

□ 論 文 □

直進交通의 左回轉車線 利用率 推定과 交叉路容量 및 最適信号灯時間 算定

Estimating Utilization Factor of Left Turn Lane for Through Traffic, Intersection Capacity, and Optimum Signal Timings

都 哲 雄 *

(陸士土木科 教授)

目 次

- | | |
|------------|---------|
| I. 序 論 | IV. 理 論 |
| II. 研究의 背景 | V. 研究結果 |
| III. 研究計劃 | VI. 結 論 |

ABSTRACT

Intersection control has dual-purposes; increasing capacity and reducing delay. The primary concern of efficient intersection control under oversaturated condition as is in Korea is to increase capacity.

Prevailing intersection operation technique permits thru traffic to utilize left turn lane, because the intersection without left turn pocket has left turn signal interval. In this situation, it seems not to be valid to calculate capacity, delay, and signal timings by conventional methods.

By critical lane technique, capacity increases as cycle length increases. However, when thru traffic utilize LT lane, the capacity varies according to LT volume, LT interval as well as cycle length, which implies that specific cycle length and LT interval exist to maximize capacity for given LT volume.

The study is designed to calculate utilization factors of LT lane for thru traffic and capacities, and identify signal timings to yield maximum capacity. The experimental design involved has 3 variables; 1) LT volumes at each approach(20-300 vph), 2) cycle lengths (60-220 sec), and 3) LT intervals (2.6-42 sec) for one scenario of isolated intersection crossing two 6-lanes streets.

For LT volume of 50-150 vph, capacity calculated by using the utilization factor is about 25% higher than that by critical lane method. The range of optimum cycle length to yield maximum capacity for LT volume less than 120 vph is 140-180 sec, and increases as LT volume increases. The optimum LT interval to yield maximum capacity is longer than the interval necessary to accommodate LT volume at saturation flow rate.

I. 序 論

交叉路에서의 信號灯 運用方式에는 獨立交

叉路信號灯, 幹線道路統制方式信號灯, 그리고 道路網統制方式信號灯이 있다. 현재 서울시

* 本學會理事 · 交通工學博士

一部地域에서 運用되고 있는 電子信號燈은 幹線道路上的 交通을 위주로한 幹線道路統制信號燈이며 나머지 大部分은 獨立交叉路信號燈으로 運用되고 있다. 설사 幹線道路統制方式이라 하더라도 信號燈交叉路의 거리가 멀리 떨어져 있을 경우에는 한 信號燈을 통과한 密集車輛群 (platoon)이 다음 信號燈에 도달될때는 이 platoon이 完全히 分散되어 버리므로 信號燈間의 連動效果는 기대할 수 없으며 따라서 獨立信號燈과 같은 역할밖에 수행할 수가 없다.

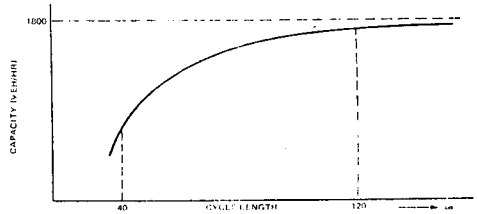
이와같이 우리나라 信號燈의 대부분을 차지하는 獨立交叉路信號燈의 統制方式은 대단히 중요하다. 특히 交叉路에서의 交通統制方式이 外國과는 判異함에도 불구하고 (全面綠色信號에서 左회전 勿함) 外國의 理論을 그대로 사용하여 信號燈時間을 결정하고있는 實情이므로 交叉路統制에서 가장 중요한 우리나라 與件에 맞는 最適信號燈時間을 찾아내지 못하고 있다.

II. 研究의 背景

交叉路의 目的은 1) 相衡하는 交通流의 容量을 최대로 하면서, 2) 그 地點을 통과하는 모든 車輛들의 遲滯를 최소로 하는 것이다. 물론 近者에 와서는 이 以外에 停止數, 燃料消耗 排氣개스들을 最小로하는 것이 더욱 바람직하다고 생각하고 이들을 各各 또는 몇개의 組合으로 구성하여 效率測定基準 (MOE) 으로 選定하고자 하는 努力이 행해지고 있으나(1,2,3) 사실상 遲滯와 燃料消耗, 排氣개스 放出率은 서로 密接한 연관성이 있는 것으로 판단되고 있으므로 遲滯가 交通流質을 평가하는 代表的인 MOE라고 해도 과언이 아니다 (停止數는 例外)

