

交通信號制御系에서의 최적신호주기와 Split Coordination

서울시정개발연구원
도시교통연구실
이 광 훈

목 차

1. 연구배경과 목적
2. 신호제어방법의 추세
3. 시뮬레이션에 의한 계통지체의 평가
4. 계통신호의 최적신호주기 설정법
5. 과포화 교통류상태에서의 split coordination
6. 결 론

1. 研究背景과 目的

自動車保有臺數의 急增에도 불구하고 자동차교통을 지탱하는 Infrastructure로서의 道路網 정비는 늦어지고 있어 일반적으로 자동차사회라고는 말들하고 있지만 어딘가 어색한 것이 최근의 현실이다.

道路容量의 부족에 의한 交通停滯는 실은 불과 10여 퍼센트의 需給갭에 의한 것이라는 것을 생각할 때, 道路整備의 不足을 커버하는 交通制御, 특히 交通信號 制御의 중요성은 명백하다 하겠다. 최근 尖端技術의 발달에 따라 交通信號 制御시스템에 있어서도 신호시스템의 눈과 神經에 상당하는

sensor시스템과 情報通信技術, 그리고 시스템의 頭腦인 컴퓨터, 그 중에서도 마이크로프로세서의 발달에 의한 시스템의 高度知能化가 기대되어지고 있다.

이러한 상황속에서, 교통공학적으로 해결하지 않으면 안될 問題가 산처럼 쌓여 있는 것이 현실이라 하겠다. 客觀적으로 볼 때, 路線 혹은 道路網을 對象으로 하는 制御概念이 古典的인(그러나 대단히 중요하기도 하다) 地點制御概念의 위에 위치하고 있는 것과, 최근 問題가 되고 있는 過飽和交通流에 대한 制御概念이 從來의 非飽和交通流 制御概念延長으로 밖에 생각되어지지 않고 있는 것 등이 그 限界性を 보이고 있다고 할 수 있다. 더군다나 交通制御시스템에서는 정책적인 意圖에 의한 소위 介入制御機能도 必要한데 介入制御가 客觀的, 科學적으로 適切하고 동시에 높은 자유도를 갖기 위해서 공학적 지식베이스가 부족하다 하겠다.

本 論文은 이상의 觀點으로부터, 하나는 오랜기간동안 未解決의 과제로 남아 있던 系統信號系의 最適信號週期(optimal cycle)에 대해서, 系統交通流의 遲滯特性和 最適信號週期の 關係를 규명하였고, 또 다른 하나는 過飽和時의 Network制御에 대해서 戰術的 접근방법으로서 過飽和교통류로 인한 2次障害인 spillback현상에 대한 제어方策을, 또 戰略的 접근방법으로는 network에서의 總 流出臺數를 最大化하기 위한 split coordination 制御方策을 논하면서 그 研究成果를 종합한 것이다.

2. 信號制御方法의 趨勢

2.1 概況

信號制御方法은 歴史的으로 볼 때 定時式(fixed time)으로부터 시작되었다고 할 수 있다. 그 중에서도 싸이클과 split의 設定技術은 Webster의 "Traffic Signal Settings"(1958)에 의해 처음으로 確立되었다고 할 수 있으며 오늘날까지도 여전히 사용되고 있는 방법이기도 하다. 물론 그동안 많은 研究者에 의해 派生的인 研究가 다수 행해지지 않은 것은 아니다. 兪셀에 대해서는 通過帶幅 最大化를 評價基準으로한 技法 및 研究의 전성기를 거쳐 Hillier의 Combination Method(1965/6), Robertson의 TRANSYT(1969)을 契機로 해서 遲滯와 停止回數의 最小化를 評價基準으로 하는 方法으로 전환되었다. 또 최근에는 히사이(久井)에 의해 Dynamic Program을 쓴 방법도 제안되어 있다.

컴퓨터의 발달에 의해, 1960年代 初期부터 交通感應式技術의 開發, 普及이 促進되었다. 소위 交通管制시스템으로서의 ATC 혹은 UTC(Area or Urban traffic control system)의 출현이 그것이다. 또, 그것과는 별도로 單獨交叉路(Isolated Intersection)에서의 適應制御(Adaptive control)의 연구도 간과할 수는 없다.

單獨交叉路의 適應制御에서는 매 싸이클의 現示마다, 想定된 綠色信號(最小綠色時間以後 最大綠色時間까지)을 數秒씩의 時間間隔으로 분할하여 車輛檢知器로 到着交通量을 計測하면서 각 時間間隔마다 綠色信號를 延長하였다고 할 경우의 각각의 遲滯量을 計算하여 最小遲滯가 實現된다고 判斷되는 綠色時間을 구하는 방법이다. 이런 종류의 모델은 Miller(1965)에 의해 초기에 제안되어 그 有望性이 評價되어 프랑스, 스웨덴 등지에서 實驗되어졌으며 Miller型이라고 불리워진다.

2.2 日本의 動向

1962년 일본에 처음으로 自動感應式 系統信號機가 美國으로부터 導入되었고, 그 뒤 1966년 東京 근자 廣域信號제어시스템이 設置된 후로 全國 主要都市에 交通管制시스템이 導入되어 1990년 3월 현재 74都市, Sub-center를 포함하면 154都市에 設置되어졌다. 管制시스템의 信號制御方法은 프로그램 選擇方式에 의한 交通感應式이 主流로 되어있다. 制御과라메타의 변환은 5~15分마다 가능하

다. 이 시스템의 가장 큰 문제의 하나는 交通狀態量으로 交通量과 占有率을 加重하여 합한 값이 대기행렬(Queue)길이와 반드시 線形關係에 있지 않다는 것이며, 대기행렬이 檢知器의 上流 150~200 m(1사이클동안 빠져나가는 대기행렬길이) 이상이 되면 占有率에 變化가 보이지 않는 特性과 패턴을 변환할 때의 기준값(threshold value)이 장소에 따라 다르다는 문제가 있어 시스템 機能發揮의 어려움으로 대두되어 있다. 최근에 와서 기존의 방법 이외에 Critical 교차로에서보다 효과적인 제어를 하기 위한 몇가지 제어방법이 운영되고 있다. 以下 그 개략을 설명하고자 한다.

(1) 고시(越) 모델

從來의 制御方法에서 볼 수 있었던 어려웠던 점, 즉 地点感應式制御에서 매 사이클의 現示길이 現示 하나하나가 실행되어질 때까지 모름으로 해서 步行者用現示의 固定化와 系統制御系에의 制約이 되어있던 것과 地点感應制御는 交叉路飽和度가 높아지면 결국은 定週期制御와 마찬가지로 되는 것, 그 위에 기존의 交通感應式制御系가 交通狀況의 feed-back時間間隔과 그 情報의 質的인 면에서 사이클 베이스의 適應制御에 適合하지 않다는 것 등을 극복하는 것을 고시모델은 주요 改善對象으로 보고 있다.

制御에 必要한 情報로서는 流入部의 混雜度指標로서 車輛檢知의 平均pulse길이를 이용하여 1사이클마다 과거 n 사이클의 混雜度を 계산하여 다음 사이클에서의 각 現示의 主要 流入部에서의 混雜도가 같아지는 방향으로 前回の split을 修正한다.

最適信號週期는 交叉路 混雜度の 1次關數로 보고, 그 식에 의해 前回の 信號주기를 修正한다. spillback현상이 일어나기 쉬운 곳에서는 해당 流出部에 車輛檢知器를 설치하여 平均pulse長이 어떤 권역치를 넘었을 경우 spillback현상으로 판정하여 流入部의 混雜度を 작은 값으로 인정함으로써 해당 現示에 不必要한 긴 綠色時間이 算定되지 않도록 하고 있다.

(2) ATICS 모델

過飽和狀態의 critical 교차로를 대상으로 Michalopoulos 등의 制御概念을 베이스로 개발된 것으로 macro처리와 micro처리로 구분되어진다.

a) macro 처리 (3개의 戰略的制御方法)

待機行列이 存在하는 流入部중에서 飽和流率(saturation flow rate)이 가장 높은 流入部에 최대

의 split을 줌으로 해서 交叉路의 총 throughput을 最大化하여 遲滯의 最小화를 이룬다.

이 제어를 계속할 경우 다른 現示流入部의 대기행렬이 현저히 늘어나 대기차량이 불공평한 遲滯를 경험하게 된다. 이러한 현상을 피하기 위하여 待機行列이 어느 한계(정책적으로 정하는 한계)에 도달한 경우에는 그 이상 待機行列이 늘어나지 않도록 하기 위한 split(流出量이 流入量과 일치하도록)을 해당 現示에 부여한다.

過飽和狀態가 심각하여 각 現示에 對應하는 流入部 待機車輛이 사전에 정해진 限度를 서로 넘었을 경우에는 각각 다음의 重要交叉點에의 停滯波及를 가능한한 遲滯시키는 方針으로 변한다. 그렇게 하기 위해서는 각 待機行列의 伸長速度를 각 상류중요교차점까지의 餘裕링-크區間長에 비례시키는 것을 目標로한 split制御를 실시한다.

b) micro처리 (飽和流의 變動에 부합된 綠色時間 微調整)

停止線上流 約 50m 위치의 각 車線에 설치된 檢知器에 의해 해당 現示에서의 飽和流通過臺數를 1秒마다 計測하여 macro처리에서 이미 정해진 綠色時間안에서 1사이클중의 單位時間당 Throughput율이 最大가 되는 現示長을 子測計算하여 이것을 該當사이클의 實現綠色信號로서 最終적으로 決定한다. 이와같은 micro處理概念은 Throughput을 最大感應制御로 일반적으로 불리어진다.

(3) 飽和度比制御

bottle-neck이 되고 있는 交叉路의 近飽和狀態에서 需要量과 飽和流率比를 飽和度(일반적으로 일컬어지고 있는 飽和度와는 다른 用語로써 流量比의 概念이다)로 해서, 이것에 비례해서 split을 決定한다. 需要量으로서의 流入交通量에 待機行列臺數를 더한 값을 이용하고 있다. 이 경우 制御는 사이클베이스로 행하여진다.

(4) 旅行時間制御

(2)의 ATICS모델에서 遲滯最小화와 정체길이의 政策的제어중 둘 중에서 하나가 선택되어지게 되는데, 후자의 정체길이 대신에 旅行時間을 채택한 것이 旅行時間制御이다. 主從도로 모두 정체된 상태에서 일정구간(또는 정체구간)의 여행시간을 양자의 비가 이미 결정된 제어목표에 부합되도록 split을 결정한다. 이 경우도 제어는 사이클베이스로 행하여진다.

(5) micro制御

매 사이클 교통류의 변동에 의한 처리효율저하를 macro하게 결정한 split값을 표준으로 해서 미 조정하는 것으로 gap감응제어와 Throughput率 최대감응제어가 있다. 전자의 대표적인 예는 좌회전 감응제어이고 그 외에도 이 방법을 従도로측에 적용하는 방법도 있다. 후자는 (2)의 ATICS의 모델에서 micro제어와 같은 개념이 되는데 사이클베이스의 Throughput率 최대화가 아니라 flow rate(처리대수/녹색시간) 최대시점에서 녹색시간을 끊는 방법이다. 두 방법 모두 감응후의 offset의 흐트러짐은 지정된 階梯(step)에서 보정되어 진다.

