

# 信號燈 連動化補正係數 算出 模型의 開發 — 理論的 考察을 中心으로 —

## An Approach to Calibrating a Progression Adjustment Factor at Signalized Intersections — Toward Theory of Background —

李勇宰\* · 崔祐赫\*\*

Lee, Yong Jae · Choi, Woo Hyuck

### Abstract

The recent study of the delay models have assumed random arrival which has a constant average flow rate throughout the cycle. However, where signals are spaced closely together or form part of progressive system, platoon flows are common and more closely represent reality. In such cases, those results are quite different pattern of estimated delay from that of observed one. In order to solve this problem, the 1985 HCM takes Progression Adjustment Factor (PAF) into account. In the 1985 HCM, however, it has deficiencies in defining and applying it, such as platoon ratio ( $R_p$ ) and platoon arrival type. The Purpose of this study is to investigate theoretically the predictive ability of the individual models concerned through comparing the estimated delay and PAF suggested by NCHRP Report 339, KHCM or USHCM (1985) with the observed obtained by field survey at a signalized intersection.

### 要 旨

既存의 遲滯模型은 遲滯의 分析을 위하여 無作為到着(Random Arrival)을 假定하고 있으므로 街路 網上에서 群의 形態를 이루는 交通流에 대한 實質遲滯를 精確히 分析하지 못한다. 이러한 短點을 補完하기 위하여 美國 道路容量便覽(HCM)에서는 連動化補正係數(PAF)를 사용하여 보다 精確한 遲滯의 分析을 試圖하고 있다. 그러나 美國의 道路容量便覽에서 提示하고 있는 連動化補正係數는 車輛群의 到着形態, 車輛群比 등에서 많은 問題點을 內包하고 있다. 本 研究은 이러한 問題點에 대하여 美國 NCHRP 研究結果를 參考로 하여 우리나라 實情에 適用할 수 있는 交叉路 遲滯模型과 連動化 分析模型을 提案하고 既存에 提示된 模型의 結果와 比較함으로써 各 模型들간의 差異點과 豫測力을 理論的으로 檢討하여 본다.

\* 정회원 · 中央大學校 建設大學 土木工學科 教授

\*\* 정회원 · 中央大學校 大學院 土木工學科

## 1. 序 論

현재까지 研究되어온 대부분의 遲滯模型은 遲滯의 分析을 위하여 無作為到着(Random Arrival)을 假定하고 있으므로 街路網上에서 群의 形態를 이루는 交通流에 대한 實質遲滯를 精確히 分析하고 있지 못하고 있다. 이러한 短點을 補完하기 위하여 美國道路容量便覽(Highway Capacity Manual : HCM)<sup>(1)</sup>에서는 連動化補正係數(Progression Adjustment Factor : PAF)를 사용하여 보다 精確한 遲滯의 分析을 試圖하고 있다. 그러나 美國의 道路容量便覽에서 提示하고 있는 連動化補正係數는 다음과 같은 問題點을 內包하고 있다.

첫째, 信號燈 設置를 計劃하고 있는 條件下에서 遲滯推定을 위한 技法이 없다.

둘째, 車輛群의 到着形態가 多樣하지 못하므로 遲滯의 推定이 敏感하지 못하다.

세째, 直進車輛群이 이어 到着하게 되는 回轉 交通量으로 인한 2차 待機行列에 대한 遲滯를 반영하지 못한다.

넷째, 車輛群化 방법은 車輛群 構造를 考慮하지 않는다.

여기서 定義되고 있는 連動(Progression)이란 意味는 信號體系 街路網上에서 Non-Stop하는 車輛群을 설명하는데 사용되는 用語이며 連動化補正係數란 實質停止遲滯와 無作為到着으로 假定했을 때의 停止遲滯와의 比를 말한다. 즉, 交叉路間의 距離가 600 m 以內의 比較的 짧은 區間일 경우 車輛은 車輛群의 形態를 이루면서 到着되므로 無作為到着을 假定한 遲滯模型의 結果는 實質停止遲滯와 差異가 있으므로 이를 補正하는 것이 連動化補正係數라 하겠다.

連動化補正係數를 適用할 때에 있어 注目받고 있는 두가지 留意事項이 있는 바 Olszewski<sup>(2)</sup>의 最近 研究結果에 따르면 連動은 過飽和 상태에서는 큰 影響을 주지 못하며 低飽和 상태일 때 큰 影響을 미친다고 주장한 것과 美國道路容量便覽(HCM)에서 사용하고 있는 車輛群化( $R_p$ )의 適用性에 관한 모호성을 들 수 있다.

Olszewski<sup>(2)</sup>의 주장에 의하면 連動化補正係數는 總遲滯중에서 均一遲滯(Uniform Delay)에만 適用되

어야 하며 交通量에 의해 影響을 받는 附加遲滯(Incremental Delay)에는 適用하지 않도록 勸告하고 있다. 또다른 問題點의 하나인 車輛群化( $R_p$ )의 適用性에서는 美國道路容量便覽(HCM)에서 사용되는 車輛群化( $R_p$ )는 有效綠色比( $g/C$ ), 飽和度( $v/c$ ) 등에 따라 다르게 나타난다는 점이다.

本 研究은 이러한 問題點에 대하여 지난 1991년 9월에 TRB(Transportation Research Board)에서 발행된 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program) 339<sup>(3)</sup>의 交通遲滯에 대한 信號燈 連動化의 效果分析의 研究結果를 參考로 하여 우리나라 實情에 適用할 수 있는 交叉路 遲滯模型과 連動化 分析模型을 提案하고 美國道路容量便覽(US Highway Capacity Manual, 1985 : HCM)과 최근 發刊된 韓國道路容量便覽(Korea Highway Capacity Manual : KHCM)<sup>(4)</sup>에 提示된 模型에서 얻어진 結果를 比較함으로써 各 模型들간의 差異點과 豫測力을 理論적으로 檢討하여 보고자 한다.

## 2. 連動化補正係數 關聯 研究의 理論考察

### 2.1 美國道路容量便覽(US HCM)의 경우

美國의 道路容量便覽(HCM, 1985)의 第9章에서는 信號燈이 있는 交叉路에 대한 서비스 水準을 評價하는 分析節次를 다루고 있는데 評價를 위해서는 우선 交叉路에 대한 幾何構造, 交通條件, 信號條件 등의 基本資料를 入力하는 過程이 필요하고 다음 段階에서는 交通量을 補正하여 尖頭時間係數(PHF)나 移動流에 대한 交通量 등을 결정하게 된다. 다음은 飽和交通流率을 補正하는 過程으로 各補正係數를 적용하여 飽和交通流率을 계산한다. 補正된 交通量과 飽和交通流率을 통해 容量分析을 하게 되고 容量( $c$ )과 飽和度( $v/c$ )를 계산하는 과정이 이 段階에 포함된다. 마지막 段階로 서비스 수준을 決定하게 되는데 이 과정에서 各 移動流의 遲滯와 交叉路의 遲滯를 결정하고 이것을 基準으로 대상교차로의 서비스 水準을 判斷하게 된다.