앞에서 언급한 交叉路運轉의 目的函數인 容量增大와 遲滯減小은 完全히 다른 兩面性을 가지고 있다. 다시 말하면 容量이 最大일때 遲滯가 最小가 되지는 않는다. 예를들어 左회전이 금지되거나 左회전 專用車線 (pocket)이 있는 경우 (外國의 경우처럼) 의 容量은 그림 1에서 보는 바와 같이 周期가 길면 길수록 커진다.(4)

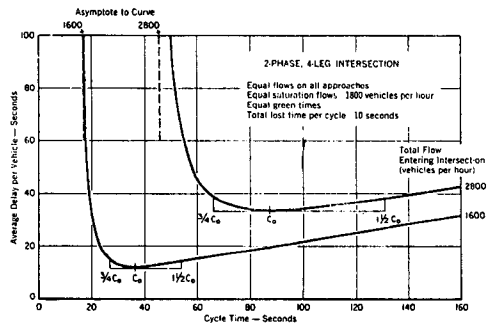
<圖 1> 交叉路容量과 周期의 關係



(Source ; Traffic Control Systems Handbook(U. S. DOT) , 1976,P.62

그러나 遲滯는 어느 特定周期에서 最小値를 갖으며 이 값보다 짧거나 긴 周期에서는 遲滯量이 증가한다.(2,3,5) (그림 2)

<圖 2> 遲滯와 周期와의 關係



(Source; Webster, F.V., Traffic Signal Settings, Road Research Technical paper No.39, Scientific and Industrial Research, Road Research Laboratory, 1958, P.13.)

交叉路의 飽和度 (degree of saturation) 가 비교적 낮은 外國의 경우에는 信號燈時間을 결정할때 단순히 交通需要를 만족시키거나 遲滯를 最小로하는 信號燈時間을 찾아내며 容量은 고려하지 않는다. 그러나 우리나라에서와 같이 飽和度가 높은 경우에는 容量을 增大시키는 信號燈時間을 찾아낼 必要가 있다. 통상 飽和度가 0.9를 넘는 경우에는 信號燈時間 調整을 包含한 여러가지 容量增大 方案을 생각해야한다.

더구나 우리나라의 交叉路 運用方式은 外國과는 달리 全面綠色信號에서 左회전을 許用하지 않고 左회전專用 信號時間은 있으나 左회전專用車線은 없다. 따라서 直進交通의 상당한 部分이 左회전車線을 이용하고 있다. 이와같은 현상은 直進交通의 경우 車線當 交通量算定을 不可能하게 하므로써 Critical Lane Technique 과 같은 方法을 이용한 容量算出이나 信號燈時間算出을 할 수 없으며 Webster 公式을 이용하여 適正周期나 遲滯量算出을 할 수도 없기때문에 현재와 같은 交叉路運用方式 아래에서는 信號燈時間과, 交叉路容量, 遲滯量算定, 그 어느것도 明快한 解를 얻을 수가 없다.

Ⅲ. 研究計劃

直進交通의 一部分이 左회전車線을 이용하므로써 생기는 概念上的 混沌을 例示하면 다음과 같다.

가. 同一한 直進交通需要이지만 左회전交通需要가 많을때가 적을때보다 直進의 左회전車線 利用率이 적어지므로 Critical Lane Volume 이 커지며 따라서 直進을 위한 綠色時間이 더 많이 所要된다.

나. 반대로 同一한 길이의 綠色直進時間이라 하더라도 左회전交通需要가 많으면 적을때

보다 直進容量이 줄어든다.

다. 同一한 길이의 直進綠色時間과 同一한 直進交通需要라 하더라도 左회전交通需要가 많으면 遲滯가 증가한다.

이와같이 信號燈時間, 容量, 遲滯에 관한 종래의 理論과의 차이가 左회전交通需要의 多小에 따라 생길뿐만 아니라 左회전交通의 到着으로 말미암아 直進이 左회전車線을 이용하지 못하는 期間, 즉 (周期 - 黃色時間을 包含한 左회전時間)의 길이에 따라 달라지므로 더욱 複雜한 양상을 띠운다.

本 研究에서는 이와같이 直進交通의 左회전車線 利用率을 統計的인 方法으로 분석하고 이에 따른 容量의 變化를 찾아내고 아울러 最大容量을 갖는 周期와 split 을 구하고자 한다. 이러한 결과는 우리나라 交叉路 統制方式에서의 遲滯量을 구하는데도 긴요하게 이용될 수 있을 것이다.