2.3 歐美의 例

英國에서도 1966年초에 디지털컴퓨터가 처음으로 도시교통제어에 사용되어졌다. 물론 그 당시 定時式시스템이 정착되어 있었고 信號表示企劃설계가 체계적으로 행하여지도록 TRANSYT모델도 개발되어있다. 그렇다해도 데이터수집, 새로운 信號表示企劃의 계산, 운용상황의 체크 등을 정기적으로 행한다고 하는 것은 關係者에게 있어서 커다란 負擔이 되어 완전한 교통감응식 UTC시스템의 개발이 요구되어지게 됐다. 이러한 배경하에 SCOOT(Split, Cycle and Offset Optimising Technique)로 불리워지는 완전교통감응식시스템개발이 TRRL에 의해 1973년에 시작되어 Ferranti, GEC, Plessey 3사의 參加하에 1975년에 연구의 제1段階를 마무리지었다.

특별히 영국의 예를 든것은 SCOOT시스템이 완전교통감응식시스템중에서 가장 새롭고 세계적으로 알려져 있기 때문이다. 그 외에도 SCOOT와 어깨를 나란히 하고 있는 시스템으로 호주의 SCAT(Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic)가 있다. 1970년대 초기에 호주 New South Wales 간선도로국의 Sims에 의하여 그 개발이 시작되었다.

양자의 특징적인 차이점은 다음과 같다. SCOOT는 TRANSYT모델의 實時間化(real time)를 基盤으로 하고 있다. 그 때문에 車輛群波形(platoon dispersion)을 예측해야 될 車輛檢知器는 각 링-크의 상류측에 위치하게 된다. SCAT은 TRANSYT와 같은 모델을 사용하고 있지는 않으나 교통상태량으로서 독특한 개념에 의한 포화도(Degree of Saturation)를 사용하고 있는 것이 최대의 특징이며, 이 때문에 車輛檢知器는 각 링-크의 하류측에 위치한다. 신호주기의 변환에 있어서는 SCOOT는

2.5분마다 이지만 SCAT는 매 사이클마다 가능하다. 포화도율에 있어서는 SCOOT가 고정치를 쓰고 있으나 SCAT는 직접 계측하고 있기 때문에 도로구조, 차선이용, 氣象, 운전자특성 등의 요인이 반영된다 하겠다. SCAT은 Vehicle actuation기능을 갖고 있으나 SCOOT에는 그 기능이 없다. 윤-셀에 있어서는 SCAT는 通過帶幅最大化를 평가기준으로 하고 있으나 SCOOT는 교통류모델을 이용하고 있다는 점에서 유리하다 하겠다.

3. 시뮬레이션에 의한 系統遲滯의 評價

3.1 micro 시뮬레이션 모델

그림 1은 micro simulation 모델의 時間距離線 그림이다.

차량도착(A_1, A_2, \dots)과 출발(B_1, B_2, \dots)은 정지선에서 일어나는 소위 수직대기행렬(vertical queue)의 개념을 쓰고 있다.

차량의 주행속도는 일정하고 신호에 의한 지체는 $B_i - A_i$ 가 된다.

또, 飽和交通流率은 0.5대/초로, 그림에서 t 는 2초이다.

simulation을 위한 입력으로는

- 1) 公同信號주기
- 2) 各 有效綠色時間
- 3) 各 링크 길이
- 4) 到着交通流率

등이다.

한편, 차량의 발생에 있어서는 이하의 방법을 설정했다.

① 均일(uniform) 발생

발생차량 차두시간(headway)이 일정하다. 따라서 均일발생에 의한 교차로에서의 지체는 均일 지체이다.

② Poisson분포 (Exponential) 발생

도착교통류분포가 poisson분포($I=1.0$)인 경우로, 지수분포에 의해 차두시간의 확률밀도함수를 분포함수로 反轉(Inversion)하여 발생시킨다.

③ 편이지수분포 (Shifted exponential) 발생

대상차선수가 1차선이기 때문에 현실적으로 차두간격 2초이하는 생각할 수 없기 때문에 최소차 두간격 2초의 편이지수분포로 발생시킨다.

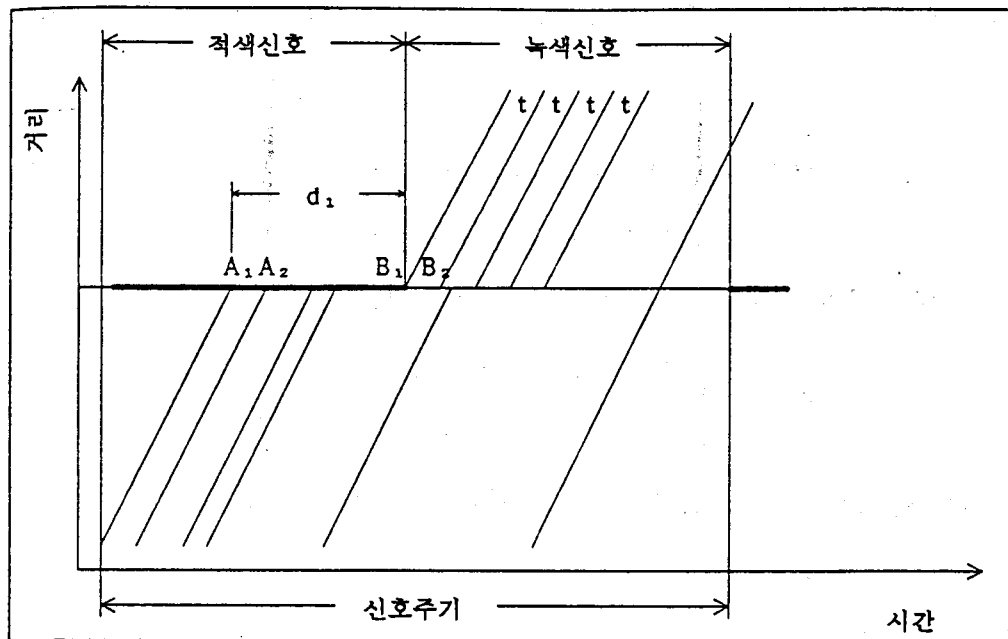


그림 1. micro simulation의 시간거리선도

3.2 macro simulation 모델

본 연구에서는 녹색신호 끝에서의 평균대기대수(N_{qe}) 구하는 방법으로 Markov연쇄를 사용했다. Markov연쇄를 사용함으로써 定常狀態(steady state)에서의 대기대수분포를 계산하여 평균대기대수를 정확히 구하는 것이 가능하였다.

Markov연쇄에 있어, 도착패턴을 나타내는 Input matrix로서는 실측된 I값이 1보다 적기 때문에 그때의 I에 의한 二項分布를 사용했다.

또, 출발패턴을 나타내는 Output matrix는 녹색시간과 飽和交通流率에 의해 정해지는 일정한 값을 갖는 matrix로 하였다.

$$A = \begin{Bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & \dots \\ 0 & a_0 & a_1 & a_2 & \dots \\ 0 & 0 & a_0 & a_1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & a_0 & \dots \end{Bmatrix}$$

여기에서 a_i 는 i 대의 차가 1사이클중에 도착하는 확률로 I 값에 따른 二項分布를 취한다.

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1-d_0 & d_0 & 0 & 0 & \dots \\ 1-d_0-d_1 & d_1 & d_0 & 0 & \dots \end{pmatrix}$$

여기에서 d_i 는 i 대의 차가 1사이클중에 출발할 수 있는 확률로

$$d_i = \begin{cases} 1 & i=S \cdot G \text{의 경우} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

이로부터 過剩待機臺數에 관한 遷移確率 matrix P 는 다음과 같이 구해진다.

$$P = A \cdot D$$

遷移確率例 P 는 확률 p_{ij} 의 matrix이고 p_{ij} 는 1사이클 동안에 대기행렬대수가 초기상태 i 로부터 최종상태 j 로 변하는 확률을 나타내고 있다.

시스템의 초기상태확률은 다음과 같은 行벡터로 표현된다.

$$P(0) = [p_1(0), p_2(0), \dots, p_m(0)]$$

또, Markov연쇄에서는 상태확률은 초기상태로부터 독립인 定常확률 P 에 수속(收束)하게 된다.

즉 正常(steady state)조건에서는 다음식의 關係가 성립한다.

$$P(n+1) = P(n) \cdot P$$

$$P(n+1) = P(n) = P^*$$

여기서는 n 은 시점을 의미한다.

m 개의 상태를 가진 Markov연쇄에서는 행렬방정식이 다음과 같은 연립방정식을 구성한다.

$$P = \begin{pmatrix} P_{1.1} & P_{1.2} & \dots & P_{1.m} \\ P_{2.1} & P_{2.2} & \dots & P_{2.m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{m.1} & P_{m.2} & \dots & P_{m.m} \end{pmatrix}$$

여기서 P_{ij} 는 1사이클동안에 대기대수가 초기상태 i 로부터 최종상태 j 로 변하는 확률

다만, P_i 는 定常상태하에서 상태 i 가 나타날 확률이다. 또 P_i 값을 확정하기 위한 구속조건은 다음과 같다.

$$P_1 + P_2 + \dots + P_m = 1, 0$$

3.3 系統信號路線에서의 遲滯特性

1) random 遲滯

Newell은 신호로 제어되는 노선에 있어서의 random 지체는 오로지 critical 교차로에서의 random 지체에 의한 것으로 critical 교차로의 상류 및 하류신호군(녹색시간이 critical 교차로보다 긴 교차로)에 의한 random 지체는 거의 없다고 주장하고 있다. 즉,

$$W_s^{(m^*)} + W_s^{(m')} + W_T^{(m^*)} + W_d^{(m^*)}$$

여기에서 $W_s(m^*)$: C.I의 random 지체

$W_s(m')$: C.I 이외의 random 지체

$W_T(m^*)$: C.I의 전체지체

$W_d(m^*)$: C.I의 균일지체

과 같이 된다. 이 주장을 확인하기 위하여 링크길이를 300m, 신호주기를 100초, 해당 노선방향의 현시율을 critical 교차로에서는 50%, 그외의 교차로에서는 60%로 하여 到着交通流率의 값이 다양한 경우에 대하여 최소차두시간을 2초로 한 shifted exponential분포 및 균일분포의 차량발생에 의해 각각 micro simulation을 행하였다.

그림 2는 그 결과로부터 「critical 교차로에서의 차 1대당 전체지체-차 1대당 균일지체」와 「구간전체에서의 차 1대당 전체지체-각 교차로에서의 차 1대당 균일지체의 합」과를 비교한 것이다.

노선의 random 지체는 거의 critical 교차로에서의 random 지체에 의한 것임을 잘 알 수 있다.

그림 3은 검증된 모델을 이용하여 대상노선 각 교차로에서의 지체를 나타내본 것으로 신호주기는 100초, 到着交通流率은 0.2125(대/초), 링크길이는 전부 300m이고 C.I에서의 포화도가 0.95의 예이다. 포화도 0.8의 경우는 random 지체가 거의 나타나지 않고, 3개 모델의 결과가 일치하였으나, 그림 2에서 알 수 있듯이 포화도가 0.95로 높아지면서 C.I에서는 점점 random 지체가 높아지는 것을

나타내고 있다.

이 경우, random 지체는 C.I에서만 발생하는 것으로부터 간선 혹은 network에서 random 지체는 C.I만을 생각해도 된다는 결론에 다다르게 된다.

