

계층분석 방법을 이용한 퍼지 교통 신호 제어에 관한 연구

A Study on Fuzzy Traffic Signal Control using Analytic Hierarchy Process

진현수 · 이상훈* · 송준호** · 김성환***

Hyun Su Jin, Sang Hoon Lee*, Jun Ho Song** and Sung Hwan Kim***

안산공과대학 전기과

* 서울시립대학교 전자전기공학부

** 서울시립대학교 수학과

*** 서울시립대학교 전자전기공학부

요 약

본 논문은 교통 교차로 신호의 최적 주기 시간을 구하기 위해, 계층분석법(AHP: Analytic Hierarchy Process)제어기 사용을 제안한다. 전문 교통 평가자로부터 데이터를 받아 시뮬레이션을 하여, AHP 제어기의 성능이 고정 시간 제어기, 퍼지제어기와 비교되었다. 시뮬레이션은 안산 시청 로타리의 많은 전문 면담자로부터 얻은 데이터를 사용하여 실행되었다. 주요한 문제는 AHP 제어기 알고리즘이 교통 교차로 신호 제어를 위해, 전문 시스템으로 구성 되어, 교통 신호 통제 체계를 얼마나 보조할 수 있는가이다. 논문은 두 단계를 갖는다. (1) 개개목적의 중요성을 계산할 수 있는 Satty의 연구를 기초로 하는 새로운 방법을 제안한다. (2) 인간의 결정 체계는 퍼지 적분이 사용되는 근사 추론에 의하여 나타내진다는 것을 고려한다.

ABSTRACT

This paper proposes the use of the analytic hierarchy process(AHP) controller for obtaining optimal cycle time of traffic intersection signal. By means of simulations that have data from expert traffic estimators, the performance of AHP controller is compared with a fixed-time controller and fuzzy controller. A simulation was executed using data obtained from many expert interviewer of Ansan City hall rotary. The principal issue is how AHP controller algorithm can aid traffic signal supervisor to construct an expert system for traffic intersection signal control. This paper has two steps: (1) we shall present a new methodology based on the work of Satty for calculating a scale of importance of each of the objectives, (2) we also consider that the human's decision mechanism is represented by approximating reasoning where the fuzzy integral is used.

1. 서 론

교통신호 제어의 근본적인 목적은 일정 시간동안 얼마만큼의 차량을 목적하는 곳에 효율적으로 이동시키는가에 있다. 이러한 교통신호 제어에 기본이 되는 차량의 교통량을 결정하는 과정은 제어의 목적에 따라 여러 가지가 있으나, 일반적으로, 통과 차량수, 대기 차량수, 보행자수, 통행 연장시간 등의 입력 상황들을 종합 추론하여 가장 적절한 판단을 기초로 처리하는 방법이 가장 합리적이라고 할 수 있다. 그런데, 이 들 교통 환경 입력 상황중 보행자 수는 교통 평가 요소로 복잡한 면이 있어 가지적으로 비교하기가 어렵다. 그리고, 모든 운행 차량들이 가고자 하는 방향으로 가장 짧은 시간에 보내 주는 것을 교통신호 제어의 목적이라 한다면, 가장 이상적인 교통신호 제어 방식은, 인간적인 사고 방법으로 여러가지 교통 상황을 종합 판단하여 차량의 통행 주기를 결정하고, 가장 적합한

교통흐름을 유도하는 것이라 할 수 있다[1].

현재, 대부분의 교통신호 현시는 다차선 4지 교차로인 경우, 대부분 선행 좌회전 신호 형식으로 고정되어 있으며, 2차선 이하 접근로의 경우 좌회전과 직진 신호를 동시에 주고 있기 때문에, 신호의 순서 변경은 교통 운영의 안정상 변형이 허용되지 않고 있다. 즉, 교통 이동류에 대하여 얼마 정도의 우선권을 어느 순서로 배분할 것인가를 고려하지 않는 실정이다[2]. 그러므로, 도로 교통상황중 모든 유형의 도로에서 발생할 수 있는 도심 교통의 정체 현상을 완화하고, 차량 통행을 관리할 수 있는 새로운 교통 신호등 운용 기술 및 전략이 필요함을 알 수 있다.

기존의 연구 사례를 보면 Gazis[3], Courage[4]등이 단일 교차로의 실시간 교통신호 제어 연구를 하였으며, Greenberg[5]등은 마이크로 컴퓨터를 이용한 순차 제어를 실현하였고, Sims[6]는 교차로의 연계성을 고려하여 연동에 관한 시뮬레이터 개발 연구를 시행하

였다. 그러나, 이들의 연구는 단일 교차로와 교차로 망과의 연동을 고려하지 않았기 때문에 전체적인 교통 흐름을 제어하는데 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 인공지능 기법의 퍼지 알고리즘을 이용하여 교통 문제를 해결하고자 하는 연구가 국내외에서 이루어졌다. 우선, Pappis와 Mamdani [7]는 2개의 1차선 단일 교차로에 대해 퍼지 교통 신호 제어를 제안하여 퍼지 방식을 이용해 매 10초마다 통과 차량용 녹색 주기의 연장을 결정하였고, Kelsey[8]는 분리된 단일 교차로의 제어에서 퍼지변수를 이용하여차량이 밀집된 방향과 이완된 방향에 있어서의 교통 밀도와 최종 신호 변경 이후 소비된 시간 및 신호의 변화율을 통해 신호 제어를 꾀하였다. 국내에서는 Jim[9]이 단일 교차로에서 일정 시간 내의 통과 차량과 대기 차량의 데이터를 가지고 퍼지논리로서 동정(identity)을 구한 후 이를 이용해 적정 출력 주기를 결정하였다.

그러나 실제 교통 환경은 교차로 주변의 교통 시설 상황 및 보행자 활동 등의 다양한 요인으로 구성되어 있는 점을 감안한다면 위의 연구들은 '차량수'라는 교통 요인에 국한되어 있어 여러 교차로의 다양한 고유 조건에 유연하게 대응하는 교통신호 제어에 부합되지 않는다. 이를 위해 우선 다양한 교통 평가 지표를 명확한 논리에 근거하여 정리하고 분류가 쉽고 이용하기 쉬운 형식으로 체계화함이 시급하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구는 종합적인 교통 환경 평가를 고려하여 기존의 가법적인 종합 평가에 대해 새로운 방법을 검토하였고, 교차로 구역 교통 요소를 원활히 하는데 필요한 정량화 기법인 계층 분석법(AHP: Analytic Hierachy Process)이라는 개념을 적용하고 계층 분석법내에 퍼지측도의 개념을 도입함으로써 교통 신호 주기 할당 알고리즘을 제안하였다. 그리고, 이를 이용하여 연동되는 교차로의 신호에 대해 응용 신호 주기 길이를 결정하였으며, 실제 교통 흐름의 제어에 있어 유용성을 가짐을 확인하였다.

본 연구의 연구 과정은 다음과 같이 기술된다.

