

■ 論 文 ■

# 구간검지체계의 통행시간정보를 이용한 신호제어 알고리즘 개발

Development of The Signal Control Algorithm Using Travel Time Informations of Sectional Detection Systems

**정 영 제**

(서울시립대학교 교통공학과 석사과정)

**김 영 찬**

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

**백 현 수**

(서울시립대학교 교통공학과 박사과정)

## 목 차

- I. 서론
    - 1. 연구 배경 및 목적
    - 2. 연구 내용 및 범위
  - II. 본 론
    - 1. 기존 이론고찰
    - 2. 통행시간을 이용한 대기행렬의 산출
    - 3. 대기행렬산출 알고리즘의 검증
    - 4. 대기행렬 균등화 신호제어
    - 5. 주기산정 및 현시 배분
    - 6. 신호제어 알고리즘
  - III. 모의실험
    - 1. 실험도구 선정
    - 2. 시뮬레이션 결과
  - IV. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 구간검지체계, 개별차량지체, 대기행렬길이, 실시간신호제어, 대기행렬균형제어

## 요 약

본 연구에서는 구간통행시간과 같은 링크의 속성정보를 수집 가능한 검지체계를 구간검지체계로 정의하여 이러한 검지체계를 기반으로 실시간신호제어 알고리즘을 개발하였다. 신호제어를 위한 변수는 공간적 개념을 가지는 대기행렬길이를 제안하였다. 개별차량에 대해 검지기 통과 시 차량의 ID와 통과시간이 수집 가능한 DSRC와 같은 기술을 이용하여 링크 통행시간을 수집하며, 한 주기 동안 수집된 개별차량 통행시간은 지체를 경험한 차량과 그렇지 않은 차량으로 구분된다. 이를 이용하여 대기행렬 해소시간을 산출가능하며, 결정적 지체모형을 기반으로 주기별 최대대기행렬을 산출하였다. 실시간신호제어의 목표는 접근로별 대기행렬의 균형화로서 각 접근로의 대기행렬이 사전에 정의된 임계대기행렬을 초과하지 않는 범위에서의 균등화될 수 있도록 대기행렬의 비율에 따라 신호시간을 배분하는 방법을 이용하였다.

This study developed an algorithm for real-time signal control based on the detection system that can collect sectional travel time. The signal control variable is maximum queue length per cycle and this variable has a sectional meaning. When a individual vehicle pass through the detector, we can gather the vehicle ID and the detected time. Therefor we can compute the travel time of an individual vehicle between consecutive detectors. This travel time informations were bisected including the delay and not. We can compute queue withdrawing time using this bisection and the max queue length is computed using the deterministic delay model. The objective function of the real-time signal control aims equalization of queue length for all direction. The distribution of the cycle is made by queue length ratios.

# 1. 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

현재 국내에서 운용되고 있는 가장 발달된 형태의 실시간 신호제어시스템은 신신호시스템(COSMOS: Cycle, Off - set, Split, MOdel of Seoul)으로 90년대 초반 서울의 교통혼잡 해소를 목적으로 개발·적용 되었다. 신신호시스템의 신호교차로운영을 위한 정보 수집 장치로는 대부분이 루프검지기를 이용 중에 있으며, 이 루프검지기는 지점검지체계로 분류할 수 있다. 루프검지기를 이용한 정보수집 방식은 지점검지체계로서(Spot Detection System) 정보수집의 목적을 교차로 신호제어로 할 경우 검지체계상 단일지점에 대한 교통정보를 수집하게 되므로 교차로 접근로 전체의 교통상황을 대변하는 정보를 수집하기에는 한계가 따른다. 따라서 링크 전체의 상황을 표현하는 정보의 산출과 이러한 정보를 이용한 신호제어가 필요한 것으로 판단된다. 또한 가장 전형적인 지점검지체계로서 신호제어를 위해 이용되고 있는 루프검지기의 경우 교통정보수집을 위해 과도한 검지기가 필요로 하며, 일부 검지기의 문제로 교차로 전체의 신호제어에 영향을 미치는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 수집정보의 종류와 방식의 한계에 대처 가능한 방식은 구간검지체계로(Interval Detection System) 이를 이용해 해당 링크의 상황을 대변할 수 있는 구간통행시간, 지체와 같은 링크의 내부상황이 표현 가능한 정보의 수집이 가능하다.

최근 IT의 발달로 인해 차량과 검지기간의 양방향 통신이 가능한 DSRC 등의 기술이 이용가능하며, 차량의 ID와 검지기 통과시각으로 개별차량의 정확한 구간통행시간의 산출이 가능하다. 따라서 이번 연구는 이러한 기술의 발달에 따른 지점검지체계 기반에서 구간검지체계로의 환경변화에 대응하며, 새로운 방식의 신호제어 방안을 모색하는데 그 목표를 두고 있다. 구간검지체계 기반의 신호제어에 목적을 두고 있으며, 이러한 목적의 실현을 위한 세부 목표는 다음과 같다.

첫째, 신호교차로의 실시간 신호제어를 위한 변수로서 공간적 개념을 가지는 주기단위의 접근로별 최대 대기행렬길이를 선정하였으며, 이는 구간검지체계에서 얻어지는 개별차량의 구간통행시간 정보를 이용하여 대기행렬의 길이를 측정하는 방안의 제시한다.

둘째, 접근로별 대기행렬의 균형화라는 목적을 가지는 신호제어 알고리즘을 개발하고자 한다.

## 2. 연구의 내용 및 범위

구간검지체계로 부터 개별차량의 구간통행시간을 산출하여, 이를 기반으로 대기행렬을 산정하였다. 또한 산출된 주기단위의 최대대기행렬길이를 이용하여 전접근로에 대해 이들을 균등화시켜줄 수 있는 신호제어를 수행하는 알고리즘을 연구하였다.

본 연구는 연구의 초기 단계로서 연구의 진행을 위해 다음과 같은 내용적 범위 하에 진행되었다.

