

서울市 신호체제의 적정 phase split 과 연쇄화를 위한 최적 offset*

(Determination of Optimal Phase Split and Offset for the Synchronization
of Traffic Signals in the CBD of Seoul.

朴 景 洙**

Abstract

The coordinated control of the traffic signals of adjacent intersections can reduce delays, relative number of stops and congestions in the coordinated traffic area. The road capacity can be increased to a certain extent because the stopping and starting of vehicles facing red traffic lights can be avoided in many instances due to the progression established along an artery. However, if traffic centers or leaves the main flow in irregular volumes on the intermediate road section, a coordination of traffic signals is unnecessary and may even be harmful.

Therefore, a computer simulation model to simulate and predict the effectiveness of a synchronized traffic signal system in the CBD of Seoul was developed and alternative policy variables, such as cycle time, offsets, phase splits, to be fed into the simulation model had to be generated. This is a report of (1) the development of a heuristic algorithm for the determination of phase splits when there are amber periods specifically reserved for left turns and (2) the computerization of time-space diagramming.

1. 서 론

일반적으로 교통 체제의 효율적인 관리를 연구하는 목적은 교통소통을 원활히 하여 지체시간을 줄이고 운전 소요시간을 단축하는 데에 있다. 이외에도 교통체제의 성능을 나타내는 척도로는 1 km 를 주행할 때의 정지횟수라던가, 안전운행, 혹은 주어질 교통체제가 전체적으로 단위시간당 취급할 수 있는 총 교통량 등을 들 수 있으며 도로망을 확장하는 등의 근본적인 정책과 병행되어 연구되어야 할 것으로는 효율적인 신호체제 관리가 있다.

효율적인 신호체제 관리를 위해서는 허용된 phase

의 적정 split 의 결정과 함께 간선 도로망의 경우에는 전진체제 (progression system) 내지는 연쇄화를 하여 교통조건의 개선을 한 예들이 많이 보고되고 있다.[1]

여기서 신호등의 전진체제라함은 앞(교통이 진행하고 있는)방향에 있는 신호등의 靑色주기가 뒤에 있는 신호등의 靑色주기보다 상대적으로 늦어지도록 인접한 두 신호등의 靑色 개시時刻(offset)을 조직적으로 조정하여 주행중인 차량이 교차로에서 지연됨 없이 몇 개의 교차로를 계속 진행할 수 있도록 하는 신호체제를 말한다. 그러므로, 전진체제가 사용될 때에는 赤色주기에 교차로에서 대기하고 있던 차량은 일단 靑色주기가 "터지면" 靑色주기의 "물결"을 타고 좀 교차로에서 赤色 신호등을 만남이 없이 계속 달릴 수 있는 것이다.

이렇게 전진체제를 이용하여 신호등을 연쇄화하면 교통지연, 정지회수, 혼잡(congestions)을 피할 수 있고 각 교차로에서 赤色 신호등때문에 대기하는 차

* 본연구는 한국과학기술연구소를 위해서 수행된 교통경제 연구의 일환이며 재정적 지원과 논문문을 발표하도록 해준 교통경제연구실의 황규부 실장께 감사드립니다. 또한 본論文에 대해서 많은 조언을 해준 심사위원에게 감사드립니다.

** 한국과학원 산업공학과

량수가 줄어들어 道路용량이 어느 정도까지는 증가할 수가 있다.

그러나 교통신호의 연쇄화를 시도하기 전에 확실하게 하여야 할 것은 特定한 교통조건에서 과연 연쇄화를 하여서 체제가 실제로 개선될 것인가 하는 문제이다.

일반적으로 하나의 신호등을 통과한 차량群(platoons)이 다음 신호등에 도착할 때까지도 줄어지지 않는 경우에는 연쇄화가 추진되고 있다.[2] 그러나 枝路에서 간선도로로 流入되는 차량이 많을 경우에는 오히려 교차로의 용량을 감소시킬 수도 있어 신호등의 연쇄화는 필요없게 되는 것이다.

본연구는 서울시와 같이 거의 포화상태에 다다랐다고 믿어지고 있는 교통체제에 연쇄화를 시도하여 과연 얼마나 큰 효과를 거둘 수 있는가를 예측하기 위하여 수행되는 Computer Simulation 모형 개발의 일환으로 서울시 중심가(Central Business District)의 간선 도로망의 신호체제관리를 위한 정책변수의 결정을 Computer 化한 결과의 보고이다.