현재 美國道路容量便覽에서 사용하고 있는 서비스 수준을 평가하는 效果尺度(MOE)는 車輛當 平均停止遲滯를 사용하고 있는데 여기서 停止遲滯란 한 車輛이 赤色信號時에 通行權(Right of Way)을 받기

위해 待機하는 동안 운전자가 경험하는 정지시간을 말한다. 여기에는 加·減速時間과 走行時間은 除外된다. 그리고 算定된 停止遲滯로 서비스 수준을 결정하는 基準은 아래의 表 1과 같다.

최근 Reilley<sup>(5)</sup>의 研究에 따르면 모든 측정된 遲滯는 有效綠色比(g/C)가 클수록 작아지며 週期(Cycle)의 길이가 길수록 增加한다고 觀察되었다. 直進交通量의 停止遲滯(Stopped Delay)는 綠色顯示에 到着하는 比率이 增加할수록 減少하며 左·右回轉交通量이 增加할수록 增加한다. 任意到着(Random Arrival)일때 總遲滯는 停止遲滯의 약 1.3배와 같은 것으로 보고되었다.

현재 사용중인 HCM(1985)의 遲滯算出 公式은 다음과 같다. 즉,

$$d = d_1 + d_2 \quad (1)$$

$$d_1 = 0.38 \times C \times \frac{(1 - g/C)^2}{(1 - g/C \times X)} \quad (2)$$

$$d_2 = 173X^2 \times [(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + (16X/c)}] \quad (3)$$

여기서 C : 信號週期(Cycle Time)

c : 交叉路의 容量

d<sub>1</sub> : 均一遲滯(sec/veh)

d<sub>2</sub> : 附加遲滯(sec/veh)

X : 飽和度(v/c)

g/C : 有效綠色比

d<sub>1</sub>은 均一(Uniform)한 혹은 한 주기동안 平均 交通流率에 의해 생기는 遲滯를 說明한다. 여기서 飽和度 X(v/c)는 1.0을 초과할 수 없다. 이는 X=y/(g/C)이고 y=v/s이며 g/C보다 작기 때문이다. 이런 制約條件은 1985 HCM에서는 明確히 認識되어 있지 않은 점이다. d<sub>2</sub>는 부가적인 遲滯로 任意到着(Random Arrival)으로 인해 생기는 遲滯이다.

또한 1985년 HCM에서는 序論에서 言及한 바와 같이 連動化補正係數(PF)를 통해 車輛群이 遲滯에 미치는 影響을 說明하고 있다. 즉, 補正된 遲滯는 式 (4)와 같으며 이는 韓國道路容量便覽에서 제시하고 있는 補正된 遲滯公式과 같다.

$$d_{adj} = d \times PF \\ = (d_1 + d_2) \times PF \quad (4)$$

表 1. 停止遲滯에 따른 信號交叉路 서비스 水準 決定 基準

서비스 水準	車輛當 平均 停止 遲滯(秒)
A	≤ 5.0
B	5.1 ~ 15.0
C	15.1 ~ 25.0
D	25.1 ~ 40.0
E	40.1 ~ 60.0
F	> 60.0

자료 : 1985 美國道路容量便覽(HCM)

여기서 d<sub>adj</sub> : 補正된 停止遲滯(sec/veh)

PF : 連動化補正係數

d<sub>1</sub> + d<sub>2</sub> : 均一遲滯과 附加遲滯의 합

한편 NCHRP 3-28(2)<sup>(6)</sup>에서는 처음으로 到着形態에 따른 連動化補正係數의 算定을 試圖하였는데 그 係數들은 1980년에서 1981년 사이에 17개의 交叉路를 통해 얻어진 資料를 토대로 만들어진 것이며 確率的인 分析過程을 통하여 到着形態의 變化에 따른 遲滯에 미치는 影響을 考慮하였다. 이 報告書에서 定義한 到着形態는 다음과 같다.

TYPE 1 : 赤信號 시작에 密集된 車輛群의 到着

TYPE 2 : 赤信號동안 散在된 車輛群이 到着하거나 赤信號 중간에 密集된 車輛群의 到着

TYPE 3 : 完全 無作爲 到着狀態를 포함한 任意 到着(Random Arrival)

TYPE 4 : 綠色信號 동안 散在된 車輛群이 到着하거나 綠色信號 중간에 密集된 車輛群의 到着

TYPE 5 : 綠色信號 시작에 密集된 車輛群의 到着

이와는 달리 Passer II-84<sup>(7)</sup>에서 提示된 遲滯模型을 살펴보면 다음과 같다. 즉,

$$d_1 = 0.38 \times C \times (1 - g/C)^2 \times \frac{q_r}{q} \left( 1 + \frac{q_r}{s - q_k} \right) \quad (5)$$

여기서 d<sub>1</sub> : 均一遲滯의 첫번째항

q : 週期동안 平均 交通率

q<sub>k</sub> : 有效綠色信號 동안 平均 交通流率(vps)

q<sub>r</sub> : 有效赤色信號 동안 平均 交通流率(vps)

s : 飽和交通流率(臺/秒)

1985년 美國道路容量便覽에서는 Passer II-84의 模型의 概念을 사용하여 좀 더 나은 連動化를 고려하기 위하여 車輛群比( $R_p$ )를 定義하였다. 즉,

$$R_p = \frac{PVG}{PTG} = \frac{\text{綠色時間에 到着하는 總 交通量에 대한 比}}{\text{週期에 綠色時間이 차지하는 比}} \quad (6)$$

式 (6)에서는 車輛群比( $R_p$ )를 綠色時間內的 相對的 交通密度를 나타낸다. 1이라는 相對的 密度에서 車輛群은 無作爲하게 到着하며 그것의 相對的 遲滯 또한 1이다. 따라서 綠色時間內的 相對的 密度는 車輛群比라 하며 相對的 遲滯는 連動化補正係數라 한다.

여기서 PVG는 實測에서 얻어지며 PTG는 實測이나 計算上에서 얻어진다. 이것은 連動化의 概念과 直接的으로 關聯이 있으며 實測과 模擬實驗을 통해 試驗되었다. 또한 車輛群比( $R_p$ )의 값들을 이용하여 5가지 到着形態를 區分하였다. 아래의 表 2는 到着形態와 車輛群比( $R_p$ )의 關係를 나타낸 것이다.