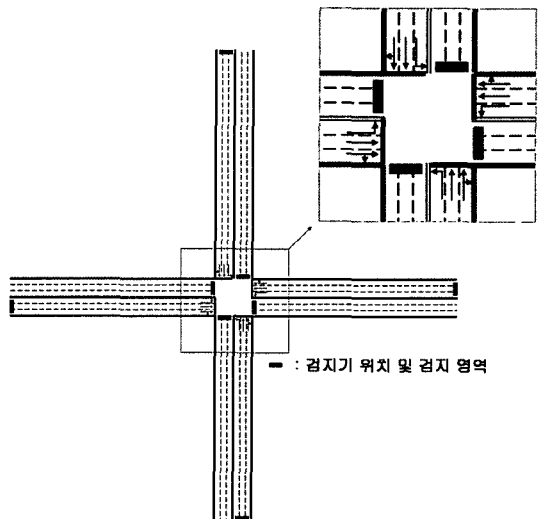
첫째, 교차로의 포화도는 비포화 상황만을 실험 대상으로 하였다.

둘째, 정보수집기술은 비콘과 같은 외관으로서 DSRC와 같이 차량과 검지기간의 양방향 무선통신을 통해 차량의 ID와 검지기 통과시각을 수집할 수 있는 형식으로만 지정하였다. 또한 검지영역에 따른 오차는 존재하지 않으며, 검지기 진입 시 모든 차량에 대해 검지가 가능한 것으로 가정하였다. 본 논문에서는 신호제어 알고리즘의 개발에 초점을 두고 있으므로 정보수집 기술의 적용에 관한 사항은 제외하였다.

셋째, 네트워크를 주행하는 모든 차량에 대해 정보수집이 가능하며, 차종은 승용차만으로 구성하였다.

넷째, 알고리즘의 적용을 위해 <그림 1>과 같은 기하구조와 차로를 가지는 실험대상 교차로를 지정하였다.

다섯째, 검지영역은 단일지점으로서 검지지점의 차이로 인한 오차는 발생하지 않는다.



<그림 1> 연구대상 교차로

## II. 본론

### 1. 선행 연구 고찰

구간검지체계 기반의 신호제어 사례는 극히 드물며, 본 선행연구 고찰은 일본의 RONDO (Rolling-Horizon Dynamic Optimization of Signal Control)에서 선택적 기능으로 제시하고 있는 통행시간을 이용한 신호제어 방안을 대상으로 하였다.

RONDO에서의 연구에서는 노선에 설치된 양방향 통신이 가능한 비컨형식의 검지기를 이용하여 개별차량의 통행시간을 수집하며, 이를 이용한 교차로의 실시간 신호제어에 초점을 맞추고 있다. 또한 신호제어의 목표는 접근로별 지체의 총합이 최소화 되도록 하는 것이다.

연구에서의 가정 사항은 아래와 같다.

첫째, 개별차량의 통행시간은 연속적으로 설치된 복수개의 검지기 통과시각차로 산출한다. 여기에서 검지기의 검지영역에 따른 개별차량간의 통행시간의 차이는 존재하지 않는 것으로 하였다.

둘째, 검지기의 종류와 검지방식 등은 구분하지 않으며, 비컨과 같은 외관을 가지는 차량과의 무선통신이 가능한 검지기만으로 가정하였다. 수집정보는 개별차량의 ID와 검지기 통과시각정보로 하였다.

셋째, 네트워크를 주행하는 차량 중 정보 수집의 대상 차량은 균일한 분포로 네트워크에 투입된다.

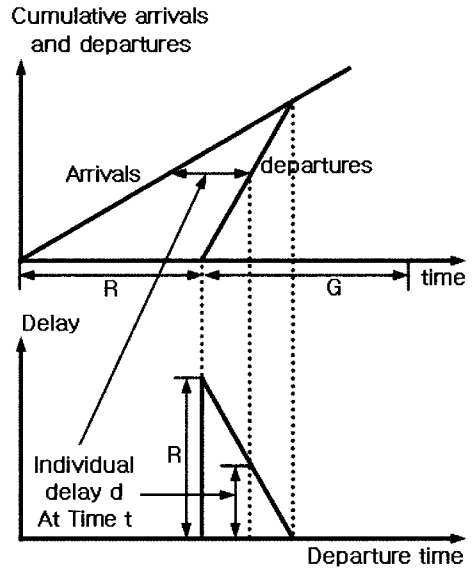
넷째, 교차로의 포화정도는 비포화 상황만을 연구 대상으로 하였다.

본 연구에서 신호제어를 위한 기초 변수가 되는 개별차량의 지체를 산정하는 과정은 식(1)과 같이 개별차량의 통행시간과 자유속도( $v_f$ )로 통행 시 링크통행시간과의 차로 계산된다.

$$d = \text{traveltime} - \frac{L}{v_f} \tag{1}$$

식(1)에 의해 산정된 개별차량의 지체는 <그림 2>에서 주기 단위의 지체로 표현되어진다. 주기단위의 누적 지체를 산정하기 위해 개별차량의 지체를 합산하는 방법을 이용하고 있으며, 이렇게 산정된 접근로별 지체를 이용하여 교차로 전체의 지체를 최소화 시키는 것을 실시간신호제어의 목표로 하고 있다.

신호제어를 위한 변수의 산출과정은 주기단위 지체



<그림 2> 주기단위 지체의 산정

를 기본으로 접근로별 포화교통류율의(S) 산출이 가능하다. 식(2)는 포화교통류율의 산출을 위한 것이며, 산출과정은 식(1)에 의해 산출되는 개별차량의 지체에 의해 대기행렬에 포함되어 지체를 경험한 차량과 교차로 통과 시 적색신호를 경험하지 않아 자유속도 이상으로 주행한 차량으로 구분이 가능하다. 지체를 경험한 차량의 수와 대기행렬 해소시간을 이용하여 포화교통류율을 산정하게 되며, 이러한 산정과정은 대기행렬의 해소는 포화교통류율과 동일한 차두시간을 가지는 원리를 이용하고 있다. 또한 포화교통류율의 안정적 산출을 위한 방안으로 네트워크를 주행하는 전체차량과 정보수집 가능 차량의 비율에 따라 수집주기를 달리하고 있으며, 보정계수를 이용하여 최종적인 포화교통류율을 산정한다.

$$S = 1 \times \frac{n_s^c}{N \times x} \tag{2}$$

$N$  : 정보를 수집한 주기의 수

$n_s^c$  : 지체를 경험한 정보수집 가능차량의 수

$x$  : 대기행렬 해소시간

: 포화교통류율의 보정을 위한 계수

신호제어를 위한 교통류율( $\lambda$ )의 산정 과정은 식(3)을 이용해 산출되며, 그 산정 방식은 포화교통류율과 검지기를 통과한 정보수집가능차량의 비율을 이용한다.