일반적으로 Computer Simulation은 직접적으로 最適解를 구하기 보다는 몇가지 代案들을 入力시켜 비교하는 데에 사용할 수 있으므로,[3] 신호체제관리를 위한 신호등 주기(cycle), 各色의 期間(phase split), offset등 여러가지 정책변수를 發生시켜 비교하여야 한다. 위에서 언급한 Simulation 모형에 入力될 代案으로는 ① 좌회전 금지, ② 일방통행, ③ 신호주기의 증가, ④ 연쇄화, ⑤ phase split의 변화등이 있으나 本論文에서는 우선 연쇄화를 위한 phase split과 offset을 구한 방법에 대하여만 보고하기로 하고 Simulation 결과에 대한 보고는 다음 기회로 미루기로 한다.

2. 좌회전 phase가 있는 신호체제의 適正 phase split

특별히 좌회전에 할당된 phase가 없을 경우(황색은 적색의 예비신호) phase split에 관한 공식은 이미 여러 문헌들에 발표된 바 있다.[4] 여기서 q_1 과 q_2 를 한 교차로에서의 배반적인 두 다른 방향(排反流)의 교통량, s_1 과 s_2 를 各各의 포화 교통량(즉, 주어진 道路가 통과시킬 수 있는 最大 교통량)이라 하면, 各 방향에 대한 靑色 phase의 기간 g_1 과 g_2 는

$$\frac{q_1}{s_1 g_1} = \frac{q_2}{s_2 g_2} \tag{식 1}$$

라는 경험적 공식으로 나타낼 수 있다.[5] 이 공식은 결국 교통량과 소통능력의 比를 일정하게 해주는 靑色 phase의 기간을 정해주는 공식으로 그 결과는

교차로에서의 지체시간을 최소화시키는 특성이 있다.[4]

이 공식을 직접 서울시 신호체제에 적용하기 힘든 이유는 첫째, 좌회전에 할당된 靑色 phase가 있고, 둘째, 포화 교통량 등과 같은 기본 資料를 구하기가 힘든 때문이다.

그러므로, Computer Simulation 모형에 入力시킬 代案 발생의 목적으로 (식 1)의 의미를 연장하여 다음과 같은 발견적(heuristic)공식을 개발하였다.

우선, 各 도로에 대한 포화교통량에 대한 資料가 없는 상태에서 이것은 各 方向에 할당된 實用車線(l_i)에 비례한다고 가정하며 $S_i \approx K l_i$ 라 하고 교통방향을 나타내는 첨자로서

- $i=1$: 동←서 방향
- $i=2$: 좌회전 (서←북, 동남←)
- $i=3$: 남←북
- $i=4$: 좌회전 (북←동, 남←서)과
- q_i : i 방향의 교통량
- l_i : i 방향의 實用車線數
- g_i : i 방향에 할당된 phase 기간
- c : 신호주기

라 하면,

東行과 南行은 排反流이므로 (식 1)로부터

$$\frac{q_1}{l_1 g_1} = \frac{q_3}{l_3 g_3} \text{에서}$$

$$g_3 = \frac{l_1 q_3}{l_3 q_1} \cdot g_1 \tag{식 2}$$

이며, 여기서 q_1 과 l_1 은 東行과 西行의 교통상황이 비슷하다는 가정하에서 평균치를 사용하였고, q_3 , l_3 도 南行과 北行의 평균치이다.

또, 東行과 좌회전(동←북)은 排反流이므로

$$\frac{q_1}{l_1 g_1} = \frac{q_2}{l_2 g_2}$$

여기서 實用 左回轉 車線數(l_2)를 1이라 가정하면,

$$g_2 = \frac{l_1 q_2}{q_1} \cdot g_1 \tag{식 3}$$

두 종류의 좌회전(서←북, 남←서)은 排反流이므로

$$\frac{q_2}{l_2 g_2} = \frac{q_4}{l_4 g_4}$$

여기서 實用 좌회전 車線數는 1이라 가정하여 (식 3)을 이용하면

$$g_4 = \frac{q_4}{q_2} \cdot g_2$$

$$= \frac{l_1 q_4}{q_1} \cdot g_1 \tag{식 4}$$

또 各 주기마다의 非可用 時間(lost time)이 g_i 에 포함되게끔 g_i 를 정의하면

$$g_1 + g_2 + g_3 + g_4 = C \tag{식 5}$$

(식 5)로부터

$$g_1 = C - (g_2 + g_3 + g_4)$$

$$= C - \left(\frac{l_1 q_2}{q_1} + \frac{l_1 q_3}{l_3 q_1} + \frac{l_1 q_4}{q_1} \right) \cdot g_1$$

$$g_1 = C / \left(1 + \frac{l_1 q_2}{q_1} + \frac{l_1 q_3}{l_3 q_1} + \frac{l_1 q_4}{q_1} \right) \quad (\text{식 6})$$

(식 6)을 (식 2)~(식 4)에 대입하면 모든 phase에 대한 적정 간격이 결정된다.

