

□ 論 文 □

信號交叉路 遲滯體系 分析方法論 研究

A Design Methodology for Signalized Intersection Delay Systems

河 東 翊

(道路交通安全協會 交通科學研究院 研究委員)

目 次

- | | |
|---------------------|------------------|
| 1. 序論 | 3.4 連動補整 |
| 2. 基存의 遲滯模型 | 4. 遲滯體系 分析方法論 定立 |
| 2.1 非飽和 模型 | 4.1 時推移 分析 |
| 2.2 過飽和 遲滯模型 | 4.2 링크容量 |
| 3. 既存 模型의 問題點 | 4.3 週期別 到着車輛分布 |
| 3.1 Steady-State 解法 | 4.4 連動效果 |
| 3.2 分析時間帶 | 4.5 提案된 分析方法論 |
| 3.3 均一 到着交通流率 | 5. 結論 |

요 약

교차로 지체를 추정하기 위해서는 대기행렬 모형이 적합한데 모든 대기시스템은 시간의 함수로 운영되므로 우리는 분석하고자 하는 시스템이 가변상태인지 또는 안정상태인지를 먼저 결정하여야 한다.

신호화된 교차로에 유입·유출되는 특히 유입교통량은 시간대별 변화가 심하다. 미국 HCM에서는 이를 15분 단위로 분석하도록 제안하였으나 신호교차로 체계의 정밀 분석을 위해서는 만족스럽지 못한 시간단위이다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 시스템이 안정상태가 아닌 가정으로 접근하여야 하며, 더 나아가 Dynamic한 분석이 요구된다. 안정상태의 지체는 Webster를 비롯한 여러 학자들에 의해 광범위하게 연구되어 왔다. 그러나 그들이 갖는 가정은 일반적으로 비현실적이어서 정밀한 지체추정은 실제로 가능하지 않다. 안정상태 가정하에서 해법의 결점은 도착교통량이 용량에 다다를수록 더욱 심하게 되어 비현실적인 지체예측을 하게 된다.

본 논문은 기존 분석방법론의 제반 한계성과 제약성을 검토하고 현실적인 교차로 지체모형을 개발하기 위해 고려되어야 할 변수들을 정립하고자 한다.

1. 序論

信號化 交叉路의 서비스水準을 결정하는 尺度로서는 車輛當 平均 遲滯時間이 주로 사용되고 있다. 그 이유로는 遲滯時間은 經濟的인 價値로 의 換算이 가능하며 또한 運轉者들이 比較的 쉽게, 예를 들면 v/c 率 보다는 서비스 程度를 判斷할 수 있는 尺度라는 장점때문이다¹⁾. 그러므로 交叉路 遲滯度를 現實性 있게 보다 정확히 豫測하는 方法論의 開發은 매우 중요한 것이다.

交叉路 遲滯를 豫測하기 위해서는 數學的으로 待期行列 模型이 사용된다. 待期行列 體系는 時間의 函數이므로 分析對象시스템이 transient狀態인가 steady狀態인가를 먼저 판단하여야 한다. 信號交叉路體系를 steady-state로 假定한 待期行列길이는 그간 많은 研究發表가 있었다. 그러나 信號交叉路體系를 steady-state로 假定하는 것은 一般的으로 非現實的이다. 따라서 既存의 模型은 정확한 遲滯豫測이 어려우며 이 문제는 車輛 到着率이 容量에 接近해 갈수록 더욱 심해진다. 즉, steady-state를 假定한 交叉路遲滯 待期行列模型은 需要가 容量에 거의 接近하면 無限大의 遲滯가 發生할 것으로 豫測하는데, 실제로는 無限大의 遲滯는 存在하지 않는다는 점에서 非現實的의이다.

뿐만아니라 既存 模型들은 分析時間帶에 걸쳐 均一한 分布의 車輛到着率, 즉 stationary한 需要를 假定하여 遲滯를 豫測한다. 그러나 이 假定은 分析時間帶 內에 到着交通率의 變化가 심한 交叉路의 分析에는 적합치 않다. 또한 이런 分析時間帶 內의 到着交通率 變化는 접어두고라도 都市部 交叉路의 경우 車輛到着率은 上流部 交叉路의 青色과 赤色信號의 영향으로 한 信號 週期內에서도 車輛到着率은 현저한 차이를 보이게 되므로 到着車輛率이 均一하다는 假定 또한 제약요인이다.

본 論文은 이러한 既存 模型들의 問題點을 파악하고 이의 改善方案을 모색하고자 하며 이를 위해 信號交叉路 待期行列體系 分析方法論을 새로이 定立하고 現實的이고 정확한 交叉路 遲滯模型을 開發하기 위한 諸 變數들을 考察하고자 한다.

2. 既存의 遲滯模型

2.1 非飽和 模型

2.1.1. Deterministic 模型

交叉路 遲滯는 <그림 2.1>로 說明될 수 있다. 累積到着車輛과 累積出發車輛 두 커브사이의 面積이 總發生遲滯가 된다.

여기서 到着交通率과 出發交通率이 v 와 s 이고 均一分布를 가진다고 假定하면 누적도착차량과 누적출발차량 커브는 直線이 될 것이며 <그림 2.1>에서 각 週期別 總遲滯는 삼각형의 面積이 될 것이다. 이를 한週期에 到着한 車輛數 vC 로 나누면 車輛當 平均遲滯時間이 되는데 이는 다음식으로 표현된다.

$$d = C(1 - \lambda)^2 / 2(1 - \lambda x)$$

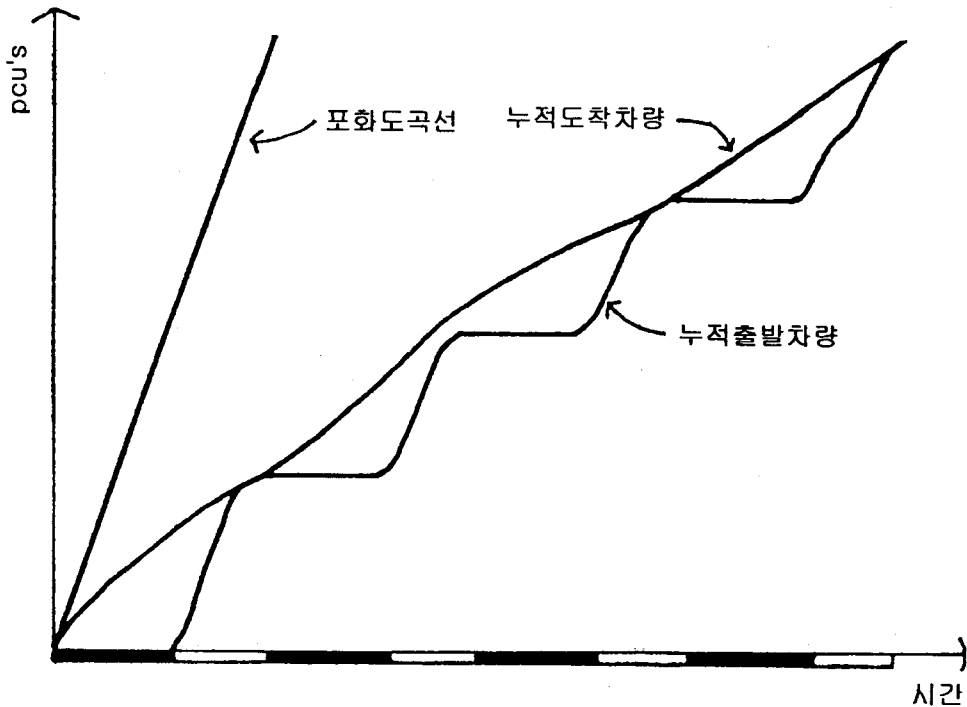
여기서 d = 車輛當 平均遲滯時間(초)

C = 信號週期(초)

λ = g/C (有效綠色時間/信號週期)

X = vC/gs 혹은 v/c (到着交通率/容量)

이 模型에서는 랜덤到着에 의한 영향이나 上流部交叉路의 信號에 의한 到着패턴의 영향이 전혀 반영되지 않는다. 그러나 飽和度가 낮은 狀態에 있는 交叉路遲滯 豫測에는 실제遲滯와 큰 차이가 없으면서도 손쉽게 計算된다는 장점이 있다.



〈그림 2.1〉 信號化 交叉路의 待期行列體系 (參考資料(16)에 基礎하여 作成)

2.1.2 Stochastic 模型

Deterministic한 待期行列 解法에서는 需要가 供給을 超過하지 않는한 遲滯는 없는 것으로 計算된다. 그러나 到着이 혹은 出發이 random한 分布인 경우에는 需要가 供給을 超過하지 않더라도 遲滯는 發生한다. 그러므로 deterministic 模型은 赤信號時間에 의한 遲滯만 豫測하지 random에 의한 遲滯는 고려하지 못하는 限界가 있다. 이를 改善하기 위해 到着이나 出發의, 특히 到着時의 random에 의한 遲滯에의 영향을 計算하기 위한 많은 研究가 이루어졌다.

Webster^[2]는 Poisson 到着率과 uniform 出發車頭時間 間격을 假定하여 遲滯模型을 제안하였는데, 이는 현재 가장 잘 알려져 있고 또한 가장 광범위하게 쓰이는 模型들 중의 하나로서 다음과 같다.

$$d = C(1 - \lambda)^2 / 2(1 - \lambda x) + x^2 / 2v(1 - x) - 0.65(C/v^2)^{1/3} x^{2+5\lambda}$$

첫째항은 均一한 到着과 出發率을 假定한 경우의 遲滯로서 deterministic 模型과 같다.