- 1) 교통 환경 요소를 설정하고 단계별 대안을 각각 지표화 한다.
- 2) 계층화 분석을 이용하여 평가 지표별 중요도를 구한다.
- 3) 퍼지추론에 의하여 평가 지표별 평가치를 구한다.
- 4) 퍼지측도에 의한 퍼지적분을 적용하여 평가 지표별로 최종 평가한다.
- 5) 최종 평가된 평가 지표별 값들을 고려하여 최적 주기를 결정한다.
- 6) 고정 주기 신호 방식, 퍼지 제어 방식, 계층화

분석 방식을 비교 평가한다.

2. 기존신호주기 결정방식

2.1 고정시간 신호주기 결정방식

고정시간 신호주기 결정 방식은 교차로 교통량의 순간적인 변동에 따라 가변적이지 못하고, 대신 미리 정해진 시간계획을 여러개의 다이얼을 사용함으로써 몇 가지의 신호시간으로 운영하는 방식이다. 즉, 한 시간 계획으로부터 다른 시간계획으로의 변동은 교통량의 변화에 따른 것이 아니라 제어기 안에 있는 시계에 의해 정해진 시간이 되면 바뀌게 된다. 이러한 고정시간 신호주기 방식의 장점은 신호기의 구조가 간단하기 때문에 운용과 정비유지가 쉬우며 인접 신호등과 연동하여 일정한 속도로 연속진행시킬 수가 있다는 것이다. 그러나 짧은 시간동안의 교통량 변동에 적용할 수 없으며 침두시간이 아닐때는 불필요한 지체를 유발하게 되는 단점을 가지고 있다. 고정 신호등 주기결정 방식으로 쓰이는 각 현시별 유효 녹색등의 주기시간은 웹스터(Webster) 방식과 그린쉬일드(Greenshields) 방식에 의해 구하여 진다. 식 (1)과 식 (2)는 각각의 주기를 구하는 식이다. 그러나, 이 식들에 의해 주기를 구하다 보면 일정한 한계 차량수를 지나면 주기값을 구할 수 없는 단점을 갖고 있다[10].

$$C_w = \frac{1.5L+5}{1-Y} \tag{1}$$

$$C_g = \frac{Y_1+Y_2+Y_3+Y_4+4(2.6)}{1-\frac{1.6(N_1+N_2)+1.7(N_3+N_4)}{3600PHF}} \tag{2}$$

여기서, C_w 는 웹스터 방식의 주기, C_g 는 그린쉬드방식의 주기를 나타내며, Y 는 $\sum Y_i$ 를 L 은 전체 손실 시간(5초)을 N_1, N_2, \dots 는 각 차선별 차량수를 Y_1, Y_2, \dots 는 각 차선별 황색시간, PHF (peak hour factor)는 침두 시간 계수를 나타내고 있다.

2.2 퍼지추론 신호주기 결정방식

교통신호 주기의 제어에 있어 통과차량수, 대기차량수, 보행자수, 통행 연장시간을 통해 현재 교통상황의 가장 원활한 운용을 유지하고자 제어하는 과정은 여러 입력상황들을 종합 추론하여 가장 적절한 판단을 내리는 인간적 사고 접근 방식과 유사하다. 또한 모든 차량들이 가고자 하는 방향으로 가장 짧은 시간에 보내주는 것을 교통신호 제어의 목적이라 한다면 가장 이상적인 교통신호제어 방식은 인간적인 사고 방법으

로 여러 가지 교통상황을 종합 판단하여 차량의 통행 주기를 결정하고 원활한 교통흐름을 유도해 내는 현시의 순서까지 결정하는 것이라 할 수 있다. 이러한 관점은 애매모호하고 불확실한 상황에서도 적절한 결정을 내릴 수 있는 퍼지제어 기법을 통해 교통신호를 제어할 수 있는 가장 큰 이유라 하겠다.

Jin등[9]이 제안한 전체적인 퍼지 교통 제어 알고리즘은 그림 1과 같다. 여기서, 시간은 1현시 구간내의 녹색 신호등의 연장 시간이며, 통과차량과 대기차량들의 시간에 따른 변화는 퍼지제어기 알고리즘에 반영되어 퍼지규칙으로서 설정하였다. 먼저 각 현시에서 퍼지 알고리즘을 통해서 구한 녹색 신호등의 연장시간은 조작자(operator)에 의해서 주기를 결정한 것으로 가정하여 그 때의 현시별 주기를 감응식제어기와 비교한다. 두 제어기에 인가된 데이터에 의해서 차량 한

대당 소요된 지연 시간을 계산한 결과를 통해 퍼지제어기의 연장시간의 변화가 감응식보다 민감함을 알 수 있었다.

여기서는 차량의 진행이 초당 10초간격으로 유지가 되고 있는 것이 특징이며, 이것은 기존의 차량 감응식 제어기에서 차량 1대가 발견 되었을 때 신호 주기를 연장하여 주는 경우와 비교되어지는 상황이다. 각 조건시간을 10초 간격으로 정한 후 10초 동안의 대기차량, 통과차량의 퍼지규칙으로 즉, 차량이 감지되면 신호를 연장하게 되고 교차로별 연동신호 차량이 감지되어 교차로별 상황이 파라미터별 연동차량이 운행될 수 있도록 하는 경우가 된다.

3. 계층 분석 방법을 이용한 교차로 신호 주기 결정 알고리즘의 제안

계층 분석 방법(AHP)은 정량적 분석법의 일종으로 1970년대 초에 Satty[11]에 의해 개발되었다. 이 기법은 대안의 평가 및 채택을 위한 의사결정기법의 하나로서 이미 이 기법에 대하여 많은 연구가 진행된바 있다[12].

본 연구에서는 평가지표에 대한 중요성의 분석방법으로서 계층분석법을 적용하였다. 이것은 평가지표의 이해도가 높고, 일대비교의 정합성이 좋으며 논리적인 대응력이 있고 다수의 일대비교가 가능하다고 하는 이점을 가지고 있다. 계층 분석법이란 의사결정자의 가치관에 따른 주관적 평가에 의해 복잡한 문제의 해결을 도모하는 방법이다. 의사결정자가 생각하고 있지만 형태화 할 수 없는 주관적인 수치를 요소 상호의 일대비교에 의해서 나타낼 수 있다. AHP의 잇점은 사용하기가 쉽다는 것, 판단에 모순을 허용하는 것, 판단에 포함된 모순의 정도를 나타내는 지표가 준비되어 있다는 것 등이다.

일대비교로부터 얻어진 행렬 A의 최대 고유치와 이것에 대한 고유벡터를 구해서 중요도로 한다. 중요도는 직접상위목적에 대한 하위목적의 상대적 중요도(weight) 또는 직접상위목적에 대한 대체 안의 평가치이다. 결과적으로 계층에 따라서 집계하여 대체 안의 종합평가를 행한다. 일대비교와 중요도 산정방법은 다음과 같다.

