

차량의 도착모형을 이용한 독립교차로 신호최적화알고리즘 개발 Development of a Signal Optimization Algorithm at Isolated Intersections Using Vehicle Arrival Models

우용한*

Yong-Han Woo*

<Abstract>

This study developed signal optimization algorithm by analyzing vehicle arrival patterns. The major principle of signal optimization is dissipate all queueing vehicle in 1cycle and assign delay time uniformly for all approaches. For this, this study used optimal green time and surplus green time. Optimal green time calculated by estimated traffic volume from vehicle arrival model. Surplus green time defined as the gap of optimal green time and queue dissipated time. And alternative cycle has minimum surplus green time was selected as the optimal cycle. Finally, total delay and average delay per vehicle can be calculated by using queueing theory.

Key Words : Green Time, Signalized Intersection Algorithm, Optimization, Delay Time

1. 서 론

교차로에서 차량의 소통능력은 신호운영방법에 따라 크게 좌우된다. 불합리한 신호운영은 혼잡과 정체를 가중시키고 나아가 사고의 위험성이 과다하게 증가하는 간접적인 부작용까지 유발할 수 있다. 따라서 관리·운영만으로 소통난을 극복하고자하는 저변에는 효율적인 신호운영방법이 항상 관심의 대상이 되고 있다.

이와 관련된 기존의 연구를 간략히 정리하면, 교차로 접근로(Approach)의 차량도착 특성에 관한 연구는 10초 간격으로 차량의 도착을 집계하여 교통량과 속도관계 등을 분석한 Rengaraju[1]

와 도착과 출발을 모두 균일(Uniform)한 것으로 가정하여 대기행렬분석을 행한 May[2]의 모형이 대표적이다. 나아가 도시내 교차로의 신호운영 최적화에 대한 연구는 GA(Genetic Algorithm)를 이용하거나 이것과 TRANSYT7F(이하 T7F)를 연계하여 추진한 Grefenstette[3]와 Hadi[4]가 있다. 그리고 현재 Simulation 프로그램으로 널리 이용되고 있는 T7F[5]도 있다. 이외 간선도로를 대상으로 한 최적운영시스템의 연구가 Rogness[6]와 Skabardonis[7]에 의해 수행된 사례도 있다.

하지만 이러한 연구들은 접근로의 교통량이 고정된 시간간격을 가지고 도착한다는 가정을

* 정희원, 경일대학교 측지공학과 겸임교수, 工博
영남대학교 대학원 졸업
E-mail: yhwoo@neolife.net

* Part-time Lecturer, Dept. of Geodetic Engineering,
Kyungil University, ph.D

도입하였는데, 이는 시간변화에 따른 도착교통량의 변화를 간과한 것이며 자체시간에 대한 해석에서 과대 혹은 과소 예측될 수 있다. 따라서 짧은 시간 동안에 도착하는 교통량을 정확히 파악하고 도착패턴을 규명하는 것이 무엇보다 중요하며, 이를 바탕으로 한 최적신호운영기법이 개발될 필요가 있다.

본 연구는 접근로의 차량도착에 관한 모형을 이용하여 신호최적화이론을 설정하고, 각 현시별로 교통량에 따른 녹색시간을 적절하게 배분하고 최적신호주기를 결정하는 알고리즘을 개발하기 위한 것이다.

2. 기존의 최적화 이론

현재 일반적으로 사용되고 있는 신호최적화 프로그램은 T7F이다. 여기에서 채택하고 있는 최적화이론은 다음과 같이 요약할 수 있다[8]. 독립교차로에서 신호운영에 필요한 주요변수는 신호주기(Cycle)와 현시(Phase), 녹색시간(Split)이다. 이 중에서 현시는 통상 외부변수로 주어지고, 나머지는 교통량 등을 변수로 하여 산정한다.