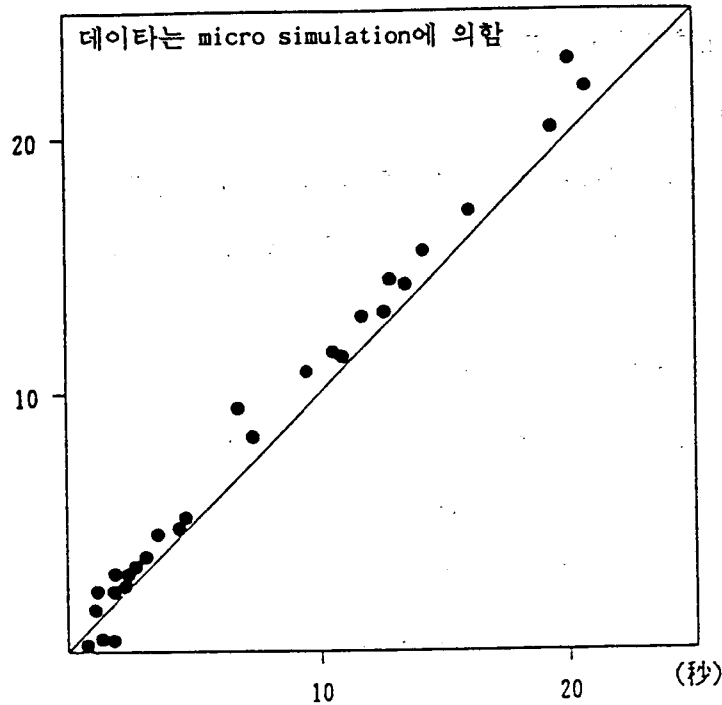


그림 2. Newell이론의 검증

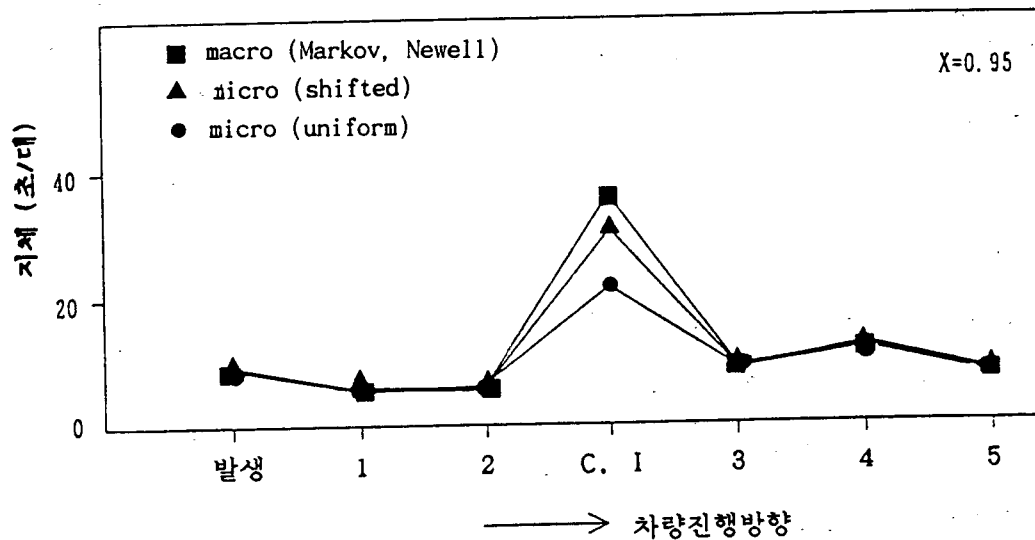


그림 3. 각 교차로에서의 random 지체특성

2) random 遲滯의 定式化

1)에서 설명한 것처럼 노선에서의 random 지체는 critical 교차로에서의 것만을 고려하면 된다. 또, 그 값을 구함에 있어 X가 0.95이상의 경우는 Newell식으로부터(설명 생략되었음), 0.95미만의 경우는 Markov연쇄를 사용함이 타당하다는 것을 설명했는데 앞으로의 분석에 편리를 기하기 위하여 정식화를 하였다.

I값별로 앞에서 서술한 방법으로 구한 차 1대당 평균 random 지체에 流率을 곱한 값과 X와의關係는 그림 4에 제시한 것과 같다. 이러한 關係로부터 I값도 설명변량으로 포함시켜 회귀를 행한 결과 다음과 같은 식 및 그림 4와 같다.

$$D_r \cdot q = -4I + (0.738I - 0.057) \cdot (1 - X)^{0.1026I - 1.048}$$

여기서, D_r 은 차 1대당 평균 random 지체

이 경우 random 지체에는 포화도 이외 요인도 생각할 수 있기 때문에 같은 포화도에 대해서 신호 주기 및 녹색시간을 바꿔가면서 Markov연쇄를 적용한 결과 평균 15% 정도의 변화가 있었으나 그 규칙성은 보이지 않았다.

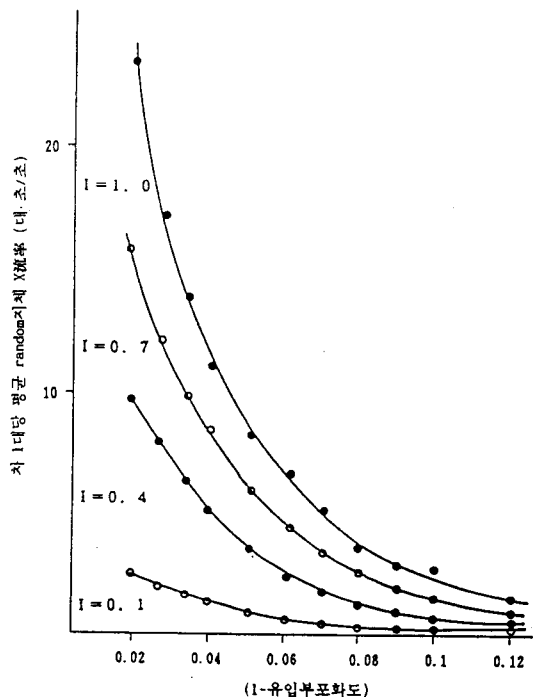


그림 4 시간당 평균 random지체와 포화도의 關係

3) 均一遲滯

① 고시(越)모델의 概要

고시는 가장 간단한 모델로서, 계통제어되는 인접한 2개의 교차로간에 대해서 다음과 같은 가정하에 고려하고 있다.

1. 링크양단신호의 신호주기, split, 飽和流率은 같다.
2. 직진교통류만 있고, 속도는 일정이며 차량확산은 없다.
3. split은 계통방향에 대해서 녹색 50%, 적색 50%이며, 완전포화상태이다.

위의 가정으로부터 양신호에의 도착교통과형은 단일포화방형파(rectangular wave)이다. 고시에 의하면, 신호주기 C가 링크의 왕복소요시간 T의 整數分の 1이라면 통과대(throughband)의 적색신호에 의한 정지는 없고 지체는 0이 된다.

일반적으로

$$t = \text{Min} |n \cdot C - T|$$

여기서 T : 링크 왕복여행시간약

C : 신호주기

n : 整數 0, 1, 2, 3, ……

t : 通過帶가 적색신호에 걸리는 量의 왕복합계

이다. 식에서 기본적인 offset형은, n이 0 혹은 偶數일 경우는 同時式, 奇數일 경우는 交互式이다.

② 고시(越)모델의 수정

고시모델에서는 양신호간의 split이 틀릴 경우는 고려하고 있지 않다.

여기서는 split이 서로 다를 경우를 고려한 경우에서의 링크길이, 신호주기와 지체의 關係를 조사했다.

그림 5는 수정된 고시모델에 의한 CI에서의 균일지체의 關係를 나타낸 것으로 그림에서 실선이 본래의 고시모델이고, 점선이 수정된 고시모델이다. 수정된 고시모델이 본래의 것보다 지체가 t^+ 만큼 높아지고 또, T지점에서 지체가 0이 안되고 있는 것을 알 수 있다.

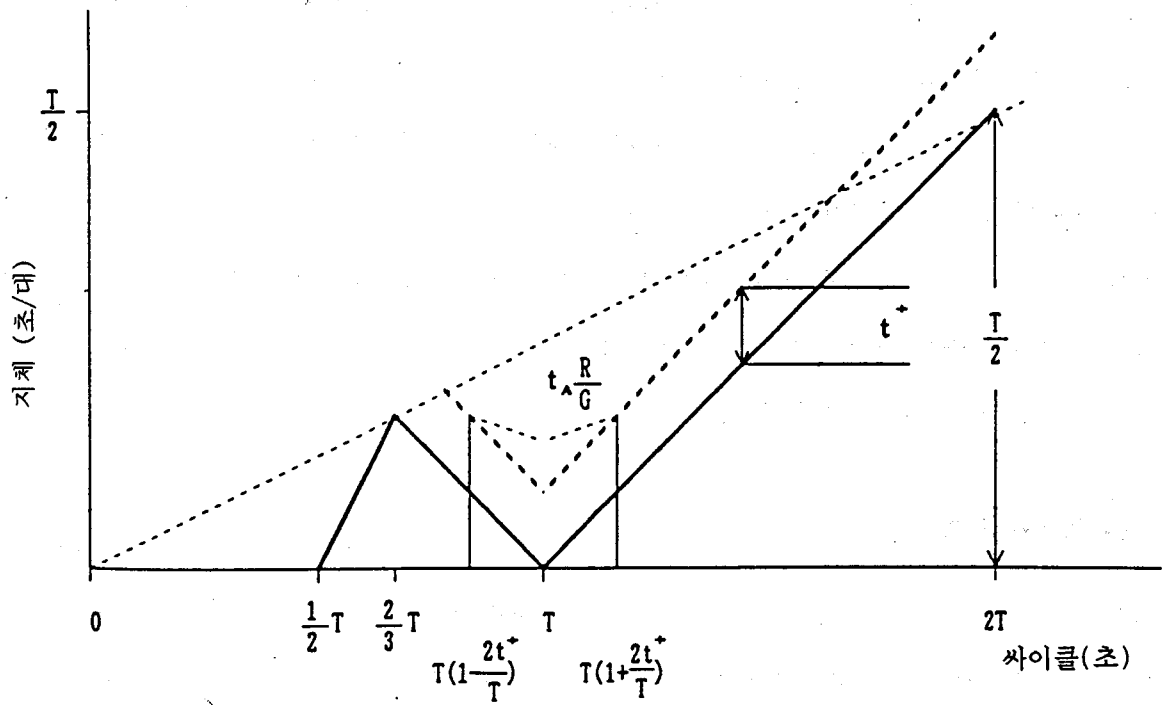


그림 5 수정된 고시모델에 의한 CI에서의 균일지체

4. 系統信號의 最適信號週期 設定法

신호교차로에서 교통용량이 신호주기에 지배되어진다는 점에서 계통신호제어에 있어서도 공통으로 사용되는 신호주기(common cycle length)는 critical 교차로 단독의 最適信號週期가 기본이 되어 운영되고 있다. 그러나 공동신호주기를 critical 교차로만으로 정한다는 것은 계통제어를 구성하는 링크와 교통류의 관계를 무시한 것이라고 할 수 있다.