즉, 직접상위목적에 대한 하위목적 또는 대체 안을 C_1, C_2, \dots, C_n 으로 표시하고 그 중요도 w_1, w_2, \dots, w_n 은 모두 양의 수로 합은 1이다. 다음으로 두가지의 하위목적 C_i, C_j 를 "직접 상위목적에 대해서 어느쪽이 어느 정도 더 중요한가"라는 방법으로 일대비교를 행한다. 이때 AHP의 큰 특징으로 중요도의 비율을 수

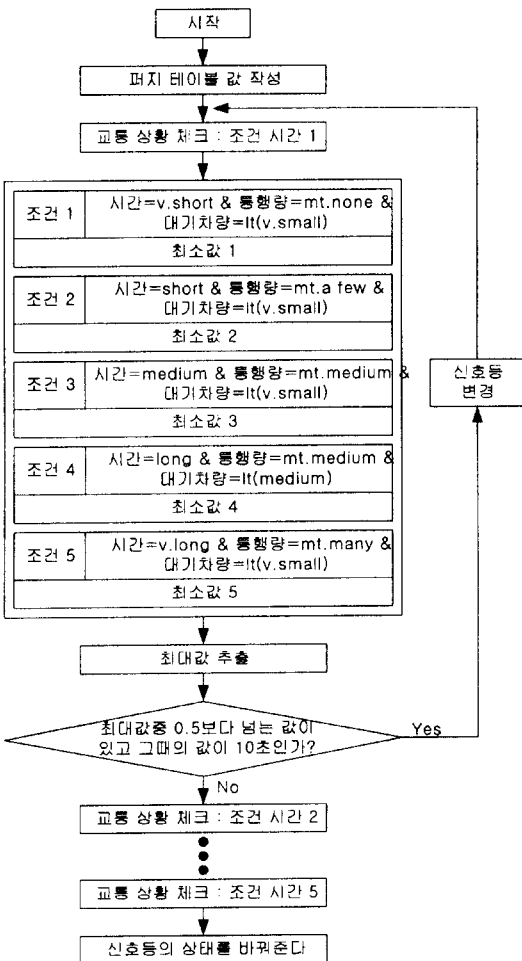


그림 1. 퍼지 교통제어 알고리즘
Fig. 1. Fuzzy traffic control algorithm

치가 아닌 “똑같은 정도”, “조금”, “꽤” 등의 언어적 표현을 사용하여 표현할 수 있다는 것이다. 그러므로 언어로 답할 때에 Satty[11]의 9점 척도를 사용하여 표 1로 정의할 수 있다.

예를 들어 C_7 가 C_j 쪽 보다 꽤 중요하다면 $a = 5$ 로 된다. C_j 쪽이 C_i 쪽보다 중요할 때는 $a_{ij} \geq 1$ 으로 한다, 여기서 a_{ij} 는 C_i 와 C_j 의 priority w_i/w_j 비율의 추정이라고 볼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & w_1/w_3 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & w_2/w_3 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & w_n/w_3 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

에서

$$Aw = nw \quad (4)$$

가 성립한다.

$$Aw = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 역으로 고유치 문제

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (6)$$

를 λ 와 w 에 관해서 풀면 그 최대고유치 $\lambda_{\max} \approx n$ 고 이것에 대한 고유벡터가 w 로 된다. 다음으로 A 가 어느정도 정합적인가를 나타내는 지표로 정합도 CI (consistency index)를 사용한다. CI 는 정합성이 있는 정도에 따라 작게, 정합성이 없게 됨에 따라 크게

표 1. 언어에 의한 중요도 비율
Table 1. Weight rate by language

수치	언어
1	Equal
3	Moderate
5	Strong
7	Very strong
9	Extreme

*2, 4, 6, 8의 수치는 중간일 때 사용한다.

된다.

$$CR = CI/RI \quad (7)$$

$$CI = (\lambda - n)/(n - 1) \quad (8)$$

여기서, CR (consistency ratio)은 일관성 비율이며, CI (consistency index)는 일관성 지수, RI (random index)는 난수지수의 약자이다.

교통 표본을 사용하여 교차로를 교통 대체 안으로 설정하고자 할 경우에는 방향별 대체안을 구체적으로 잡고서 방향의 국소 파라미터를 설정하는데 이중 중요한 4가지 평가지표(통과차량수, 지체차량수, 중대형 차량비, 도로길이)를 적용한다. 본 논문에서는 안산 시청앞 교차로에 대해 논술한다. 대체안의 단계별 설정안은 그림 2와 같다.

안산 교차로의 4지 교차로(그림 4 참조)를 시뮬레이션하기 위하여 대안 설정을 하고자 할 때는 교통요소의 중요파라미터를 설정하는 것이 중요하며, 또한,

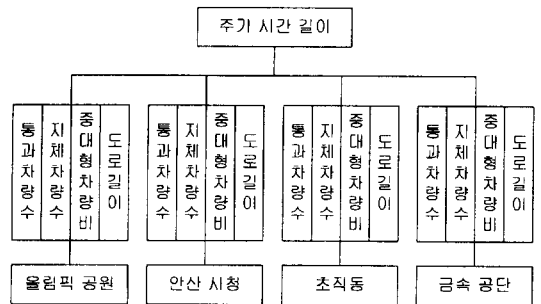


그림 2. 계층 분석 교통요소 대안표 (안산시청 주변)
Fig. 2. AHP traffic element proposal table (peripheral areas around Ansan City Hall)

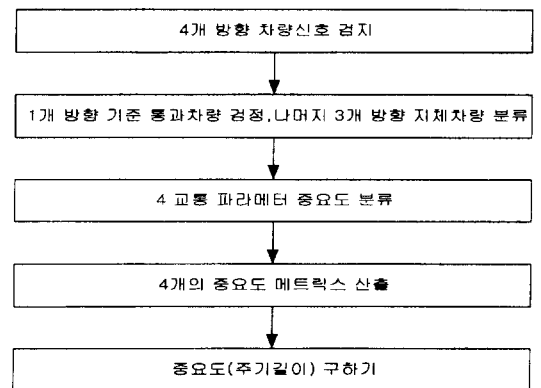


그림 3. 주기결정 순서도
Fig. 3. Flow chart of cycle time decision

교통 신호 주기 결정을 정의하여야 한다. 다음 그림 3과 표 2는 주기 결정 순서도 및 주기 결정 시물레이션 표를 보여 주고 있다.