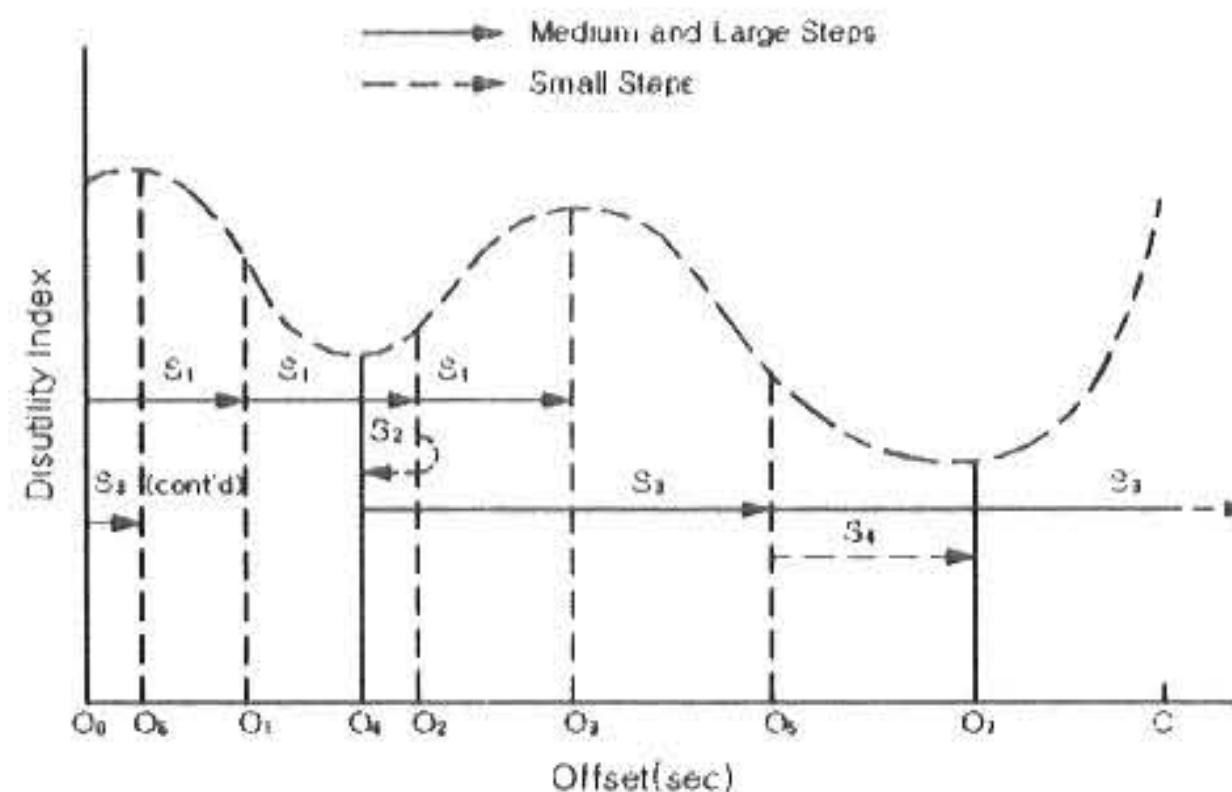


Fig.1 Illustration of the Hill-climb Process

T7F에서 녹색시간의 최적화는 시간당 교통량을 각 단계로 구분하여 결정하게 되는데, 각 분할단계의 크기(Step Size)가 녹색시간의 결정에 영향을 미치며, 한 개 이상을 지정하여 사용한다. 그리고 최적화의 목적함수는 DI (Disutility Index)가 사용되며, T7F에서는 이것을 식(1)과 같이 제시하고 있다. 이는 최적화의 지표로 사용하고 있는 PI(Performance Index)에 대한 최소 DI를 의미한다.

$$DI = \sum_{i=0}^n \{ [(W_{di} d_i + KW_{Si} S_i) \\ + U_i (W_{di-1} d_{i-1} + KW_{Si-1} S_{i-1}) \\ + QB_i [W_q (q_i - qc_i)^2]] \} \quad (1)$$

T7F에서의 최적화는 'Hill-climb' 기법을 사용하는 데, PI를 기준지표로 설정하여 최소 PI를 단계별로 찾아가는 방법이다. 개념도를 Fig.1에 나타내었다.

그리고 T7F에서 신호주기는 식을 통해 산정하는 것이 아니고, 대안으로 제시된 주기중에서 PI가 최소인 값을 선택하는 Simulation에 의한다. T7F에서는 PI의 변수로 지체(Delay)와 정지 수를 고려한 연료소모량과 운행비용, 대기길이(Queue Length)가 주로 사용된다. 한편, 식에 의해 신호주기를 결정하는 방법은 Webster[9]나 Failure-rate[10], Pignataro[11] 등이 있다.

3. 신호최적화 알고리즘 개발

3.1 접근로의 차량도착모형

Table1 Models for Arrival Vehicles and Cycle

Models	Time	
	a	b
Case 1	Coefficient	1.920
	t-ratio	22.677 ^{*)}
	F-ratio	612.027 ^{*)}
	R-square	0.968
Case 2	Coefficient	2.275
	t-ratio	22.482 ^{*)}
	F-ratio	1,898.542 ^{*)}
	R-square	0.988
Case 3	Coefficient	5.916
	t-ratio	11.471 ^{*)}
	F-ratio	306.104 ^{*)}
	R-square	0.937

*) Reject at 0.05 Level

접근로의 차량도착과 용량은 다음과 같은 3 가지 유형으로 구분할 수 있다[12]. 유형1은 '도착 < 용량'인 경우로서 접근로가 한산한 상태를 말한다. 유형2는 '도착=용량'인 경우로서 이론적으로는 포화도(Degree of Saturation) '1.0'인

포화상태(Saturation Flow)를 의미한다. 유형3은 ‘도착’ 용량인 경우로서 접근로에 정체(Congestion)가 발생하여 과포화상태인 것을 의미한다. 유형별로 차량의 도착특성이 다르게 나타나는데, 관측자료를 근거로 모형화한 결과가 Table1과 같다[13]. 시간의 경과에 따라 접근로에 도착하는 차량의 패턴이 유형별로 다르게 나타남을 반영하여 경과시간을 독립변수로 두고 모형화한 것이다. 접근로의 대기차량에 대한 분석은 대기행렬이론을 적용하였으며, 결과는 수행된 연구[13]에서 나타내었다. 표에서 Q_{av} 는 접근로에 도착하는 차량의 수를 의미하고, t 는

경과시간이다.

3.2 신호최적화의 기본원리

녹색시간은 교통량의 비율에 따라 배분하는 것이 가장 좋은 방법이지만 동일한 교통량에서도 차량의 도착유형에 따라 소요시간 차이가 있으므로 이것을 반영해야 하며, 최소녹색시간을 우선적으로 배분한 다음 나머지 시간을 필요한 현시에 배분하는 것이 보다 합리적이다. 보통 녹색시간의 배분지표로는 최소지체시간을 사용하는데 과포화상태에서는 큰 의미가 없다. 과포화상태에서는 도착교통량과 용량과의 관계