$$\lambda = \frac{(\overline{n^e})/NC}{(\overline{n_s^e})/N\&} = \frac{n^e}{n_s^e} \times \frac{x}{C} \quad (3)$$

$n^e$  : 정보수집가능차량의 수  
 $C$  : 주기길이

실시간 신호제어를 위해 최종적인 주기와 현시의 산출과정은 식(4)와 같이 교통류율( $\lambda$ )을 이용하여 Webster방식으로 최적주기와 현시를 결정한다. 이는 신호제어 목표인 교차로 전체 지체의 최소화를 위한 방식이다.

$$C_{opt} = \frac{1.5L+5}{1-\lambda} \quad (4a)$$

$$C_{min} = \frac{L}{1-\lambda} \quad (4b)$$

$$G_i = C \times \frac{\lambda_i}{\sum \lambda_i} \quad (4c)$$

**2. 통행시간을 이용한 대기행렬길이 산출**

**1) 개별차량의 지체시간**

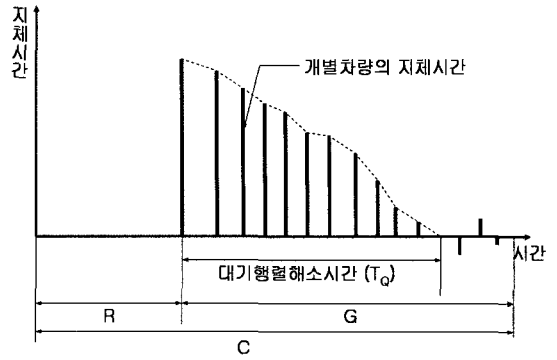
개별 차량의 지체시간은 식(5)로서 산출되며, 통행시간과 자유속도로 해당링크를 주행 시 소요되는 시간과의 차이를 개별차량의 지체시간으로 한다. 여기서 자유속도는 사전에 정의하는 방법과 지체를 경험하지 않은 차량의 평균 구간통행속도를 이용하는 방안이 있다.

$$d_{in} = t_{l_i} - \frac{D_{l_i}}{v_f} \quad (5)$$

$d_{in}$  : 개별차량의 지체시간 (sec)  
 $t_{l_i}$  : 링크  $l_i$ 의 통행시간 (sec)  
 $D_{l_i}$  : 링크  $l_i$ 의 거리 (m)  
 $v_f$  : 자유속도 (m/sec)

**2) 대기행렬의 해소시간**

대기행렬의 해소시간은 포화교통류율의 산정과 최대



〈그림 3〉 개별차량의 지체시간 변화

대기행렬 길이의 산정을 위해 사용되며, 〈그림 3〉과 같이 대기행렬 중 개별차량의 지체가 사전에 정의된 기준 이하로 나타난 첫 차량을 대기행렬 후미차량으로 간주하여 대기행렬 해소시간을 산출하게 된다.

$$T_Q = TOQ - TOF$$

$T_Q$  : 대기행렬 해소시간 (sec)  
 $TOF$  : 대기행렬 후미 차량의 검지기 통과시간 (sec)  
 $TOQ$  : 대기행렬 선두 차량의 검지기 통과시간 (sec)

**3) 접근로별 포화교통류율**

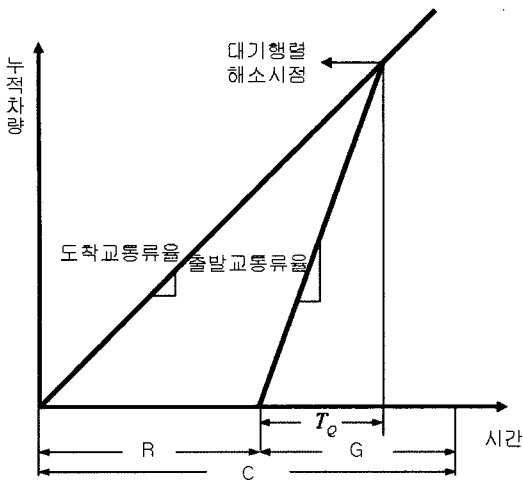
포화 교통류율을 식(6)과 같이 대기행렬이 모두 해소되는 시간동안의 차량과 시간의 비율로서 계산하였다. 여기에서 출발손실시간을 고려하여 대기행렬 해소시간에서 2.3초를 제외하여 포화교통류율을 산출하게 된다.

$$S = \frac{Q_{max}}{T_Q - SLT} \times 3600 \quad (6)$$

$S$  : 포화교통류율 (pcphg)  
 $Q_{max}$  : 최대대기행렬 (Passenger Car)  
 $T_Q$  : 대기행렬 해소시간 (sec)  
 $SLT$  : 출발손실시간(2.3sec)

**4) 접근로별 지체 산정**

접근로별 지체의 산정을 위해 앞서 산정한 대기행렬 해소시간 및 포화교통류율을 이용하며, 결정적 지체모형의 출발·도착 프로세스를 기반으로 한다. 이는 본



〈그림 4〉 주기 단위의 지체

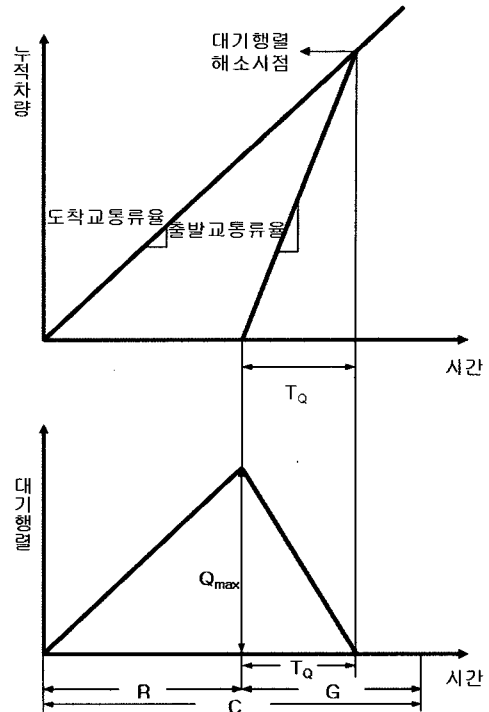
논문에서는 비포화상황 만을 그 대상으로 하고 있으므로 정확한 대기행렬 해소시간의 산정이 용이하며, 주기 단위의 지체 산정하기 용이하기 때문이다. 식(6)에서 산출한 포화교통유율은 도착교통류율과 동일한 것으로 가정하여 지체를 산정하게 된다. 이는 대기행렬의 해소시 출발손실시간을 겪는 이후 차량은 포화교통류율과 동일한 차두시간을 갖는다는 것의 주기 단위의 지체는 〈그림 4〉에서 삼각형의 너비에 해당하며, 출발율과 대기행렬해소시간의 곱을 이용하여 삼각형의 높이를 산출 가능하다. 따라서 식(7)과 같이 삼각형의 아래변의 길이인 적색시간과의 곱으로 최종적인 주기 단위의 지체를 산정하게 된다. 여기서 대기행렬 해소시간의 오차 등을 고려하여 보정계수를 통해 보다 정확한 접근로별 지체를 산정할 수 있다.