여기서는, 3장에서 명백히 한 계통신호노선에서의 확정적(균일)지체와 확률적(random)지체의 신호주기와 관계에 관한 각각의 특성을 이용하여 노선의 최소지체를 평가기준으로 하는 最適信號週期の 특성, 근사계산식 및 그 적용에 대해서 논하였다.

1) 信號週期和 遲滯

표 1은 계통제어에서 최적신호주기 평가를 위한 simulation작업의 케이스를 나타낸 것이다.

주도로측과 종도로측의 유량비의 비율은 C.I에서는 50:50, 그외의 교차로에서는 60:40이다. 따라서 split은 C.I만이 50%이고 그외는 60%이다.

손실시간(losing time)은 양측을 합하여 10초이다. 따라서 $\lambda_1 + \lambda_2$ 는 1보다 작게 된다. 또 C.I에서의 포화도는 0.3~0.9의 범위로 여섯가지의 케이스를 정했다.

한편, 지체계산은 간선만의 경우와 network 전체로 나누어 계산했다.

그림 6은 simulation 결과의 한 예로 그림에서 윗 그림은 流率이 0.2125대/초의 경우로 신호주기가 짧아지고 따라서 포화도가 높아짐에 따라 random 지체가 차지하는 비율이 높아져 지체가 최소가 되는 신호주기의 臨界点이 존재하는 것을 나타내고 있다. 또, 그러한 현상이 I값에 의해서도 각기 다르다는 것을 보여주고 있다.

반면, 밑에 그림은 流率이 0.125대/초의 경우로 신호주기가 짧아져도 포화도가 높아지지 않음으로 해서 결국 random 지체가 적게 되고 반면에, 균일지체가 월등한 상태이기 때문에 고시모델과 같은 지체의 변화를 보이고 있다. 따라서 왕복여행시간에 상당하는 신호주기가 임계점(이하에서는 이것을 고시모델의 임계점이라 함)이 되고 있다.

표 1 최적싸이클 평가를 위한 simulation 작업케이스

항목 / 케이스	1	2	3	4	5	6
y_1^*	0.45	0.425	0.40	0.35	0.25	0.15
y_2^*	0.45	0.425	0.40	0.35	0.25	0.15
Y^*	0.90	0.85	0.8	0.7	0.5	0.3
q_1^* (대/시)	810	765	720	630	450	270
q_2^* (대/시)	810	765	720	630	450	270
$y_1^{(1)}$	0.45	0.425	0.40	0.35	0.25	0.15
$y_2^{(1)}$	0.3	0.283	0.267	0.233	0.167	0.1
$Y^{(1)}$	0.75	0.708	0.667	0.583	0.417	0.15
$q_1^{(1)}$ (대/시)	810	765	720	630	450	270
$q_2^{(1)}$ (대/시)	540	509	480	419	380	180

주) *는 C.I(중요교차로), (1)은 mimor 교차로

여기서

$$Y = (\text{교차로포화도}) = (y_1 + y_2) = \frac{q_1}{s} + \frac{q_2}{s}$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{60}{40} = 1.5, \quad y_1 = y_1^*$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{g_1/c}{g_2/c} = \frac{y_1}{y_2}, \quad \lambda_1 + \lambda_2 < 1.0$$

손실시간 = 10초

$$c - 10 = g_1 + g_2$$

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{y_1}{y_2}$$

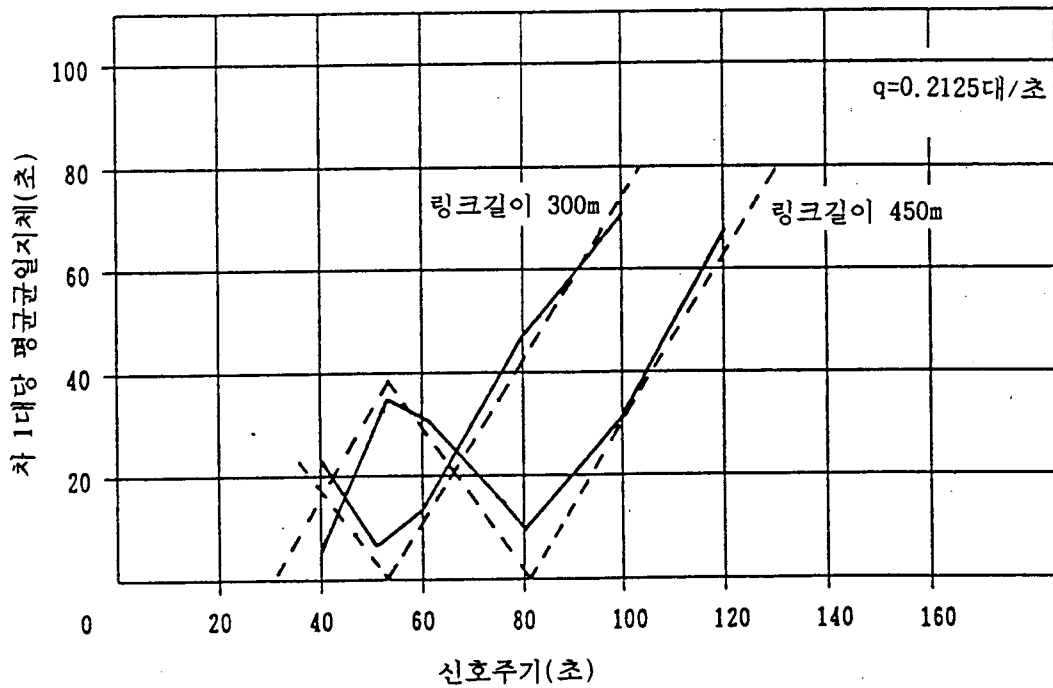
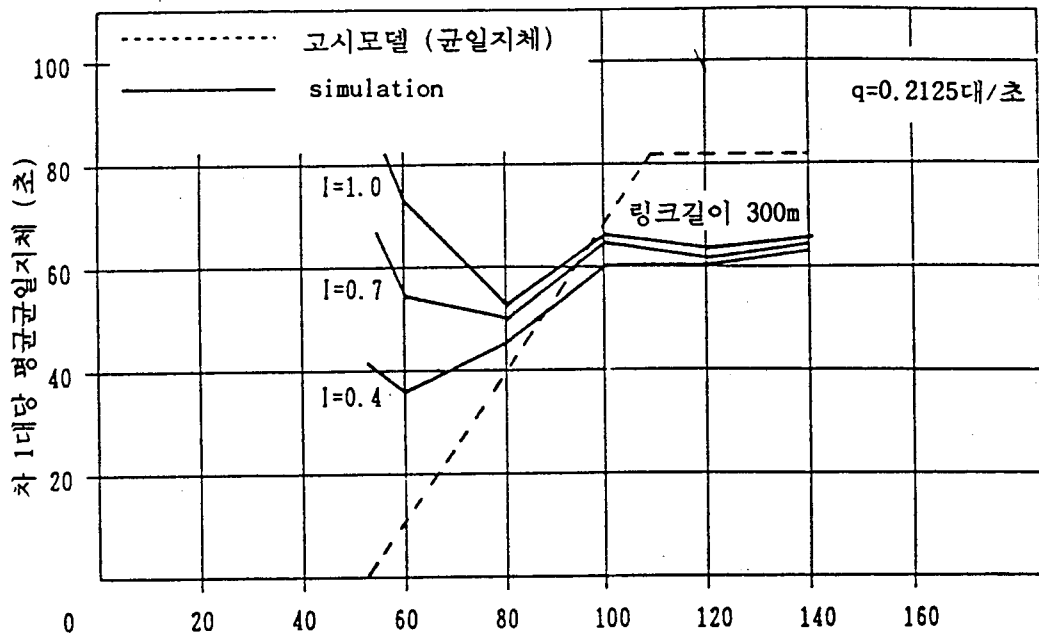


그림 6 간선에서 신호주기와 평균지체와의 관계의 simulation의 예

2) 系統信號路線의 最適信號週期探索

3장에서 언급하였듯이 계통신호노선에서의 지체는 균일지체에 대해서는 고시모델을 확대적용하는 것이 가능하고 random 지체에 대해서는 critical 교차로에서의 random 지체만을 고려하면 된다.

지체를 최소로 하는 신호주기를 구할 경우, 균일지체에 대해서는 고시모델의 임계점이상 부분을 고려하면 된다. 신호주기가 임계점이하에서는 random 지체를 고려하지 않더라도 지체는 신호주기와 음의 관계가 타월하기 때문이다. 또, 이 경우 각 링크에서의 균일지체의 합계를 고려해야 하지만 지체최소신호주기를 구한다는 목적으로 볼 때, 신호주기에 대해서 하향볼록함수의 微係數를 문제로 삼고 있기 때문에 지체의 절대량이 아니라 신호주기와 지체의 관계곡선구배를 취하면 족하다. 또, 이러한 관점에서 볼때 고시모델에서는 왕복여행시간의 2배이상 신호주기에서는 지체가 변하지 않는다는 점에서 그 부분을 취급할 필요는 없다 하겠다.

그림 7은 계통방향현시율을 critical 교차로측에 50%, 그외 교차로측에 60%, 여행속도를 40km/h, critical 교차로의 손실시간을 10초로 하여 $2T_i$ 에 의한 제약을 받지않는 링크수 n 이 2인 경우와 5인 경우를 예로해서 신호주기와 지체의 관계를 구한 예이다. 링크수가 많을수록 균일지체의 영향력이 크기 때문에 最適信號週期는 짧아지는 경향을 보인다. 또, 流量比와 I값을 조합한 경우를 비교하면 流量比가 높을수록 또 I값이 높을수록 最適信號週期는 길어지는 경향을 보인다.

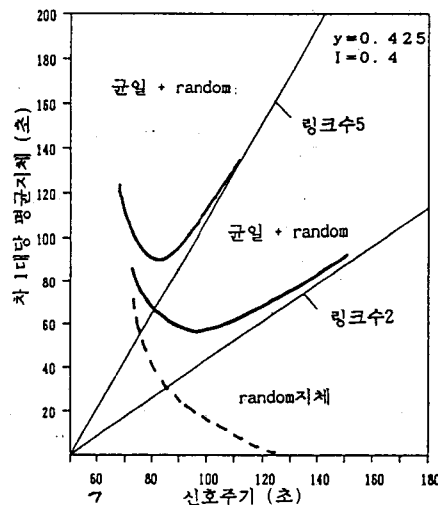


그림 7. 링크수와 最適信號週期の 예 (II)

3) 最適信號週期の 近似式

2)에서 알 수 있듯이 最適信號週期の 탐색은 가능하다. 그러나 最適信號週期를 해석적으로 구하려고 할 경우 지체와 신호주기와의 관계를 신호주기에 대해서 미분하는 것이 되나 그 미분은 그리 간단하지가 않다. 여기서는 다양한 설정조건에 대해서 수치계산에 의해 구한 最適信號週기에 입각하여 1노선에서 最適信號週期를 근사식으로 나타내는 식을 歸納的으로 유도하는 시도를 하였다.

앞에서 언급했듯이 노선의 最適信號週期에는, 신호주기에 대해서 증가함수의 관계가 있는 균일지체를 지배하는 노선구성링크와 거꾸로 감소함수의 관계에 있는 random 지체를 지배하는 I값 및 포화도가 관계하고 있다. 이들 중에서 3개이상의 링크수와 I값에 대해서는 그림 8, 그림 9에 보여지는 바와 같이 最適信號週期에의 기여(영향도)가 거의 없기 때문에, 포화도요인으로서의 critical 교차로 대상유입부의 유량비 $y=y_1$, 마찬가지로 해당 녹색시간에 관여하는 교차도로측 유량비 y_2 와 y_1 의 비 $r=y_2/y_1$, 및 critical 교차로의 손실시간 L 을 설명변량으로 해서 검증했다.