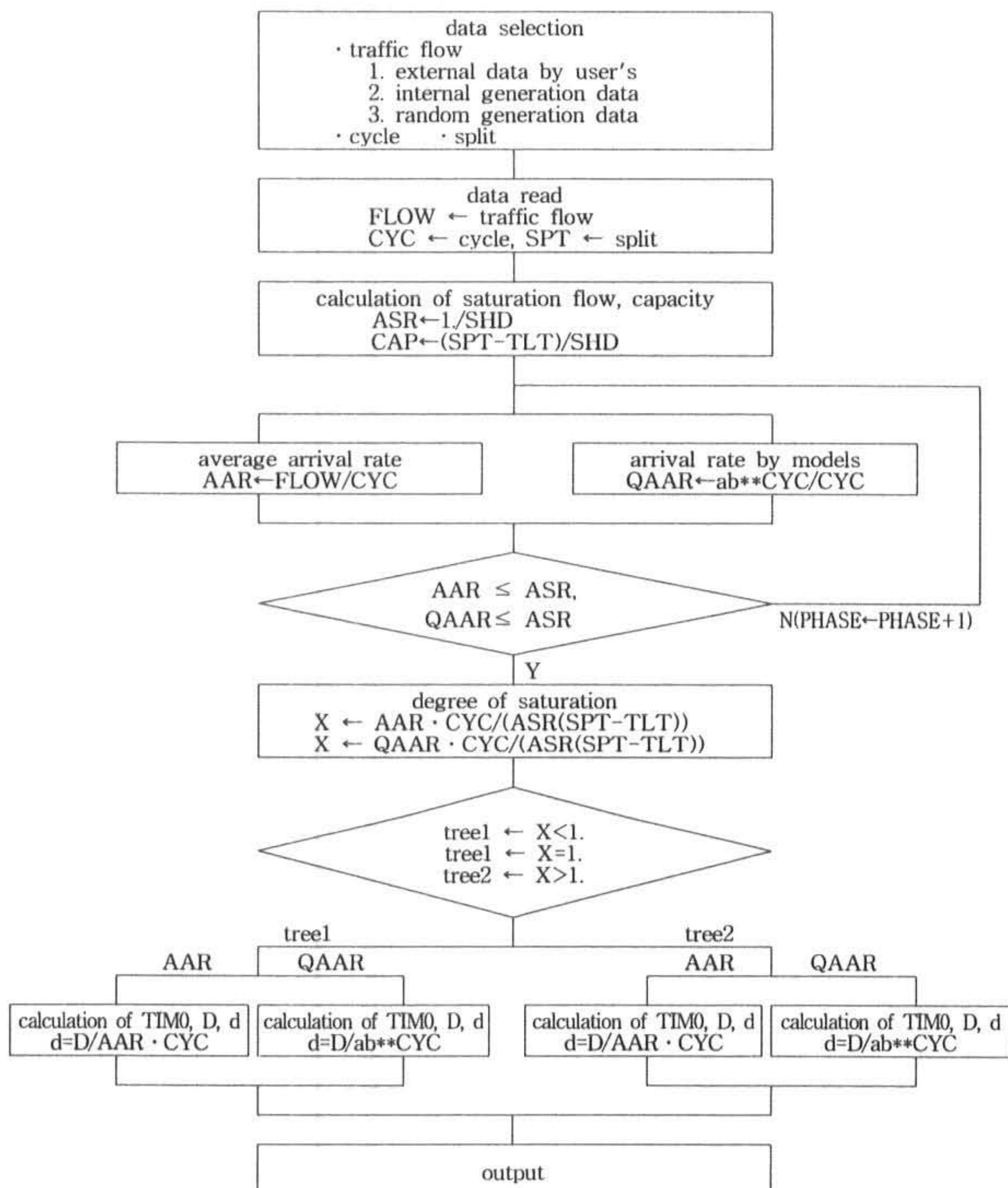


Fig.2 Flow Chart of Signal Analysis Use to Queueing Equations

를 고려하여 차량의 대기가 효율적으로 관리되고 해소되는 신호시간을 설계해야 한다. 따라서 접근로의 대기차량에 대한 관리가 우선되어야 하며, 도착과 용량의 관계로부터 지표가 선정되어야 함이 바람직하다. 이를 위해 접근로의 대기차량 해소시간과 녹색시간의 관계를 고려해야 하고, 시간경과에 따른 도착차량의 패턴이 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 녹색신호가 시작된 후 차량이 출발하여 대기했던 차량이 완전히 해소되기까지의 소요녹색시간을 산정하고, 각 현시의 녹색시간 낭비가 최소화되도록 신호주기를 결정하였다.

3.3 현황분석 알고리즘 개발

신호운영은 현황분석과 최적화의 두 가지로 대별할 수 있다. Fig.2와 같은 현황분석 알고리즘은 평균도착율(Average Arrival Rate)을 적용할 경우와 차량도착모형을 적용할 경우에 대한 2가지 분석결과를 비교할 수 있도록 개발하였다. 입력에서 출력까지 총 8단계로 진행되는데, 신호운영현황을 입력하고, 도착율을 산정하여 평균서비스율과 비교한 다음, 포화도를 산정하고 접근로의 교통처리 유형을 결정한다. 유형별로 녹색신호 후 대기차량해소시간과 총지체시간, 차량당 평균지체시간을 산정한다.

3.4 신호최적화 알고리즘 개발

(1) 최적화 이론

접근로의 차량도착과 용량 관계에서 유형2는 대기차량과 용량이 일치하는 경우로서 해당 접근로의 녹색시간이 아주 이상적으로 배분된 형태이다. 따라서 별도의 최적화가 필요 없고, 유형1, 3은 최적화가 필요하다.