둘째항은 車輛到着의 random性에 기인하는 遲滯를 고려한 것으로 Poisson 到着과 general 서비스 時間을 假定한 steady-state 待期行列體系에서 平均 待期時間은 Pollaczek-Khintchine 公式로 다음과 같이 표현된다.

$$W_q = [x^2 + v^2 \text{var}(t)] / 2v(1-x)$$

여기서 W_q = 待期行列內에서의 平均待期時間
 $\text{var}(t)$ = 서비스時間 t 의 分散.

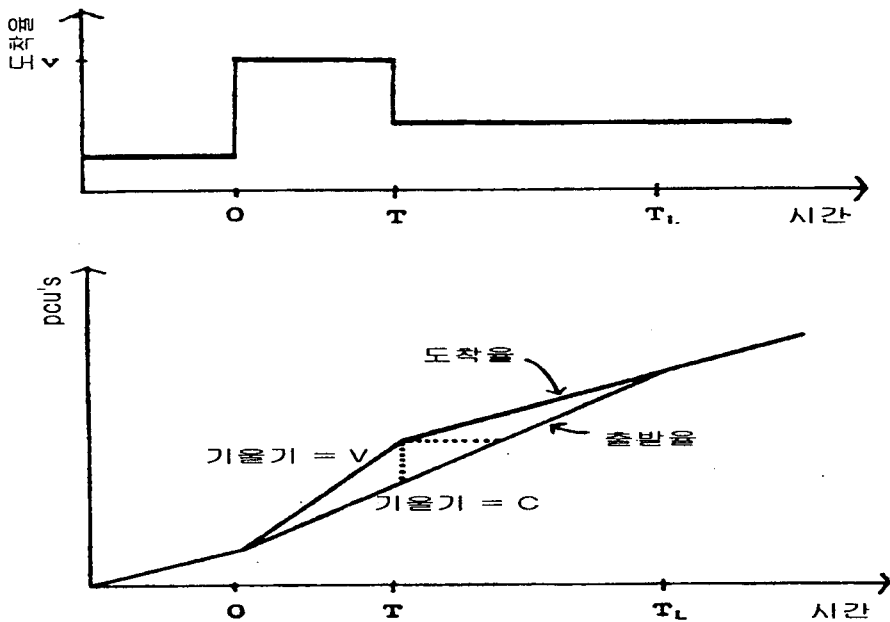
이 식에서 분산이 0, 즉 uniform한 서비스시간 분포를 假定하면 Webster公式의 두번째항이 된다. 셋째항은 보정항으로서 첫째와 둘째항의 합은 실제보다 다소 過大豫測한다고 分析되어 이를 감하기 위한 항이다. 그는 세번째항은 全體 豫測된 遲滯의 5~15% 程度라고 發表하였다.

Steady-state stochastic 模型은 到着交通量이 交叉路容量을 超過하면 計算이 불가능하다. 또한 到着交通量이 交叉路容量에 이르면 遲滯는 無限大로 發生한다고 豫測한다. 그러나 실제에 있어서는 一時的이나마 容量을 超過한 需要가 發生할 수 있다. 또한 無限大의 遲滯 역시 存在하지 않는다. 즉 대부분의 경우 到着交通量이 容量에 이르는 水準으로 長時間에 걸쳐 持續적으로 發生하지는 않는다. 실제 遲滯는 이러한 持續적인 높은 到着交通率에 의한 영향보

다는 一時的으로 發生된 過飽和 혹은 近飽和 水準의 需要에 의해 發生된 遲滯에 의해 유발된 여건變化, 혹은 해소과정상에서 심각해지는 것이 一般的이다. 또한 심한 遲滯로 긴 待期行列이 發生한 交叉路의 경우 上流部 交叉路에서의 到着交通量이 제약을 받게 되는데 steady-state 假定은 이를 전혀 반영하지 못한다. 또한 심한 遲滯가 發生한 경우 車輛들은 우회경로를 찾아 需要가 전환되거나 혹은 需要白體가 減少되어 실제로는 無限大라고 표현될 만큼의 遲滯는 거의 發生되지 않는다.

2.2 過飽和 遲滯模型

過飽和狀態에서는 需要가 변하지 않는다면 待期行列은 時間에 정비례하여 增加하게 된다. 매우 非現實的인 假定이지만 <그림 2.2>와 같은



<그림 2.2> $v/c > 1$ 境遇의 過飽和遲滯(overflow delay) (參考資料 [1]에서 引用)

需要がある 경우, 時間 0 이전에는 過飽和遲滯(overflow delay)가 거의 무시될 수 있을 정도로 작은 到着交通率의 需要가 있다. 過飽和遲滯(overflow delay)라 함은 random性에 의해서 혹은 過飽和 需要에 의해 해당 信號週期에 처리되지 못한 待期行列에 의해 發生되어 다음 信號週期에 넘겨지는 遲滯를 말한다. 時間 0 에서 T까지의 尖頭時의 需要는 v 이고 時間 T 이후에는 그 보다 적은 非飽和狀態의 需要가 있는 경우를 假定해 보자.

〈그림 2.2〉에서 發生된 삼각형의 遲滯는 過飽和遲滯(overflow delay)中 random性에 의해서 發生된 遲滯를 제외하고 오직 過飽和需要에 의한 遲滯만을 반영한다. 總遲滯는 이 過飽和遲滯(overflow delay)에 $v/c = 1$ 일 경우의 遲滯를 추가하여 算出한다. 이 삼각형의 面積은 간단히 計算된다^[4]. 時間 0 이나 時間 T_L 에 到着하는 車輛은 過飽和遲滯(overflow delay)를 겪지 않는다. 時間 T에 到着하는 車輛은 수평의 점선만큼 遲滯된다. 따라서 時間 0 에서 時間 T까지 到着한 車輛의 遲滯時間 平均은 수평의 점선길이의 절반이다. 즉 時間 0 에서 時間 T_L 까지 到着한 車輛의 過飽和遲滯(overflow delay) d_{of} 는 수평의 점선길이의 절반이다.

한편 수직의 점선 길이는 時間 0에서 T까지의 到着率 v 와 出發率(정확히는 出發率이 아니라 容量임) c 사이의 차이로서 $vT - cT = (v - c)T$ 이다. 또한 이 길이는 出發率 c 로 수평의 점선 길이 동안(平均 過飽和遲滯(overflow delay)의 2배) 生成된 車輛數이기도 하다. 이 두식을 같다고 놓으면 平均 過飽和遲滯(overflow delay) d_{of} 는 다음과 같다.

$$d_{of} = (T/2)[(v-c)/c] = (T/2)[(v/c)-1].$$

이 過飽和遲滯(overflow delay)는 尖頭時間길

이 T에 정비례하고 $[(v/c)-1]$, 즉 過飽和의 程度에 정비례한다. 이 模型도 random性의 영향을 반영 못한다. 待期行列이 매우 길때는 相對的으로 random에 의한 遲滯는 매우 적으므로 큰 문제는 되지 않으나 過飽和 程度가 적을 때에는 random 영향의 무시로 인한 誤差는 보다 커지게 된다^[4].

2.3 補整模型

2.3.1. 誤差 補整模型

TRANSYT은 幹線道路 信號最適化 模型으로 가장 널리 쓰이는 模擬實驗 프로그램이다. 그 중 遲滯를 計算해 내는 알고리즘은 다음과 같은데 여기서 T의 單位는 分, 그리고 v 와 c 는 vph이다. dof는 過飽和遲滯(overflow delay)로서 이를 uniform 遲滯와 합산하면 總遲滯가 算出된다^[5].

$$d_{of} = (15T/c)[(v-c) + \sqrt{(v-c)^2 + 40v/T}]$$

또다른 유사한 公式이 호주의 Akcelik[6]에 의해 開發되었는데 다음과 같다. 여기서의 時間單位는 TRANSYT 公式과 다르게 分으로만 한정되지 않고 秒로도 쓸 수 있다.

$$d_{of} = \{T/4[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + 12(x-x_0)/cT}], \\ x > x_0 \text{ 경우, } 0, \text{ 기타 경우}$$

여기서 $x_0 = 0.67 + sg/600$ 이다.

2.3.2 停止遲滯 補整模型

Reilly는 10개의 交叉路를 對象으로 分析한 結果 車輛當 停止遲滯(stopped delay)는 接近遲滯(approach delay)의 76%라고 發表하였다^[7]. 이 結果를 기초로 하면 停止遲滯는 算出된 接近遲

滯에 0.76을 곱함으로써 補整할 수 있는데 1985년 美國 HCM은 이를 適用하는 한편 몇 개의 研究機關^[10]이 共同研究하여 다음과 같은 停止 遲滯 模型을 開發하였다.

$$d = 0.38C(1 - \lambda)^2 / (1 - \lambda x) + 173x^2 [(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + 16x/c}]$$

첫번째 항은 uniform 遲滯公式을 停止遲滯로 환산한 것이고 두번째 항은 15분간의 遲延遲滯를 나타낸다. 그러나 이는 數學的 模型은 아니

고 실제 經驗的인 遲延遲滯에 근접하는 값을 算出하기 위해 단지 數理的인 表現을 한 것에 불과하다. Akcelik^[10]은 호주 및 캐나다模型, 그리고 TRANSYT-8과 1985 美國 HCM 方式은 동일한 變數들을 사용하며 단지 각 變數들의 計數나 조합을 조정한 것에 불과하다고 밝히고 있다. 또한 그는 호주 方式이나 TRANSYT-8 公式에 비해 美國 HCM 方式이 v/c가 증가함에 따라 과도한 遲滯를 豫測하여 v/c = 1.20 경우에는 41%나 높게 豫測한다고 發表하기도 하였다.