이와 아울러 Passer II의 遲滯理論을 사용하여 遲滯豫測을 위한 새로운 連動化補正係數를 만들었다. 이와같은 段階를 거쳐서 1985년 美國道路容量

便覽에서는 다음의 表 3과 같은 최종적인 連動化補正係數를 算出하였다.

美國 道路容量便覽(HCM)에서는 이러한 과정을 통하여 連動化補正係數가 算出되었고 이는 實質遲滯의 模型에서 算出된 車輛當 平均停止遲滯의 比로 나타나게 된다.

## 2.2 韓國道路容量便覽(KOREA HCM)의 경우

韓國道路容量便覽(KHCM)에서는 시뮬레이션 모형인 TRAF-NETSIM을 사용하여 連動化補正係數를 算出하였는데 시뮬레이션에 사용된 街路網構造는 5개의 結節點(Node)와 12개의 假結節點(Dummy

表 2. 到着形態와 車輛群比와의 關係

到着形態	車輛群比( $R_p$ )의 範圍
1	≤0.50
2	0.51~0.85
3	0.86~1.15
4	1.16~1.50
5	>1.50

자료 : 1985 美國道路容量便覽(HCM)

表 3. 1985 美國道路容量便覽(HCM)에 따른 連動化補正係數(PF)

Type of Signal	Lane Group Type	v/c Ratio, X	Arrival Type				
			1	2	3	4	5
Pretimed	TH, RT	≤0.6	1.85	1.35	1.00	0.72	0.53
		0.8	1.50	1.22	1.00	0.82	0.67
		1.0	1.40	1.18	1.00	0.90	0.82
Actuated	TH, RT	≤0.6	1.54	1.08	0.85	0.62	0.40
		0.8	1.25	0.98	0.85	0.71	0.50
		1.0	1.16	0.94	0.85	0.78	0.61
Semiactuated	Main St.	≤0.6	1.85	1.35	1.00	0.72	0.42
		0.8	1.50	1.22	1.00	0.82	0.53
		1.0	1.40	1.18	1.00	0.90	0.65
Semiactuated	Side St.	≤0.6	1.48	1.18	1.00	0.86	0.70
		0.8	1.20	1.07	1.00	0.98	0.89
		1.0	1.12	1.04	1.00	1.00	1.00
All LT		All	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

자료 : 1985 美國道路容量便覽(HCM)

Node), 12개의 유입결절점(Entry Node), 16개의 링크(Link)를 가지며, 아래의 圖 1와 같이 표현된다.

圖 1의 構造는 여러 개의 交叉路를 갖는 幹線道路의 形態를 고려함으로써 하나의 링크만을 고려한 構造보다 現實性을 가지며, 하나의 링크에 의한 連動化는 여러 개의 링크가 맞물렸을 때 進行對比에 대한 고려가 부족하므로 링크의 수를 增加시켜 각 링크에서의 停止遲滯를 算術平均하게 된다.

결과적으로 韓國道路容量便覽은 시뮬레이션 패키지인 TRAF-NETSIM을 이용하여 첫째, 信號交叉路上에서의 停止遲滯를 算定하고, 둘째, 이에 따른 連動化補正係數를 美國道路容量便覽의 방식에 의하여 구하였으며, 셋째, 각 變數에 따른 連動化補正係數를 模型化하였다. 美國道路容量便覽 및 제 2의 待機行列(Secondary Queue)에 의한 방식에 대해 提示하였던 矛盾을 다음과 같이 解決하였다.

- 1) 連續의인(Continuous) 模型을 導出함으로써 現實의 각 狀況에 대해 敏感하게 反應한다.
- 2) 시뮬레이션을 利用하므로써 第2의 待機行列에 의한 방식에서 제시하였던 接近遲滯와 停止遲滯의 관계에 대해 補正할 수 있다.
- 3) 시뮬레이션상에서 第2의 待機行列에 대해 고려하였다.
- 4) 畝셀, 링크 길이, 飽和度를 고려함으로써 車輛群比에 대해 反應한다.

한편 韓國道路容量便覽(KHCM)에서는 KOTI(Korea Transport Institute) 遲滯模型을 提示하였는데 이 模型은 理論的 側面에서 既存模型의 向上을 기하기 보다는 Akcelik<sup>(7)</sup>의 遲滯模型에서 母數(Parameter)를 調整하여 開發된 것으로 보인다.

Akcelik<sup>(7)</sup>의 一般化된 遲滯式은 다음과 같다. 즉,

$$d = \frac{0.5 \times C \times (1 - g/C)^2}{(1 - g/C \times X)} + 900TX^n \times [(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + m(X - X_0)/cT}] \quad (7)$$

- 여기서 d : 平均接近遲滯(Approach Delay)  
 C : 信號週期  
 c : 交叉路의 容量  
 X : 飽和度(v/c)  
 a, b, m, n : 母數(Parameters)  
 X<sub>0</sub> : Overflow Delay가 발생하는 臨

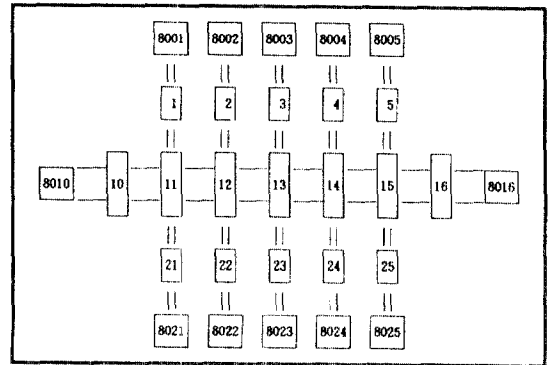


圖 1. 시뮬레이션에 사용된 街路網 構造.

초의 飽和度(= a + bsg)

s : 飽和交通流率(대/초)

g : 有效綠色時間(초)

위의 遲滯度算出 一般式은 4개의 母數(a, b, m, n)를 包含하는데 Akcelik의 遲滯模型은 n, m이 각각 0과 8이고 a는 0.5, b는 0이고 미국의 遲滯式은 n, m이 각각 2와 4이고 a, b는 모두 0인 경우이다. 한국의 遲滯模型은 n, m이 각각 0과 3이고 a, b는 모두 0인 경우로 韓國道路容量便覽에서 提示하는 최종적인 KOTI 遲滯模型은 아래의 式 (8)과 같다.

$$d = \frac{0.38 \times C \times (1 - g/C)^2}{(1 - g/C \times X)} + \frac{173 \times [(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + (12X/c)}]}{\quad} \quad (8)$$

### 3. 連動化補正係數의 分析模型

#### 3.1 連動化補正係數의 適用

連動化補正係數를 모든 遲滯公式(均一遲滯와 附加遲滯)에 적용할 것인지 아니면 附加遲滯項을 除外하고 均一遲滯에만 適用할 것인지에 대해서는 불확실하다. 아래의 圖 2는 2개의 차선, 週期的 길이(C)가 130초, 有效綠色比(g/C)가 0.51, 飽和交通流率(s)이 4147 pcphg, 飽和度(v/c)는 0에서 1.2까지 경우에 대해 遲滯의 變化를 圖式化한 것으로 飽和度가 0.6까지는 附加遲滯의 影響은 무시할 수 있으나 0.8 이상이 되면서 급격히 增加함을 보이고 있다.