3. 간선 도로망의 전진 신호체제

간선 도로망의 전진 신호체제에 대해서는 이미 많은 연구 결과가 발표되었고 그 주목적은 통과간격(through band)의 最大化에 있다. 간선 도로망에서 동↔서와 서↔동 방향의 교통조건이 같을 때에는 각 교통신호의 offset을 조정하여 모든 신호등의 靑色 혹은 非靑色 phase의 중간점이 일치하도록 하여 주면 양 방향의 同一 통과간격을 最大化 할 수가 있다.

여기서는 Morgan과 Little에 의해서 개발된 방법을 사용하였는데[6] 그 계산 절차를 요약하면 다음과 같다.

중심가(CBD)의 서쪽에서부터 신호등에 $i=1, 2, \dots, n$ 의 번호를 부여한다. 非靑色 phase의 기간(주기에 대한 비율)을 r_i , 신호등의 거리(km)를 x_i , 신호주기를 C , 양방향의 자유주행속도를 v 라 하면,

$$B = \max_i \min_j \max_{\delta=0, \frac{1}{2}} [U_{ij}(\delta - r_j)],$$

여기서 $U_{ij}(\delta) = 1 - \text{mantissa}(y_j - y_i - \delta)$

$$y_1 = 10,$$

$$y_i = y_{i-1} - \frac{1}{2}(r_i - r_{i-1}) + (x_i - x_{i-1}) \cdot \frac{1}{vC}$$

위의 식에서 B 를 最大化하는 δ 를 $\delta_{i^*j^*}$, i 를 i^* 라 하면, i^* 를 기준으로한 상대적인 offset(주기에 대한 비율)은

$$\theta_{i^*j^*} = \text{mantissa}(\delta_{i^*j^*})$$

이므로 절대시간으로 표시된 offset은

$$\theta'_{i^*j^*} = C \left(\theta_{i^*j^*} + \frac{r_j - r_{i^*}}{2} \right)$$

이다.

이상에서 유도된 전진 신호체제는 엄밀히 말해서 간선 도로(여기에서는 동↔서 방향의 offset을 결정하는 방법이며 바둑판과 같이 형성된 도로망에 적용하기 위해서는 3차원(2차원 공간+시간차원)의 時空圖表(time space diagram)를 작성해야 하는 바 그것의 해석적 해법은 극히 복잡하며[7] 실용적인 방법으로 主(동↔서) 方向의 전진 신호체제를 결정하고

副(남↔북) 方向의 전진 신호체제는 各 교차로에서의 offset 여유(leeway)를 조정하여 전진 신호체제에 가까울도록 하여 주는 방법이 사용되었다.[1]

4. 결 론

이상의 數學的 計劃을 program하여 各 간선 도로망에 대한 전진 신호체제를 계산하였으며, computer program中 $i^*, \delta_{i^*j^*}, B^*, \theta'_{i^*j^*}$ 을 계산하는 부분과 鍾路에 대한 예가 부록에 나타나 있다.

여기에서는 주기 C 가 入力 資料로 선택되었기 때문에 最適주기 C^* 는 전반적인 신호체제에 대한 simulation 결과로부터 비교 선택할 수 밖에 없으며 一般的으로 교통량이 적을 때에는 짧은 주기가 사용되고 교통량이 많아 질수록 非可用 時間(lost time)에 의한 악영향을 제거하기 위해서 긴 주기가 사용된다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] Horton, T.R., *Traffic Control-Theory and Instrumentation*, Plenum Press, New York (1965)
- [2] Pavel, D.G., "The Designing of Fixed-Cycle Traffic Signals for Coordinated Intersections," *Straßenverkehrstechnik*, Vol. 15 (1971)
- [3] 朴景洙, "運營研究 道具로서의 Simulation," 한국 O.R.학회지 제 1권 제 1호 (1976)
- [4] Webster, F.V., "Traffic Signal Settings," *Road Research Technical Paper No. 39*, Road Research Laboratory, England (1958)
- [5] Evans, H.K., *Traffic Engineering Handbook*, Institute of Traffic Engineers, New Haven, Conn. (1950)
- [6] Morgan, J.T. and J.D.C. Little, "Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth," *Operations Research*, Vol. 12, pp. 896-912 (1964)
- [7] Yardeni, L.A., "Vehicular Traffic Control: Time-Space Design Models," *Technical Report TR 02.289*, IBM General Products Division, San Jose, California (1964)