研究地域은 2개의 6車線道路가 交叉하는 獨立信號燈交叉路중에서 交叉路 부근의 버스 정유장이 있거나 右회전車輻이 많아 右側車線의 直進利用率이 낮은 전형적인 都市部 交叉路를 모델로 했다.

實驗의 設計에 包含되는 變數는 左回轉交通需要, 周期, split 이며 이들 各變數의 水準은 다음과 같다.

- 가. 左回轉需要 - 20 vph에서 300 vph까지 29 levels
- 나. 周期 - 60 초에서 220 초 까지 17 levels
- 다. split - 左回轉綠色時間; 2.6 초 부터 42 초 까지 25 levels
- 한 道路에 대한 綠色時間이 全綠色時間에 대한 % ; 10%에서 90%까지 9 levels

直進交通의 左回轉車線 利用率, UF 는 左回轉交通量, 周期, 左回轉 信號 時間에 의해서

左右된다. 그러므로 여기서 $(29 \times 17 \times 25)$ 개의 UF를 얻을 수 있으며 이를 이용한 한 接近路의 容量은 直進時間을 추가로 고려하여 $(29 \times 17 \times 25 \times 9)$ 개의 容量을 구했다. 더 자세히 설명하면 17개 水準의 周期과, 9개 水準의 直進時間, 25개 水準의 左回轉時間과 29개 水準의 左回轉交通量에 대한 한 接近路의 直進 및 左回轉容量을 구해서 各 變數 相互間의 關係와 容量에 대한 sensitivity 分析을 했다.

本 研究에서 사용된 飽和交通量은 直進인 경우 2400 臺/綠色時間, 左회전인 경우 2200 臺/綠色時間이며 4 초의 黃色時間과 3 초의 出發遲滯, 2 초의 進行延長 (End-Lag)을 사용했다.

IV. 理論

獨立交叉路의 車輛到着率은 Poisson分布를 갖는다는 것은 잘 알려진 사실이다.

直進交通의 左회전車線 利用率은 바로 앞 cycle의 左회전信號동안 모든 左회전車輛이 통과하고난 다음 부터 그다음 左회전信號 直前까지의 左회전到着確率에 의해서 결정된다. 즉 바로 앞 cycle의 左회전信號동안 모든 左회전車輛이 통과한다고 가정하고 그 이후 부터 다음의 左회전信號 直前까지 左회전車輛이 한대도 到着하지 않을 確率은 $P(0; \mu)$ 이며 이때 直進의 左회전車線 利用率은 $P(0; \mu) \times 1$ 이다. 여기서 P는 Poisson 確率函數이며 μ 는 그 시간 (周期 - 黃色信號를 포함한 左회전時間) 동안의 左회전平均到着率이다. 만약 그 時間동안 左回轉車輛이 1 臺 到着한다면 그 確率은 $P(1; \mu)$ 이며 直進의 左回轉車線 利用率은 平均 $F(1; \mu) \times \frac{1}{2}$ 이다. 같은 方法으로 그 時間동안 左回轉이 x臺 到着할때의

直進의 左回轉車線 利用率은 $P(x; \mu) \times \frac{1}{x+1}$ 이다. 그러므로 直進의 左回轉車線 全體利用率은

$$P_1 = \sum_{x=0}^{\infty} P(x; \mu) \times \frac{1}{x+1} = \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\mu^x e^{-\mu}}{(x+1)!}$$

P_1 은 바로 앞 cycle의 左回轉信號동안 모든 左回轉車輛이 전부 통과한다는 가정下的 (실제는 P_2 의 確率을 가짐) 利用率 이므로 실제 UF는 $P_1 \times P_2$ 이다. P_2 는 고려하는 cycle 以前의 어떤 cycle에서 左회전의 cycle failure가 일어난다 하더라도 고려하는 cycle이 시작되는 時點에서는 左회전 待期를 하는 車輛이 完全히 解消된 狀態가 되는 確率이다. 예를들어 連續된 2 cycle에서 뒷 cycle 동안의 到着이 0 이면서 뒷 cycle 마지막에 左회전 cycle failure가 일어나지 않으려면 앞 cycle의 到着이 2S臺 보다 적어야 한다.