그리고 아래의 圖 3는 주기가 130초이고 有效 녹색비(g/C)가 0.51인 경우에 있어서 連動化補正係數

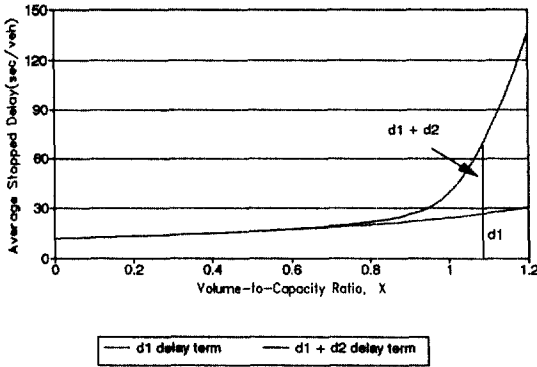


圖 2. 飽和度(v/c)에 따른 HCM(1985) 遲滯.

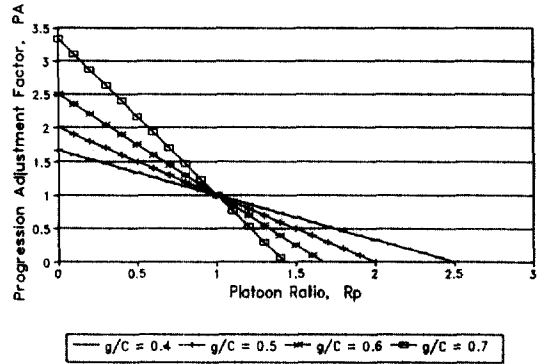


圖 4. 連動化補正係數와 車輛群比와의 關係.

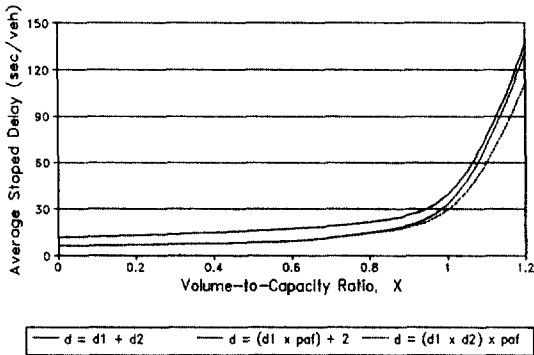


圖 3. TYPE 5에 대한 連動化補正係數에 따른 HCM (1985) 遲滯.

를 적용하지 않거나 혹은 均一遲滯에만 적용하고 혹은 모든 遲滯에 적용한 경우 3가지에 대한 結果를 보인 것으로 飽和度가 0.8 이하인 경우는 거의 비슷하며 0.8과 1.0 사이의 경우에는 차이가 있으며 1.0 이상의 경우에 대해서는 급격한 差異를 보이고 있다.

美國道路容量便覽(HCM)의 遲滯公式에서 均一遲滯는 週期(Cycle)當 均一한 흐름(Uniform Flow)으로 인한 遲滯를 설명한다. 따라서 連動에 의한 車輛群의 흐름은 각 주기당 均一(Uniform)하다는 假定을 세울 수 있다. 均一한 흐름(Uniform Flow)이 遲滯에 미치는 影響을 考慮하기 위하여 連動化補正係數를 適用해야 한다. 따라서 補正係數는 交通量(Volume)의 影響을 크게 받지 않는다. 만약 任意到着(Random Arrival)에 의한 또 다른 遲滯를 補正해야 한다면 飽和度(v/c)가 0.8 이상이 될 때 交通量의 變化에

따른 補正係數의 定義도 아울러 필요하게 될 것이다.

### 3.2 車輛群比(Rp)의 適用

현재 美國道路容量便覽에서 連動化를 考慮하기 위하여 定義되는 車輛群比(Rp)는 Rp=1이면 均일한 교통류이고 이때의 補正係數(PF)는 1.0의 값을 갖는다. 또한 Rp<1일 때 PF의 수치는 1.0보다 크고 Rp>1일 때 PF의 수치는 1.0보다 적게 된다. 그러나 Rp는 最大·最小의 限界値가 없다. 그러므로 이 값은 交通狀況이나 그 周邊環境에 따라 影響을 받게 되므로 一般化된 連動化를 考慮할 수 없게 된다.

만약 車輛群比를 한 週期の 平均 交通率(q)과 綠色顯示에 到着率(qg)와의 比로서 表現한다면 Rp가 許容되는 實際의인 範圍를 利用하여 限界를 定할 수 있게 된다.

$$R_p = \frac{PVG}{PTG} = \frac{\left[ \frac{q_g \cdot g}{q \cdot C} \right]}{g/C} = \frac{q_g}{q}$$

$$= \frac{q_g}{X \cdot s \cdot g/C} = \frac{q_g}{X \cdot s \cdot \lambda} \quad (9)$$

즉, qg는 一般의으로 s(飽和交通流率)를 超過할 수 없다(qg≤s) 또한 q는 s·(g/C)를 超過할 수 없다. 一般的으로 Rp는 qg가 增加할수록 커지며 이런 增加推移는 X와 λ에 의해서 制限받게 된다. Rp의 範圍를 살펴보면 X=1일 때 0≤Rp≤1/λ이 된다. 여기서 Rp는 美國道路容量便覽이 제시한 것보다 크거나 작을 수 있다고 가정할 수 있다. 또한 精確한 境界條件은 λ에 의해서 影響을 받는다. 아래의 圖 4는 λ가

0.4에서부터 0.7까지의 경우를 고려하여 도식화한 것이다.