표 3은 계층 분석 방법의 최대 고유치, 중요도, 일관성 비율등을 구한 예로, 그 방법은, 먼저, 최대 고

유치는, 위표의 비교행렬을 A라 할 때, $|A - \lambda I| = 0$ (여기서, λ 는 단위행렬)이 성립되어, 최대 고유치가 산출되며, 그리고 $Aw = \lambda_{max}w$ (여기서, w 는 중요도)에서 각각의 중요도가 구해지며, 일관성 비율(CR)은 $CR = CI/RI$, $CI = (\lambda - n)/(n - 1)$ (식 7, 식 8 참조)등에

표 2. 주기 결정 시물레이션 상황표
Table 2. Table of flowchart of decision cycle time

순서	교통현장	시물레이션상황	함수식 표현																									
1	4개 신호검지 (안산시청, 초직동, 올림픽공원, 금속공단)	4개의 난수 신호(1,0 유무)발생 ● 통과차량, 대기차량:차량수 단위 (Vehicle/Hour) ● 차량의 형태:소형차량에 대한 대형 차량의 비 ● 도로의 길이:교차로 차량정차선에서 부터의 길이 단위(m)	난수발생 T1=Rand(1), T2=Rand(2), T3=Rand(3), T4=Rand(4)																									
2	차량의 형태 대형, 중형, 소형으로 분류	대형차량 주기 합당시간 소형 차량의 2배	방향별 차량 합산 Pstraight(직진)=T1s(직진) Qdelay(정지)=T2s+T3(좌회전)+T4I																									
3	신호사이클 배정 ■ 안산시청 -초직동 : 직진 ■ 금속공단 -올림픽공원 : 직진 ■ 안산시청 -올림픽공원 : 좌회전 ■ 금속공단 -초직동 : 좌회전	4개 파라메터 중요도 매트릭스 선정 비 교표 작성 1. Equal(2) 3. Moderate(4) 5. Strong(6) 7. Very Strong(8) 9. Extreme(8) 팔호안은 중간값일 경우의 수치	◆ 방향 파라메터 설정 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="5">통과차량 대기차량 차량형태 도로길이</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>안산시청</td> <td>P1</td> <td>Q1</td> <td>T1</td> <td>L1</td> </tr> <tr> <td>초직동</td> <td>P2</td> <td>Q2</td> <td>T2</td> <td>L2</td> </tr> <tr> <td>올림픽공원</td> <td>P3</td> <td>Q3</td> <td>T3</td> <td>L3</td> </tr> <tr> <td>금속공단</td> <td>P4</td> <td>Q4</td> <td>T4</td> <td>L4</td> </tr> </tbody> </table>	통과차량 대기차량 차량형태 도로길이					안산시청	P1	Q1	T1	L1	초직동	P2	Q2	T2	L2	올림픽공원	P3	Q3	T3	L3	금속공단	P4	Q4	T4	L4
통과차량 대기차량 차량형태 도로길이																												
안산시청	P1	Q1	T1	L1																								
초직동	P2	Q2	T2	L2																								
올림픽공원	P3	Q3	T3	L3																								
금속공단	P4	Q4	T4	L4																								
4	정지차량수의 유무 확인차량이 길어지는 경우 신호 변경	1. 각 방향별 중요도 설정 고유값 설정 고유값 영역 확인 2. 샘플의 평가치 계산 ① 첫주기에서 표본값 10초 샘플치 계산 ② 표본값 10초를 10개취합 표본값 나열, 총 100초 취합 ③ 퍼지 추론룰을 통한가치 계산방향별 ④ 합성중심법에 의한 종합평가치 계산 3. 중요도와 평가치를 퍼지측도로 종합 평가함수 $U = \sqrt{[h(x) \wedge g(H)]}$	◆ 방향 언어영역 룩업테이블 배열 작성 M p1~ Mp4[5], Mq1~Mq4[5], M t1~Mt4[5], Ml1~Ml4[5] ◆ 방향별 매트릭스 설정 W1(안산시청)[16], W2(금속공단)[16] W3(올림픽공원)[16], W4(초직동)[16] 1. $A[16]W[4] = 4W[4] = \lambda_{max}W[4]$ 2. 표본 평가치 배열 결정 ③ $hx(p1) \sim hx(p4)[10]$, $hx(q5) \sim hx(q8)[10]$, $hx(t9) \sim hx(t12)[10]$, $hx(L13) \sim hx(L16)[10]$ ④ 종합평가치 $h(x1) \sim hx(16)$ 3. max : maximum() min : minimum() $X[10] = \max[h(x) \min(h)]$																									
5	주기 길이 변경	종합 평가치 나열																										
6	정지차량길이 참고 신호 변경	차량당 지체 시간 계산	정지차선의 차량수 $Q_R = Q_G + \sum_{k=1}^n q_k$ 정지차선의 차량의 지체시간 $D_{R-R} = \sum_{r=1}^m (Q_G + \sum_{k=1}^i q_k)$																									

표 3. 교통평가기준 및 평가요소의 중요도 예시
Table 3. Example of Traffic assessment basis and weight of assessment element

	통과 차량수	지체 차량수	중대형 차량비	도로길이	중요도
통과차량수	1	1/3	1/3	1/2	0.106
지체차량수	3	1	3	2	0.450
중대형차량비	3	1/3	1/3	2	0.259
도로길이	2	1/2	1/2	1	0.185
$\lambda_{max}=4.198$					CR=0.073

의해 도출된다.

교통혼잡을 정량화하는 것은 교통요소를 종합 평가하는 함수를 설정하는 것이며, 교통 요소 등의 종합평가에 있어서, 함수는 각각의 속성평가와 각 속성간의 중요도에 의해서 구성되는데 표현식은 다음과 같다.

$$U = f(w_j, h(x_j)) \quad (9)$$

여기서, w_j 는 각각의 평가 지표의 중요도이고 $h(x_j)$ 는 각 평가지표의 평가함수, f 는 종합화의 함수, U 는 종합평가를 나타내며, 각 평가지표의 평가치는 퍼지추론에 의해서 구하고, 중요도와 평가치에 대한 종합화는 퍼지적분을 이용한다. 이를 수행하기 위해, 본 연구에서는 주관적 평가를 퍼지이론에 있어서의 귀속도 함수(membership function)로 정한다. 이것은 정량화수법에 퍼지적분을 이용하는 것으로 평가치가 $[0, 1]$ 로 표시되며, 표준화할 필요가 없다고 하는 편리성 때문이다. 각 평가요소의 평가치는 $s_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ij})$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서 s_{ij} 는 평가지표 i 의 j 번째에 대한 평가치 $s_i = S_j(x_{ij})$ 이다. 따라서, 본 연구에서는 제안된 알고리즘의 평가지표별 평가치를 얻기 위하여 퍼지추론을 하였으며, 퍼지 추론은 Mamdani의 max-min 법으로 합성한 후, 무게 중심 법(center of gravity)으로 비퍼지화 하였다.

이를 위하여 아래의 10개 퍼지 규칙을 이용한다.

규칙 1: 만약 상당히 많은 교통 표본에 대해서 평가치가 높으면, 평가지표의 종합 평가치는 상당히 높다.

규칙 2: 만약 절반의 교통 표본에 대해서 평가치가 1이고, 나머지의 평가치가 높으면, 평가지표의 종합 평가치는 상당히 높다.

규칙 3: 만약 많은 교통 표본의 평가치가 높으면, 평가지표의 종합 평가치는 높다.