부록 1. Computer Program 中一部

```

.....前 略.....
C.....ABOVE R(I) IS THE RED TIME(FRACTION OF CYCLE)
  Y(I)=0.
  DO 1100 I=2, NSIG
1100 Y(I)=Y(I-1) - (R(I)-R(I-1))/2. + (X(I)-X(I-1))/(CYCLE*V)
  DO 1200 I=1, NSIG
  DO 1200 J=1, NSIG
  U0(I, J)=1-FMANT(Y(J)-Y(I))
  U5(I, J)=1-FMANT(Y(J)-Y(I)-.5)
  MAXDELT(I, J)=0.
  U5(I, J)=U5(I, J)-R(J)
  U0(I, J)=U0(I, J)-R(J)
  IF(U5(I, J).GT. U0(I, J)) MAXDELT(I, J)=0.5
  IF(U0(I, J). GT. U5(I, J)) U5(I, J)=U0(I, J)
1200 CONTINUE
  DO 1300 I=1, NSIG
  DO 1300 J=2, NSIG
  IF(U5(I, J). LT. U5(I, 1)) U5(I, 1)=U5(I, J)
1300 CONTINUE
  MAXI=1
  DO 1400 I=2, NSIG
  IF(U5(I, 1). GT. U5(MAXI, 1)) MAXI=I
1400 CONTINUE
  BAND=U5(MAXI, 1)*CYCLE
  WRITE(12, 1410) MAXI, BAND
1410 FORMAT(/T10, ≠ SIGNAL ≠, I3, ≠ IS THE CRITICAL ONE ≠/T10, ≠ MAXIMAL
  1 EQUAL BANDWIDTHS IS ≠, F6.2, ≠ SECONDS. ≠/T10, ≠ RELATIVE OFFSETS AR
  2 E AS FOLLOWS: ≠/T10, ≠SIGNAL≠, T20, ≠ OFFSET(SEC) ≠,
  3 T35, ≡PHASE1≡, T45, ≡PHASE2≡, T55, ≡PHASE 3≡, T65, ≡PHASE4≡)
  OFF=R(MAXI)* CYCLE/2.
  DO 1500 J=1, NSIG
  CETA(J)=FMANT(MAXDELT (MAXI, J))
  CETA(J)=CETA(J)*CYCLE+R(J)* CYCLE/2. -OFF

```

부록 2. Output 例

FOR A GIVEN CYCLE LENGTH AND TRAFFIC DATA, THIS PROGRAM COMPUTES THE OPTIMAL LENGTH OF PHASES AND OFFSETS TO SYNCHRONIZE A NETWORK OF SIGNALS. WRITTEN BY K.S.PARK (AT K.A.I.S.).

REF: (1) MORGAN AND LITTLE, O.R. VOL.12, PAGE 896-912 (1964),

(2) HORTON, TRAFFIC CONTROL THEORY AND INSTRUMENTATION, PLENUM PRESS, N.Y.(1965)

OPTIMUM SIGNAL POLICY FOR THE ARTERY CHONG RO CYCLE TIME=80.00 SECONDS.

SIGNAL 6 IS THE CRITICAL ONE
 MAXIMAL EQUAL BANDWIDTHS IS 5.82 SECONDS.
 RELATIVE OFFSETS ARE AS FOLLOWS:

SIGNAL	OFFSET (SEC)	PHASE1	PHASE2	PHASE3	PHASE4
1	32.90	42.5	0.0	37.5	0.0
2	75.24	37.8	9.0	26.2	7.0
3	39.15	30.0	0.0	17.2	32.8
4	70.88	46.5	0.0	33.5	0.0
5	25.72	56.8	0.0	20.0	3.1
6	0.00	28.3	18.4	12.6	20.6
7	42.15	24.0	21.1	21.2	13.8

TIME--SPACE DIAGRAM FOR THE ARTERY CHONG RO CYCLE TIME= 80.00 SECONDS.