그림 10에서는 $L=10$ 초의 경우를 예로해서 r 과 最適信號週期 C_{op} 의 관계를, y 를 parameter로 제시한 것이다. 이 결과를 검토한 결과 일정한 y , r 에서 C_{op} 와 L 이 선형적인 관계에 있다는 것과 일정한 L , y 에서 C_{op} 와 r 이 2차적인 관계에 있다는 것으로 부터 $r=1$ 의 경우, y 와 C_{op} 의 관계를 기본으로 해서 다음의 근사식을 유도하였다.

$$C_{op} = \frac{1.2L + 1.5}{(1-1.98Y) + 0.42r(1-r)}$$

또, 본 식을 유도함에 있어서 고시모델의 임계점에 대해서는 고려되어 있지 않기 때문에 最適信號週期 결정에는 이 임계점을 제약조건으로서 추가하지 않으면 안된다. 본 식은 노선 링크수가 3이상의 경우이지만 링크수가 2인 경우에는 C_{op} 보다 10% 높게, 링크수가 1인 경우에는 20% 더 높게 책정하는 것이 바람직하다.

이 식은 critical 교차로를 중심으로한 1차선에 대한 것이나 critical 교차로의 신호주기를 정하기 위해서는 교차하는 노선중에서 유량비 y 가 critical한 노선에 대해서도 C_{op} 를 구할 필요가 있다. 따라서 각기 구해진 C_{op} 의 값 중에서 큰 값을 채택하여야 하며 그 결과를 Webster의 다음식

$$C_{op} = \frac{1.5L+5}{1-(y_1+y_2)}$$

에 의한 결과와 비교하면 다양한 y_1 과 y_2 의 조합에 대해서, 그림 11 ($L=10$ 초의 경우)과 같은 결과를 보인다. 본 근사식에 의한 값이 Webster값의 60~70%에 있음을 알 수 있다.

또, L 을 15초로 올려보아도 그 결과는 큰 변화가 없었다.

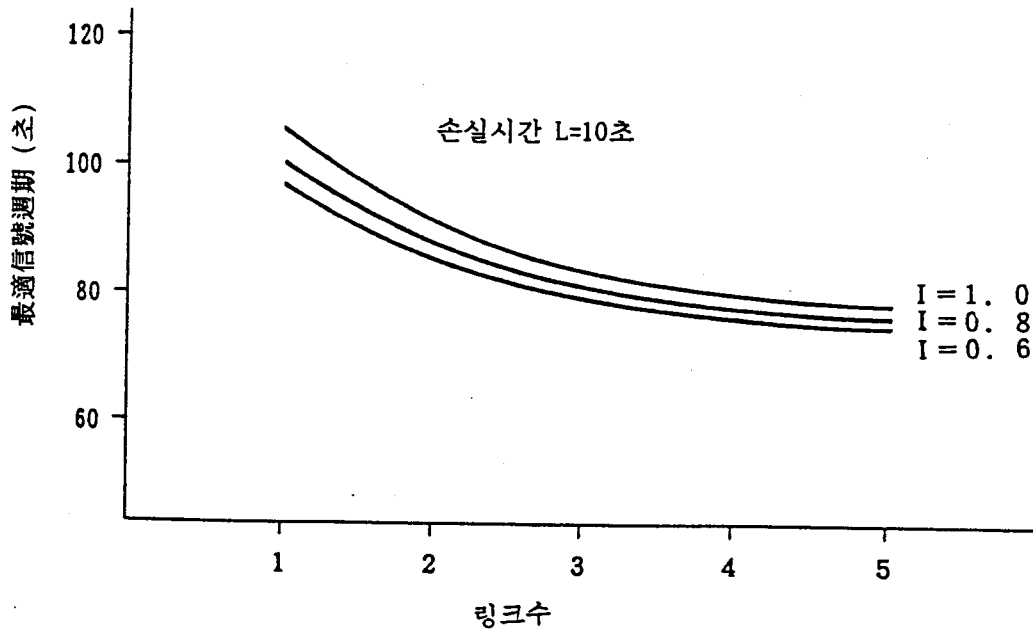


그림 8. 노선링크수와 最適信號週期

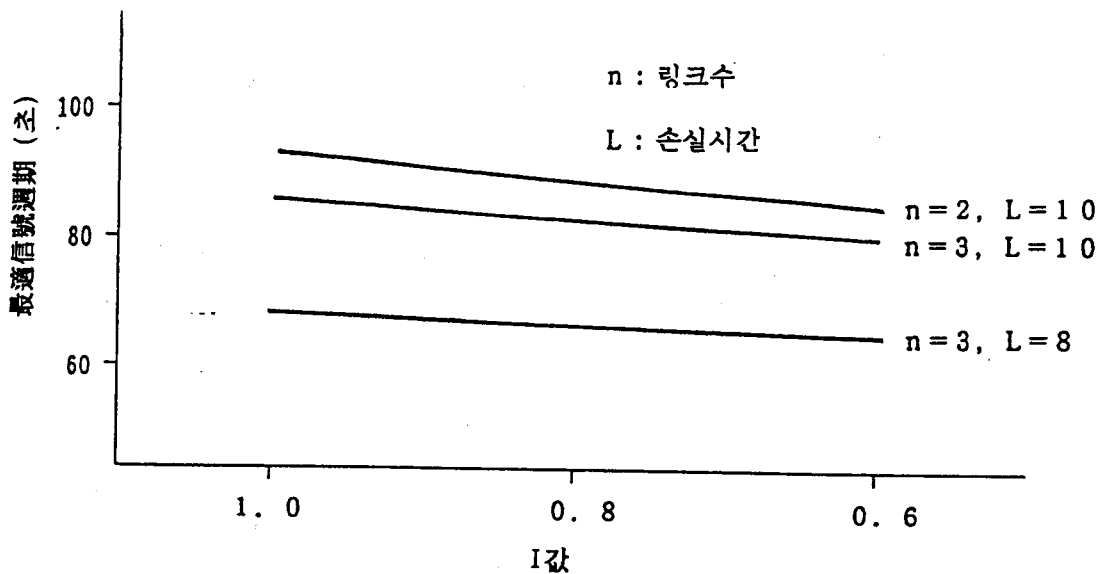


그림 9. I값과 最適信號週期

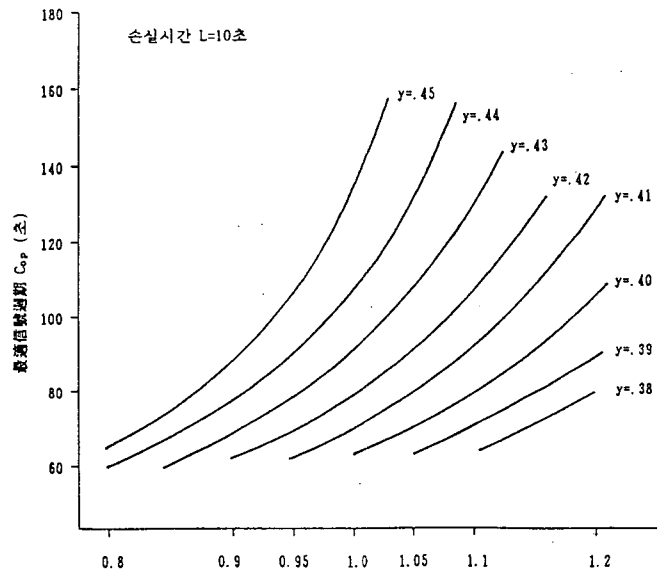


그림 10 해당 유입부 유량비($y=q/S$)와 교차유입부 유량비 y_2 와의 비($r=y_2/y$)와 C_{op}

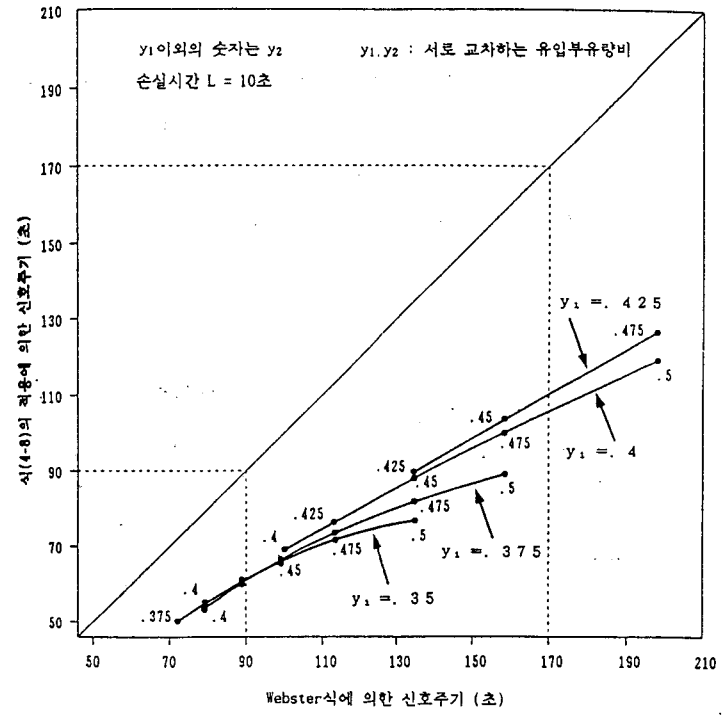


그림 11 본 연구 근사식의 적용에 의한 신호주기와 Webster식에 의한 신호주기와 비교

4) 最適信號週期の適用에 대해서

지금까지 논하였듯이 노선의 최적신호주기는 그 노선의 균일지체와 노선중에서의 critical 교차로 유입부의 포화도라고 하는 두개의 요인에 지배된다. 따라서 주복노선을 생각해 볼 때, 2개의 critical 교차로 유입부를 고려하지 않으면 안된다. 또 한개의 critical 교차로의 신호주기에 의해서 접속된 전체 노선의 지체가 정해지는 것이 된다. 이렇게 함으로써 대상은 network로서 확장되는 성질을 갖게 되나, network로 확장된다고 하더라도 본 연구에서 취급한 1차선에서의 신호주기와 지체의 관계를 확대적용하면 된다. 결과적으로 본 연구에서 취급한 한개의 critical 교차로를 중심으로 한 1방향 노선이 기본 unit이 된다. 이 기본 unit개념은 시스템취급의 자유도라는 점에서 볼 때 의미가 있다 하겠다. 또, I값에 대해서는 비포화일 경우 관측은 간단하다.

실제 운용에 있어 기본 unit마다 3)에서 제시한 근사식에 의거 假信號週期를 구해 假信號週期로부터 통일된 신호주기를 검토할 수 있다.

이 경우, 신호주기의 최적치로부터 편차가 지체에 끼치는 영향에 유의할 필요가 있다. 이것에 대해서 약간의 試算을 행한 결과를 예시하면 표 2와 같다.

random 지체의 특성으로 볼 때 당연한 결과이지만 지체의 증가는 신호주기가 길어짐에 따라서는 완만하나 짧아지면 급격히 늘어나는 경향이 있다.