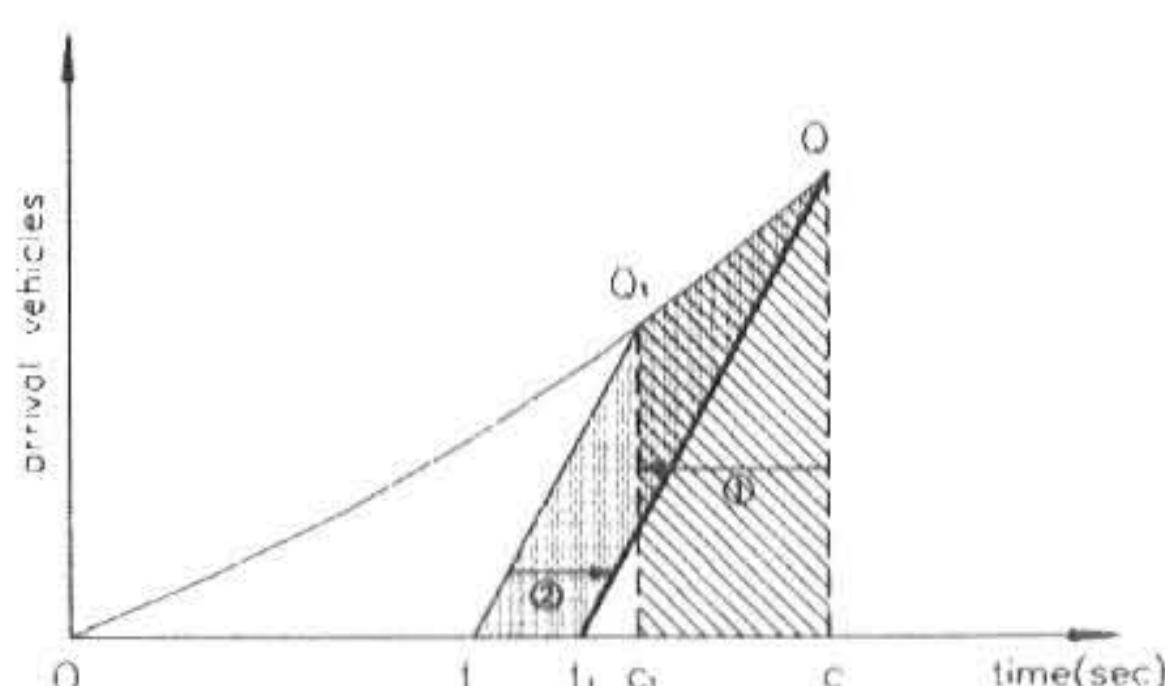


Fig.3 Method of Signal Optimization in Case1

유형1에 대한 최적화는 Fig.3으로 설명할 수 있다. 그림의 X축에서 신호주기를 O-c, 적색시간을 O-t, 녹색시간을 t-c로 둘 때, 대기했던 차량은 녹색신호의 종료 이전에 이미 해소되고, 남은 녹색시간(이하 여유녹색시간)에 도착하는 차량은 교차로를 Non-stop으로 통과하게 된다. 첫째, 적색시간을 고정해 놓고 신호주기와 녹색시간을 단축하는 방법인데, 그림에서 ①의 빗금 친 부분만큼 주기가 감소하여 O-c₁이 되고, 녹색시간도 t-c에서 t-c₁으로 감소한다. 이 방법은 신호주기가 현시별로 달라지므로 불필요한 반복계산을 많아 최적주기를 탐색하는 데는 적합하지 않다. 둘째, 신호주기를 고정하고 녹색시간을 단축하는 방법이다. ②의 음영부분처럼 녹색시간이 t₁-c로 감소하면서 적색시간은 자연히 O-t₁으로 증가하게 된다. 이 방법은 주기가 고정되므로 주기별 비교가 쉽지만, 적색시간의 증가에 따른 도착패턴의 변화를 고려해야 하는 문제가 생긴다. 하지만 시간변화에 따른 차량도착모형을 사용하기 때문에 오히려 합리적인 방법이라 판단되어 유형1은 후자를 적용하였다.

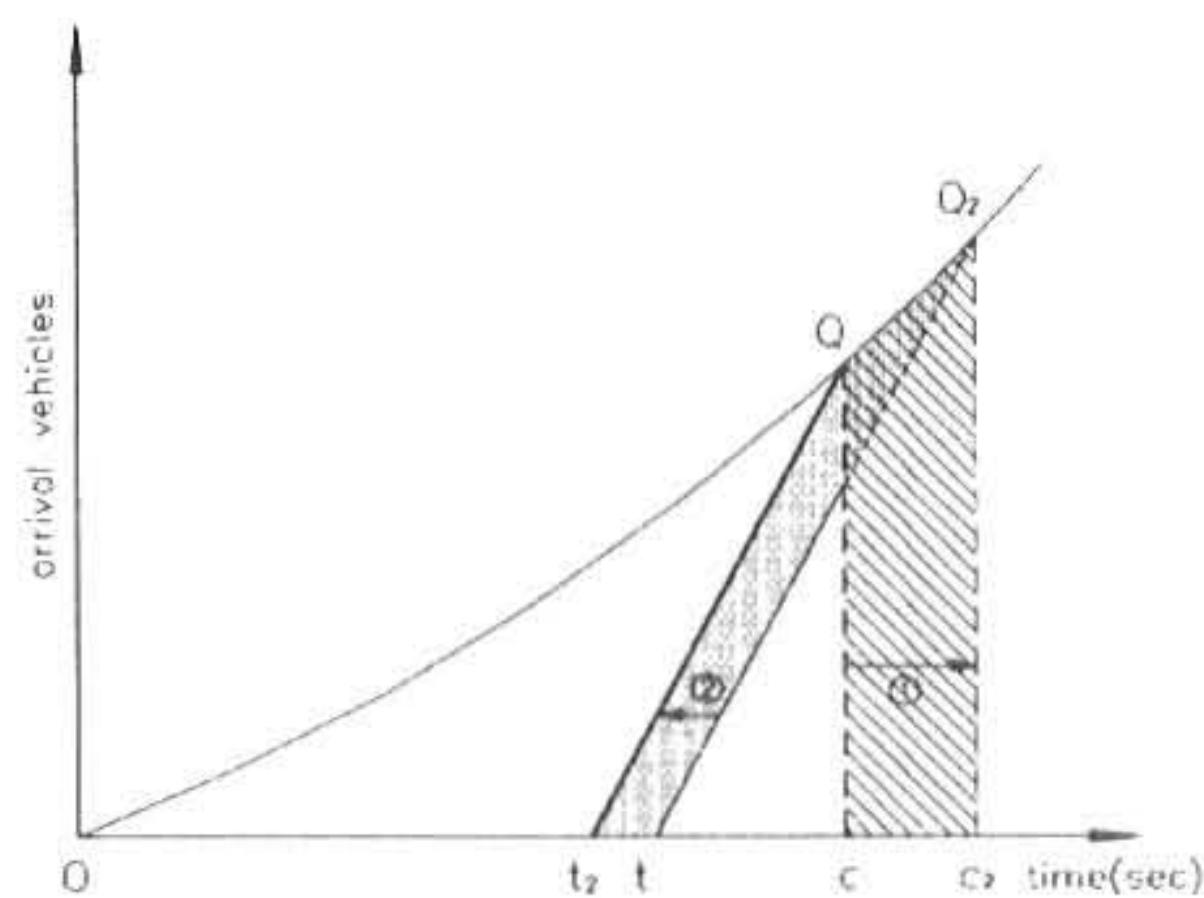


Fig.4 Method of Signal Optimization in Case3

유형3은 Fig.4와 같은 경우인데 신호주기를 O-c로 두고 녹색시간을 t-c일 때, 통과하지 못한 일부 차량이 다음 신호를 기다리는 현상이다. 최적화 방법으로는 첫째, 적색시간을 고정하고 녹색시간을 대기해소시점까지 증가시키는 방법인데, 그림에서 ①의 빗금 친 부분만큼 주기가 증가하게 된다. 이 방법의 문제점은 녹색시간이 과다하게 소요됨에 따라 비현실적인 신호주기가 산정될 수 있다는 것이며, 앞선 유형1과 마찬가지로 반복계산을 과다하게 수행해야