<表 2.1> TRANSYT과 美國 HCM 模型의 比較

遲滯 種類	TRANSYT	HCM
Uniform 遲滯	· 上流部 交叉路에서 보내진 到着 車輛率은 週期內 각 單位時間別로, 예를들면 週期內 60單位時間別로 換算되어 分析된다. 赤色 信號時間동안 쌓인 待期行列은 綠色時間에 出發시키며 單位時間別 車輛움직임을 豫測한다.	· 車輛當 平均 均一遲滯는 均一 車輛到着 및 出發率을 가정하여 계산한다. 주변 交叉路의 信號燈 영향은 고려하지 못한다.
Random 및 過飽和遲滯	· 公式은 다소 차이가 나지만 둘 다 經驗적으로 얻어진 값을 나타내는 數式으로 산출한다. 두 경우 다 飽和程度가 遲滯에 미치는 영향이 가장 큰 變數로 작용한다.	
連動效果	· TRANSYT에서는 連動補整 작업이 없다. 단지 uniform 遲滯 算定時 上流部 交叉路에서 流入되는 到着車輛率을 해당 交叉路에서 單位時間別로 分析하여 連動效果를 반영한다.	· 連動의 정도를 5개 水準으로 분류하였다. 그리하여 해당 交叉路의 水準을 평가하는데 예를 들면 전체 到着交通量중 綠色時間에 到着하는 交通量의 比率 등으로 정도를 판단한다.
連動補整係數		· 補整係數는 5개 水準別로 그리고 飽和程度別로 구분하여 제안되어 해당되는 計數를 산출된 停止遲滯에 곱하여 補整한다.

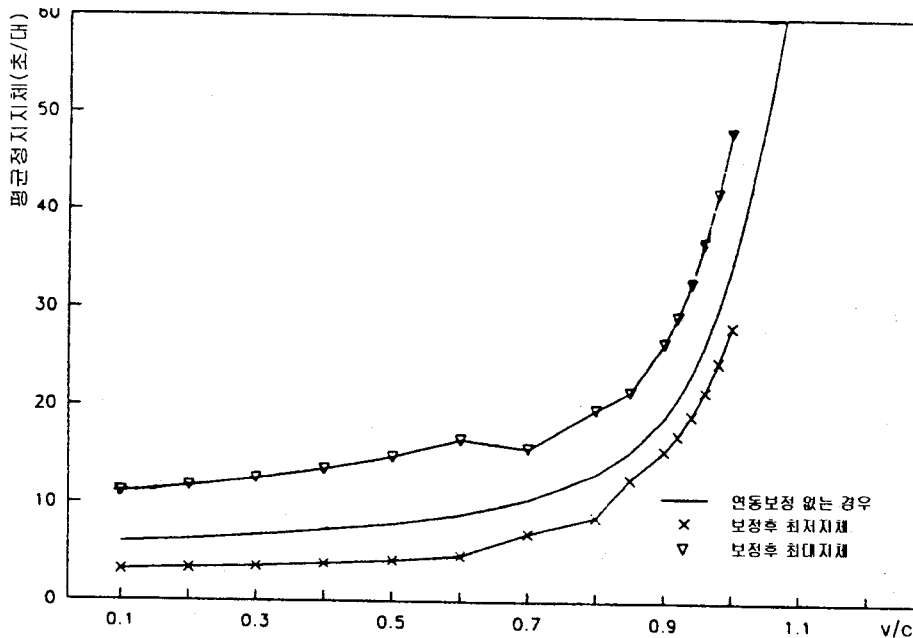
資料: K.G.Courage, C.E.Wallace, and R.Alqasem, "Modeling the Effect of Traffic Signal Progression on Delay". TRR 1194, 1988

2.3.3 連動補整係數

지금까지 소개한 遲滯模型들은 uniform한, 혹은 random한 車輛到着을 假定한 狀態에서의 것들이다. 그러나 上流部 交叉路의 綠色, 赤色 信號時間에 의해 제어되어 보내진 到着 交通率의 分布는 uniform도 아니고 완전한 random도 아닌 대부분 platoon群을 形成한 分布를 보이게 된다. 到着 車輛分布를 random으로 假定하기 위해서는 交叉路間 間격이 連動化된 信號體系의 경우는 최소한 800m, 非連動化된 信號體系의 경우는 400m가 要求된다는 研究報告를 감안할 때 대부분의 都市部 信號交叉路는 이에 해당되지 않는다^[11]. 따라서 1985 HCM은 이 문제를 극복하기 위해 算出된 停止遲滯에 連動補整係數

를 適用할 것을 제안하였다.

1985 HCM에서 제안하는 連動補整係數를 檢證해본 結果 실제상황을 倏倏하게 반영하는 것으로 分析^[11]되었다고는 하나 連動 程度를 5개로 분류하는데 그 分類基準이나 適用方法상 論理力이 약하다. 또한 遲延待期行列程度, 飽和程度 등에 따라 복잡한 양상을 보이는 連動程度 문제를 단순한 補整係數에 의해 극복될 수 있으나 하는 문제가 무엇보다도 根本的인 문제인 것이다. <그림 2.3>은 美國 HCM에서 제안한 連動補整係數를 適用했을 때의 v/c 別 遲滯範圍이다. 그림에서 보는 바와 같이 連動補整係數는 $v/c < 1$ 인 경우에만 제안되어 있는 限界가 있다.



<그림 2.3> 美國 HCM의 連動效果 分析 (參考資料^[12]에 基礎하여 作成)

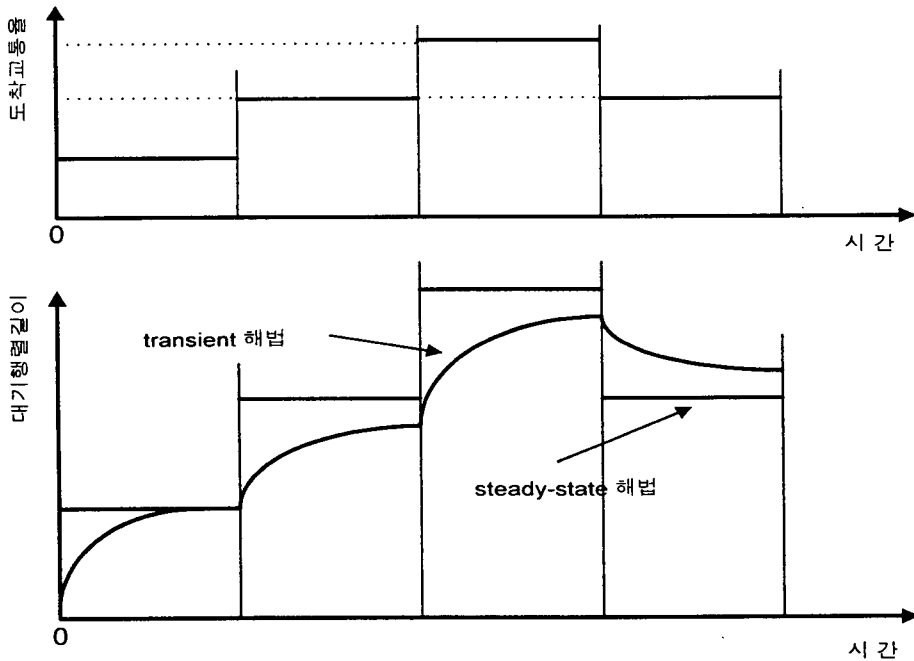
3. 既存 模型의 問題點

3.1 Steady-State 解法

待期行列體系를 分析하는 궁극적인 目的은 실제 分析對象體系의 分析을 위한 效果尺度를 開發하는 것이다. 그러므로 실제 分析對象體系의 狀態를 잘 표현할 수 있는 假定에 의해 풀이를 해야 함이 필수적이다. 그러나 信號交叉路體系를 分析함에 있어 steady-state를 假定하고 待期行列 理論을 適用함은 풀이가 쉽다는 장점은 있으나 根本적으로 잘못된 것이다.

分析對象 시스템은 到着하고 서비스해 가는 과정을 진행하며 transient 待期行列狀態를 유지

하게 된다. 이런 狀態는 충분히 많은 時間이 경과함에 따라 서서히 steady-state 狀態에 이르게 된다[13]. steady-state 狀態에 到達하는 時間은 分析對象 시스템의 飽和度에 따라 다르지만 一般的으로 時間帶別로 需要의 혹은 서비스率의 變化가 현저한 시스템의 分析으로는 적합치 않다. 따라서 街路 및 交叉路의 1日平均 待期行列길이, 혹은 遲滯를 구하고자 하는 目的 외에 尖頭時間 등 特定時間帶 分析을 위해서는 steady-state 假定이 아닌 transient 狀態를 假定한 풀이가 要求된다. <그림 3.1>에서 直線部는 待期行列體系의 steady-state 解法이고 曲線部는 transient 解法인데 두 解法 사이의 面積이 誤差가 된다.