규칙 4: 만약 절반의 교통 표본에 대해 평가치가 상당히 높고, 나머지의 평가치가 상당히 높지 않다면 평가자료의 종합 평가치는 높다.

규칙 5: 만약 절반의 교통 표본에 대해 평가치가

높고 나머지의 평가치가 높지 않다면, 평가자료의 종합 평가치는 약간 높다.

규칙 6: 만약 절반의 교통 표본에 대해 평가치가 낮고, 나머지의 평가치가 낮지 않다면, 평가자료의 종합 평가치는 약간 낮다.

규칙 7: 만약 많은 교통 표본에 대해 평가치가 낮으면, 평가지표의 종합 평가치는 낮다.

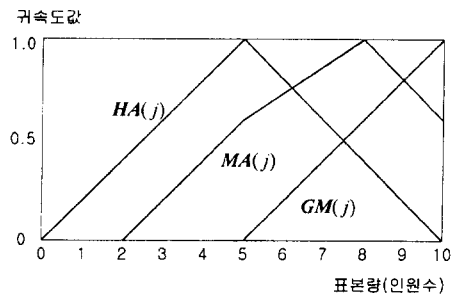
규칙 8: 만약 상당히 많은 교통 표본에 대해 평가치가 낮으면, 평가지표의 종합 평가치는 상당히 낮다.

규칙 9: 만약 절반의 교통 표본에 대해 평가치가 상당히 낮고, 나머지의 평가치가 상당히 낮지 않으면 평가지표의 종합 평가치는 낮다.

규칙 10: 만약 절반의 교통 표본에 대해 평가치가 0이고, 나머지의 평가치가 0이 아니면, 평가지표의 종합 평가치는 상당히 낮다.

이와 같은 규칙을 적용함으로써 평가지표별 평가치를 퍼지 추론에 의하여 구한다.

위의 그림 4와 그림 5로부터 각 규칙에 대해 퍼지화 및 퍼지추론 할 수 있다. 규칙1의 경우, 입력 변수는 '표본이 상당히 많다'와 '평가치가 높다'가 되



$GM(j)$: 매우 많은 교통 표본

$MA(j)$: 많은 교통 표본

$HA(j)$: 절반의 교통 표본

그림 4. 교통 표본수의 소속함수

Fig. 4. Membership function of traffic sample number

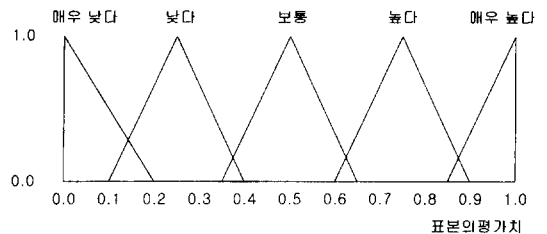


그림 5. 평가치의 소속함수

Fig. 5. Membership function of assessment value

며, 출력 변수는 '평가지표의 종합평가치는 상당히 높다'이다. 따라서, 첫 번째 입력변수는 그림 4로부터 $GM(j) = 1/10 + 0.8/9 + 0.6/8 + 0.4/7 + 0.2/6 + 0/5 + 0/4 + 0/3 + 0/2 + 1/0$ 으로 표현할 수 있고, 두 번째 입력 변수는 그림 5로부터 표본수 10개의 평가치 $s = \{0.82, 0.76, 0.74, 0.70, 0.67, 0.61, 0.58, 0.53, 0.48, 0.45\}$ 일 때, $H(s_j) = 0/0.45 + 0/0.48 + 0/0.53 + 0/0.58 + 0.07/0.61 + 0.47/0.67 + 0.72/0.70 + 0.93/0.74 + 0.93/0.76 + 0.53/0.82$ 로 표현할 수 있으며, 출력 변수는 그림 5로부터 1/1.0이 된다. 이와 같이 나머지 규칙들도 같은 방식으로 적용한 다음, 전체 규칙에 대해 max-min 법으로 합성한 후, 무게 중심 법으로 비퍼지화하여, 평가지표별 평가치가 추론된다.

퍼지 개념에 있어 요소에 대한 귀속도는 귀속도/요소로 나타낸다. 즉 퍼지 개념

$$A = \{(\mu_A(u), u) : u \in U\}$$

$$= \mu_A(u_1)/u_1 + \mu_A(u_2)/u_2 + \dots + \mu_A(u_n)/u_n$$

$$= \sum_{i=1}^n \mu_A(u_i)/u_i, \quad u_i \in U \quad (10)$$

으로 표기된다. U 가 연속일 경우 위 식은 $A = \int \mu_A(u)/u$ 로 적분기호를 사용하여 표기한다. 여기서 기호 $+$, \int , \sum 는 가산이 아니고, 조합(union or composition)을 나타낸다. 그래서 본 연구에서는 교차로 교통요소의 정량화 수법으로서 일반적으로 이용하고 있는 퍼지 측도와 퍼지적분의 두가지 방법을 이용하여 평가하였으며, 퍼지측도는 다음과 같다.

$E \subseteq E'$ 이면 $g(E) \leq g(E')$ 대신에 E 와 E' 가 공통점을 갖지 않는, 즉 $E \cap E' = \emptyset$ 일 때

$$g(E \cap E') = g_A(E) + g_A(E') + \lambda g_A(E)g_A(E') \quad (-1 < \lambda < 1) \quad (11)$$

을 만족하는 g 를 g_λ 라고 쓴다. 즉, 퍼지 분포함수 상에서 정의되고 다음의 성질을 갖는 함수를 퍼지 분포함수라고 한다.

- i) $0 \leq H(x) \leq 1, x \in R^1$
- ii) $x \leq y$ 이면 $H(x) \leq H(y)$
- iii) $\lim_{x \rightarrow a+0} H(x) = H(a)$
- iv) $\lim_{x \rightarrow \infty} H(x) = 0, \lim_{x \rightarrow 0} H(x) = 1$

퍼지 분포함수를 이용한 g_λ 를 구성해 보자. X 상의 함수 $h(x)$ 가 $h(x_1) \geq h(x_2) \geq \dots \geq h(x_n)$ 로 되어 있다고 하면 여기서 퍼지 분포함수 $H(x)$ 를 $H(x_1) \geq H(x_2) \geq \dots \geq H(x_n) = 1$ 로 한다.

$g_\lambda(X_i) = H(x_i), X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 로 정하고

$$g_{\lambda 1} = H(x_i)$$

$$g_{\lambda i} = \frac{H(x_i) - H(x_{i-1})}{1 + \lambda H(x_{i-1})}, 2 \leq i \leq n \quad (12)$$

을 정의한다. 즉,

$$H(x_i) = g_{\lambda i}$$

$$H(x_i) = g_{\lambda 1} + g_\lambda(H_{i-1}) + \lambda_{\lambda i}(H_{i-1}), i = 2, 3, \dots, n$$

$$H(x_n) = 1 \quad (13)$$

여기서 $g_{\lambda i}$ 는 퍼지밀도이며, 지표 x_i 를 중요시하는 비율을 나타내는 평가척도이고, $H(x_i)$ 는 퍼지 측도로 $g(H_i)$ 라고도 쓰며, λ 를 파라미터로 하여 H_i 를 중요시하는 비율을 나타내는 평가척도가 된다.