여기서 S는 左회전 有效綠色時間동안의 飽和流率이다. 만약 뒷 cycle 동안의 到着率 이 1 이면서 뒷 cycle 마지막에 左回轉 cycle failure가 일어나지 않으려면 앞 cycle 동안의 到着이 $2S-1$ 보다 적어야 한다. 그러므로 連續된 2 cycle에서 마지막 cycle 끝에 左回轉 차량이 完全히 解消될 確率은

$$\sum_{i=0}^S P(i; \mu e) \sum_{j=0}^{2S-i} P(j; \mu e)$$

있다. 여기서 μe 는 한 周期동안의 左回轉 平均到着率이다. 그러나 連續된 2 cycle 만이 아니라 連續된 많은 cycle을 고려해야 하므로 실제 P_2 는;

$$\sum_{i=0}^S P(i; \mu e) \sum_{j=0}^{2S-i} P(j; \mu e) \dots P(y; \mu e) \sum_{z=0}^{\infty} P(z; \mu e)$$

로 표시될 수 있다. P_2 의 계산은 사실상 연

속된 3개의 cycle 을 고려하면 충분하다. 만약 $\mu e < s$ 인 경우에는 연속된 2개의 cycle 만 고려해도 별 오차가 없다.

結論적으로 본 연구에서 UF를 구하기 위한 공식은 다음과 같다.

$$\left(\sum_{x=0}^{\infty} P(x; \mu) \times \frac{1}{x+1} \right) \times \left(\sum_{i=0}^s P(i; \mu e) \right)$$

여기서 $\sum_{j=0}^{2s-i} P(j; \mu e) \sum_{k=0}^{3s-j} P(k; \mu e)$

$$\mu = \frac{\text{左回轉交通量}}{3600} \times (\text{周期} - \text{黃色時間을 포함한 左回轉時間})$$

$$\mu e = \frac{\text{左回轉交通量}}{3600} \times \text{周期}$$

$$S = \frac{\text{左回轉飽和流率(綠色時間當)}}{3600} \times (\text{有效左回轉時間})$$

V. 研究結果

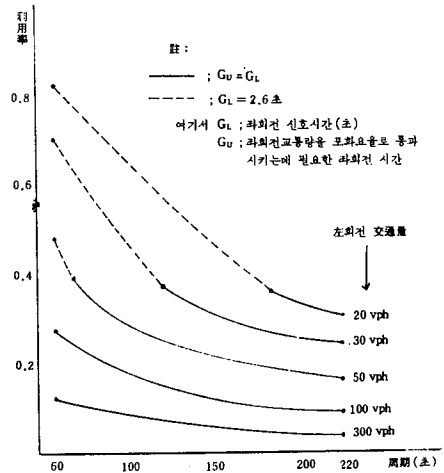
本研究은 根本적으로 아래의 의문에 대한 理論的인 解를 얻기 위하여 行하여 졌다.

가. 直進交通이 左回轉車線을 어느정도 利用하고 있으며 左回轉交通量과 信號燈時間의 變化에 따라 利用率이 어떻게 變하는가?

나. 이에 따라 交叉路의 容量은 어떤 變化를 나타내며, 外國과는 달리 信號燈時間과 左回轉交通量에 따라 直進交通容量의 變化가 생기는가? 그렇다면 주어진 左回轉交通量에 대하여 어떤 信號燈時間에서 最大容量을 나타내는가?

그림3에서 보는 바와 같이 左回轉交通需要를 左回轉飽和流率로 통과시키는데 必要한 左回轉時間을 줄때 UF는 左回轉交通需要가 클수록, 周期가 길수록 적어짐을 알 수 있다. 또 左回轉時間을 이보다 더 길게하면 UF는 증가