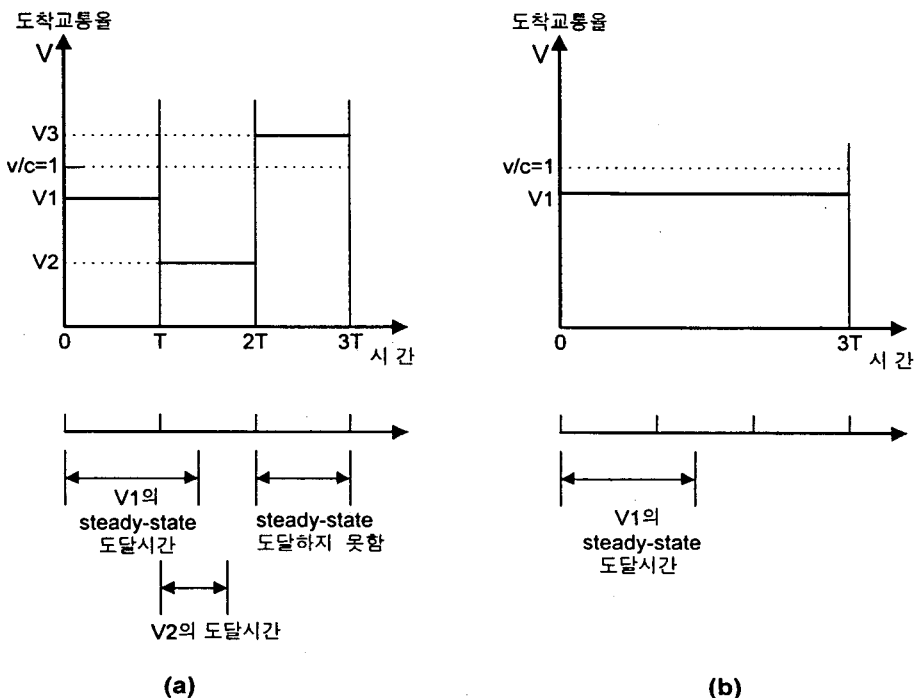
<그림 3.1> 到着交通量 變化에 대한 transient 待期行列 變化

또한 steady-state 假定하에서는 v/c 率 이 1보다 큰 경우는 分析이 불가능하다. 왜냐하면 需要가 容量을 超過하게 되면 時間에 따라 持續的인 遲滯의 增加만이 이루어지며 steady-state 에는 到達하지 못하기 때문이다.

結論的으로 信號交叉路, 특히 혼잡한 交叉路의 遲滯 豫測을 위해서는 steady-state stochastic 模型은 부적합하다. 그러므로 이를 改善하기 위해서는 時間結果에 따라 待期行列의 變化를 分析하는, 즉 transient 狀態變化를 說明할 수 있는 模型의 開發이 要求된다. 그러나 불행히도 이러한 transient 待期行列理論은 다소 발전이 미흡한 수확분야이며, 일부 開發된 수학적 解法도 매우 복잡하다.

3.2 分析時間帶

一般的으로 交通設計를 目的으로 혹은 運營 狀態 評價를 目的으로한 分析을 위해서는 分析 時間帶가 짧을수록 보다 精確하고 現實的인 豫測이 가능하다. 그러나 기존의 steady-state 模型들은 分析對象 交叉路가 steady-state에 到達한 狀態로 假定하여 分析하는 외에도 그 과정에 있어 需要는 일정하다고 假定한다. 즉, 分析 時間帶 T 에 걸쳐 到着交通率은 일정하다고 假定한다. 그러므로 尖頭時間帶 分析을 위한 steady-state 待期行列模型은 一般的으로 現實的이지 못하다. <그림 3.2a>와 같은 경우를 假定해 보자. 到着交通率이 v_1 일 경우는 v_2 일 경우보



<그림 3.2> 到着交通率과 分析時間帶

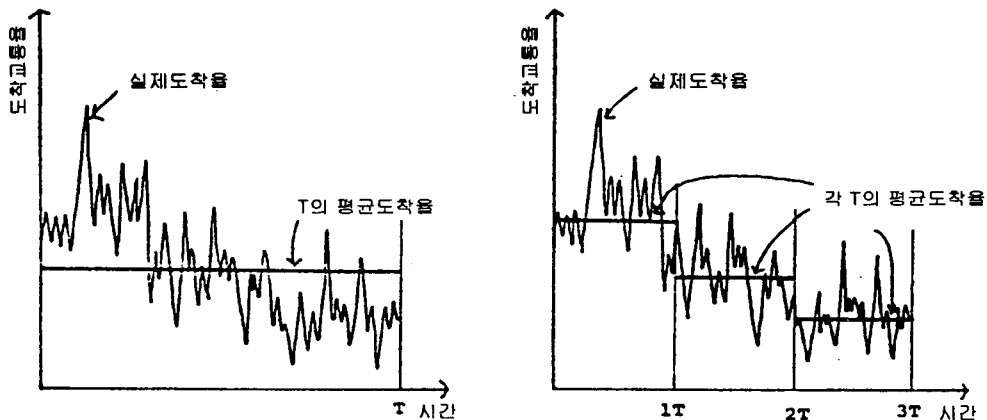
다 steady-state 에 到達하는 時間이 더 길게 된다. 이렇게 到着交通率이 높을수록, 즉 v/c 율이 높을수록 steady-state에 到達하는 時間은 길어지고, 그럴수록 “steady-state에 到達하기에 충분한 分析時間帶를 가진 시스템으로서 또한 이때까지의 到着交通率도 일정한 시스템”이라는 조건에서 멀어지게 된다. 따라서 v_1 의 경우가 v_2 의 경우보다 豫測遲滯와 實際遲滯間의 誤差(過大豫測이건 過小豫測이건)가 커지게 된다. 그리고 v_3 의 경우는 v/c 率が 1보다 크므로 steady-state가 存在하지 않게 된다. 이 경우 美國 HCM 등과 같이 補整模型이 아닌 Webster 方式과 같은 數學的 模型은 豫測이 불가능하다. 補整模型의 경우라도 實際遲滯와의 誤差는 매우 커지게 되어 美國 HCM에서는 v/c 가 1.2를 超過하거나 遲速時間이 15분 이상의 경우는 豫測된 遲滯의 의미가 없다고 밝히고 있다.

<그림 3.2.b>경우의 예를 보면 3T期間 동안의 平均到着交通率을 통해 豫測하므로 分析數值上으로 $v/c > 1$ 의 경우는 없다. 뿐만아니라 分析時間帶도 3T로서 平均 v_1 의 到着交通率

steady-state에 到達하기에 충분한 여유가 있다. 그러므로 이 期間동안의 “平均的인 遲滯”를 구하기에는 <그림 3.2.a>보다 steady-state 假定을 適用하기에 相對的으로 이론의 무리가 없다. 그러나 이 경우는 尖頭時間帶 등 원하는 時間帶에 대한 待期行列 및 遲滯에 관한 情報를 얻을 수가 없다. 結論的으로 말해 steady-state 假定을 가급적 충족하기 위해서는 分析時間帶가 충분히 길어져야 하나, 交叉路 設計 및 運營을 위한 分析을 위해서는 分析時間帶가 더욱 짧아져야 하는 두가지 상반된 조건사이에서 그 어느것도 滿足시키지 못하고 있는것이 現在의 模型들이 안고 있는 限界點이다.

3.3 均一 到着交通流率

前節에서 언급하였듯이 既存 模型들은 分析時間帶에 걸쳐 到着交通流率은 일정한 것으로 假定한다. 그러나 이는 물론 실제 到着交通率의 分布는 아니다. 뿐만아니라 分析時間帶에 똑같은 交通量이 到着하더라도 分析時間帶 內



<그림 3.3> 實際 交通需要와 單位時間別 平均値

에서의 到着交通率의 變化程度에 따라 實際遲滯는 달라지게 된다.

보다 정확한 遲滯 豫測을 위해서는 時間帶에 걸친 交通需要 變化를 보다 세밀하게 반영하고 그에 따른 待期行列 變化를 分析할 수 있어야 한다. 이러한 待期行列의 變化度와 이에 따른 遲滯의 影響을 分析하기 위해서는 non-stationary한 到着交通率을 이용할 수 있다^[14]. 그러나 stationary한 到着交通率을 假定하더라도 <그림 3.3>에서 보는 바와 같이 單位時間을 작게함으로써 보다 충실히 遲滯를 豫測할 수 있다.

Transient-state를 假定한 풀이는 分析時間帶나 그 時間帶 동안의 平均到着交通率 등에 대한 제약이 없으므로 이러한 문제는 해결된다. 또한 到着交通率의 세밀한 變化를 分析時 반영함으로써 보다 現實적이고 精밀한 遲滯 豫測을 할 수 있다.