$$D = \frac{1}{2} R \times \left( \frac{S}{3600} \times T_q \right) \quad (7)$$

- D : 주기 단위 지체 (sec-pc)
- R : 적색시간 (sec)
- S : 출발교통류율 (pcph)
- T<sub>q</sub> : 대기행렬 해소시간 (sec)
- : 보정계수

5) 최대 대기행렬길이의 산정

이동류별 최대 대기행렬길이는 결정적 지체모형에서 〈그림 5〉의 상단부 그림에 해당하는 출발·도착프로세



〈그림 5〉 지체시간과 대기행렬의 관계

스와 하단부에 해당하는 누적대기행렬프로세스의 너비는 주기 단위의 접근로별 지체를 의미하며 둘의 크기는 동일하다는 개념을 이용하였다.

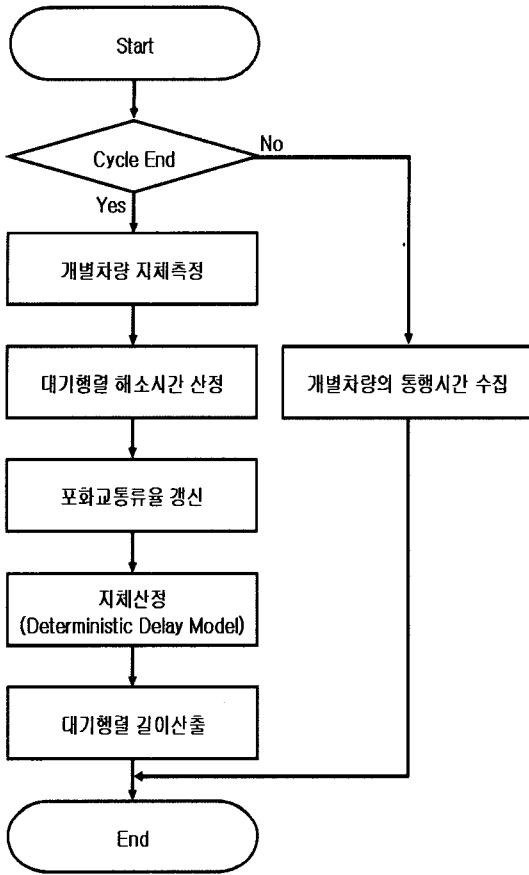
식(7)에서 산출된 주기단위의 지체는 〈그림 5〉에서와 같이 누적대기행렬 프로세스 부분의 삼각형 너비와 동일하며, 삼각형의 높이는 최대 대기행렬길이에 해당한다. 여기에 식(8)에서 적색시간과 대기행렬해소시간을 이용하여 최종적인 대기행렬 길이를 산출하게 된다.

$$Q_{max} = \frac{2D}{R + T_q} \quad (8)$$

- Q<sub>max</sub> : 최대 대기행렬길이 (Passenger Car)
- D : 주기당 접근로별 지체 (sec-pc)
- R : 적색시간 (sec)
- T<sub>q</sub> : 대기행렬 해소시간 (sec)

6) 대기행렬 산출 알고리즘

대기행렬의 산출을 위해 사전에 정의된 매시간동안 〈그림 6〉과 같은 알고리즘이 매 Time-Step 단위로 반복 수행되어 대기행렬을 산출하게 된다.



〈그림 6〉 대기행렬 산출 알고리즘

### 3. 대기행렬 길이의 검증

대기행렬에 영향을 미칠 수 있는 요소로는 포화도, 차로수, 신호운영방식(Dual-ring, 동시신호), 교차로 기하구조 등 다양한 조건을 고려할 수 있으나 교차로 기하구조는 사전에 정의하였으므로 〈표 1〉과 같이 포화도와 주기를 변수로 실험 시나리오를 구성하여 대기행렬 산출 알고리즘에 대한 검증과정을 수행하였다. 식 (9)와 같은 방법으로 검증을 위한 대기행렬 오차를 산출하였다.

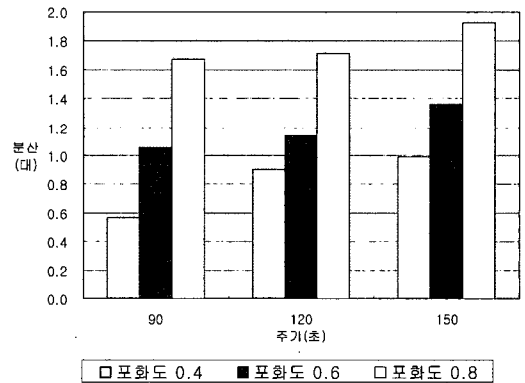
$$Q_e = Q_a - Q_s \tag{9}$$

- $Q_e$  : 대기행렬 오차 (대)
- $Q_a$  : 알고리즘에 의한 대기행렬 (대)
- $Q_s$  : 시뮬레이터에서 산출된 대기행렬 (대)

