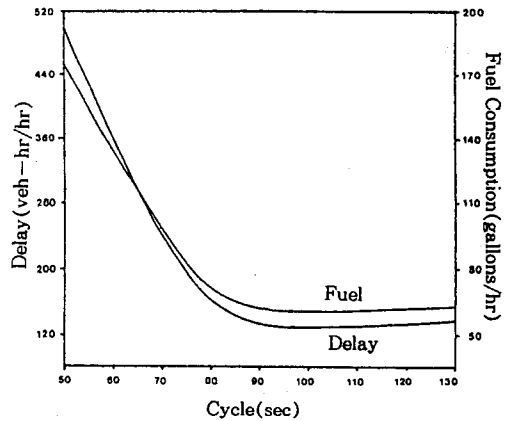
여기서의 D와 S는 乘用車로 換算한 全體車輛의 時間當 遲滯(台-時) 및 秒當 停止回數이다.

週期에 따른 遲滯 및 燃料消耗量은 <그림 13>과 같다. 週期 100秒에서 總遲滯 130.3 veh-hour/hour, 燃料消耗量 60.5gallon/hour로 最少遲滯 및 燃料消耗를 기대할 수 있었으며, 各 接近路別 現示時間은 다음과 같다.

- 南北左迴轉 : 18秒
- 南北直進 : 58秒
- 東西左迴轉 : 7秒
- 東西直進 : 17秒

左迴轉車輛에 의한 直進交通의 容量 減小를 무시한 경우의 最適週期 60秒에 比하여는 큰 改善을 기대할 수 있으나, 獨立 半保護左

迴轉 交叉路의 最適週期 90秒에 比하여는 微小한 改善을 기대할 수 있었다. 이는 隣接信號와의 連動으로 綠色信號時間 동안의 左迴轉車輛의 到着台數가 增加하여 直進車輛의 左迴轉車線 利用率이 減小하는데 기인한다.



<그림 13> 週期에 따른 燃料消耗量과 遲滯

### V. 結 論

本 研究에서는 交通運營上의 問題가 深刻한 4車線街路上의 相互 連結된 半保護左迴轉 交叉路에서의 에너지節約을 위한 信號時間設計用 電算프로그램이 開發되었으며, 主要 研究結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 後行左迴轉(lagging left-turn) 信號方式이나 非保護左迴轉 交叉路에서의 直進車輛의 共同左迴轉車線 利用時間 推定 模型으로는 本文의 (式 17)이 提案된다.

(2) 相互 連結된 半保護左迴轉 交叉路에서의 後行左迴轉 및 先行左迴轉(leading left-turn) 信號方式의 比較에서 直進交通이 主交通을 이루는 一般의 幹線道路上에서는 先行左迴轉 信號方式이 效率의인 것으로 判斷된다.

(3) 先行左迴轉 信號方式의 相互 連結된 半保護左迴轉 交叉路에서의 車輛의 遲滯, 停止率 및 待機行列 推定 模型으로는 各各 (式

27), (式 28) 및 (式 29)가 提案된다.

(4) 위의 數理模型들과 車輛의 待機 空廻轉時的 燃料消耗率 및 停止·出發의 速度變化時的 燃料消耗量을 利用하여 相互 連結된 半保護左廻轉 交叉路에서의 에너지消耗를 最少化하는 電算프로그램이 開發되었다. 이 프로그램은 에너지 消耗最少化 뿐만 아니라 遲滯時間 및 停止率 最少化를 위한 信號時間設計에도 利用될 수 있으며, 4車線 以上の 街路에도 利用될 수 있다.

### 感謝의 말

本 論文은 韓國科學財團의 支援에 의한 것임을 밝히며, 同 財團에 感謝드립니다.