단, $H_1 = \{x_1\}, H_2 = \{x_1, x_2\}, \dots, H_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} = X$ 이다

한편, 퍼지 측도에 의한 퍼지적분은 다음과 같이 정의한다.

퍼지집합의 부분 집합 상에서 정의된 함수 $h : E \rightarrow [0, 1]$ 일 때

$$f_{x \in E} h(x) \circ g = \bigcup_{H \subseteq E} [h(x) \wedge g(H)] \quad (14)$$

를 E 상의 퍼지 적분이라 한다.

이 적분은 $f_E h(x) \circ g$ 또는 $f_E h(x) \circ g(x)$ 으로 나타낸다.

특히 $E = X$ 일 때는 $f \circ g$ 라 한다

여기서 \circ 는 퍼지집합론에서 사용되는 조합(composition)의 기호이다. 따라서 함수 $h : x \rightarrow [0, 1]$ 의 퍼지측도 g 에 의한 $H(\exists x)$ 값이

$$f_E h(x) \circ g = \bigcup [h(x) \wedge g(H)] = \bigvee [h(x_i) \wedge H(x_i)] \quad (15)$$

다만 여기서 집합 X 는 n 지표를 갖는 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 으로 되는 유한집합으로 각 요소의 평가함수 $h(x_i)$ 의 순서를 $h(x_1) \geq h(x_2) \geq \dots \geq h(x_n)$ 으로 배열시키는 것으로 한다.

이와 같이, 본 논문에서, 제안된 알고리즘은 계층화 분석 및 퍼지추론을 이용하여, 최적화된 교통 주기를 결정하는 것이며, 다시 말해, 평가지표별 중요도 및 평가치를 퍼지 측도에 의한 퍼지 적분을 이용하여 최종 주기결정을 하는 것이다.

4. 제안된 알고리즘의 성능 평가

4.1 안산시청교차로의 AHP적용

안산시청 교차로를 중심으로 한 지역의 지도는 그

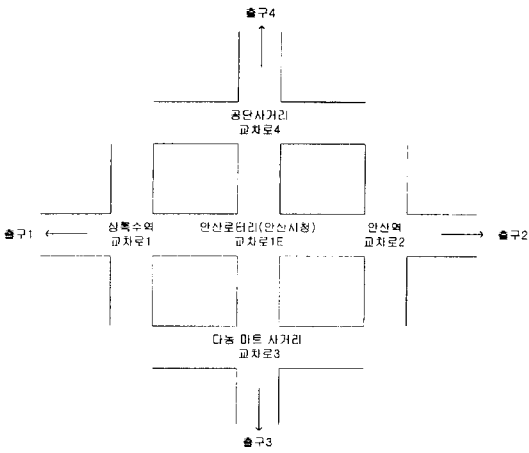


그림 6. 안산시청 교차로 주변 지역
Fig. 6. Peripheral region of Ansan City Hall intersection

림 6과 같으며, 계층 분석 알고리즘의 적용은 안산 시청 주변 교차로를 중심으로 적용하였다. 여기서, 출구1은 한양대역 방향, 출구2는 안산역 방향, 출구3은

초직동 방향, 출구4는 금속 공단 방향임을 나타내고 있다. 그리고, 이중 중요교차로인 안산 시청 로터리의 교통상황은 안산공과 대학생 10여명을 통해 안산시청 주변 교차로의 교통흐름을 10초 상황별로 파악하였으며, 교통조사는 100여명을 대상으로한평가 지표 설정 조사와 10여명을 대상으로한평가 지표별 중요도 조사로 구분하여 실시하였다.

표 4는 행렬 원소수치의 룩업테이블(look-up table)로 사용되며, 매 20초마다 차량수와 도로의 형태의 수치가 얻어지게 된다. 표 4에서 A1의 가중평균치는 0.52이며 퍼지규칙적인 평가치는 0.61이다.

4.2 안산시청 교차로 성능 평가

이와같은 방법으로 1개 구간에 대한 평가결과를 주기별로 살펴보면 표 5와 같다. 매 10초마다 선형 평가치의 결과를 2개의 평균값으로 나타내었는데, 선형 평가치의 평균치가 가장 높고, 퍼지 추론치 값이 중간 값을 나타내고 있다. 이는 각 주기값이 같은 차량 대수당 낮은 시간을 표시하므로 같은 시간에 많은 차량 수를 보내 주는 것을 보여주고 있다. 즉, 통과차량 1

표 4. satty의 9점 척도 수치 적용표
Table 4. Application table of numerical value of satty's nine point scale

주기순서	satty 점수											
	안산시청-초직동			금속공단-한양대역			안산시청-금속공단			초직동-한양대역		
	통과차량	대기차량	차량형태	통과차량	대기차량	차량형태	통과차량	대기차량	차량형태	통과차량	대기차량	차량형태
A1	2	1	2	3	5	7	22	1	2	9	3	3
A2	1	1	3	2	3	5	4	1	5	7	3	3
A3	2	1	4	3	2	2	6	2	3	6	2	5
A5	1	1	2	5	7	5	7	3	2	5	5	7
A6	2	1	3	3	5	7	3	2	1	9	3	2
A7	1	1	1	7	3	5	2	1	4	3	3	4
A8	2	1	2	2	7	3	3	2	3	52		6
A9	1	1	5	7	3	9	2	3	2	3	2	3
A10	1	1	3	1	2	3	2	2	1	7	5	8
A11	2	1	2	5	1	5	1	1	3	8	7	4
A12	1	1	1	3	1	7	4	3	2	5	5	6
A13	1	1	3	9	2	3	3	1	1	7	3	4
A14	1	1	2	3	1	7	2	2	3	5	5	7
A15	2	1	1	5	2	5	2	1	5	9	7	3
A16	2	1	5	7	2	2	1	3	2	5	5	6
A17	2	1	2	5	1	6	2	2	3	7	3	4
A18	1	1	3	3	5	5	1	1	3	8	7	8
A19	1	1	2	6	2	3	4	3	2	5	4	4
A20	2	1	5	3	1	5	2	2	1	7	7	3

표 5. 교통주기별 중요도 계산 결과
Table 5. Result of traffic parameter weight calculation of each cycle time

주기번호	신형평가치		퍼지적분평가치
	가중평균치	퍼지추론치	
A1	0.52	0.61	0.55
A2	0.56	0.55	0.55
A3	0.59	0.60	0.61
A4	0.69	0.70	0.68
A5	0.61	0.61	0.59
A6	0.62	0.62	0.62
A7	0.59	0.70	0.71
A8	0.55	0.57	0.51
A9	0.48	0.59	0.60
A10	0.65	0.47	0.44
A11	0.54	0.67	0.64
A12	0.47	0.56	0.59
A13	0.58	0.56	0.53
A14	0.51	0.49	0.53
A15	0.54	0.58	0.55
A16	0.65	0.52	0.53
A17	0.55	0.54	0.53
A18	0.46	0.68	0.61
A19	0.58	0.52	0.42
A20	0.65	0.62	0.52

대당 해당시간이 짧음을 보여주고 있다.