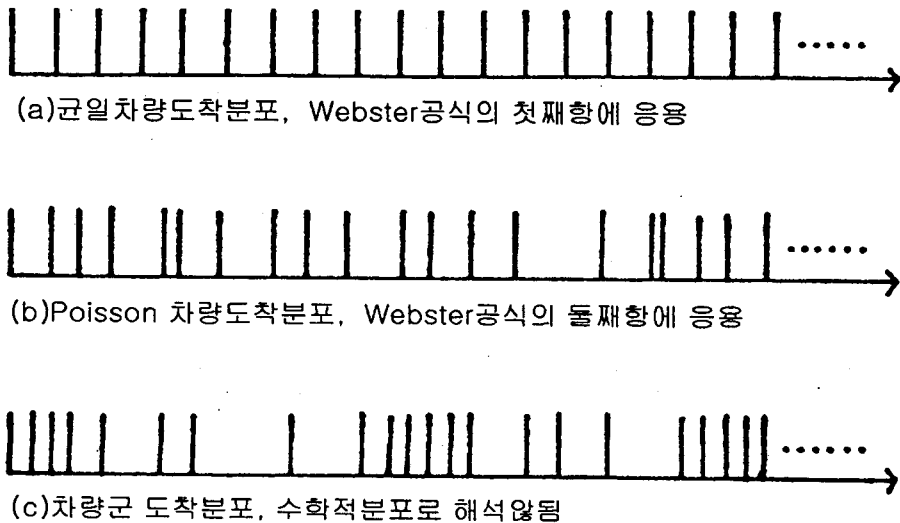
3.4 連動補整

본장에서 지금까지는 모두 獨立交叉路 運營方

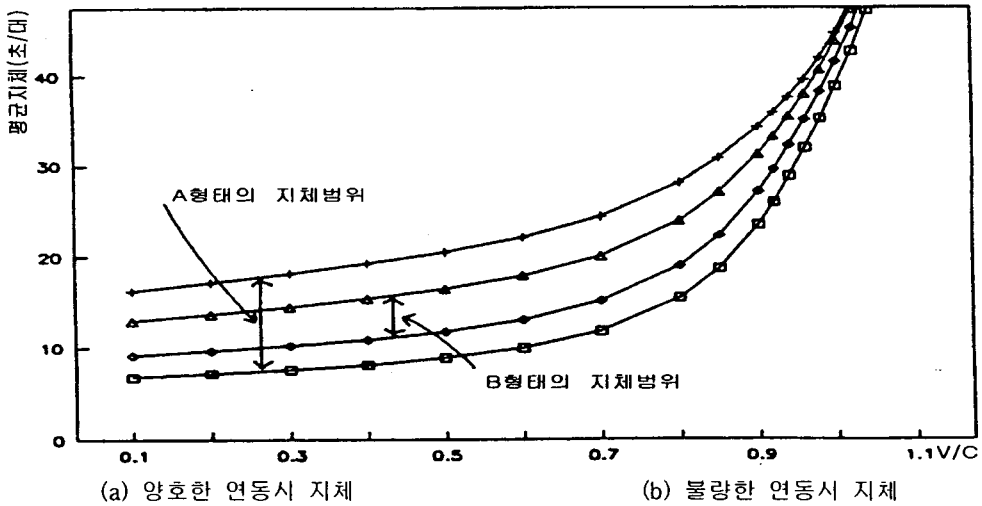
식에 대한 언급이었다. 그러나 現在 都市部 交叉路의 경우 連動化 시스템이 많이 보급되어 있고 일부 都市地域에는 實時間連動化 시스템까지도 設置運營되고 있다. 이러한 시스템에서는 上流部 交叉路의 信號運營과 下流部 交叉路의 到着交通率은 밀접한 연관이 있다. 즉 信號週期內 到着交通率은 특정 pattern을 가지게 된다.

아직은 遲滯豫測時 이러한 連動效果를 滿足할 만큼 반영시키는 模型은 없다. TRANSYT 模型은 到着하는 車輛群의 형상을 豫測함으로써 連動效果를 計算하고, 반면에 1985 HCM은 보다 단순한, 그러기에 더욱 불만족스러운 補整係數를 곱해주는 방법으로 반영하고 있다^[15]. 이러한 信號의 連動效果는 <그림 3.5>에서 보듯이 遲滯 산정시 매우 결정적인 變數로서 美國 HCM은 豫測된 이 連動效果에 따라 53%에서 185%까지 줄거나 늘기도 하는 것으로 報告하고 있다.

到着交通量은 두가지 類型으로 分類할 수 있다. 하나는 上流部 交叉路의 綠色時間의 시작으로 待期行列 狀態에서 出發한 高밀도의 그룹이고 또 하나는 기타 저밀도 그룹 및 上流部 赤



<그림 3.4> 車輛到着 pattern의 種類 (參考資料^[15]에서 인용)



〈그림 3.5〉 遲滯와 連動效果

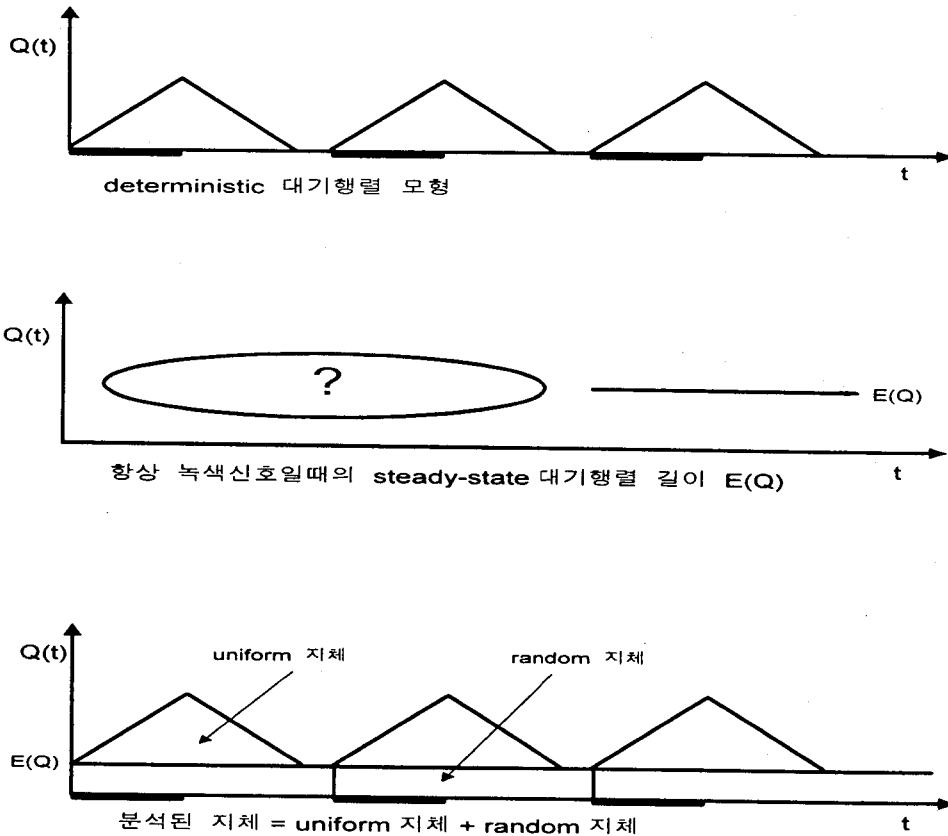
色信號 時間동안 出發한 左右回傳 車輛들이다. 만약 需要의 單位時間 T 를 信號週期內 到着車輛의 變化率을 어느程度 區分할 수 있을 程度로 짧게 나눈다면, 그리고 platoon 그룹의 交叉路 停止線 通過(到着)時間을 알 수 있다면, 連動效果를 模型에서 計算할 수 있을 것이다. 즉 세분된 單位時間 T 에서의 到着 交通率은 stationary 하다고 假定하고 이를 discrete한 transient-state 模型을 통하여 分析하면 連動效果를 豫測할 수 있다. 그러나 資料수집상의 어려움이 있으므로 이 두가지 觀點에서 適正 單位時間을 선정하여야 할 것이다.

4. 遲滯體系 分析方法論 定立

4.1 時推移 分析

信號交叉路 待期行列體系를 分析하기 위해서

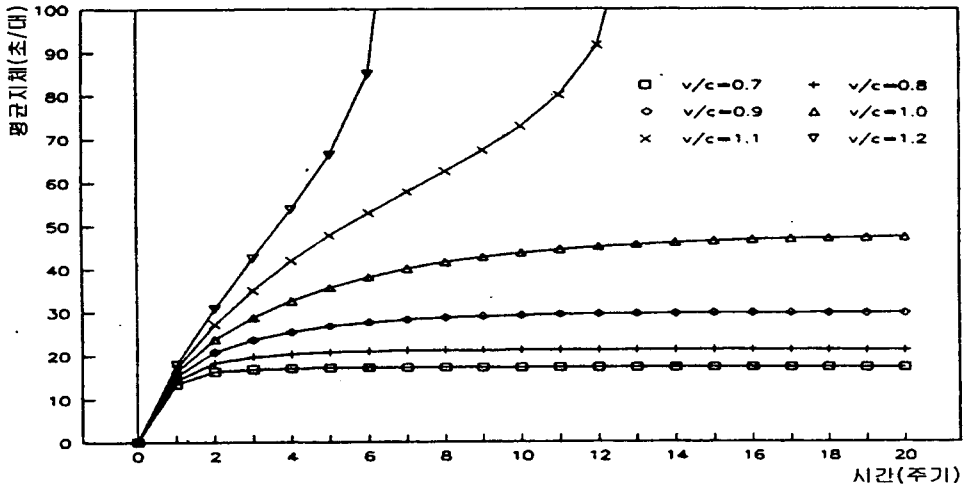
는 根本적으로 time-dependent한 模型의 開發이 要求된다. 엄밀히 말해, 既存의 steady-state 模型은 완전한 analytic 模型은 아니다. 이 模型들은 赤色時間 동안은 deterministic한 待期行列 分析方法으로 서비스 없이 일정 到着交通量에 의한 待期行列이 發生되고 이어 綠色時間에는 이를 서비스하는 시스템으로 간주하여 分析하였다. 또한 이외에 random에 의한 영향을 추가적으로 고려하기 위해 交叉路가 赤色時間 없이 綠色時間만 持續된다고 假定한 경우의 주어진 到着과 서비스율에 대한 待期行列 分析과 그에 따른 遲滯를 별도로 算出하였다. 그리하여 假定과 방법론이 다른 이 둘을 融合함으로써 車輛當 平均遲滯를 豫測하고자 하였다. 그러나 Webster方式을 제외한 대부분 既存 模型의 경우 이 random 遲滯를 數學的 풀이가 아닌, 단지 數式的 표현을 통한 適正值를 제공하고 있다.