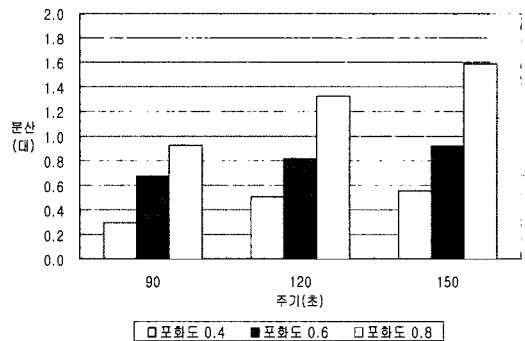
〈표 1〉 대기행렬 알고리즘의 검증 시나리오

구분	주기	유효녹색 (비율)		접근로 포화도
		좌회전	직진	
Scenario 1	90초	14초 (15%)	27초 (30%)	0.4
				0.6
				0.8
Scenario 2	120초	18초 (15%)	36초 (30%)	0.4
				0.6
				0.8
Scenario 3	150초	23초 (15%)	45초 (30%)	0.4
				0.6
				0.8

시나리오별 대기행렬의 오차에 대한 분산은 〈그림 7〉, 〈그림 8〉과 같이 높은 포화도와 긴 주기에서 분산의 값이 최대 1.9대로서 크게 나타났으며, 이는 대기행렬의 길이가 길수록 오차의 정도가 큰 것을 의미하는 결과로 대기행렬 해소시간의 측정 오차가 원인으로 판단된다.



〈그림 7〉 직진 대기행렬 오차의 분산



〈그림 8〉 좌회전 대기행렬 오차의 분산

#### 4. 대기행렬 균등화 신호제어

통행시간 기반의 신호제어의 목적은 접근로별 대기행렬의 균등화에 있으며, 다음과 같은 세부적인 목표를 가진다.

첫째, 전체 접근로의 현시별 대기행렬 길이는 사전에 정의한 임계대기행렬을 초과하지 않도록 신호제어를 수행한다.

둘째, 대기행렬의 길이는 전 접근로별로 균등화되도록 실시간 신호제어를 수행한다.

셋째, 직진과 좌회전의 대기행렬 길이를 분리 추정하며, 전체 접근로의 현시별 대기행렬 길이를 균등화한다.

#### 5. 주기 산정 및 현시 배분

주기의 산정은 전접근로에 대해 대기행렬을 모두 해소 가능한 주기값 산출을 목표로 하고 있다. 접근로별 대기행렬의 정지차량이 정지선까지의 도달시간은 식(10)과 같이 포화교통류율과 대기행렬의 곱으로 산출되는 시간과 출발손실시간의 합으로서 산출된다.

$$T = 1 \left[ \frac{3600}{S} Q_{MAX} + SLT \right] \quad (10)$$

- $T$  : 대기행렬 최종차량 정지선 도달시간(sec)
- $S$  : 포화교통류율 (pcph)
- $Q_{MAX}$  : 대기행렬 차량 대수 (pc)
- $SLT$  : 출발손실시간 (sec)

주기의 산정을 위해서는 식(10)을 기본 개념으로 신호제어방식에 따라 대기행렬이 큰 접근로를 임계차로 설정하며, 임계차로 대기행렬의 해소를 위한 값이 신호주기 산정에 이용된다. 식(11)과 같이 임계차로의 수에 따른 출발지체시간을 고려하여 최종적인 주기를 산정한다.

산정된 주기는 이전 주기를 고려하여 급격한 주기변화에 따른 교통류의 충격 완화하기 위해 단위주기길이 만큼의 단계적 주기변화만 가능하다. 단위주기의 크기는 사전에 정의되며, 또한 사전에 정의된 최소, 최대주기를 만족 여부를 확인하여 최종적인 주기를 산정하게 된다.

$$C = 1 \times \sum_{i=1}^4 \left[ Q_i + \frac{Q_i}{R_i} \times T_i \right] \times 2.0 + 2.3 \times i \quad (11)$$

- $C$  : 주기
- $Q_i$  : 임계차로의 대기행렬
- $R_i$  : 적색시간
- $T_i$  : 대기행렬 마지막 차량의 정지선 도달시간
- $i$  : 임계현시

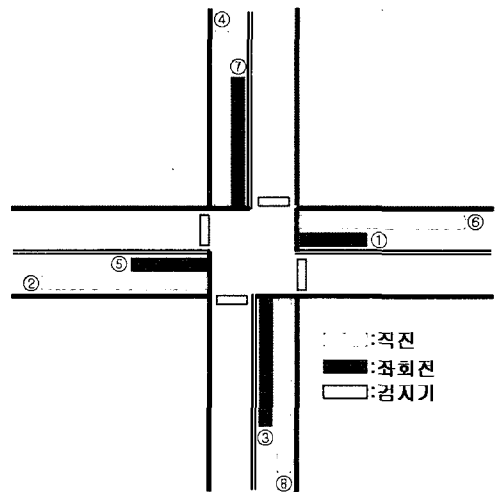
여기서 구해진 주기에 임계치를 두어 최종주기를 산출하게 된다.

주기산정 후 현시의 배분을 위해 접근로별 최대대기행렬길이를 이용하며, 접근로별 대기행렬의 균등화를 위해 식(12)와 같이 전체 대기행렬길이에 대한 접근로별 대기행렬의 비율을 이용하여 현시를 배분하게 된다.

$$G_i = C \times \frac{Q_{max i}}{\sum Q_{max i}} \quad (12)$$

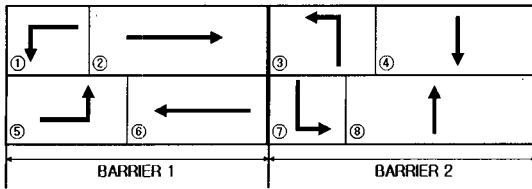
- $G_i$  :  $i$ 현시의 녹색시간
- $C$  : 주기길이
- $Q_{max i}$  : 임계 대기행렬길이

(그림 9)과 같이 접근로별 대기행렬의 길이에 NEMA와 동일한 번호체계를 부여하여 현시별 최대대기행렬의 길이의 비율을 이용하여 현시길이를 결정한다.



(그림 9) 현시별 번호체계

현시의 길이는 다음과 같은 순서로서 결정한다. 첫째, 주기를 Barrier로 분할한다.



〈그림 10〉 Dual-ring 현시체계

Barrier의 배분과정은 〈그림 10〉에서 ①현시의 대기행렬길이와 ②현시의 대기행렬길이의 합과 ⑤현시의 대기행렬길이와 ⑥현시의 대기행렬길이 합의 크기를 비교하여 큰 쪽으로 Barrier1의 크기 결정하고, 주기와 의 차로 Barrier2의 크기를 결정하게 된다. 이는 COSMOS에서 포화도를 이용한 방식과 동일한 개념으로 최대대기행렬 길이의 비율에 따른 Barrier 결정으로 접근로별 대기행렬의 균형을 방안이다.