### 3.3 綠色時間에 到着하는 總交通量에 대한 比

$R_p$ 의 범위가  $0 \leq R_p \leq 1/\lambda$ 라는 것은 사실은 현재 定義하고 있는  $R_p$ 는 連動化의 程度를 나타내는 확실한 指標로서 역할을 하지 못한다는 의미가 된다. 왜냐하면  $R_p$ 의 許容範圍는 대상지역의 特性에 따라 달리 나타날 수 있기 때문이다. 즉, 대상 접근로의 有效綠色比( $g/C$ )와 飽和度( $v/c$ )에 따라 許容範圍가 달라진다는 것을 의미하기 때문이다.

그러나 만약  $P = R_p \cdot \lambda$ 로 定義하면  $P$ 의 값은 항상 일정하게 0과 1.0 사이를 나타내게 된다.  $P$ 라는 새로운 變數는 현재 美國道路容量便覽의 綠色顯示에 到着하는 交通量의 總 交通量에 대한 比(PVG)와 같게 된다. 車輛群比와  $P$ 값의 關係를 再整理하면 현재 美國道路容量便覽에서 連動化補正係數를 구하기 위하여 必要的 情報가 必要하게 된다. 아래의 圖 5은  $P$ 값과 連動化補正係數와의 關係와 車輛群比와  $P$ 값의 關係를 圖表化한 것이다.

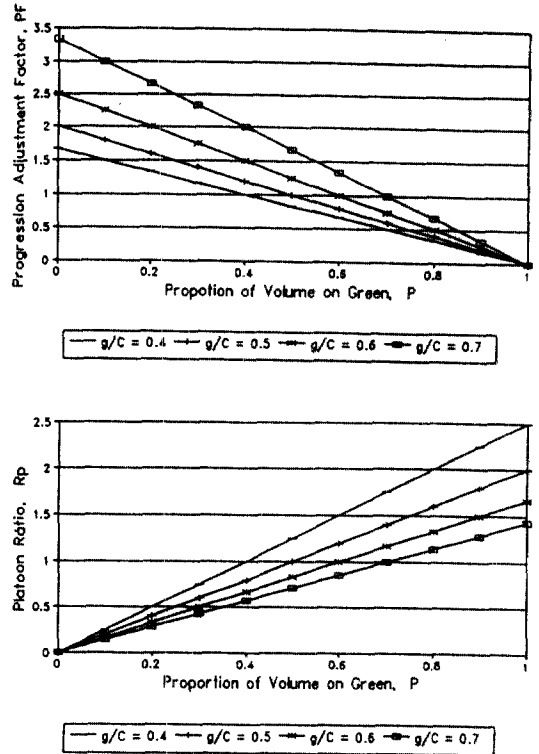


圖 5. 連動化補正係數 및 車輛群比와  $P$ 값의 關係.

### 3.4 連動 및 遲滯 解析模型(Progression-Delay Model)의 開發

NCHRP 339 보고서에 제시된 遲滯公式과 連動化補正係數 유도과정을 고려하여 연동 및 지체에 관한 모형을 제시하면 아래와 같다.

$$C = r + g \quad (10)$$

$$q \cdot C = r \cdot q_r + g \cdot q_g \quad (11)$$

- 여기서  $C$  : 週期(Cycle Time)
- $g$  : 有效綠色時間(초)
- $r$  : 有效赤色時間(초)
- $q$  : 平均 交通流率(대/초)
- $q_g$  : 綠色時間 동안의 平均 交通流率(대/초)
- $q_r$  : 赤色時間동안의 平均 交通流率(대/초)

여기서  $q$ 로 나누면,

$$C = \frac{q_r}{q} \cdot r + \frac{q_g}{q} \cdot g \quad (12)$$

여기서 전체를  $C$ 로 나누면,

$$1 = \frac{q_r \cdot r}{q \cdot C} + \frac{q_g \cdot g}{q \cdot C} \quad (13)$$

$$\therefore 1 = PVR + PVG \quad (14)$$

여기서 PVG : 綠色時間에 到着하는 總 交通量에 대한 比

PTG : 週期에 綠色時間이 차지하는 比

$$R_p = \frac{PVG}{PTG} = \frac{\left[ \frac{q_g \cdot g}{q \cdot C} \right]}{g/C} = \frac{q_g}{q}$$

$$= \frac{q_g}{X \cdot s \cdot g/C} = \frac{q_g}{X \cdot s \cdot \lambda}$$

$$P = R_p \cdot \lambda = \frac{q_g \cdot g}{q \cdot C} = PVG를 이용하면,$$

$$q_g = \frac{P}{\lambda} \cdot q \text{와 } q_r = \frac{1-P}{1-\lambda} \cdot q \quad (15)$$

一般的으로 遲滯는  $P$ 가 1.0에 가까울 수록 減少한다.

즉, 綠色信號에 도착하는 交通量이 많아지고 赤色信號에 도착하는 交通量이 적다는 意味이다.

總遲滯(D)는 위 圖 6의 三角形 面積과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \left[ r \cdot (q_r \cdot r) + (q_r \cdot r) \cdot \frac{q_r \cdot r}{s - q_g} \right] / 2$$

$$= \frac{q_r \cdot r^2}{2} \left[ 1 + \frac{q_r}{s - q_g} \right] \quad (16)$$

여기서 車輛當 平均遲滯(d)를 구하기 위해서 總遲滯에  $q \cdot C$ 로 나누면

$$d = \frac{q_r \cdot r^2}{2 \cdot q \cdot C} \left[ 1 + \frac{q_r}{s - q_g} \right] \quad (17)$$

여기서  $r = C(1 - \lambda)$ 를 식 (17)에 代入하면

$$d = \frac{C}{2} \cdot (1 - \lambda)^2 \cdot \left[ 1 + \frac{q_r}{s - q_g} \right] \cdot \frac{q_r}{q} \quad (18)$$

여기서  $q_r$ 과  $q_g$ 가 均一하다면  $q_r = q_g = q$ 이다. 따라서

$$d_u = \frac{C}{2} \cdot \frac{(1 - \lambda)^2}{1 - y} \quad (19)$$

위의 공식은 Webster 공식의 첫번째항과 같다. 그리고 식 (18)에서 식 (19)를 代入하면

$$d = \frac{C}{2} \cdot (1 - \lambda)^2 \cdot \left[ 1 + \frac{q_r}{s - q_g} \right] \cdot \frac{1 - P}{1 - \lambda}$$

$$= \frac{C}{2} \cdot (1 - \lambda) \cdot \left[ 1 + \frac{q_r}{s - q_g} \right] \cdot (1 - P)$$

$$= \frac{r}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{q_r}{s - q_g} \right] \cdot (1 - P) \quad (20)$$

여기서  $q_r = q_g = q$ 이고  $1 - P = 1 - \lambda$ 를 代入하면

$$d_u = \frac{r}{2} \cdot \frac{1 - \lambda}{1 - y} \quad (21)$$

따라서 總 平均遲滯( $d_{total}$ )는 다음과 같다.