### 引 用 文 獻

1. 都哲雄, “直進交通의 左廻轉車線 利用率을 고려한 새로운 信號燈 時間計劃”, 交通安全研究總論, Vol. 3, 1984, p. 3~70.
2. 金京煥, “에너지節約을 위한 半保護左廻轉 交叉路의 信號時間設計”, 大韓交通學會誌, Vol. 5, No. 2, 1987, p. 19~36.
3. Akcelik, R., “Opposed Turns at Signalized Intersections: The Australian Method, ITE Journal, Vol. 59, No. 6, 1989, p. 21~27.
4. Robertson, D. I. and P. Gower, User Guide to TRANSYT Version 6, TRRL Supplementary Report 255, Transport and Road Research Laboratory, 1977.
5. Webster, F. V. and Cobbe, B. M., Traffic Signals, Road Research Technical Paper No. 56, Road Research Laboratory, 1966.
6. Fedral Highway Administration, Traffic Control Systems Handbook, Fedral Highway Administration, 1976, p. 59~63.
7. Morgan, J. T. and J. D. C. Little, “Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth”, Operations Research, Vol. 12, 1974, p. 896~912.
8. Bleyl, R., “A Practical Computer Program for Designing Traffic-Signal-System Timing Plans”, HRB, HRR 211, 1967.
9. Messer, C. J., R. H. Whitson, C. L. Dudek and E. J. Romano, “A Variable-Sequence Multi-Phase Progression Optimization Program”, HRB, HRR 445, 1973.
10. Wagner, F. A. and D. L. Gerlough, “Improved Criteria for Traffic Signal Systems on Urban Arterials”, NCHRP Report, No. 73, HRB, 1969.
11. BANG, K. L., “Swedish Capacity Manual, Part 3: Capacity of Signalized Intersections”, TRB, TRR 667, 1978m p. 11~28.
12. TRB, Highway Capacity Manual, Special Report 209, Washington, D. C.: TRB, 1985.
13. 오익수, “信號交叉點의 飽和交通量에 관한 研究”, 대한토목학회 학술발표회 (1983), 1983, p. 29~39.
14. Federal Highway Administration, “Signal Operations Analysis Package User's Manual”, FHWA, 1984.
15. Winfrey, R., Economic Analysis for Highways, International Tentbook Company, 1969, p. 679~727.
16. Claffey, D. T., Running Costs of Motor Vehicles as Affected by Road Design and Traffic, NCHRP Report No. III, HRB, 1971.



(부록 2) 전산프로그램의 출력

VERSION 84.02(DECEMBER 84)

<SIGNAL OPERATIONS ANALYSIS PACKAGE>

PAGE-27

DESIGN AND EVALUATION SUMMARY

INTERSECTION NAME	RUN TITLE	CONTROLLER		SEQUENCE		PHASE		LOST TIME		STEP SIZE	STOP PENALTY
		TYPE	DIAL	N/S	E/W			/PH	TOTAL		
		PRETIMED	1	LT	LT	4		2.0	8.0	2.0	82.0

MOVEMENTS:	MEASURES OF EFFECTIVENESS										SEQUENCE					
	DELAY (VEH-HRS)	STOPS (%)	EXC FUEL (GAL)	EXC LEFT (VEH)	MAXIMUM QUEUE	V/C	LEFT TURN PROTECTION	TREATNEBT VEH/CYC	PH1	PH2	PH3	PH4	PH5	PH6		
NB THRU : LEFT	95.86	100.0	37.48	15.1	31.2	1.02	REST	0.0	XXXX	XXXX						
SB THRU : LEFT	13.34	100.0	5.91	0.0	7.1	1.06	REST	0.0	XXXX	XXXX						
EB THRU : LEFT	7.44	86.5	9.54	0.0	28.7	0.90	REST	0.0	XXXX							
WB THRU : LEFT	2.31	94.9	1.84	0.0	4.5	0.71	REST	0.0	XXXX	XXXX	XXXX					
EB THRU : LEFT	10.15	100.0	4.77	0.0	6.5	1.03	REST	0.0								
WB THRU : LEFT	0.45	96.9	0.34	0.0	0.8	0.39	REST	0.0								
WB THRU : LEFT	0.60	88.5	0.52	0.0	1.3	0.24	REST	0.0								
WB THRU : LEFT	0.12	95.6	0.10	0.0	0.2	0.12	REST	0.0								

ANALYSIS : PERIOD :	DELAY (VEH-HRS)	STOPS (%)	EX. FUEL (GAL)	EX. LEFT (VEH)	MAXIMUM QUEUE	V/C	ALL RED (SEC)	DIAL :	CYCLE: (SEC)	PH1	PH2	PH3	PH4	PH5	PH6
										(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
700-800 :	130.28	94.2	60.51	15.1	31.2	1.06	0.0	1	100.0	17.6	58.7	7.0	16.7		
TOTAL/MAX :	130.28	94.2	60.51	15.1	31.2	1.06	PERFORMANCE IMPROVED 68.3% BY TIMING OPTIMIZATION								