한다. 둘째, 신호주기를 고정하고 적색시간을 줄이면서 주어진 교통량을 모두 처리할 수 있는 최적녹색시간을 탐색하는 방법이다. 즉, 주기는 O-c로 고정하고 t에서 t₂로 감소하는 적색시간 만큼 녹색시간을 증가시키는 것으로서 ②의 음영부분이다. 이 방법은 도착교통량에 대한 실질적인 대기해소시간을 찾는다는 측면에서

유용하며, 주기간 상호 비교가 용이하므로 좋은 방법이다.

위의 최적화방법은 1현시에 대한 것이며, 교차로에서는 현시별로 유형1~3이 혼합되어 발생한다. 따라서 대안으로 선정된 신호주기에서 각 현시에 대한 여유녹색시간의 +(Plus)와 -(Minus)를 조정하여 그 값이 최소가 되도록 결

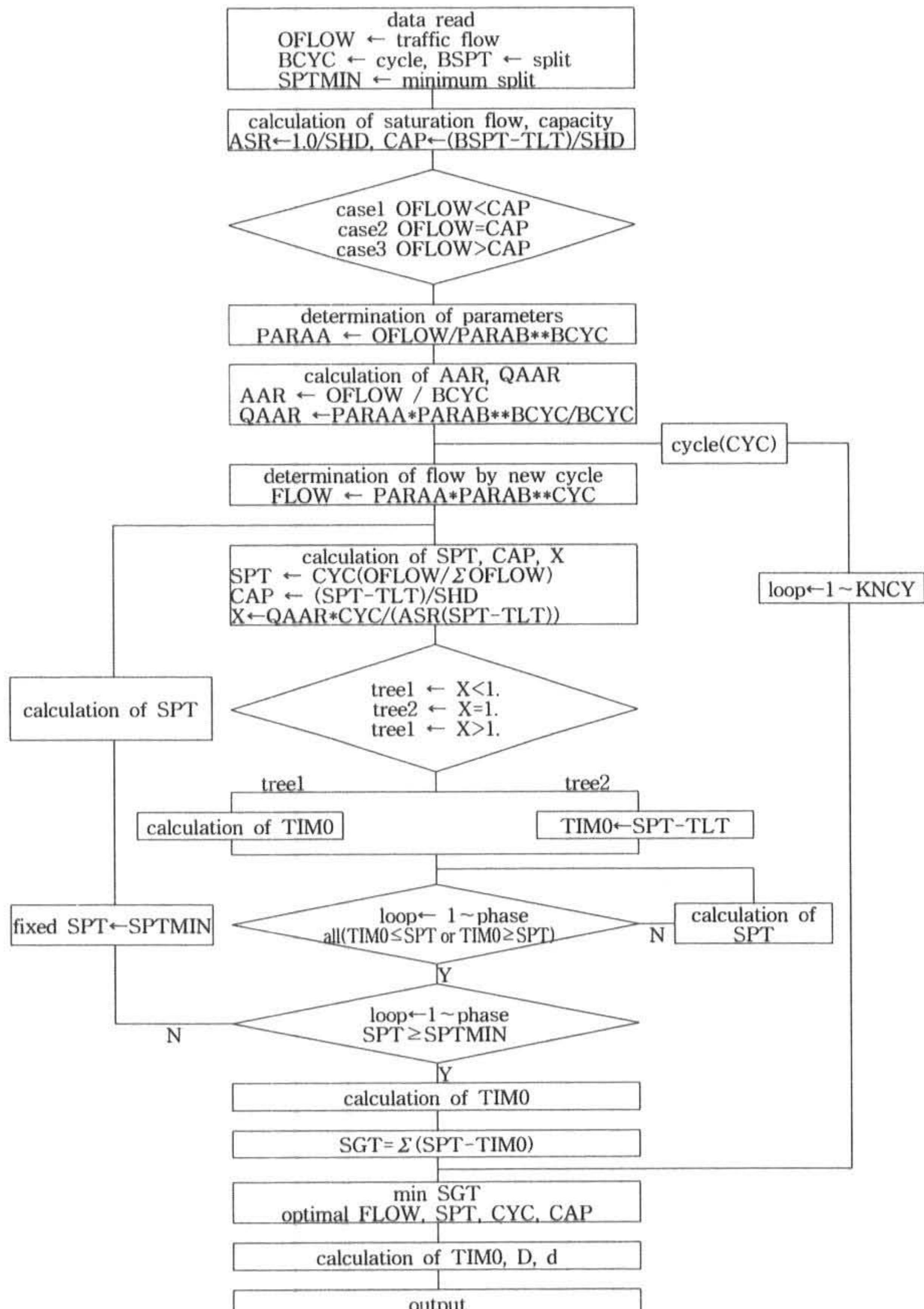


Fig.5 Flow Chart of Signal Optimization

정하는 것이 중요하다. 특히, 각 현시의 여유녹색시간이 '+'값을 가지도록 해야하며, 불가피할 경우에는 '-'값이 최소가 되도록 결정해야 한다. '-'는 차량의 정체가 누적됨을 의미하기 때문이다. 전체 현시에 대한 여유녹색시간의 최소는 각 현시별로 배분된 녹색시간을 아주 효율적으로 사용한 것이 된다. 녹색시간 동안 차량이 포화상태로 통과하면서 대기차량이 모두 해소되므로 교통용량을 최대로 이용하는 것이다. 또한, 각 현시별 여유녹색시간의 합이 최소인 신호주기를 선택하기 때문에 각 접근로의 대기 차량 수도 최소가 되는 것이다. 여유녹색시간이 '-'의 값을 가지는 과포화상태일 경우에도 다음 주기까지 정체되는 차량의 수를 최소화하기 위해 여유녹색시간의 최소 값이 결정되는 것이다. 따라서 신호최적화에서 사용하는 여유녹색 시간이라는 지표는 접근로의 대기차량 수를 최소화하고 용량을 최대화하면서 처리가 가능하다는 의미를 가지고 있다.