주기별 번호 A1~A20은 각 4가지 번호별로 새로운 주기의 회귀를 나타내어 4주기가 1사이클이 반복되는 시간을 나타내고 있다. 평가 지표치 $h(x_i)$ 가 계산이 되어지면 나열된 지표치를 평균치, 퍼지 추론치, 퍼지 적분 평가치로 중요도를 계산하여 4가지 현시 단위별로 중요도를 계산하게 된다. 여기서, 주기별 중요도가 높은 값을 선정하여 이전 주기값에 대한 비율로서 현재 현시의 주기 시간값을 산출하며, 그리고, 평균치, 퍼지추론치보다 퍼지 적분 평가치의 중요도 값이 대체로 10~20% 이내의 높음을 보여주고 있는데, 그것은 차량수가 많은 것에 긴 주기를 배정하고, 차량수가 적을 경우 상대적 중요도가 적은 수치를 배정하고 있음을 나타내고 있으며, 이 값을 통해 전 주기의 주기 시간을 늘려주게 된다. 한편, 결과치의 수치가 작음이 좋은 효과를 나타내는데 이는 고정시간 주기를 기준 했을 때보다 통과 차량대비 주기 시간이

짧으므로 허용 통과 차량수가 많음을 보여주고 있다.

4.3 최종 성능 평가

본 연구는 제안된 알고리즘에서, 계층화 분석 및 퍼지 추론을 적용하여, 퍼지적분으로 최적화한 AHP제어기를 교통 연구에 새로이 도입한 것으로, 기존의 순수한 퍼지방식의 퍼지 제어기, 고정 주기 제어기와 구별이 된다. 결국, 이들 3가지 제어기는 서로 각각 다른 특징을 갖는 제어기로서, 서로 비교가 가능하며, 중요한 가치를 갖고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 교통 신호제어에 대한 연구 효과를 각 제어기들에 대한 성능 평가로 나타내었다. 우선, 평가에 앞서 그림 4의 일반적인 교차로 교통 현황은 다음과 같다(참고로, 그림 7부터 그림 12까지 표현된 약자는, 예를 들면, 교4N : 교차로 4의 북쪽을, Exit는 출구를, 교 3E : 교차로 3의 동쪽을, 임N : 안산로타리 교차로 북쪽을 나타낸다).

교차로당 앞막힘 현상의 차량 지체량을 합하여서 보면 임계 교차로의 각 방향별 지체 시간이 가장 높아서 외부 교차로의 출구별 지체시간이 낮더라도 임계 교차로(안산 교차로)의 정체시간이 높아져서 출구별

Name of access road

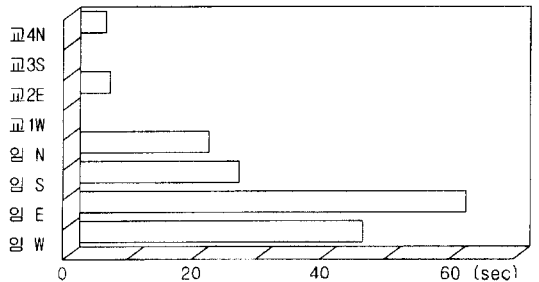


그림 7. 각 링크별 전체 정체시간
Fig. 7. Overall spill back time at each link

[Vehicle / hour]

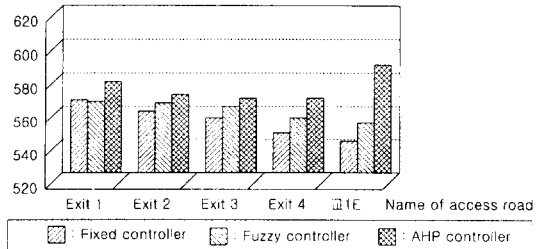


그림 8. 교차로별 직진 통과차량수 비교(시간당)
Fig. 8. Comparison of number of straight passing vehicle with respect to intersection

차량수가 낮아지게 된다. 이를 그림 7에 나타내었는데 각 방향별 병목시간이 임계교차로에서 집중하여 임계교차로의 정체시간이 전체 5개 교차로 중 약 90% 이상을 차지함을 알 수 있어 임계교차로 즉, 중앙교차로의 정체시간을 줄이는 것이 우선임을 보여준다.

5개 교차로가 1개조이므로 중앙교차로에 이웃한 4개의 교차로 중 한 방향의 진입로만을 출구로 삼을 경우 4개의 출구가 생겨 교차로 1의 서쪽 출구와 교차로 2의 동쪽 출구, 교차로 3의 남쪽 출구, 교차로 4의 북쪽 출구에서 차량의 정체현상이 계산되는데 중앙교차로에서 대부분의 많은 정체가 생겨 대부분의 차량정체시간이 집중하게 된다. 교차로의 시간당 통과 차량수는 1350[veh./hour]이고 정체시간은 임계 교차로에서 평균 45초이나 좌회전 차량의 정지시간이 작용하는 교차로4와 교차로2에서는 주기값 차이에서 생긴 10초가량의 정체 시간이 생겼다. 중앙교차로의 주기시간 길이가 5개의 교차로중 가장 정체 시간의 대부분을 차지하여 다른 4개 교차로는 차량의 출구 역할만 하게되어 중앙 교차로의 주기길이에 맞는 이웃 교차로 교통요소 중요도가 가장 높다.

임계교차로의 출구별 차량수의 차이가 가장 커서 AHP의 제어기가 임계교차로에서 더욱 효과적임을 그림8에 보여주고 있다. 시간별 통과 차량의 평균수가 중앙 교차로의 주기길이 우선으로 배정되어 있으므로 중앙 교차로 AHP제어기의 차량수가 가장 높고 이웃 교차로의 직진통과 차량시에는 기존 고정주기 제어기와 퍼지 제어기의 비중이 상대적으로 높음을 나타내고 있다.

진입로의 길이를 일정하게 하여 차량의 길이를 차량의 형태별로 도로의 점유상태를 계산하였을 경우 임계교차로의 점유 길이가 가장 높아 진입로의 길이가 길더라도 주기의 길이가 짧아져서 임계교차로의 길이가 AHP제어에서 줄어들음을 그림 9에 보여주고 있다. 1주기당 차량수의 점유길이는 AHP제어기에서

통과차량수와 반비례하여 고정제어기와는 5대 차이이고 퍼지제어기는 평균 7대 차이로 약 12%가량 차이가 났다.