$$d_{tot} = (d_u \cdot PF) + d_i \quad (22)$$

이고 여기서  $d = d_u \cdot PF$ 라 하고 식 (20)과 식 (21)를 代入하면

$$\frac{r}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{q_r}{s - q_g} \right] \cdot (1 - P) = \frac{r}{2} \cdot \frac{1 - \lambda}{1 - y} \cdot PF$$

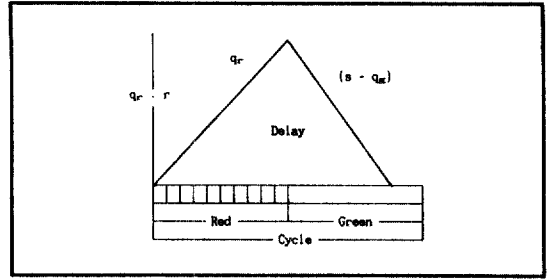


圖 6. 接近 叉路에서의 總遲滯.

따라서 PF는 다음과 같이 算出된다.

$$PF = \frac{1 - P}{1 - \lambda} \cdot \left[ 1 + \frac{q_r}{s - q_g} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{q}{s} \right] \quad (23)$$

위의 PF 공식을 簡略化하면

$$PF \approx \frac{1 - P}{1 - \lambda} \quad (24)$$

$$\therefore d = d_u \cdot PF = \frac{r}{2} \cdot \frac{1 - \lambda}{1 - y} \cdot \frac{1 - P}{1 - \lambda}$$

$$= \frac{r}{2} \cdot \frac{1 - P}{1 - y} \quad (25)$$

여기서 PF에 X는 影響을 미치지 못하며(단,  $X \leq 1.0$ ) 影響을 주는 요소는 有效綠色比( $g/C$ )이다. 따라서 구하고자 하는 차량當 平均停止遲滯(d)는 아래의 식 (26)와 같다.

$$d = \frac{r}{2} \cdot \frac{1 - P}{1 - y} + 173X^2 \times [(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + (16X/c)}] \quad (26)$$

여기서 d : 平均接近遲滯(Approach Delay)

c : 叉路의 Capacity

X : 飽和度( $v/c$ )

y : 交通量과 飽和交通流率과의 比( $v/s$ )

P : 綠色時間에 到着하는 總交通量에 대한 比(PVG)

s : 飽和交通流率( $vp_{sg}$ )

$\lambda$  : 綠色時間 對 週期の 比( $g/C$ )

y : 交通量과 飽和交通流率의 比( $v/s$ )

$d_u$  : 平均到着率을 假定한 均一遲滯(초/대)



#### 4. 模擬實驗(Simulation)結果의 分析

NCHRP 339<sup>(3)</sup>에서 信號의 連動(Progression)에 影響을 미치는 變數들 사이의 關係를 糾明하기 위해 PasserIII-88<sup>(16)</sup>과 T-7F(TRANSYT-7F)<sup>(17)</sup>를 통한 실험을 하였다. 먼저 PasserIII-88는 Platoon Dispersion의 影響을 考慮하지 않고서 信號時間에 필요한 파라메타와 다른 交通量의 影響을 考慮하기 위하여 사용되었다. 그 다음에 T-7F를 사용하여 交叉路의 길이를 變化시키거나 交通量에 따른 Platoon Dispersion과 PasserIII-88에 의해 얻어진 신호시간계획(Signal Setting)에 대한 세밀한 影響을 考慮하였다.

##### 4.1 模擬實驗의 接近方法

앞에서 언급한 바와 같이 Platoon Dispersion의 影響을 考慮하지 않고 PasserIII-88를 사용하여 우선 서로다른 交通量과 信號時間에 필요한 파라메타들의 影響을 考慮하였다. 여기서 검토된 서로 다른 交通量의 影響을 考慮하기 위한 方法은 飽和度(v/c)를 0.2에서 1.0까지 0.2씩 增加시키고 週期의 길이(C)를 60, 75, 90, 120초씩을 각각 適用하고 有效綠色比(g/C) 또한 0.5, 0.7, 0.9를 適用하였다. 따라서 60개의 조합의 경우(5 v/c×4 주기길이×3 g/C)는 각각 10개의 서로다른 Offset값에 의해 評價되었다. 그러므로 總 600개의 서로 다른 條件들이 研究되었다.

한편 PasserIII-88에 의해 결정된 信號의 길이, 交通量에 따른 Platoon Dispersion Rate와 隣接交叉路의 距離에 대한 影響을 考慮하였다. 또한 通行時間은 20, 40, 80, 120초를 考慮하였고 이런 通行時間은 交叉路 間隔이 400 ft 이하에서 5000 ft 이상되는 경우를 考慮한 것과 같은 것이다. PasserIII-88와 T-7F에 의해 考慮된 여러 조건에 대하여 連動化補正係數는 하류부 交叉路에서 얻는 實驗結果의 遲滯와 美國道路容量便覽에 따른 遲滯와의 比率에 의해 얻어진 것이다.

PasserIII-88은 한 交叉路에서 다른 交叉路까지 車輛群이 通行할때 Dispersion이 없는 것으로 간주하며 綠色에 도착하는 交通量의 비율이 2개의 信號交叉路 사이의 가능한 모든 Offset값에 대한 遲滯를 얻을 수 있다. 그러나 T-7F에서는 車輛群은 가로망을 따라서 車輛群의 크기와 通行時間에 대한 函數로서 Dispersion 한다는 假定을 전제로 하고

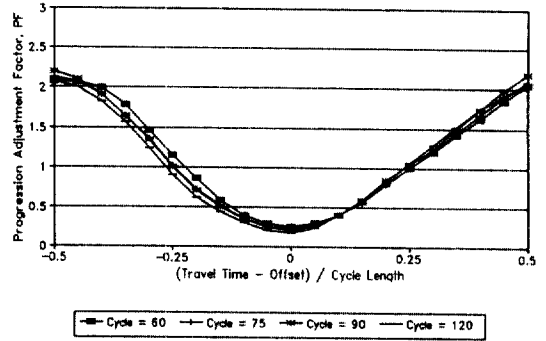


圖 7. PasserIII-88 實驗結果(週期길이).

있으며 이 比率은 入力資料로 處理된다. 그러므로 PasserIII-88의 結果를 사용하여 Platoon Dispersion을 考慮하지 않고서 信號時間과 交通量의 影響을 따로따로 연구할 수 있다.