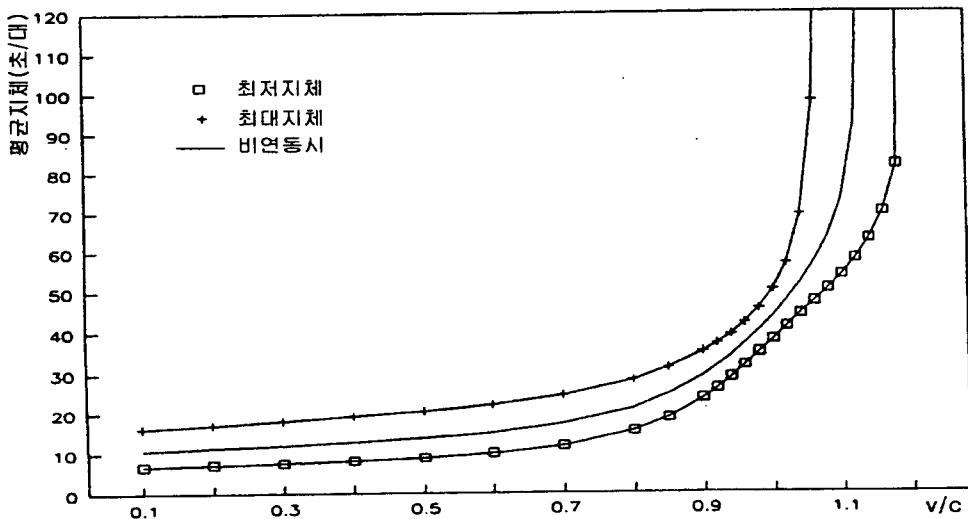
〈그림 4.1〉 既存 模型에서 Uniform 遲滯와 過飽和 待期行列

그러나 time-dependent한 待期行列 分析模型이 開發된다면 이와같은 문제도 해결될 것이다. 〈그림 4.2〉는 v/c 比別로 time-dependent한 待期行列 길이, 혹은 平均遲滯를 개념의으로 표현한 것이다. 낮은 v/c 比에서 交叉路 시스템은 比較的 짧은 時間에, 예를 들면 4-5週期가 경과한 후 steady-state에 到達할 것이다. v/c 比가 높을 경우는 반대로 steady-state에 到達하는 時間이 매우 오래 걸리게 된다. 過飽和된 경우는 steady-state는 存在하지 않으며

時間이 경과함에 따라 待期行列 길이, 혹은 遲滯는 持續的으로 늘어나게 된다. 그러므로 遲滯는 하나의 값으로 주어질 수 없으며 到着 交通率의 變化 혹은 持續時間 또는 分析期間에 따라 다르게 되어 〈그림 4.3〉의 두 실선 사이의 어디엔가 주어진 조건에 따라 存在하게 된다. 이때 v/c 比가 낮을수록 steady-state에 到達하는 時間이 짧게 되어 豫測結果에 있어 time-dependent한 模型과의 差異는 적어지게 되는 것이다.



〈그림 4.2〉 v/c別 time-dependent한 平均遲滯



〈그림 4.3〉 v/c別 平均遲滯의 存在範圍

4.2 週期別 到着車輛分布

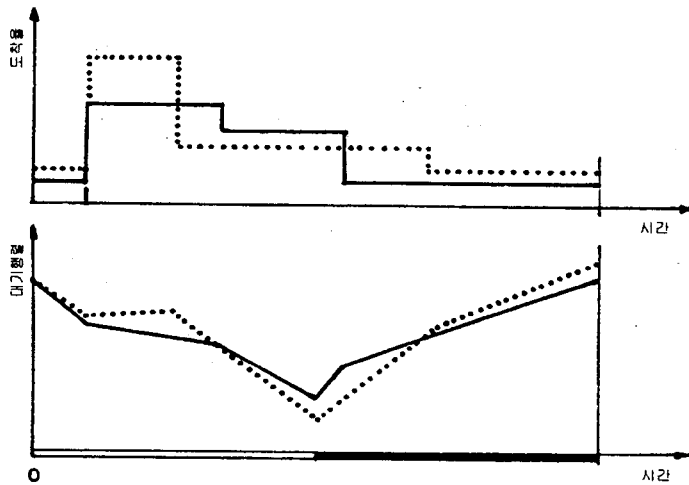
交叉路 遲滯는 信號週期內 車輛到着率의 變化에 매우 민감하다. 그러므로 믿을 만한 豫測

結果를 얻기 위해서는 到着交通의 pattern을 세밀하게 分析할 需要가 있다. 〈그림 4.4〉에서와 같이 한 信號週期에 동일한 交通量이 到着하고, 또한 동일한 offset의 값을 가진 경우라도 그 到

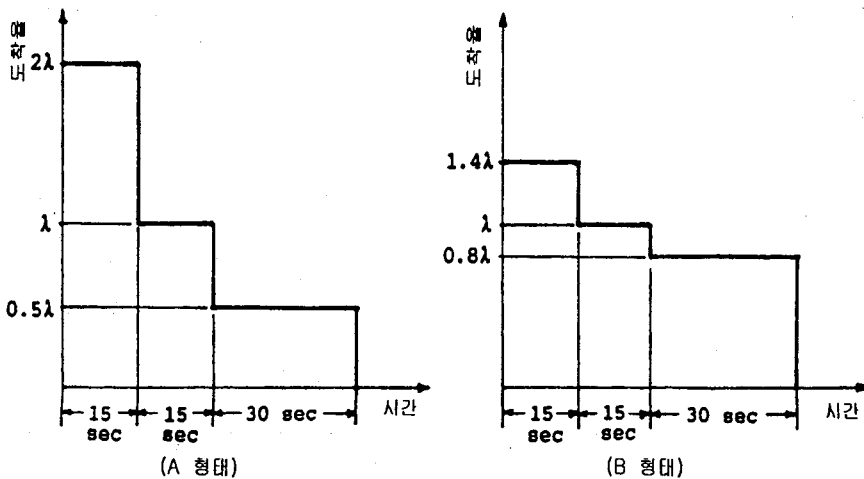
着形態에 따라 待期行列길이의 變化, 즉 遲滯는 다르게 된다.

〈그림 4.5〉와 같이 信號週期當 到着交通量은 동일하되 각기 다른 到着車輛 分布를 보이는 경우를 假定해보자. 이 두 경우에 대한 連動程度에 따른 平均 遲滯時間의 變化는 〈그림 4.6〉과 같이 다를 것이다. 즉 到着車輛分布가 A형

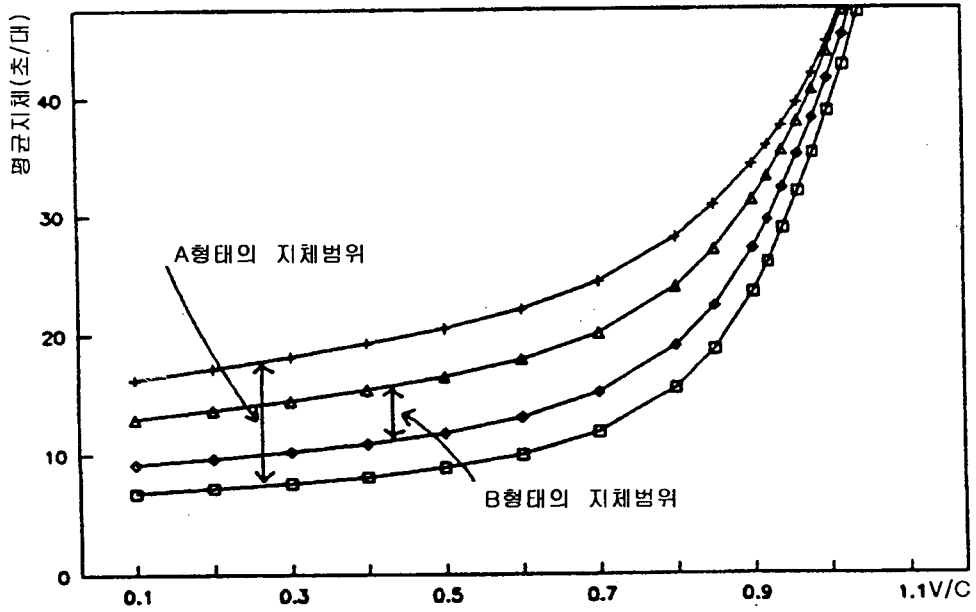
태와 같을때 offset 값에 따른 遲滯의 變化는 B 형태 보다 심하게 된다. 다시말해 到着車輛率의 變化가 심할 수록 offset 값에 따른 遲滯의 變化도 심하다. 이러한 개념은 〈그림 4.7〉과 같이 說明될 수 있는데 連動의 效果는 v/c 比別로 다소 차이가 있을지라도 많은 부분 到着車輛分布에 의해 영향을 받게 된다.