표 2 最適信號週期 C_{op} 로부터의 편차와 지체의 증가율 (손실시간 10초의 경우)

r	C _{op} 로부터의 편차(%) y	-15	-10	최적신호 주기(초)	+10	+15	+20	+25	+30
		0.944	0.225	44.5	10.3	100	3.2	5.9	9.5
1.060	0.2	40.5	12.3	72	3.1	6.1	10.4	15.3	19.0
1.125	0.2	49.7	12.8	84	3.0	6.0	9.3	14.0	18.2
0.842	0.2375	41.2	9.2	100	3.2	6.4	10.0	13.6	18.0
1.214	0.175	43.9	10.7	57	4.2	7.8	12.2	17.5	22.0
平	均	44.0	11.1		3.3	6.4	10.3	15.3	19.7

주) y : 해당유입부 流量比, r : y와 교차하는 유입부 流量比와의 비율

5. 過飽和交通流狀態에서의 split coordination制御

過飽和現象은 交叉路容量을 초과하는 交通需要가 지속될 경우만이 아니라 近飽和, 飽和交通流에 있어서도 到着交通流의 일시적인 超過需要에 의해서도 발생된다.

過飽和現象이 지속되는 경우 待機行列은 서서히 늘어나 上流交叉路의 交叉側 交通流에도 영향을 끼치게 된다. 소위 spillback현상이 그것이다.

過飽和狀態에 있어서 停滯는 피할 수 없는 것이 된다. 따라서 過飽和時의 제어정책목표는 停滯現象의 시작을 늦추거나 spillback에 의한 녹색시간의 손실이라고 하는 2次障害의 방지, 더 나아가 總出力의 最大化(Total throughput maximization)라는 것이 될 수 있다.

기존 제어방법의 대부분은 비포화교통을 전제로한 것이기 때문에 과포화상태에서는 거의 효용이 없다. 또 몇가지의 과포화제어방법도 이론에 너무 치우친 나머지 실제현상에 적용하는 것은 어려운 실정이다.

본 장에서는 위에서 언급한 과포화교통제어의 목표를 달성하기 위하여, network에서의 split coordination이라고 하는 개념에 중점을 둔 제어방법에 대하여 논하고자 한다.

5.1 split coordination 制御概念과 시스템

1) split coordination의 概念

과포화에서의 신호제어방법에 있어서 가장 중요한 제어parameter는 split이다. 현재 split에 대해서는 교차로마다 독립적으로 정하는 것이 일반적으로 되어있다. 그러나 정체시에는 대기행렬이 항상 링크상류까지 뻗어있어 下流교차로의 split에 의해 통과된 교통량만큼이 상류교차로로부터 유입하는 것이 가능하다. 그렇기 때문에, 과포화신호제어에 있어서 split은 다른 제어parameter인 싸이클, offset과 마찬가지로 인접신호간에 coordination 되어져야만 한다.

이를 위해 본 연구에서는 Forward Coordination, Backward Coordination 및 Network Coordination이라고 하는 3종류의 split coordination제어를 제안하고 있다.

Forward coordination은 교통류의 前向波를 제어대상으로 하여 근포화 또는 포화교통류상태에서

到着流率의 변동에 의한 일시적인 초과수요의 누적으로 인한 정체현상의 발생방지를 목적으로 하면서 流入量과 流出量의 균형을 목표로한 하류교차로 녹색시간의 feed-back제어를 행한다. 이 경우에 하류교차로 교차도로측과의 균형도 고려하면서 제어를 하게 된다.

Backward coordination은 교차로의 後向波를 제어대상으로 해서 과포화교통류상태에서 상류교차로의 spillback방지를 목적으로 하여, 하류교차로의 유출량과 상류교차로의 유입량의 균형을 목표로 상류교차로 녹색시간의 feed-back제어를 하면서 여분의 녹색시간을 상류교차로의 교차도로 및 그 외의 현시에 배분하는 것이다.

Network coordination은 정체발생원이 되고 있는 neck교차로에서, 주종도로 어느쪽 방향이든지 녹색시간을 최대로 제어하는 것에 의해 정체된 network의 특정방향출력을 최대화 하는 것으로 政策的 介入制御를 목표로 한다. 이 경우 앞에서 설명한 2가지의 coordination제어, 특히 Backward coordination제어는 network coordination제어의 戰略的 制御를 위한 戰術的 要素로서 각 교차로에서 불가피한 것이 된다.

이러한 split coordination개념을 구사하면서 본 연구에서는 하나의 제어시스템을 대상으로 하고 있다.

2) Forward Coordination 制御

Forward Coordination제어는 근포화, 포화교통류상태에서 도착교통류의 변동에 의한 일시적인 초과수요의 누적에 의한 대기행렬의 성장을 방지하기 위하여, 상류교차로부터의 유입량과 하류교차로의 유출량의 平衡을 유지하도록, neck교차로에서의 포화도가 0.8이상이면 양 링크 모두 대기행렬이 Backward제어개시지점까지 도달하지 않은 경우에 행하여 진다. 제어알고리즘은 그림 12와 식 (5.1)과 같다.

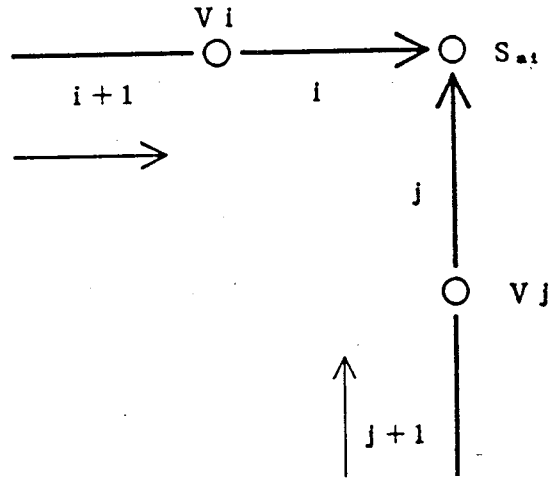


그림 12. Forward 제어개념

$$G_i(t+1) = G_i(t) + b \times \frac{TH_i(t) + \{TH_i(t) + TH_i(t)\}/2}{\{TH_i(t) + TH_i(t)\}/2} \dots\dots\dots (5.1)$$

여기서 b : Forward제어 parameter

$G_i(t)$: 녹색시간

t : 사이클번호

$V_i(t)$: 유입교통류 (대/시)

$H_i(t) : V_i(t) - S_{mi} \times G_i(t)$

$TH_i(t)$: 통과못한 잔류대수 (대)

$TH_i(t) = \sum_{i=1}^n H_i(t)$

S_{mi} : 飽和交通流率 (대/녹색시간)

$TH_i(t)$: 잔류대수의 합 (대)

IF $TH_i(t) < 0$ THEN $TH_i(t) = 0$

3) Backward coordination 制御

Forward coordination제어에 의해 어느정도 대기행렬이 성장억지가 되더라도 교통수요초과가 지속되면 대기행렬성장에 의한 상류교차로에서의 spillback현상을 피할 수 없는 것이 된다. Backward coordination제어는 그림 13에서 대기행렬이 검지기 2에 도달하면서 시작된다. 따라서, 검지기 2에서 측정되어진 교통량은 하류교차로 교통량의 변동을 반영하고 있다. 제어는 검지기 1에서의 流量과 검지기 2에서의 流量과의 차로부터 계산되는 누적잔류대수가 0이 되도록 G_i (상류교차로의 주도

로측 녹색신호시간)의 On-line feed-back제어를 싸이클베이스로 행한다. 또 G_j 의 급격한 변동을 막기 위하여 調節의 베이스가 되는 녹색시간의 값에 대해서 指數平滑法을 적용하였다. 제어알고리즘은 식 (5.2)와 같다.

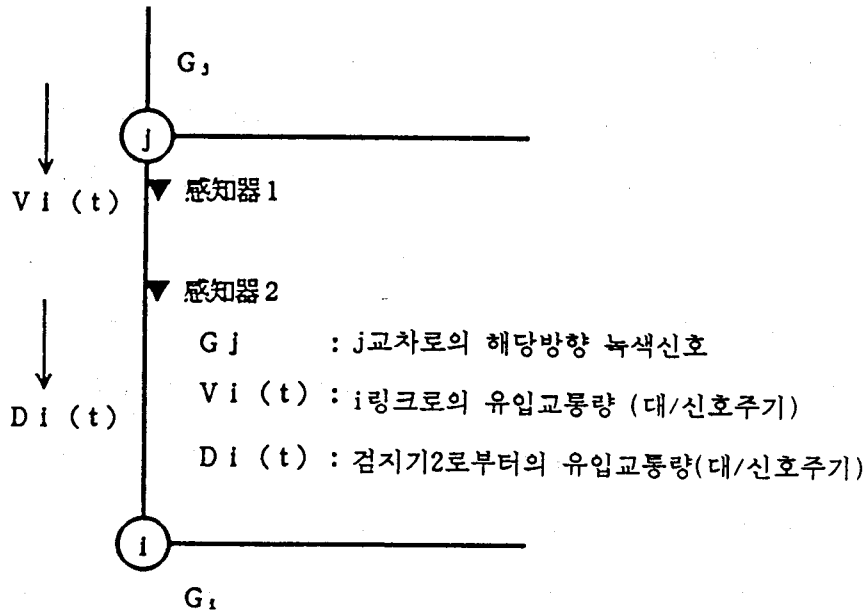


그림 13. Backward coordination 제어개념

$$G_{j(t+1)} = \alpha \times G_{j(t)} + (1-\alpha) \times G_{j(t+1)} - k \times N_{(t)} \dots\dots\dots (5.2)$$

여기서 α : 指數平滑係數 k : Backward coordination 제어 parameter

$$N_{(t)} = \sum_{i=1}^n (V_{f(i)} - D_{f(i)})$$

$N_{(t)}$: 누적잔류대수 (대)

5.2 split coordination 制御方策의 評價

split coordination 제어방책의 평가는 MACSTRAN의 출력결과로부터 이하의 평가항목에 대해서 기존 제어와의 비교에 의해 행해졌다.

1. 평균 1대당 지체 (초/대)

2. network 총유출대수 (대)
3. 각 링크마다의 유출대수 (대)
4. 각 링크마다의 녹색시간이용률 (%)
5. network의 포화링크수 (개)
6. 방향별 총 유출대수 (대)

본 연구의 중요한 목적은 과포화 network의 총유출대수를 최대화하는 것에 있기때문에 총유출대수를 평가의 중요항목으로 선정했다. 또, 지체를 서비스수준의 전반적인 평가로서 사용했다.

1) 車輛 한대당 平均遲滯

표 3은 각 경우별의 simulation에 의한 1대당 평균지체를 新方策과 既存方策별로 종합한 것이다.

경우 4, 9, 10의 세 경우를 제외하면 split coordination에 의한 新方策이 좋은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 양 방향별 1200대/시의 경우에는 최대녹색시간과 飽和流率패턴에 상관없이 既存方策보다 11%~22%정도 좋은 결과를 보이고 있다.

그러나 그외의 경우로 방향별 입력교통량에 차가 있는 경우는 반드시 新方策이 좋은 결과를 나타내고 있는 것은 아니고, 경우 4, 9, 10과 같이 飽和交通流率과 입력교통량의 패턴의 경우는 나쁜 결과도 보이고 있다. 또, 新方策이 좋은 결과를 나타내고 있는 경우에 대해서는 1대당 지체에 있어 기존 방책과 비교하여 평균 15%의 개선효과가 보였다.