(2) 최적화 알고리즘

전 항의 최적화이론과 차량도착모형, 대기행렬 분석을 위한 제반 식들을 이용하여 신호최적화에 대한 탐색을 시작하였다. 우선 신호주기별

대기차량 수로 각 현시별 녹색시간을 산정한 후 교차로 전체에 대한 최적녹색시간을 결정하고, 여유녹색시간이 최소인 최적주기를 선택하는 단계적 반복계산방법을 이용하였다. 주어진 교통량과 신호운영조건에 따라 구축된 신호최적화 알고리즘은 Fig.5와 같이 12단계로 나타낼 수 있다.

- 1단계 : 현재의 교통량과 신호운영현황, 최소 녹색시간에 대한 1차 정보를 입력 혹은 내부에서 결정
- 2단계 : 포화차두시간에 의한 평균서비스율 산정, 주어진 녹색시간으로 처리용량 산정
- 3단계 : 도착량과 용량을 비교하여 현시별로 처리유형을 구분(유형1~3)
- 4단계 : 도착모형의 매개변수 값을 산정하여 평균도착율과 도착모형에 의한 새로운 도착율 결정
- 5단계 : 주기 대안에 따라 도착교통량을 예측하고, 교통량에 따라 녹색시간을 다시 배분. 배분된 녹색시간에 따라 용량을 새로 산정하고 포화도 결정
- 6단계 : 포화도에 따라 새로운 유형을 결정하고, 유형별로 대기해소시간(별도의

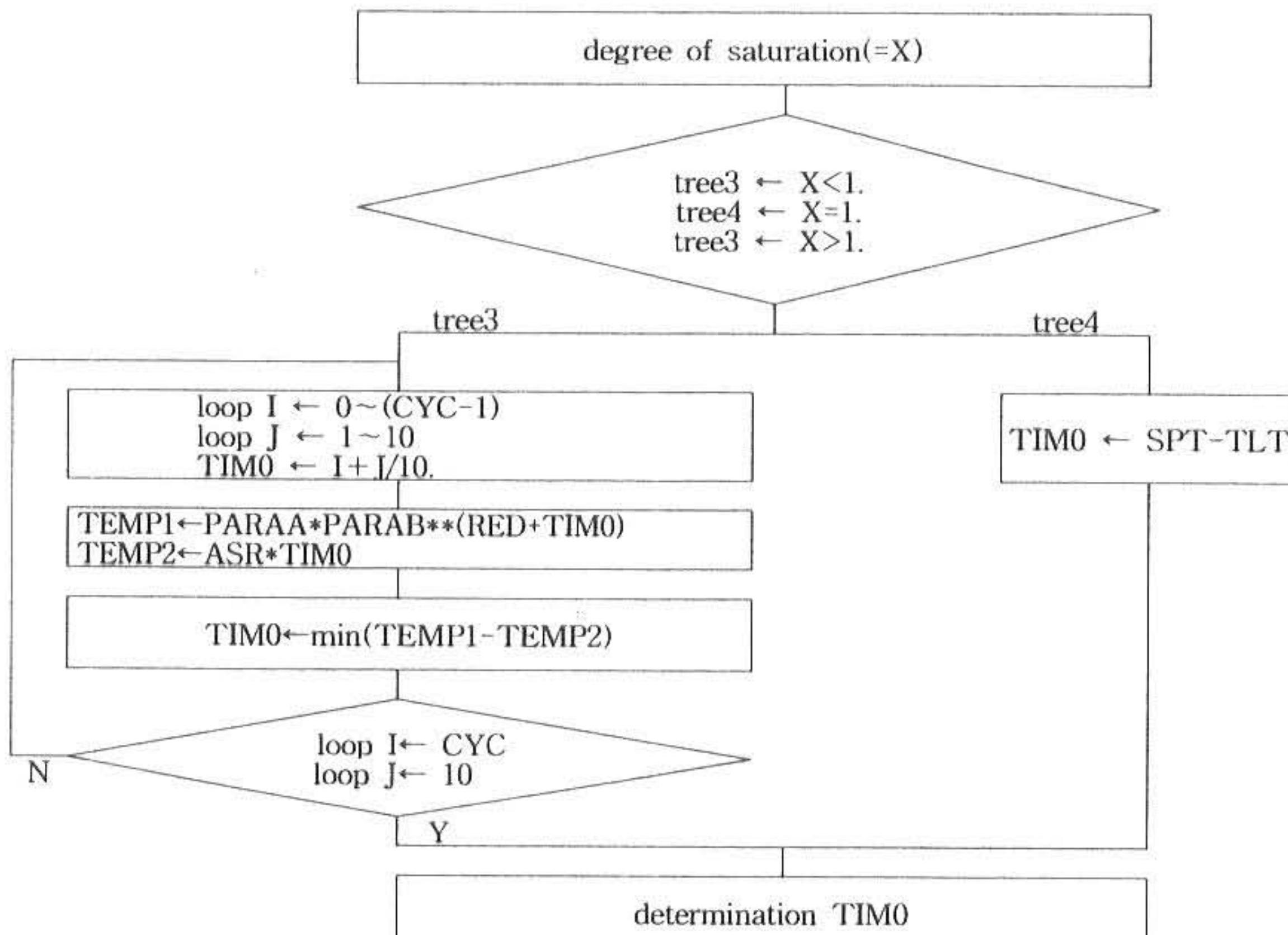


Fig.6 Flow Chart for Calculation to Queue Dissipated Time

Subroutine) 산정

- 7단계 : 여유녹색시간이 최소가 되도록 최적 녹색시간을 결정
- 8단계 : 최적녹색시간을 최소녹색시간과 비교
- 9단계 : 1주기의 총대기차량해소시간을 산정한 다음, 녹색시간과 비교하여 여유 녹색시간을 산정
- 10단계: 주기 대안별 여유녹색시간을 산정하여, 최적주기와 최적녹색시간을 확정
- 11단계: 대기해소시간(TIM0), 총지체시간(D), 차량당 평균지체시간(d) 산정
- 12단계: 최적화의 결과를 출력