둘째, 대기행렬의 비율에 따라 현시를 배분한다.

결정된 배리어의 크기에 따라 식(13)과 같이 배리어 별 현시를 배분한다.

$$G1 = Barrier1 \times \frac{Q_{max1}}{Q_{max1} + Q_{max2}} \quad (13a)$$

$$G2 = Barrier1 \times \frac{Q_{max2}}{Q_{max1} + Q_{max2}} \quad (13b)$$

$$G3 = Barrier2 \times \frac{Q_{max3}}{Q_{max3} + Q_{max4}} \quad (13c)$$

$$G4 = Barrier2 \times \frac{Q_{max4}}{Q_{max3} + Q_{max4}} \quad (13d)$$

$$G5 = Barrier1 \times \frac{Q_{max5}}{Q_{max5} + Q_{max6}} \quad (13e)$$

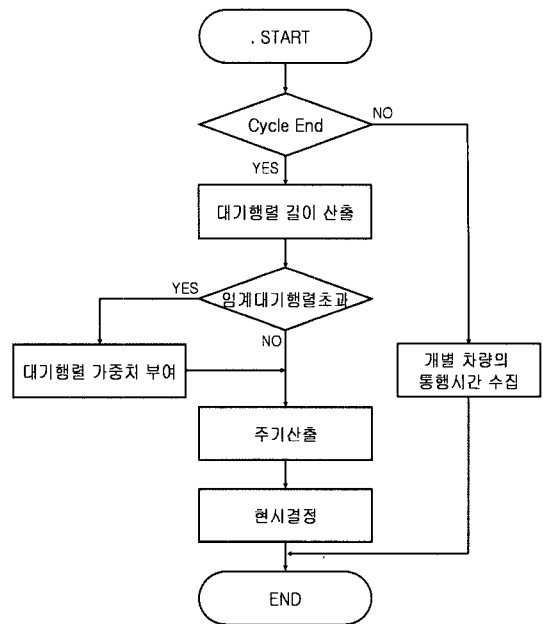
$$G6 = Barrier1 \times \frac{Q_{max6}}{Q_{max5} + Q_{max6}} \quad (13f)$$

$$G7 = Barrier2 \times \frac{Q_{max7}}{Q_{max7} + Q_{max8}} \quad (13g)$$

$$G8 = Barrier2 \times \frac{Q_{max8}}{Q_{max7} + Q_{max8}} \quad (13h)$$

6. 신호제어 알고리즘

신호제어를 위한 변수산출의 순서 및 주기와 현시 산출의 과정은 〈그림 11〉과 같이 실시간 신호제어 알고리즘의 신호제어를 위한 기초 변수인 대기행렬을 산출하여, 주기, 현시를 결정한다.

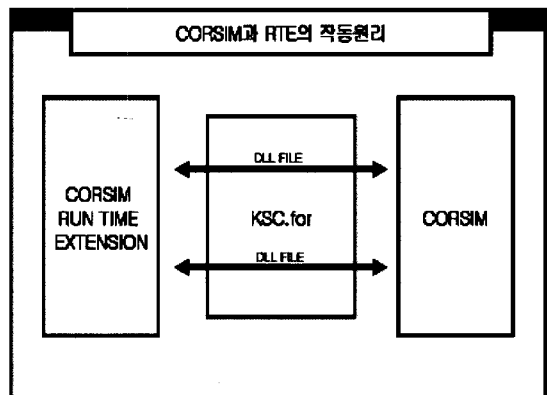


〈그림 11〉 신호제어 알고리즘

III. 모의실험

1. 실험도구 선정

실시간신호제어시스템에 대한 모의실험을 위해 TSIS(Traffic Software Integrated System)를 실험 도구로서 선정하였다. 이는 많은 연구에서 신뢰할 수 있는 모의실험 도구로서 검증·수용되어왔으며, 〈그림 12〉와 같이 CORSIM TRE(Data Dictionary)를 제공하여 다양한 교통상황에 대한 실험이 가능하기 때문이다.



〈그림 12〉 RTE의 작동 원리



## 2. 시뮬레이션 결과

접근로별 대기행렬 길이를 균형화 시켜주기 위한 신호제어 알고리즘에 대한 평가를 위하여 다양한 교통조건, 신호조건을 시나리오로 작성하였다. 교통조건에서는 <표 2>와 같이 접근로별 투입교통량의 비율에 대한 분석에 목적을 두고 있으며, 신호조건에서는 <표 3>과 같이 주기와 포화도의 변화에 대한 분석에 그 목적을 두고 있다. 따라서 각각의 상황에 따른 시나리오를 분석함으로써 통행시간 기반 제어에 대한 효과를 분석하였다.

<표 2> 시뮬레이션을 위한 교통조건

구분	동측 접근로	서측 접근로	남측 접근로	북측 접근로	합계
상황 1	25%	25%	25%	25%	100%
상황 2	35%	35%	15%	15%	100%
상황 3	40%	20%	20%	20%	100%

<표 3> 시뮬레이션을 위한 신호조건

구분	주기	임계 포화도	회전 교통량비	
			좌회전	직진
scenario 1	90초	0.4	30%	70%
		0.6		
		0.8		
scenario 2	120초	0.4	30%	70%
		0.6		
		0.8		
scenario 3	150초	0.4	30%	70%
		0.6		
		0.8		

대기행렬 균형전략에 따른 신호제어의 평가를 위해 식(14)와 같이 편차 절대값의 평균을 의미하는 평균편차(Mean Diviation)을 이용하여, 상황에 따른 시나리오를 분석하였다. 또한 효과적인 평가를 위해 Webster 식에 의한 최적화된 정주기신호제어와 지체시간의 비교를 수행하여, 신호제어의 근본적인 목적에 해당하는 교차로 전체 지체의 최소화에 대한 분석을 시행하였다.