新方策이 좋은 결과를 보이고 있는 경우 1을 보면 지체의 차뿐만 아니라 정체의 발생시간과 소멸시간 모두 既存方策과 비교하여 좋은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 또, 대상 simulation시간 (4000초)에 있어서도 1대당 약 3분 지체의 감소가 보였다.

표 3 simulation 결과 일람 (1대당 지체)

단위 : 초/대

G_{min} G_{max} (초)	경우	既存方策	新方策	(新-既存) 차	비율 (%)
30 70	경우 1	831.3	689.4	-141.9	-17.1
	경우 2	795.9	618.8	-177.1	-22.3
	경우 3	437.0	436.0	-1.0	-0.2
	경우 4	444.5	494.0	+49.5	+11.1
	경우 5	684.9	586.6	-102.3	-14.9
	경우 6	616.0	525.0	-91.0	-14.8
38 62	경우 7	807.6	718.4	-89.2	-11.0
	경우 8	787.1	655.3	-131.8	-16.7
	경우 9	454.8	565.6	+110.8	+24.4
	경우 10	491.2	551.2	+60.0	+12.2
	경우 11	663.6	599.3	-64.3	-9.7
	경우 12	574.4	483.5	-90.9	-15.8

2) 停滯時의 network 總 流出臺數

정체시에 있어서 network 유출링크에로의 통과 대수를 최대화하는 것은 과포화시 신호제어방책의 가장 중요한 과제이다.

표 4는 제어시간대 전체에 걸쳐서 정체가 지속된 경우, 新方策과 既存方策의 유출링크에로의 총 유출대수를 경우별로 종합한 것이다.

앞에서도 설명하였듯이 新方策은 과포화상태에서 가장 효과가 있으므로 총 유출대수의 평가에 있어서도 모든 경우에서 既存方策의 능력을 약 15% 上回하고 있다.

표 4 정체시의 新方策과 既存方策의 network 유출대수

경우	항목	유출대수 (대/사이클)		(新 - 既存)	率 (%)
		新方策	既存方策	差 (대)	
경우 13		167.2	147.4	+19.8	+13.4
경우 14		169.6	148.7	+20.9	+14.1
경우 15		168.6	146.3	+22.3	+15.2
경우 16		171.8	147.2	+24.6	+16.7

3) network의 飽和링크數

新方策과 既存方策에 의한 network內 링크의 LOS(Level of service)를 알아보기 위하여 매 사이클마다의 포화링크數를 조사했다. 여기서 포화링크는 新方策, 既存方策 모두 대기행렬의 최후미가 링크의 2/3이상까지 도달해 있는 상황을 취하였다.

그림 14를 보면 新方策이 포화링크數가 적고 정체의 시작시간이 늦으며 정체해소 역시 빠르다는 것을 알 수 있다.



그림 14 新方策과 既存方策의 포화링크비교

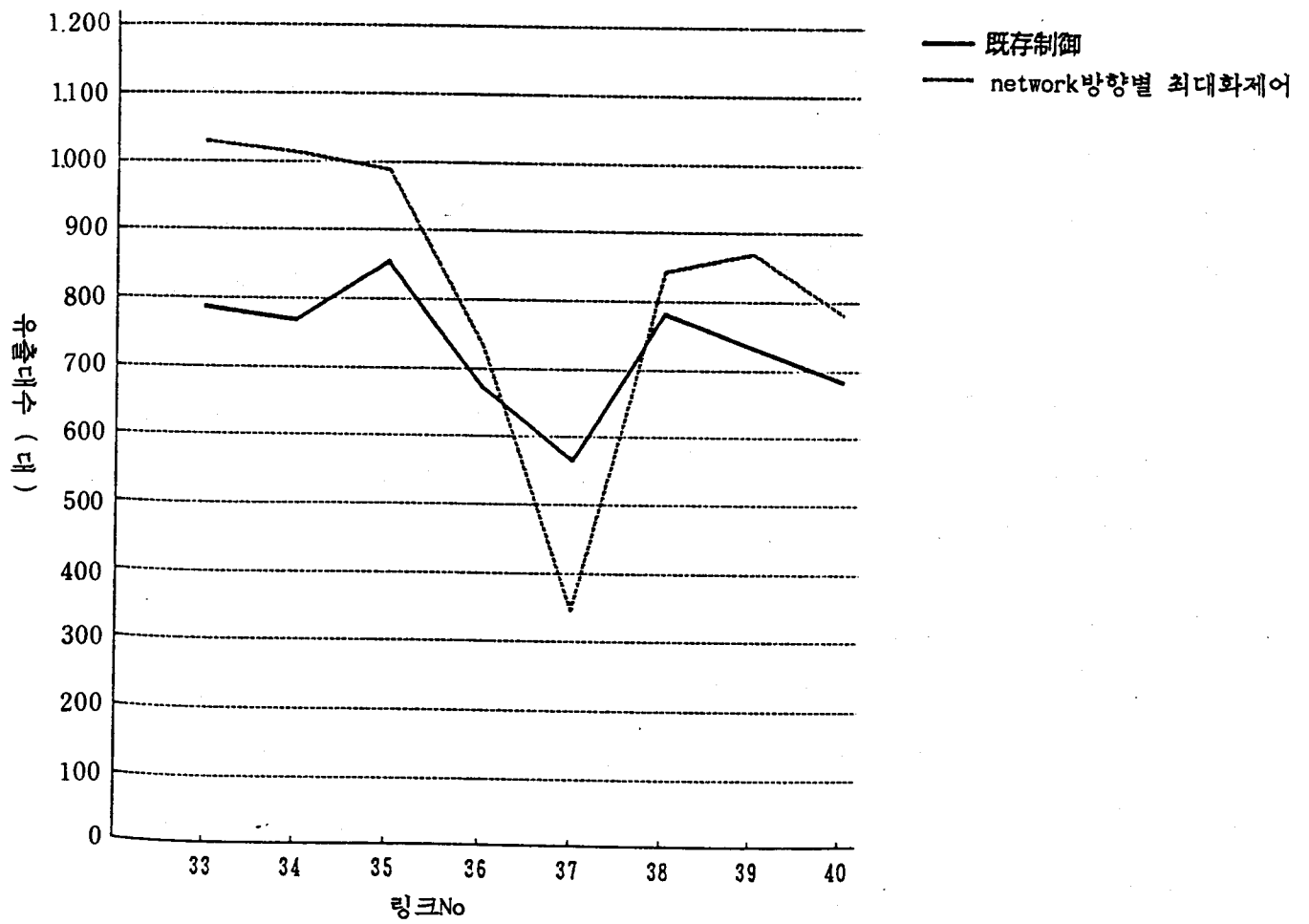


그림 15 유출링크별 유출대수

4) 링크別 流出臺數와 綠色時間利用率

앞에서 지체와 유출대수 등에서 新方策과 既存方策의 전체적인 비교를 해보았다.

여기서는 新方策과 既存方策의 差를 더욱 자세히 알아보기 위하여 매 링크마다의 유출대수와 그때의 녹색시간이용률(延 유출대수/(飽和流率×延 녹색시간) 延 유출대수를, simulation시간 1000초로부터 2000초까지의 출력으로부터 구했다.

新方策쪽이 좋은 예에 있어서는 새로운 방법에서의 녹색시간이용률이 평균 90.6%로 既存方策의 평균 79%보다 높으며 또 유출대수에 있어서도 평균 228대로 既存方策의 평균 204대를 상회하고 있다.

거꾸로, 新方策이 나쁜 예에 있어서는 새로운 방법의 녹색시간이용률이 평균 79.6%, 既存方策이 평균 80.4%로 차는 거의 없으나 유출대수에 있어서 既存方策이 평균 11대 정도로 상회하고 있음을 알 수 있었다.

5) network 方向別 流出臺數

network coordination에 의한 방향별 유출대수최대화제어의 가능성을 확인하기 위하여 neck교차로의 32번 링크의 녹색시간(G_{32})을 최대(70초)로한 simulation을 행하였다. 그림 15는 G_{32} 에 최대녹색시간을 제공하여 남북방향별 유출대수의 최대화를 시도한 경우의 新方策과 既存方策에 의한 각 유출링크별 누적유출대수를 나타낸 것이다.

新方策의 결과를 보면 링크 33, 34, 35, 36 즉, 북쪽방면의 유출대수가 동쪽방면 보다도 25%이상 더 빠져나가고 있음을 알 수 있다. 또, 동쪽방면 유출대수도 기존제어와 거의 같은 수준을 보임을 알 수 있다. 新方策에서는 neck교차로의 최대녹색시간을 특정방향에 제공하는 정책적 개입제어에 의해 다른 방향의 처리능력을 현상태로 유지하면서 특정방향의 처리능력을 약 25% 향상시키는 효과를 볼 수 있다.

6. 結 論

본 연구는 교통신호제어에서 미해결의 중요한 과제인 계통제어의 신호주기결정법과 앞으로의 중심과제라고 믿어지는 과포화교통류의 신호제어방책에 대하여 연구를 진행하였다.

신호교차로의 교통용량이 신호주기에 지배되어지는 것으로부터 계통신호제어에서도 공통신호주기는 critical 교차로 단독의 最適信號週期가 기본이 되어져 있다. 그러나 이 경우에는 계통제어를 구성하는 링크와 교통류의 관계가 무시되어져 있다고 할 수 있다.

한편, 신호에 의한 차의 지체에 대해서는 적색신호에 의해 멈추어짐으로써 생기는 確定的 遲滯와 도착류의 random성에 의해 생기는 과잉대기행렬에 기인하는 확률적 지체가 있어 이 양자는 신호주기와의 관계에 있어서 상반하는 성질을 갖고 있음으로 해서 지체가 최소가 되는 最適信號週期는 양자의 상호작용에 의존한다. 그런데 가로망에서의 교통류는 신호로 정류되어지기 때문에 random성이 적다고 일반적으로 생각하고 있으나 이것이 random 지체에, 더 나아가 最適信號週期에 어느정도 관여하는가에 대해서는 잘 알려져 있지 않다.

본 연구의 첫번째 연구에서는 이 random 지체를 명백히 하여 오랫동안 남아있던 중요과제인 계통신호의 最適信號週期에 대해서 논하였다.

교통신호계에서의 또다른 과제는 과포화교통의 제어이다. 신호제어의 3대 parameter중, 싸이클의 문제는 부차적이라 할 수 있다. offset에 대해서는 비포화교통에서의 최적해 연구는 꽤 행하여진 반면, 과포화에서는 주종의 유입량 제어를 빼면 offset의 중요성은 약하다.

과포화상태의 최우선사항은 교통용량최대화를 위한 녹색시간의 고도유효이용으로 그러기 위해서는 split제어가 무엇보다도 중요하게 된다. 현재 split에 대해서는 비포화에서의 Webster개념에 의한 교차로 개별제어가 주류가 되어있고 위에서 언급한 목적에서의 검토는 적다고 하겠다.

따라서 본 연구 두번째 연구테마는 정체시 대기행렬로 연결되어지는 교차로는 당연히 그 녹색시간이 연계되어야 한다는 시점으로부터 싸이클, offset과 마찬가지로, split의 coordination제어개념을 새로이 도입한 제어방책을 논하였다.