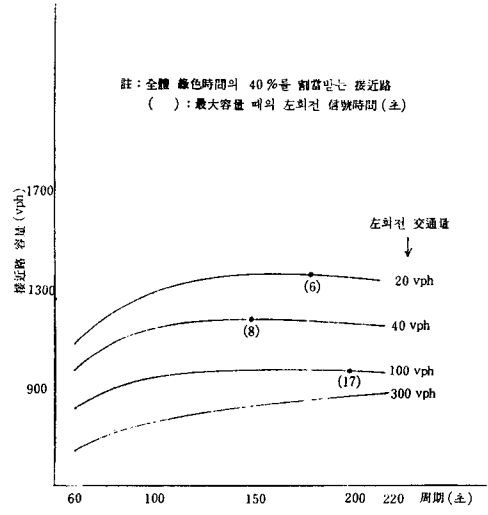
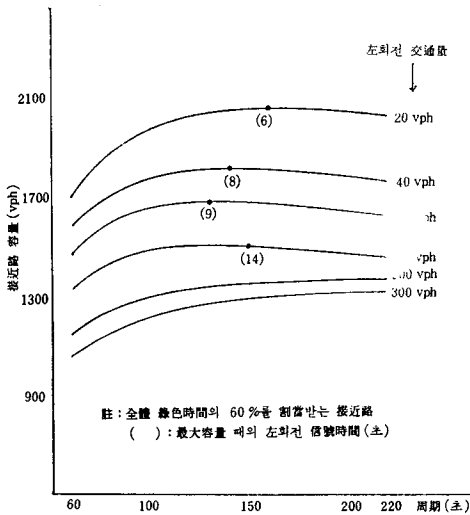
한다. 그러나 이때 UF가 增加한다고 해서 交叉路容量이 반드시 증가하는 것은 아니다. 왜냐하면 左回轉時間이 길어지면 UF가 커지므로 直進交通의 接近路當(車線當이 아니라) 飽和流率은 클지 모르나 相對적으로 直進時間이 짧아지므로 容量이 줄어들 수도 있다.



< 圖 3 > 周期, 左회전交通量과 利用率

그림 4와 그림 5는 各周期의 全體綠色時間을 6 : 4로 할당받는 두 接近路에서 各 左회전交通量에 대한 接近路容量(直進+左회전)을 나타내었다. 그림에서 보는 바와같이 各 左회전交通量에 대한 接近路容量이 最大가 되는 周期과 split이 存在한다. 그림 4에서 左회전交通量이 20 vph일때의 最大容量은 周期가 160초, 左회전信號時間이 6초(左회전飽和流率로 3臺가 통과할 수 있는 時間), 直進信號時間이 (160-16)×0.6-6 = 80.4초일 때이며, 이때의 最大接近路容量은 2060 臺/時間임을 알 수 있다.

일반적으로 左회전交通需要가 120 vph以下인 경우의 最適周期는 140~180秒이며 그 以上の 交通量에서는 周期도 길어진다. 또 左회전信號時間은 左회전交通이 飽和流率로 通



〈圖 4〉周期, 左회전 교통량과 接近路 容量

〈圖 5〉周期, 左회전 교통량과 接近路 容量

過하는데 必要한 時間보다 긴 時間을 줄때 最大의 容量을 나타낸다.

다. 이때 한 쌍을 이루는 主副接近路는 두가지 경우를 모두 생각해야 한다. 交叉路 全體에 대해서는 다시 이들을 합하여 最大容量을 나타내는 共通된 信號時間과 容量을 얻을 수 있다. 예를 들어 主道路와 副道路가 6 : 4로 全體 綠色時間을 割當받으면서 主接近路의 左회전交通량이 100 vph와 120 vph이고, 副接近路의 左회전交通량이 60 vph와 70 vph인 경우의 둘 또는 네 接近路容量과 最適信號時間을 계산하여 表 1에 나타내었다.

이와같은 결과를 이용하면 交叉하는 두 接近路의 용량을 最大로 하는 信號燈時間과 最大容量을 구할 수 있을뿐만 아니라 交叉路에서 각각 相異한 左회전交通량을 가진 4 接近路에 대해서 全體交叉路容量을 最大로 하는 信號燈時間을 얻을 수가 있다. 한 接近路의 容量과 이때의 最適信號時間은 그림 4와 5에서 보는 바와 같으나 交叉하는 두 接近路의 容量은 위의 두 그림에서 보인 容量을 합하여 最大容量을 나타내는 共通된 信號時間을 구할

그러므로 위의 예에서 周期 160초 主接近路의 左회전 17초, 副接近路 左회전 11초 일때

表 1. 左회전 교통량에 따른 2 또는 4 接近路 용량과 最適信號時間

區 分	副 道 路 左 회 전 (vph)	主 道 路 左 회 전 (vph)	2 接 近 路 最 適 信 號 時 間 (초) (周期, 副, 主)	2 接 近 路 最 大 容 量 (vph)	4 接 近 路 最 大 容 量 (vph)
경 우 I	60	100	(150, 9, 14)	2582	5070
	70	120	(160, 11, 17)	2501	5081
경 우 II	60	120	(160, 11, 17)	2536	5081
	70	100	(150, 11, 14)	2548	5075

最大 交叉路容量을 얻을 수 있으며 그 값은 5081 臺/時間이다.