##### 4.2 敏感度 分析(Sensitivity Analysis)

敏感度 分析過程에서는 週期의 길이, 綠色時間, 交通量, 通行時間과 같은 變數들이 連動化補正係數에 미치는 影響을 考慮하게 된다.

###### 4.2.1 週期의 길이(Cycle Length)

우선 PasserIII-88를 사용하여 週期의 길이에 따른 連動化補正係數에 미치는 影響을 考慮한 結果 아래의 圖 7과 같다.

위의 그림에서 水平軸은 通行時間과 Offset값의 차이를 週기로 나눈 값이고 垂直軸은 實驗된 連動化補正係數로 連動化된 到着(Progressed Arrival)으로 인한 遲滯를 均一到着(Uniform Arrival)으로 인한 遲滯로 나눈 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 週期의 길이에 대한 變化는 극히 微弱한 것으로 판단된다. 결과중에서 水平軸에서 완전한 信號의 連動(값이 0인 경우)상태에서 양측으로 멀어져갈수록 곡선기울기가 서로 다르기 때문에 PF값이 달라지고 따라서 상대적인 停止遲滯의 크기도 달라진다는 사실을 알 수 있다.

즉, 綠色信號가 시작하기전 週期의 0.5比率에 도착하는 車輛群의 遲滯는 똑같은 週期의 比率로서 綠色信號가 시작된 후 到着하는 차량의 遲滯보다 작다. 이것은 車輛群의 到着이 綠色信號가 시작하기 전인지 혹은 後인지에 따라서 서로다른 平均遲滯값을 가질 수 있다는 뜻이 된다.

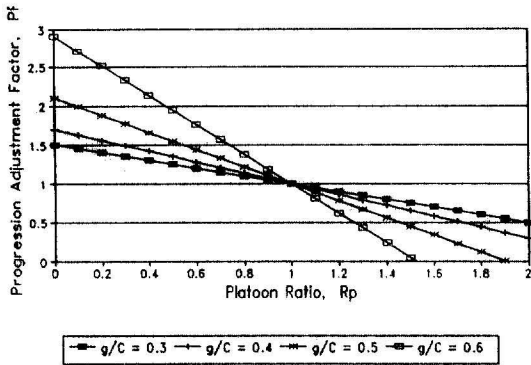


圖 8. PasserIII-88 實驗結果(色時間과 車輛群比).

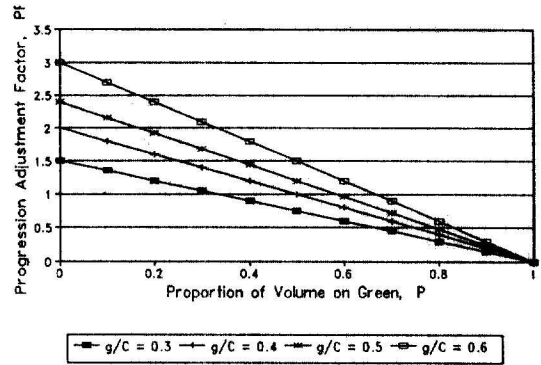


圖 9. PasserIII-88 實驗結果(色時間과 PVG값).

#### 4.2.2 綠色時間(Green Time)

그 다음 PasserIII-88를 이용하여 綠色時間의 變化에 따른 連動化補正係數에 미치는 影響을 考慮하면 아래의 圖 8에서와 같은 結果를 얻을 수 있다. 圖 8은 綠色時間 혹은 有效綠色比( $g/C$ )에 따른 結果를 圖表한 것이다.

위의 그림에서 水平軸은 實驗된 車輛群比( $R_p$ )이고 垂直軸은 連動化補正係數를 의미하며 車輛群比가 增加할수록 連動化補正係數는 減少한다. 그리고 有效綠色比의 값이 클수록 補正係數의 範圍가 커짐을 알 수 있다. 또한 車輛群比를 PVG값으로 변환하여 다시 算出하면 아래의 圖 9과 같고 이 結果는 提案된 模型에서 PVG값이 일정한 境界條件( $0 \leq PVG \leq 1$ )을 가진다는 것을 설명하는 과정에서 圖式化한 그림과 같다. 특히 위의 경우와 마찬가지로 有效綠色比가 增加함에 따라 連動化補正係數의 範圍가 增加함을 보이고 있다.

#### 4.2.3 交通量(Traffic Volume)

PasserIII-88를 사용하여 서로다른 交通量에 따른 連動化補正係數에 미치는 影響을 考慮하면 圖 10의 結果를 가져 온다. 圖 10에서 보면 連動化補正係數가 均一遲滯에 적용될 경우 交通量의 影響은 거의 없는 것으로 나타났다. 한편 美國道路容量便覽에 제시된 連動化補正係數는 0.6, 0.8, 그리고 1.0에 따라 큰 變化를 보이고 있는데 이는 補正係數를 均一遲滯와 追加遲滯項 모두에 적용함으로써 생긴 結果로 보여진다. 또한 아래의 그림에서 車輛群의 선두가 도착하는 時點이 綠色信號가 시작하는 時點에 가까울수록

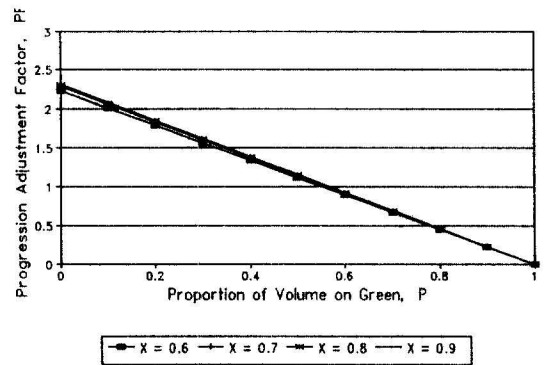


圖 10. PasserIII-88 實驗結果(交通量).

록 綠色에 도착하는 比率이 높아지며 따라서 遲滯는 적어지게 된다.