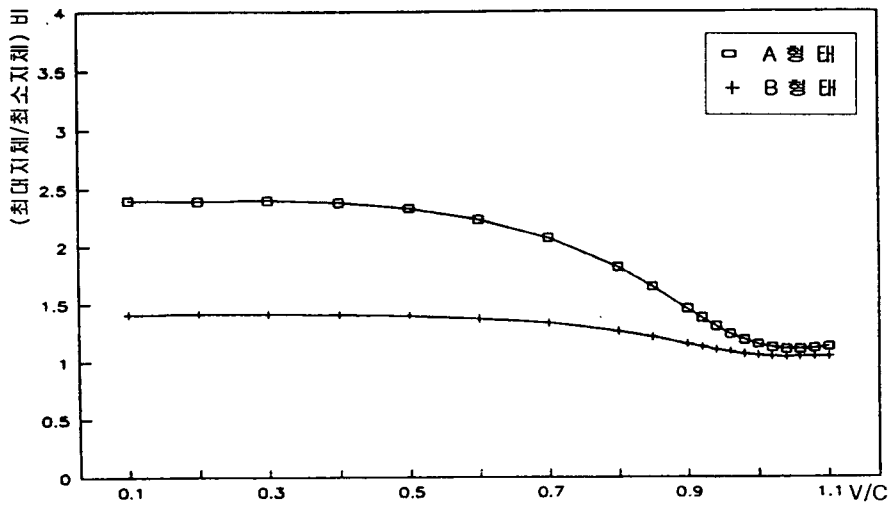
〈그림 4.4〉 到着車輛分布別 待期行列 變化



〈그림 4.5〉 信號週期內 到着車輛 分布의 例



<그림 4.6> 連動程度에 따른 遲滯變化

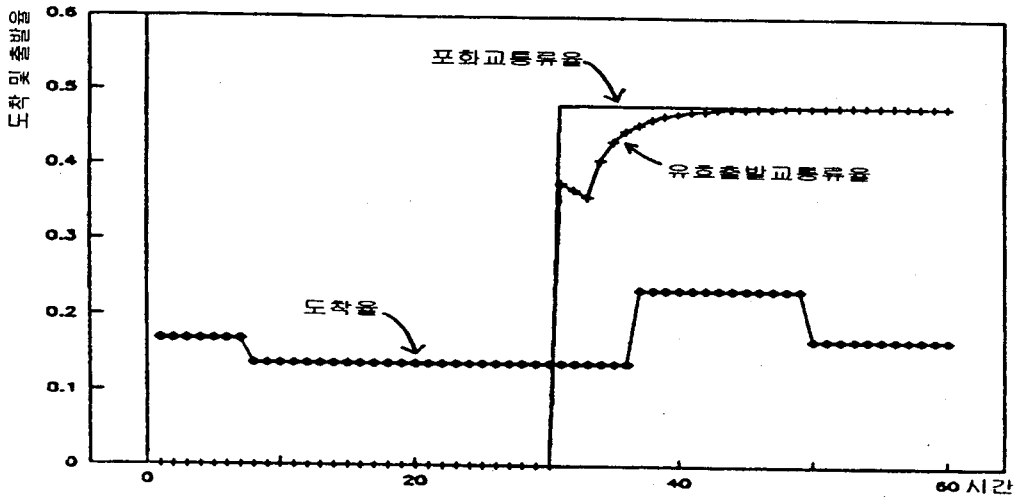


<그림 4.7> 到着形態別 遲滯範圍

4.3 링크容量

交叉路의 容量은 주어진 조건하에서 交叉路 停止線을 통과할 수 있는 最大 交通量으로 정

의된다. 그러나 過飽和狀態에서의 到着交通量은 停止線에서의 容量에 의해서 뿐만아니라 交叉路 시스템의 링크容量에 의해서도 制限을 받게 된다.



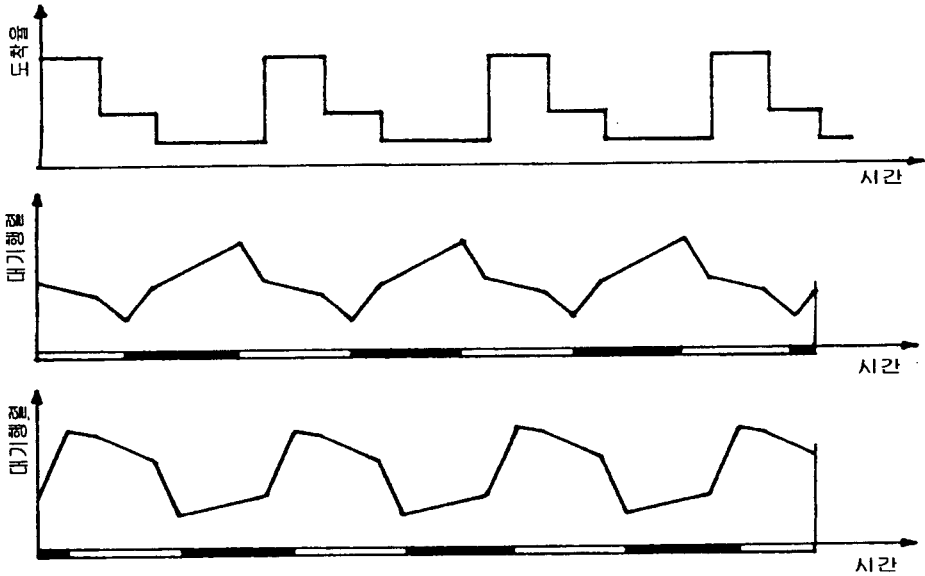
〈그림 4.8〉 有效 出發交通率 變化의 例

이러한 到着交通量의 交叉路 시스템으로의 進入制約은 〈그림 4.8〉의 사례와 같이 說明될 수 있다. 下流部 交叉路가 過飽和狀態인 경우 有效 出發交通流率은 制限을 받게 된다. 이 경우 時間에 따른 待期行列길이가 持續적으로 늘어나게 되면 해당 交叉路의 到着交通率은 역시 制限을 받게 되는데, 이때 링크容量이 중요한 變數로 작용한다. 즉 링크에 車線數가 많고 길이 또한 길수록 到着交通率에 制限을 가하는 시점이 늦어지므로 一時的인 過飽和 現象에 대해 링크容量이 짧은 경우에 비해 需要를 감당하여 처리하는데 여유가 있다.

4.4 連動效果

信號交叉路 體系를 運營함에 있어 offset調整

은 매우 중요한 사항이다. 到着交通率이 일정하면 이러한 offset의 영향은 없다. 그러나 실제 交叉路에서의 遲滯는 車輛群의 到着 時點과 綠色信號 開始時間의 연관에 의해 크게 영향을 받게 된다. 〈그림 4.9〉에서 보듯이 동일한 到着交通 pattern을 가지더라도 車輛群의 到着時間, 다시말해 連動의 程度에 따라 待期行列의 變化, 즉 遲滯는 다르게 된다. 또한 下流部 交叉路가 近飽和 혹은 過飽和狀態인 경우 精確한 遲滯豫測을 위해서는 해당 交叉路의 車輛群 到着時間 못지 않게 중요한 것이 下流部 交叉路의 車輛群 到着時間이다. 왜냐하면 下流部 交叉路의 週期內 時間흐름에 따른 待期行列길이의 變化, 그리고 그에 따른 下流部 交叉路 링크容量의 여유程度에 따라 해당 交叉路 車輛의 進入與否가 制限을 받게되기 때문이다.



〈그림 4.9〉 車輛群 到着時間과 待期行列 變化

따라서 정확한 交叉路 遲滯豫測을 위해서는 특히, 混雜度가 심한 경우의 遲滯 豫測을 위해서는 해당 交叉路만의 分析으로는 滿足스럽지 못하며 上流部 그리고 下流部 交叉路와 連繫한 分析體系가 要求된다.

이러한 下流部 交叉路의 offset과 連繫한 該 當交叉路의 offset값 제공은 매우 중요함에도 불구하고 既存 模型들은 이에 대한 分析이 전혀 무시되고 있다. 連動의 效果는 v/c 가 0.7-0.8程度에서 크며 이는 0.9를 지나 容量에 이르면 줄어들게 된다. 그러나 過飽和狀態가 되면 連動 效果는 다시 커지게 될 것이다. 그 이유는 過飽和狀態에서는 遲滯가 매우 크므로 全體遲滯중 連動에 의한 遲滯減少效果는 비록 적은 比率를 차지하더라도 減少된 遲滯값 그 자체는 非飽和狀態에서의 改善된 遲滯값과 比較할때

매우 크기 때문이다.