5. 결 론

본 논문에서는 인간적인 사고방식으로 여러 가지 교통상황을 종합 판단하여 차량의 통행주기를 결정하고 가장 적합한 교통흐름을 유도하는 방법을 연구하였다. 이를 위하여 종합적인 교통환경 평가를 고려하여 기존의 가법적인 종합평가에 대해 새로운 방법을 검토하였고 교차로 구역 교통요소를 고려하여 교통을 원활히 하는데 필요한 교통요소 정량화 기법으로서 계층분석법(AHP)이라는 개념을 적용하였다. 이를 이용하여 교차로의신호주기를 결정하였으며, 실제로 안산 시청 교차로에 적용하여 교통흐름의 제어에 있어 유용성을 가짐을 확인하였다. 본 논문에서는 기존의 교통량을 검지 운용하는 방법들을 설명하고 이의 문제점을 해결하기 위하여 계층분석방법을 단계별로 확인하고 이를 통해 불확실한 교통량의 개념을 교차로의 교통신호제어에 적용할 수 있는 타당성을 논의하였다. 그리고 계층분석법 내에 퍼지 추도의 개념을 도입하고, 교통량제어에 응용할 수 있는 교통 신호주기 할당 알고리즘을 제안하였다. 즉, 제안된 알고리즘은 기존의 퍼지제어기가 순수한 퍼지방식만을 이용한 제어기인데 반해, AHP제어기는 계층화 분석 기법 및 퍼지추론을 거쳐, 퍼지적분을 사용하여 최종 평가된 제어기를 나타내고 있다.

본 논문의 중요한 연구 결과는 다음과 같다.

1. 기존제어기(고정제어기 및 퍼지제어기)와 AHP제어기를 차량통과 측면에서 비교결과, AHP제어기가 전체적으로 더 좋은 시뮬레이션 결과를 가져왔다.
2. 교통 용량 지표면에서 기존제어기와 AHP제어기를 비교결과 앞막힘 예방에 AHP제어기가 우수함을 알 수 있었다. 즉, 점유율과 지체길이 개선에서 더 좋은 결과를보여주었다.
3. AHP제어기는 기존제어기에 비하여 방향별 주기 중요도 값을 주기 결정치로 환산할 수 있고, 교통이용자들의 주관을 직접 주기 결정에 투영할 수 있으며 다수의 교통 파라미터를 동시에 처리 할 수 있다.
4. AHP제어기는 교통소통에 관련이 없는 파라미터를 선택하여 소거할 수 있으며 교통주기의 변화를 차량의 운행상태로 확인할 수 있다.
5. 결론적으로 AHP제어기는 교차로 운영상에서 기존제어기보다 10~20% 향상된 차량의 지체 시간 감소를 보여 주었다.

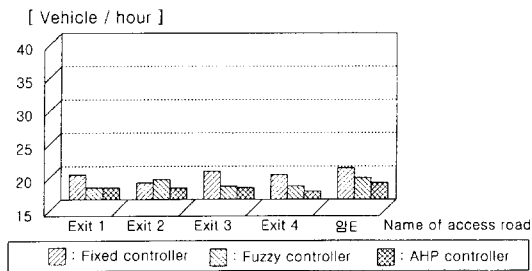


그림 9. 직진통과 차량시 교차로별 점유차량수
 Fig. 9. Occupied vehicle number at each intersection when straight passing condition

이와같이 본 연구에서는 교통신호제어를 위하여 기존의 제어방식인 고정제어기 및 퍼지제어기의 단점을 극복할 수 있는 제어방식으로서 교차로 환경 평가 파라미터인 도로길이, 중대형 차량비, 통과차량수, 지체 차량수 등을 정량적인 값들로 환산할 수 있는 AHP제어기를 제안하였다.

앞으로 본 연구의 결과를 토대로 하여 도로시설과 공사 구간 등의 교통시설 파라미터들도 고려한 AHP 제어기의 확장연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

[1] 이승환, “우리나라의 전자교통신호시스템 개선방향”, *한불산업정보*, 제8권 2호, pp. 3-7, 1990.

[2] 이현재, “1, 2, 3차년 용역결과를 중심으로한 신호시스템 효율성 평가와 향후대책”, *경찰청*, 1994.

[3] Grazis, D. C. “Traffic control : from hand signal to computers,” *Proc. IEEE*, Vol. 59, pp. 1090-1099, 1971.

[4] K. G. Courage and S. M. Parapar, “Delay and Fuel consumption at Traffic Signal,” *Traffic Engineering*, Vol. 45, pp. 23-27, Nov. 1975.

[5] P. Greenberg, A. Trabelsi and D. Tabak, “Distributed Microcomputer-based control of Multiple Signalized Traffic Intersections,” *IFAC Control in Transportation system*, pp. 135-140, 1983.

[6] A. G. Sims, K. W. Dobinson, “The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System-Philosophy and Benefits,” *IEEE Trans. on Veh. Tec.* No. 2, pp. 130-137, May 1980.

[7] C. P. Pappis, E. H. Mamdani, “A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, Vol. 7(10), pp. 707-717, 1977.

[8] R. Kelsey, K. Bisset, and M. Jamshidi, “A simulation Environment for Fuzzy Control of Traffic Systems,” 12th. World Congress IFAC, Sydney, Australia, Vol. 5, pp. 553-556, 1993.

[9] 진현수, 김재필, 김종원, 홍완희, 김성환, “퍼지 동적 알고리즘을 이용한 교차로 교통 신호등 제어의 최적 주기 결정,” *대한전자공학회논문집*, 제30권, 제60호, pp. 100-108, 1991.

[10] D. R. Drew, “Traffic Flow Theory and Control,”

Mcgraw-Hill Co., 1968.

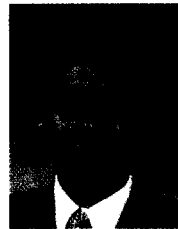
[11] Saaty, R. W., “The Analytic Hierarchy Process-what it is and how it is used,” *Mathematical Modeling*, pp. 161-176, 1987 9.

[12] 문정희, 이희철, “주민의식에 기초한 주거환경 평가 수법에 관한 연구,” *대한국토도시계획 학회지*, 제32권, 제4호, pp. 91-107, 1997.

[13] H. J. Zimmermann and P. Zysno, “Decision and evaluation by hierarchical aggregation of information,” *Fuzzy Sets and Systems* Vol. 10, pp. 31-36, 1983.

진 현 수 (Hyun-Su Jin)

제 8권 제2호 참조



이 상 훈 (Sang-Hoon Lee)

1987년 : 광운대학교 전자공학과 졸업
 1990년 8월 : 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업
 1995년 3월~현재 : 서울시립대학교 대학원 전자공학과 재학중
 관심분야 : 제어 및 신호 처리, 인공지능



송 준 호 (Jun-Ho Song)

1982년~현재 : 서울시립대학교 수학과 교수

김 성 환 (Sung-Hwan Kim)

제 8권 제 2호 참조