(3) 대기해소시간 산정 알고리즘

대기해소시간은 식에 의한 근사값으로 계산하며, Subroutine으로 구성된 알고리즘은 Fig.6과 같다. 유형2는 녹색시간과 일치하므로 별도의 계산이 필요 없고, 유형1, 3은 수렴과정을 거쳐 대기해소시간이 산정된다. 포화도에 따라 유형을 구분한 다음, 신호주기를 최대값으로 두고 0.1초부터 시작하여 0.1초 단위의 근사값을 찾는다.

(4) 최적녹색시간 결정 알고리즘

최적녹색시간 결정에서 유형1인 경우는 모든 현시에 여유녹색시간이 균등 배분되도록 하며, 유형3인 경우는 현시별 정체 크기를 동일 비율로 배분한다. Fig.7과 같은 3차 과정을 거쳐 최적녹색시간이 결정되는데, 후에 이 값은 최소녹색시간과 비교하여 적을 경우 다시 산정하게 된다.

4. 기존 방법과의 비교

신호주기를 결정하는 기존의 연구는 식을 이용하기 때문에 교통량에 대응하는 주기의 적응력이 저하하며, 이를 바탕으로 녹색시간을 결정함으로서 불합리한 배분이 불가피하게 발생할 가능성이 있다. T7F와 본 알고리즘에서는 교통량에 따라 최적녹색시간을 산정한 후, 대안으로 설정한 여러 주기중에서 하나를 선택하기 때문에 보다 합리적이다. 하지만 T7F는 PI라는 최적신호주기 산정지표를 사용하고 있으나, 이 값의 산정에 이용되는 주요 변수는 지체시간과 K