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_i - \bar{a}| \quad (14)$$

MD : 평균편차

$a_i$  : 현시별 최대 대기행렬 길이

$\bar{a}$  : 현시별 최대 대기행렬 길이의 평균

$a_m$  : 임계대기행렬 길이

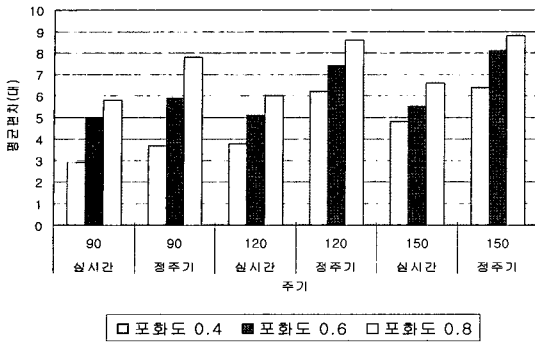
상황 1의 경우 전접근로에 대해 동일한 비율의 교통량을 투입하며, 상황 2는 동서측 접근로를 주방향으로 남북측 접근로를 부방향으로 하고 있으며, 상황 3에서는 동측접근로에서만 높은 교통량 비율을 보이도록 상황을 설정하였다. 분석결과 본 연구에서 제시한 실시간 신호제어 모형은 모두 동일한 경향으로 낮은 주기와 낮은 포화도에서 우수한 평균편차를 산출할 수 있었고, 또한 <표 4>에 나타나있는 상황별 시나리오별 평균편차에서 상황 1에서 일부 경우를 제외한 모든 분석결과에서 정주기 제어 보다 다소 낮은 분석결과를 도출하였다.

지체의 비교에서는 낮은 포화도에서는 통행시간기반 제어와 Webster 식에 의한 정주기 제어 간 큰 차를 나타내지 않았으며, 높은 포화도에서는 실시간 신호제어에서 다소 높은 지체를 보이는 것으로 분석되었다.

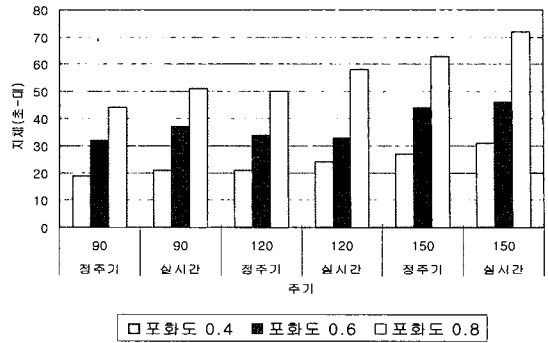
상황별 시나리오 분석에 따라 포화도와 주기변화로

<표 4> 상황별 시나리오별 평균편차 (단위: 대)

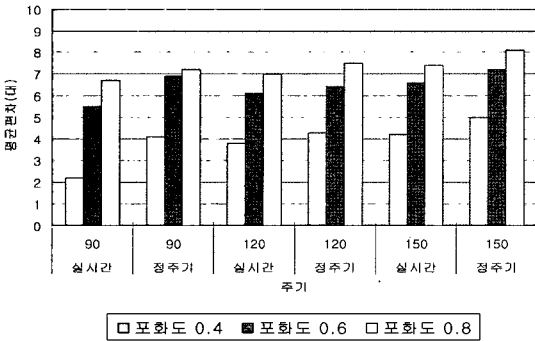
상황	주기 (초)	포화도	실시간신호제어		정주기제어	
			직진	좌회전	직진	좌회전
1	90	0.4	1.3	1.6	1.1	1.8
		0.6	1.1	1.8	2.5	1.7
		0.8	1.6	2.0	2.1	2.2
	120	0.4	1.7	1.5	2.0	1.9
		0.6	2.9	3.0	3.0	3.2
		0.8	3.0	3.3	3.1	3.6
	150	0.4	2.6	1.5	1.7	1.9
		0.6	2.6	2.3	2.6	2.1
		0.8	3.5	2.6	3.1	2.9
2	90	0.4	2.9	2.2	3.7	4.1
		0.6	5.0	5.5	5.9	6.9
		0.8	5.8	6.7	7.8	7.2
	120	0.4	3.8	3.8	6.2	4.3
		0.6	5.1	6.1	7.4	6.4
		0.8	6.0	7.0	8.6	7.5
	150	0.4	4.8	4.2	6.4	5.0
		0.6	5.5	5.1	8.1	7.2
		0.8	6.6	5.9	8.8	8.1
3	90	0.4	3.1	1.9	3.3	2.1
		0.6	4.4	3.3	6.3	4.3
		0.8	5.4	3.8	7.1	5.6
	120	0.4	4.3	2.8	5.1	3.7
		0.6	5.0	3.2	6.0	4.5
		0.8	5.8	4.0	6.9	5.5
	150	0.4	5.1	3.1	5.9	3.7
		0.6	5.7	3.8	6.6	4.6
		0.8	6.4	4.2	7.2	5.8



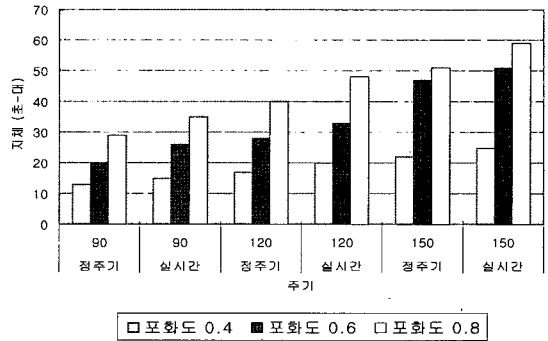
〈그림 13〉 상황 2의 직진 평균편차 비교



〈그림 16〉 상황 2의 제어유형별 지체 비교



〈그림 14〉 상황 2의 좌회전 평균편차 비교



〈그림 17〉 상황 3의 제어유형별 지체 비교

서 구간통행시간이반 실시간신호제어 알고리즘의 효과를 분석한 결과 접근로별 대기행렬 균등화라는 목적에는 최적화된 정주기 신호제어보다 효과가 있으나, 교차로 전체 지체 감소에는 효과가 미비하였다. 〈그림 13〉와 〈그림 14〉는 상황2의 직진과 좌회전에 대해 대기행렬 균등화라는 결과를 보여준다.