본 연구의 성과는 각 장별로 다음과 같이 요약할 수 있다.

제2장 「교통신호제어의 현황과 과제」에서는 기존제어방책에 대해서 개관하면서 과제를 논한 뒤에 본 연구의 위상을 명확히 하였다.

제3장 「계통신호노선에서의 교통류의 지체특성」에서는 계통신호계의 신호주기를 취급함에 있어 불가피한 교통지체에 대하여 확정적 지체와 확률적 지체의 특성을 조사해 각각 명확히 하였다. 이를 위한 수단으로서 확정적 지체에 대해서는 차량 한대 한대의 도착과 출발을 다루는 micro simulation, 또 확률적 지체에 대해서는 주로 Markov연쇄에 의해 과잉대기행렬을 구하는 계산 simulation에 의거했다.

확정적 지체와 신호주기와의 관계를 노선을 구성하는 다양한 링크길이의 조합과 다양한 교통량레벨 등에 대해서 조사한 결과로서 고시에 의한 링크단일포화방형과도착모델이 복수 링크의 노선과 비포화조건에 있어서도 일반적으로 확대적용이 가능하다는 것을 제시하였다. 이 특성은 링크의 왕복여행시간을 T 로 할 경우 신호주기가 $T \sim 2T$ 의 영역에서는 확정적 지체는 신호주기에 정비례하고 $2T$ 이상의 영역에서는 일정하다는 것을 말한다.

확률적 지체에 대하여 계산 simulation에 의한 결과와 Newell의 근사식에 의한 결과를 micro simulation에 의해 검증한 결과, 전자는 교차로유입부 포화도 0.95미만에 있어서, 또 후자는 0.95이상에 있어서 적합하다는 결과로부터 random 지체의 산출방법을 포화도에 의해 분리하여 사용함이 바람직하다는 것을 알았다.

또 계통신호노선에서의 확률적 지체는 Newell의 주장과 같이 critical 교차로 유입부만을 고려하면 충분하다는 것을 확인했다.

마지막으로 다양한 교통요건에 대해서 확률적 지체를 구한 결과로부터 random 지체의 시간당 지체를 교차로유입부 포화도와 도착류의 random parameter I 의 관수로서 정식화했다. 이 경우 유입부 포화도의 어느 레벨이상에 있어서는 확률적지체가 증가하는 성질이 있고, 이것은 또 I 값이 커짐에 따라 현저하게 됨을 알았다.

제4장 「계통신호계의 신호주기설정법」에서는 제3장에서 규명한 계통신호노선에서의 확률적지체의 신호주기와의 관계에 관한 각각의 특성을 이용하여 노선지체 최소를 평가기준으로 하는 最適信號週期の 특성과 그 근사계산식 및 적용에 대해서 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

확정적지체가 신호주기의 특정영역에서 정비례하는 성질과 확률적지체가 신호주기의 단축에 의해 증가하는 성질로부터 양자합성에 의한 지체가 극소로 되는 신호주기가 존재하며 다양한 조건에 의한 이 극소점의 위치는 제3장에서 명백히한 특성을 이용함으로써 구할 수 있음을 제시하였다.

이렇게 조사된 결과 I값과 셋 이상의 링크수는 최적싸이클 결정에의 기여가 낮음으로써 포화도 요인으로서의 critical 교차로 대상 유입부의 유량비(到着流率/포화도율) y_1 , 마찬가지로 녹색시간에 관여하는 교차도로측 유입부의 유량비 y_2 와 y_1 의 비 r 및 critical 교차로의 손실시간 L 을 最適信號週期の 설명변량으로서 검증했다. 그 결과 손실시간과 最適信號週期の 관계가 선형에 있는 것과 y_1 과 最適信號週期の 관계가 r 에 의해 제어되어지는 특성을 찾아내어 이것에 의한 最適信號週期の 근사 계산식을 유도하였다. 또 여기에 제시하고 있는 근사식에 의한 신호주기는 교차로만을 대상으로한 Webster의 근사식과 비교해서 낮은 값을 취해 Webster에 의한 과대추정문제가 개선되었음을 제시하였다.

본 연구에서는 노선에 있어 하나의 critical 교차로 유입부의 포화도와 그 노선의 균일지체(uniform delay)를 요인으로서 다루었다. 따라서 왕복노선을 생각할 경우 두개의 critical 교차로 유입부를 고려하지 않으면 안된다. 또, 한개의 critical 교차로의 신호주기에 의해 이것에 접속하는 전 노선의 지체가 결정되어지는 것이 된다. 이렇게 하여 대상은 network로서 확대되는 성질을 갖게 되나 그 어느경우도 본 연구에서 고려하고 있는 1노선에서의 신호주기와 지체의 관계를 확대적용할 수 있다. 따라서 본 연구의 대상이 기본unit이 되고 이 unit의 개념은 시스템을 취급함에 있어 자유도라는 점에서도 의미가 있음을 주장하였다.

이러한 것으로부터 실용상에서는 이 unit마다의 가상 신호주기를 구해 각 가상 싸이클에 의해 신호주기를 검증하는 것을 제안했다. 한편, 신호주기의 최적값으로부터의 편차에 유의할 필요가 있는 것으로부터 그 음·양의 편차와 지체의 증가율과의 관계를 제시하였다.

제5장 「과포화상태에서의 신호계의 split coordination 제어」에서는 split의 Forward coordination (Forward Coordination), Backward coordination(Backward Coordination) 및 network coordination (Network Coordination)라고 하는 3수준의 제어방책을 제시하여 각각의 알고리즘과 기능의 평가를 다루었다.

Forward coordination는 교통류의 前向波를 제어대상으로 해서 근포화와 포화시의 到着流率의 변동에 의한 일시적인 초과수요 누적에 의한 정체발생방지를 목적으로 하면서 유입량과 유출량의 균형을 목표로 한 하류교차로의 녹색시간 feed-back제어를 행한다. 이 경우에 교차도로측과의 균형도 고려한 제어 parameter의 적정한 값에 대하여 안정성의 면으로부터 검토결과를 제시했다.

Backward coordination는 교통류의 後向波를 제어대상으로 해서 과포화시의 상류교차로에서의 spillback방지를 목적으로 하면서 유출량과 유입량의 균형을 목표로 상류교차로의 녹색시간 feed-back제어를 하며 여분의 녹색시간을 교차도로의 현시에 배분한다. 이 경우도 제어 parameter의 적정한 값에 대해서는 안정성의 면으로부터 검토결과를 제시했다.

network coordination는 정체발생원이 되고 있는 neck교차로에서 주종 어느쪽인가의 방향에 녹색시간을 최대한으로 제공함으로써 정체 network의 특정방향출력을 최대화하는 것으로 정책적 개입제어를 목적으로 한다. 이 경우 앞에서 언급한 2개의 split coordination제어, 특히 Backward coordination제어는 전략적 제어를 위한 전술적 요소로서 각 교차로에서 불가피한 것임을 나타냈다.

이러한 제어방책의 기능을 평가하기 위하여 既存의 實用法 중에서도 가장 새로운 싸이클베이스의 실용제어인 포화도비제어와의 비교를 격자상 network에서 다양한 조건하에 simulation을 하였다. 그 결과로서 既存方策과 비교하여 교통지체는 10~15%, network용량은 15%의 개선효과가 나타났다.

이상을 요약하면 본 연구에서는 계통신호노선에서의 교통류지체 계산방법과 종래로부터의 중요과제였던 계통신호계의 最適信號週期 설정법을 제시하고 또, 금후의 중심과제인 과포화상태의 신호제어에 대하여 split coordination의 신개념에 의한 제어방책을 제시하여 그 효과를 명백히 할 수 있었다.

앞으로의 과제로서는 신호주기에 대해서는 細街路와의 유출입을 고려한 正道의 向上, 또 split coordination에 대해서는 다양한 정체패턴에서의 개입제어 고도화의 문제가 고려되어야 한다.

참 고 문 헌

- 1) Webster F. V. : Traffic Signal Settings, *Road Research Tech. Paper*, No.39, Great Britain Road Research Laboratory, London, (1958).
- 2) Ikenoue K., Nakamura K. and Miyasako T. : Experiments with an Adaptive Control Policy for Oversaturated Critical Intersections, *Compendium of Technical Papers*, ITE 53rd Annual Meeting, pp.10-14-10-18, (1983).
- 3) Gazis D.C. : Optimal Control of a System of Oversaturated Intersections, *Operations Research*, Vol.12, pp.815-831, (1964).
- 4) D'Ans G., Gazis D.C. : Optimal Control of Oversaturated Store-and-Forward Transportation Networks, *Trans. Sci.*, Vol.10, pp.1-19, (1976).
- 5) Michalopoulos P.G., Stephanopoulos G. : Optimal Control of Oversaturated Intersections, *Traffic Engineering & Control*, 19, pp.216-221, (1978).
- 6) Michalopoulos P.G. and Stephanopoulos G. : An Algorithm for Real-Time Control of Critical Intersections, *Traffic Engineering & Control*, 20, pp.9-15, (1979).
- 7) Newell G. F. : The Flow of Highway Traffic Through a Sequence of Synchronized Traffic Signals, *Trans. Sci.*, pp.390-405.
- 8) Newell G. F. : Statistical Analysis of the Flow of Highway Traffic Through a Signalized Intersection, *Q. Appl. Math.*, 13, pp.353-369, (1956).
- 9) Miller A. J. : Some Operating Characteristics of Fixed Time Signals with Random Arrivals, Institute of Highway and Traffic Research, University of New South Wales, (1969).
- 10) Newell G. F. : Approximation Methods for Queues with Applications to the Fixed Cycle Traffic Light, *SIAM Rev.*, 7(2), pp.223-240, (1965).
- 11) Gartner N. H., et al : Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed-Integer Programming, Part II, The Network Synchronization Problem, *Trans. Sci.*, 9, pp.344-363, (1975).

- 12) Gartner N. H., Little J.D.C. and Gabbay H. : MITROP : A Computer Program for Simultaneous Optimization of Offsets, Splits, and Cycle Time, *Traffic Engineering & Control*, 17, pp.355–359, (1976).
- 13) Werner Brilon and Ning Wu : Delay at Fixed Time Traffic Signals under Time–Dependent Traffic Conditions, *Traffic Engineering & Control*, 31, pp.623–631, (1991).
- 14) Newell G.F. : Stochastic Delays on Signalized Arterial Highways, *Proc. of the 11th Int. Sym. on Transpn and Traffic Theory*, pp.589–598, (1990).
- 15) 李, 池之上, : 系統交通信号における遅れの特性と最適サイクル長に関する研究, 交通工学, 交通工学研究会, (1992).
- 16) 李 光勳 : 連動信号制御系에서의 交通流의 지체, 大韓交通工學會, 大韓交通學會誌, No.9, pp.47–56, (1991).
- 17) 李, 池之上, 安井 : 近飽和, 過飽和交通流における信号遅れ, 土木計畫學研究講演集, pp.205–212, (1990).
- 18) 李, 池之上, 林 : 過飽和交通による信号交差点での先づまり現象について, 第10回交通工学研究發表會論文集, pp.101–104, (1991).
- 19) 李, 池之上, 安井 : 過飽和交通流の信号制御方策の一提案, 日本大學理工學部學術講演會, pp.241–242, (1991).