4.5 提案된 分析 方法論

1958년 Webster가 遲滯公式을 發表한 후 steady-state를 假定한 많은 遲滯 模型들이 發表되었다. 그러나 車輛 到着率을 random하게 假定하고 週期內 到着率은 일정하다는 假定하에서의 解法은 現 信號體系를 說明하기에는 적합하지 않다. 더구나 1970년대 이후 信號交叉路는 中央 制御式으로 運營되므로 이런 假定은 더욱 現實과 멀어지게 된다. 특히 信號連動의 效果를 模型에서 고려하지 못하여 現實性이나 精確도에 문제가 있다.

HCM模型에서 提示하고 있는 模型 역시 現示를 고려하였다고 하나 需要 및 放出 교통량

에 대한 定量的 數值를 사용하는 限界를 가지고 있음으로 인하여 시간에 따라 변화하는 交通狀況하에서 링크상의 차량의 이동을 정확히 說明하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 Webster 방식이나 미국 HCM방식 모두 지체시간을 구하는 변수로는 분석시간대에 걸친 stationary한 도착교통류율과 출발류율, 녹색시간, 주기 등 4가지를 使用하여 현실성 반영에 限界가 있다. 또한 두 模型 모두 steady-state를 가정한 解法이기에 더욱 현실적용에 무리가 있다. 물론 미국 HCM방법은 15분간의 분석시간대를 目標로한 풀이기는 하나 $v/c > 1$ 인 경우가 15분이 아닌 경우, 특히 15분을 초과한 경우 현실과는 동떨어진 分析結果를 산출해 내는 한계가 있다.

이러한 문제점을 해결해 내기 위해서는 우선 새로운 模型은 수요 및 방출교통량에 대한 time-dependent한 分析을 할 수 있어야 할 것이다. Oversaturated되었을 경우 지체는 지속시간에 가장 큰 영향을 받는다는 점을 考慮할 때 이러한 점을 반영하기 위해서는 time-dependent한 분석이 必需的이다. 또한, 도착교통은 그 이전 교차로의 녹색, 적색시간 여부, 녹색시의 혼잡정

도, 적색시 좌·우회전 교통량 등의 與件에 따라 한 주기내에서도 그 율은 달라질 것이며 출발교통유율 역시 하류부 교차로의 車線數 및 기하구조 등의 與件에 따라 달라질 것이다. 특히 하류부 교차로가 oversaturated 되어 그 여파가 spill-back수준까지 이르면 해당교차로의 출발교통은 상당히 制約을 받게 된다. 따라서, 보다 정확한 分析을 위해서는 주기내 도착 및 출발교통율을 보다 세밀화할 필요가 있다.

아울러 링크용량 역시 遲滯算定에 고려되어야 한다. 閑散 및 근포화 상황에서 링크간의 均等한 대기길이를, 과포화상황에서 링크의 길이 비율에 따른 待期の 創出을 目標로 삼고 있는 근간의 交通制御方式下에서 待期模型을 보다 현실성있게 說明하기 위해서는 링크별 用량이 變數로서 주어져야 할 것이다. 한 예로 하류부 교차로의 링크거리가 너무 짧아 교차로간 progression에 의하지 않고서는 해당교차로의 방출교통량을 수용하지 못할 경우가 있는데 기존 모형은 이러한 점을 고려하지 못한다. 또한 하류부 교차로의 링크거리가 긴 경우의 교차로가 그렇지 않은 경우에 비해 oversaturated 상태를 지탱하는데 더욱 유리하여 해당교차로 遲滯에

〈表 2.2〉 既存 및 提案된 模型의 特性 比較

Webster 模型	<ul style="list-style-type: none"> · $d = f \{ v, s, g, C \}$ · steady - state 待期行列 模型을 조합 · $D = UD(\text{deterministic steady-state 模型}) + RD(\text{stochastic steady-state 模型})$
HCM 模型	<ul style="list-style-type: none"> · $d = f \{ v, s, g, C \}$ · 現示를 고려한 정량적 해법 · $D = UD(\text{deterministic steady-state 模型}) + RD(\text{현실 경험치를 기초로 한 수리식})$ · 산출된 遲滯를 連動補整係數를 이용하여 連動效果 반영
提案 模型	<ul style="list-style-type: none"> · $d = \{ v(t), s(t), g, C, \text{link容量}, \text{Progression정도} \}$ · time - dependent 待期行列 模型. · $D = \sum_{i=1}^{n-1} \text{Queue}(i)$ · 連動效果를 模型內에서 반영, 算出

영향을 덜 미치게 되는데 이러한 점 역시 既存 模型에서는 고려되어 있지 않다.

무엇보다도 중요한 것은 옴셋이 模型상에서 適用되어야 할 것이다. 그러면 分析 時間帶 시점에서의 초기 待期行列 크기에서 分析 시작하여 각 週期內에서의 到着 및 出發率 變化를 반영하여 待期行列길이의 變化를 豫測할 수 있고, 따라서 信號連動效果 또한 模型에서 직접 算出될 수 있을 것이다. 아울러 이러한 分析을 위해서는 위에서 언급한 바와 같이 link容量과 offset 값도 입력資料로 要求될 것이다.

5. 結論

Steady-state를 假定한 待期行列模型은 分析 期間 T는 두가지의 중요한 假定과 동시에 연관되어 있다. 첫째 假定은 T에 걸쳐 到着交通流 確率密度函數는 불변이라는 것과 둘째 假定은 T가 steady-state에 到達하기에 충분한 時間帶라는 것이다. 보다 정밀하고 現實的인 遲滯豫測은 T를 짧게 하여 需要의 變化를 반영하는 방법이지만 T가 짧으면 짧을수록 steady-state가 T期間內에 到達한다는 假定에서는 멀어지게 된다. 그러므로 交叉路 遲滯分析을 위해서는 time-dependent한 待期行列 分析體系의 開發이 要求된다. 이는 수시로 運營데이터가 變하는 實時間 信號運營體系下의 交叉路分析을 위해서도 必修的이다.

또한 대부분의 경우, 信號週期內 車輛到着分布는 uniform도 아니고 random도 아닌 車輛群 到着形態를 보인다. 信號連動效果는 交叉路遲滯 豫測時 가장 중요한 變數들 중의 하나이다. 그럼에도 지금까지 이러한 車輛到着率 變化와 連繫한 連動의 效果를 체계적으로 반영한 遲滯模型은 전무하다. 또한 分析對象 交叉路의 到

着車輛은 上流部 交叉路의 出發車輛이고, 마찬가지로 分析對象 交叉路의 出發車輛은 下流部 交叉路의 到着車輛이다. 이 관계에서 각 交叉路의 綠色 및 赤色時間, 飽和度, offset값, 링크容量 등 여러 變數에 따라 待期行列體系는 變하게 된다.

그러므로 정확한 遲滯豫測을 위해서는 信號週期內의 時間帶別 交通率變化를 반영할 수 있는 time-dependent한 分析을 하여야 하며 이때 單一 交叉路의 分析만으로는 모든 變數를 고려할 수 없으므로 周邊交叉路와 連繫한, 나아가 network 分析이 가능한 遲滯模型의 開發이 要求된다.

參考文獻

1. V.F.Hurdle, "Signalized Intersection Delay Model - A Primer for Initiated", TRR 971
2. F.V.Webster, Traffic Signal Setting, Road Research Technical Paper No.9, Her Majesty's Stationery Office, London, 1958
3. T.L.Satty, Elements of Queueing Theory with Applications, Dover Publications Inc.,N.Y.,1961
4. F.V.Webster and B.M.Cobbe, Traffic Signals, Road Research Technical Paper No.56, Her Majesty's Stationery Office, London,1966
5. D.I.Robertson, Traffic Models and Optimum Strategies of Control-A Review: Proceeding on Traffic Control System, Vol. 1, Berkeley, 1979
6. R.Akcelik, Traffic Signals : Capacity and Timing Analysis, Research Report 123, Australian Road Research Board, Victoria, 1981

7. W.R.Reilly and C.C.Gardner, "Technique for Measuring Delay at Intersections", TRR 644, 1977
8. JHK and Associates, Urban Signalized Intersection Capacity, Uncorrected Draft, NCHRP Project 3-83(2), TRB, National Research Council, Washington,D.C.,1982
9. R.P.Roess and W.R.McShane, Final Report on the New Highway Capacity Manual, TTRC, Polytechnic Univ, Oct. 1986
10. R.Akcelic, "The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersection, ITE Journal, March 1988
11. E.C.Chang, D.B.Fambro, and C.J.Messer, Effects of Quality of Traffic Signal Progression on Delay, Texas A&M Research Foundation, 1988
12. Highway Capacity Manual, Special Report 209, National Research Council, TRB, Washington, D.C., 1985
13. H.A.Taha, Operation Research, 3rd Ed., Macmillan Publishing Company, Inc., N.Y.
14. D.L.Gerlough and M.J.Huber, Traffic Flow Theory - A Monograph, TRB Special Report 165, 1975
15. W.R.McShane and R.P.Roess, Traffic Engineering, Polytechnic Series in Transportation, Prentice Hall, 1990
16. D.R.Drew, Traffic Flow Theory & Control, McGraw-Hill Series in Transportation, McGraw-Hill Book Co., 1968
17. K.G.Courage, C.E.Wallace, and R.Alqasem, "Modeling the Effect of Traffic Signal Progression on Delay". TRR 1194, 1988