이 값은 左회전車線을 直進이 전혀 이용하지 못하는 경우에 Critical Lane Method 에 의해서 구한 값 4135 臺/時間과 비교하면 약 23% 큰 값이다. 다른 말로 표현하면 直進이 左회전車線을 最大로 이용하게하는 最適信號燈時間을 사용하면 最大 23%의 容量증가를 얻을 수 있다고 할 수 있다.

研究結果에 의하면 交叉路의 容量을 最大로 하는 信號燈時間은 主, 副道路의 左회전交通量이 가장 큰 한 쌍의 接近路容量을 最大로 하는 信號燈時間과 一致함을 발견했다.

VI. 結 論

우리나라의 交叉路에서는 直進車輦이 左회전車線을 이용하므로써 交叉路의 效率인 運用을 위해서 必須인 交叉路容量을 구할 수 없을뿐만 아니라 容量을 最大로 할 수 있는 最適信號燈時間의 設計도 不可能하다. 다시 말하면 우리나라의 與件에서 交叉路 運用은 容量을 增加시키는 것이 急先務이며 그러기 위해서는 모든 信號燈時間은 容量을 最大로 할 수 있도록 設計되어야 하나 現實적으로 外國과 같이 遲滯를 最小로하는 信號燈時間 設計法을 사용하고 있다. 그러나 이것 역시 直進이 左회전車線을 이용할 경우에는 그 理論的 基礎가 흔들리므로 實質적으로 우리나라 交叉路 運用 與件에 맞는 信號燈時間 設計方法으로는 적합치가 않다.

本 研究에서는 獨立信號燈 交叉路에서 直進交通이 左회전車線을 이용함으로써 생기는 概

念上의 特徵을 찾아내고 그 利用率에 影響을 미치는 여러가지 要素와 그 效果를 理論的으로 구했다. 나아가서 이 利用率을 사용하여 各信號燈時間에 따른 交叉路의 容量을 구하고 반대로 交叉路의 容量을 最大로 하는 信號燈時間을 찾아내려고 試圖했다.

左회전交通量이 120 vph 以下일때 容量을 最大로하는 信號燈周期는 140 ~ 180 秒 사이에 있으며 그 이상의 左회전 交通量인 경우에는 周期가 길어진다. 또 左回轉信號時間은 左回轉交通이 飽和流率로 通過하는데 必要한 時間보다 긴 時間을 줄때 最大의 容量을 나타낸다.

直進交通이 左회전車線을 이용함으로써 통상 25% 内外의 容量증가를 얻을 수 있으나 適正信號燈時間을 이용하지 않을 경우 이와같은 利得을 잃게된다. 뿐만 아니라 지금까지 交叉路容量을 이용하거나 信號燈時間을 設計할때 이와같은 增加分을 고려하지 않았다면 그만큼 validity가 감소 되었다고 할 수 있다.

앞으로의 後續研究는 本 研究結果를 Nomo-graph 化하여 이용하기 쉽게 하고, Critical Lane Method를 사용할때 이 概念을 이용하도록 그 方法을 修正해야할 것이다. 뿐만 아니라 遲滯나 停止數, 燃料消耗 등 다른 MOE를 最小化하는 信號燈時間 設計時에도 이 概念을 이용하여 총래에 사용하던 車線當 飽和流率을 修正해야 할 것이다.

더욱 바람직한 것은 現在의 信號燈 顯示 (phase) 順序를 (直進 다음에 左회전) 左회전 다음에 直進이 오는 경우로 바꾸어 이 方法을 이용하여 檢討해 볼 必要가 있다.

參 考 文 獻

1. Bauer, C.S., "Some Energy Considerations in Traffic Signal Timing," Traffic Engineering, ITE, Feb., 1975, pp.19-25.
2. Courage, K.G. and S.M. Parapar, "Delay and Fuel Consumption at Traffic Signals," Traffic Engineering, ITE, Nov., 1975, pp.23-27.
3. Cohen, S.L. and G. Euler, "Signal Cycle Length and Fuel Consumption and Emissions," Transportation Research Record 677. TRB, 1979, pp.41-48.
4. US. DOT., Traffic Control Systems Handbook, 1976, p.62.
5. Webster, F.V., Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper No. 39, Scientific and Industrial Research, RRL, 1958, p.13.