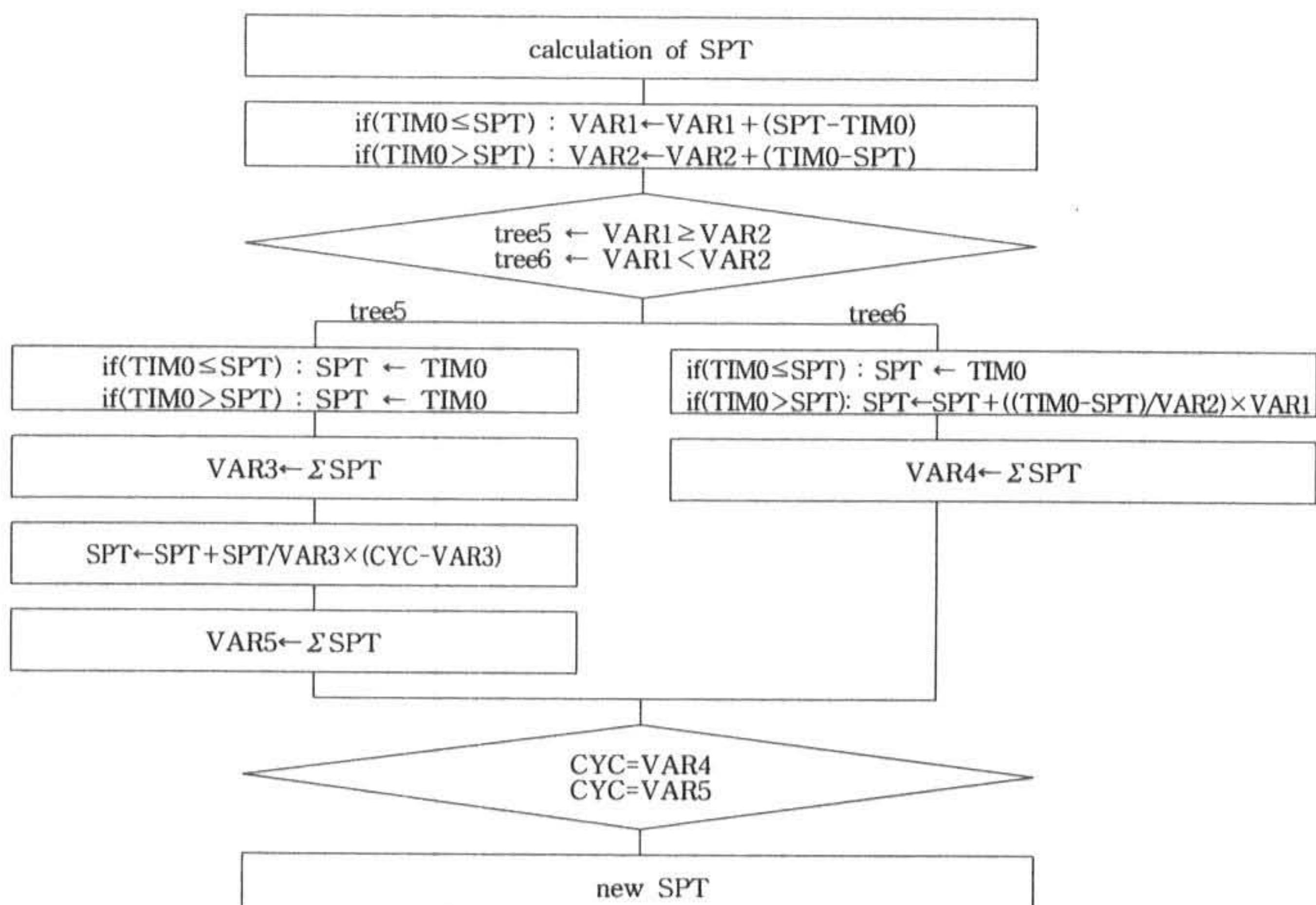


Fig.7 Flow Chart to Determine Split Optimization

계수, 연료소비량이다. 이중에서도 지체시간이 가장 큰 비중을 차지함에 따라 지체시간의 최소가 곧 PI의 최소로 인식되고, 그때의 신호주기가 최적으로 결정된다. T7F에서는 지체시간 산정을 위해 자체적인 모형을 사용하는데, 우리나라 실정에 적합한지를 검정할 필요가 있으나 Package의 성격상 불가능한 문제도 있다. 도철웅[14]의 연구에서는 T7F에 내재된 매개변수 값을 우리나라의 실정에 맞게 적절히 사용할 것을 권장하고 있다. 이처럼 T7F의 사용은 불합리한 신호주기가 선택될 수도 있다는 가능성을 제시하고 있는 것이다.

반면, 본 연구는 차량도착모형을 이용하여 시간경과에 따른 도착교통량을 예측함으로서 현실성이 높고, 여유녹색시간이 최소가 되도록 최적주기와 녹색시간을 결정하는 방법을 택하였다. 따라서 녹색시간이 부족하지 않는 범위내에서 주기의 최소값을 선택하기 때문에 접근로의 대기차량 수를 최소화하고 용량을 최대한 이용할 수 있는 신호시간의 설계가 가능하다.

5. 결 론

신호교차로 접근로의 차량도착모형을 사용하여 여유녹색시간을 최소화하는 신호최적화 알고리즘을 개발하였다. 먼저, 대안에 따른 신호주기의 값을 고정시키고 도착교통량을 모두 처리할 수 있는 최적녹색시간을 결정하였는데, 교차로 전체의 여유녹색시간이 최소화되는 조건이다. 그 후, 대안으로 설정한 각 주기별로 산정된 여유녹색시간을 비교·분석함으로서 최적 신호주기를 결정하는 단계적 반복계산방법을 이용하였다. 한산상태에서의 신호최적화 기본원칙은 접근로의 모든 대기차량을 한 주기 내에 모두 해소하고, 현시별 녹색시간을 효율적으로 사용하자는 것이다. 과포화상태에서는 각 접근로의 지체시간을 균등히 배분하는 것이다. 개발된 알고리즘을 바탕으로 향후 Simulation Model 구축할 것이며, 사례연구를 통해 보다 구체화된 적용성을 검토할 계획이다. 끝으로, 교차로의 소통능력에 따른 한산상태나 과포화 상태에 대한 접근로의 도착교통은 대기행렬이론을 도입하여 관리하고, 시간 경과에 따른 차

량의 도착패턴을 고려하여 적절한 신호관리를 수행할 수 있는 기초적 근거를 마련하였음이 본 연구가 가지는 의의라 할 수 있다.

사용약어

- AAR : 평균도착율
- ASR : 평균서비스율
- CAP : 교통처리용량
- CYC, BCYC : 신호주기
- d : 차량당 평균지체시간
- D : 총 지체시간
- FLOW, OFLOW : 교통량
- KNCY : 대안으로 설정한 신호주기 수
- PARAA, PARAB : 차량도착모형 매개변수
- QAAR : 차량도착모형에 의한 도착율
- RED : 적색시간
- SGT : 여유녹색시간
- SHD : 포화차두시간
- SPT, BSPT : 녹색시간 비
- SPTMIN : 최소녹색시간 비
- TIM0 : 녹색신호 후 대기차량 해소시간
- TLT : 총 손실시간
- X : 포화도

참고문헌

- 1) Rengaraju,V.R., Rao,V.T. : Vehicle-Arrival Characteristics at Urban Uncontrolled Intersections, Journal of Transportation Engineering, Vol.319, pp.317-323, (1995)
- 2) May,A.D. : Traffic Flow Theory-the Traffic Engineer's Challenge, Proc.Inst. Traffic Eng., pp.290-303, (1965)
- 3) Grefenstette,J.J. : Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms, IEEE Transactions on System, Men and Cybernetics, Volume SMC-16 No.1, pp.122-128, (1986)
- 4) Hadi,M.A., Wallace,C.F. : A Hybrid Genetic Algorithm to Optimize Signal Phasing and Timing, Transportation Research Board 72nd Annual Meeting, Paper No.930800, (1993)
- 5) USDOT, Federal Highway Administration :

- TRANSYT-7F Users Guide, University of Florida, (1991)
- 6) Rogness, R.O., Messer, C.J. : Heuristic Programming Approach to Arterial Signal Timing, Transportation Research Record **906**, pp.67-75, (1983)
 - 7) Skabardonis,A., May,A.D. : Comparative Analysis of Computer Models for Arterial Signal Timing, Transportation Research Record **1021**, pp.45-52, (1985)
 - 8) 전계서 5) pp.4-30~4-38
 - 9) Webster,F.V., Cobbe,B.M. : Traffic Signals, Road Research Technical Paper, No.**56**, pp.55-60, (1966)
 - 10) Drew,D., Pinnell,C. : A Study of Peaking Characteristics of Signalized Urban Intersection as Related to Capacity and Design, Highway Research Board, Bulletin No.**352**, (1962)
 - 11) Pignataro, L.J. : Traffic Engineering Theory and Practice, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, pp.351-355, (1973)
 - 12) 김대웅, 우용한 : 신호교차로 접근로의 교통특성 분석, 영남대학교 공업기술연구소 논문집, 제25권, 제2호, pp.123-124, (1997)
 - 13) 김대웅, 우용한 : 도착특성을 고려한 접근로의 대기행렬예측모형 개발, 대한토목학회 논문집, 제18권, 제III-2호, pp.159-171, (1998)
 - 14) 도철웅 : TRANSYT 모델의 내재 매개변수에 관한 연구, 대한교통학회지, Vol.6, No.1, pp.55-64, (1988)

(2000년 11월5일 접수, 2001년 1월 5일 채택)