#### 4.2.4 通行時間(Travel Time)

通行時間은 인접하는 交叉路와의 距離와 通行速度에 대한 函數로 표현이 된다. T-7F를 사용하여 通行時間이 連動化補正係數에 미치는 影響을 考慮하면 圖 11의 結果를 얻을 수 있다. 아래의 圖 11는 通行時間과 綠色時間에 도착하는 總交通量에 대한 比( $PVG : P$ )에 대한 連動化補正係數를 圖表化한 것으로 通行時間이 적을수록 즉, 인접하는 交叉路와의 距離가 짧을수록 連動化補正係數의 範圍는 넓어진다. 이것은 車輛群의 密度가 높고 또한 이 경우에 車輛群이 하류부 交叉路에 도착하는 時點에 따라 平均遲滯에 많은 影響을 미친다는 것을 意味한다. 그와는 반대로 交叉路간의 距離가 멀수록 즉, 인접하는 交叉路와의 距離가 멀수록 補正係數의 範圍는 작아지며 車輛群은 거의 均一한 흐름(Uniform Flow)

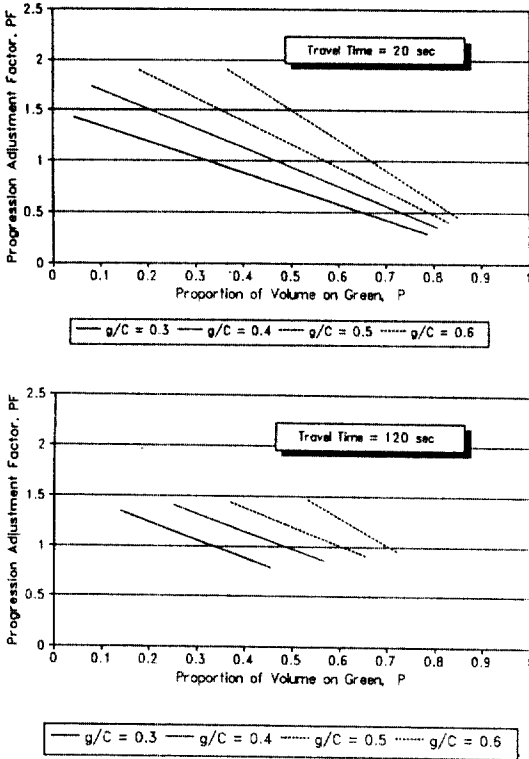


圖 11. T-7F 實驗結果(通行時間).

에 가까워지며 車輛群이 하류부 交叉路에 도착하는 時點은 平均遲滯에 거의 影響을 미치지 않게 된다.

## 5. 結論 및 提議

本 論文에서는 信號燈 連動化에 따른 基礎的인 技術分野에 대하여 言及하였다. 특히 信號燈 交叉路에 있어서의 서비스 水準을 評價할 수 있는 遲滯模型과 連動化에 따른 連動化補正係數(PF) 算出模型에 대하여 集中的으로 分析하여 보았다.

현재의 美國道路容量便覽과 韓國道路容量便覽에서 提示하고 있는 連動 및 遲滯模型과 本 研究에서 提示하고 있는 새로운 PVG(綠色時間에 到着하는 總交通量에 대한 比)를 사용한 連動 및 遲滯模型의 結果를 模擬實驗을 통하여 相互 比較分析을 試圖하므로써 提示한 模型의 實用化 可能性을 또한 檢討하여 보았다.

현재 進行中인 實驗結果에 의하면 1985년 美國 HCM의 模型과 1992년 韓國 HCM의 遲滯模型의

模型遲滯 推定値는 대체로 實質遲滯보다 상당히 높게 나타나고 있다. 이와는 對照的으로 本 研究에서 提示하고 있는 遲滯模型의 結果는 理論的으로 說明한 바와 같이 매우 安定的인 豫測結果를 주고 있다.

앞으로의 信號燈 連動化 研究에서는 아래와 같은 事項에 대하여 留意할 必要가 있다.

첫째, 連動化補正係數는 總遲滯 中 均一遲滯에만 適用하는 問題

둘째, 交叉路 連動化의 質의 水準을 評價하는데 P係數(綠色顯示에 到着하는 總交通量에 대한 比率)의 適用問題

그러나 아직 本 研究에서 提案한 模型이 一般化되기 위해서는 많은 觀測과 妥當性에 대한 研究가 必要할 것으로 생각된다. 이 중 각기 다른 到着形態에 대한 實質的인 連動 및 遲滯分析이 특히 必要하게 될 것이다.

## 感謝의 글

本 研究는 1993年 韓國學術振興財團의 公募課題 研究費에 의해 遂行된 것으로 本 연구를 可能케 한 關係機關에 感謝를 드립니다.

## 參考文獻

1. "Highway Capacity Manual-1985", TRB Special Report 209, Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1985.
2. Olszewski, P.S., "Traffic Signal Delay for Non-Uniform Arrivals" Paper Presented at the 11th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 1990.
3. Daniel, B. Fambro, Edmond, C. P. Chang, Carroll, J. Messer, "Effects of The Quality of Traffic Signal Progression Delay." NCHRP Report 339, Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1991.
4. 건설부, "도로용량편람 연구조사 제3단계 최종보고서", 한국건설기술연구원, 교통개발연구원, 1992. 10.
5. Reilley, W.R., S.L. Bolduc, J.H. Kell, and M.L. Gallagher, "Urban Signalized Intersection Capacity." NCHRP Report 3-28(2), Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1983.

6. Chang, E.C., C.J. Messer, and B.G. Marsden, "Analysis of Reduced Delay and Other Enhancements to PASSER II-80-PASSER II-84", Report 375-1F, College Station, Texas: Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 1984.
7. Akcelik, R., "The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections", *ITE journal*, March 1988, pp. 23-27.
8. 도철용, "교통공학 원론", 청문각, 1989.
9. 최우혁, "신호등 교차로에서의 신호연동보정계수 산출을 위한 새로운 접근방법의 모색", 중앙대학교 대학원 석사학위 논문, 1993.
10. 이철기, "신호등 교차로에서의 지체예측에 관한 연구", 아주대학교 대학원 석사학위 논문, 1991.
11. 김원창, "신호등이 있는 가로망의 신호 연동화보정계수산정모형", 아주대학교 대학원 석사학위 논문, 1992.
12. Roupail, N.M., "Analysis of TRANSYT Platoon Dispersion Algorithm", Transportation Research Record 905, Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1983, pp. 72-80.
13. Prevedouros, P.D., and P.P. Jovanis, "Validation of Saturation Flows and Progression Factors for Traffic Actuated Signals", Transportation Research Record 1194, Washington, D.C., National Research Council, 1988, pp. 147-159.
14. Courage, K.G., C.E. Wallage, and R. Alqasem, "Modeling the Effect of Traffic Signal Progression on Delay." Transportation Research Record 1194, Washington, D.C., National Research Council, 1988, pp. 139-146.
15. Dong-Ik Ha, "A Dynamic Model for Intersection Delay with Time Varying Demand", Polytechnic University, 1992.
16. Fambro, D.B., N.A. Chaudhary, C.J. Messer, and R.U. Garza, "A Report on the User's Manual for the Microcomputer Version of PASSER III-88", Report 478-1, College Station, Texas: Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 1988.
17. Wallace, C.E. et al., "TRANSYT-7F User's Manual", Office of Traffic Operations, Federal Highway Administration, 1983.

(接受 : 1994. 2. 14)