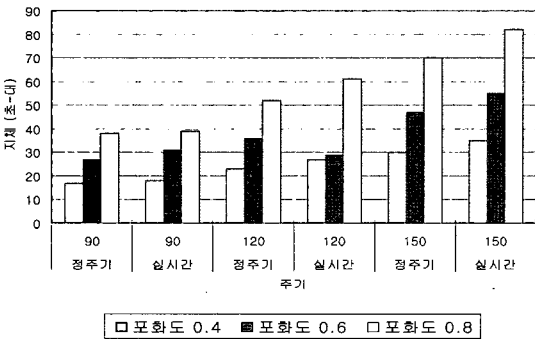
신호제어 분석결과 본 연구에서 제시한 제어목적에는 부합되는 결과를 도출하였으나 신호제어의 일반적 목적이라고 할 수 교차로 전체지체의 최소화에서 최적화된 정주기 제어보다 높은 지체를 나타내었다. 〈그림 15〉, 〈그림 16〉, 〈그림 17〉는 각각 상황별 교차로 전

체 지체에 대해 본 연구의 알고리즘 제어결과와 Webster식에 의한 정주기 제어결과와 비교한 것이다.

#### IV. 결론 및 향후 연구과제

구간검지체계 하에서 신호제어를 위해 최대 대기행렬 길이라는 공간적 개념을 가지는 변수를 산출하여, 대기행렬 균형제어를 목적으로 하는 교차로 신호제어에 적용하였다. 구간검지체계로부터 산출된 통행시간은 교차로의 신호제어로 인해 개별차량의 지체경험 여부를 판별할 수 있으며, 이는 대기행렬 해소시간의 산출이 가능함을 의미한다. 또한 결정적 지체모형을 이용해 대기행렬해소시간으로 주기별 최대대기행렬을 산출하였다. 이러한 변수를 이용한 실시간 신호제어를 위해 대기행렬 균등화라는 목적함수를 가지는 신호제어 알고리즘을 제시하였다.

본 연구에서 제시한 대기행렬산출알고리즘을 통해 얻어지는 주기별 최대 대기행렬의 길이는 전반적으로 높은 신뢰도의 결과를 산출할 수 있었다. 그 상황별 결과에서는 짧은 주기, 낮은 포화도에서 그 정확도가 높은 반면, 긴 주기와 높은 포화도에서는 그 정확도가 반



〈그림 15〉 상황 1의 제어유형별 지체 비교

대의 경우에 비해 다소 떨어지는 것을 확인하였다. 이는 대기행렬 해소시간, 알고리즘의 단계별 적용되는 보정계수, 포화교통류를 등이 포화도가 높아지고, 주기가 길어지는 상황에서 그 정확도가 떨어지기 때문에 판단된다. 또한 대기행렬 산출을 위한 알고리즘의 각 단계별로 적용되어지는 보정계수 등이 포화도와 주기의 변화에 따라 차등 적용되지 못한 것이 대기행렬의 정확도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

대기행렬의 길이를 이용한 신호제어에서는 대기행렬의 정확도와 동일한 경향으로 낮은 포화도와 짧은 주기로 설정된 시나리오에서는 대기행렬길이 균형화라는 목적을 보다 잘 만족시키는 평균편차를 나타내었다. 이는 앞의 대기행렬의 정확도와 관련된 사항으로 판단된다. 또한 Webster 식에 의한 정주기신호제어와 비교 시 상황 1의 일부 경우를 제외한 전체에서 보다 우수한 평균편차를 도출하였다. 그러나 지체의 분석에서는 정주기 제어와의 비교 시 그 효과가 미비하였다. 이는 실시간 신호제어의 목적이 전접근로의 지체 최소화가 아닌 대기행렬 균등화에 있기 때문으로 판단된다.

구간검지체계 하에서의 신호제어를 위한 향후 연구 과제로는 다음과 같은 사항들이 있다.

첫째, 구간검지체계 기반의 신호제어 알고리즘은 비포화 상황이라는 전제하에 연구가 진행된 것으로 실제 교차로의 적용을 위해서는 과포화상황에 대한 신호제어 방안이 연구되어야 할 것이다.

둘째, 본 연구는 네트워크를 주행하는 전체 차량의 정보를 수집 가능한 것으로 가정한 후 수행되었다. 그러나 현장 적용을 위해서는 전체 차량의 정보수집이 현실적으로 불가능하므로 정보수집가능차량의 비율에 따른 정보수집 주기 변화에 관한 연구가 수반되어야 하겠다.

셋째, 신호제어를 위한 변수 산출 과정에서 각 단계별로 적용되는 보정계수에 대해 주기와 포화도에 따른

차등 적용이 필요하며, 이를 통해 신호제어 목적에 보다 부합되는 신호제어가 가능할 것으로 판단된다.

넷째, 대기행렬 산정의 기본이 되는 변수인 개별차량의 지체를 사전에 정의된 자유속도를 이용하여 산정하였다. 그러나 실제의 링크통행 속도 반영을 위해 임계속도 이상으로 주행한 차량의 평균통행속도를 자유속도로 이용하는 것에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 김홍진(2002), "과포화시 대기행렬길이 균형전략에 따른 교통신호제어모형의 개발", 석사학위논문, 서울시립대학교, pp.9~13.
2. 서울지방경찰청(2003), "실시간 신호제어시스템 실무해설집", p.26, pp.31~37.
3. 교통개발연구원(2003), "차세대무선통신 신호제어 시스템 개발", pp.65~66.
4. 대한교통학회(2004), 도로용량편람, pp.253~260.
5. 이정윤·김진태·장명순(2004), "실시간 신호제어를 위한 신경망 적용 지체최소화 주기길이 설계모형 개발" 대한교통학회지, 제22권 제3호, 대한교통학회, pp.147~148.
6. 도철웅(1995), 교통공학원론(상), 청문각, pp.73~74.
7. M. Massart, M. Koshi and M. Kuwahara(2002), "Traffic signal control based on travel time information from beacon", pp.1~4.
8. Francois Dion, Hesham Rakha and Youn-soo Kim (2002), "Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated signalized intersections", TRR, 99-122, TRB, pp.4~5.

☞ 주 작 성 자 : 정영제

☞ 교 신 저 자 : 김영찬

☞ 논문투고일 : 2005. 10. 29

☞ 논문심사일 : 2005. 11. 30 (1차)

2005. 12. 15 (2차)

☞ 심사판정일 : 2005. 12. 15

☞ 반론접수기한 : 2006. 4. 30