

## 지능제어기법을 이용한 신호등 주기 최적화

김근범 · 김경근 · 장욱 · 박광성 · 박진배

연세대학교 전기공학과

### Optimization of Traffic Signals Using Intelligent Control Methods

Keun Bum Kim · Kyung Keun Kim · Wook Chang · Kwang Sung Park · Jin Bae Park

Department of Electrical Engineering, Yonsei University

**Abstract** - The traffic congestion caused by the exploding increase of vehicles became one of the severest social problems. Among the various approaches to solve this problem, controlling the length of traffic signals appropriately according to the individual traffic situation would be the most plausible and cost-effective method. To design a traffic signal controller which has such a property as adaptive decision-making process, we adopt fuzzy logic control method(fuzzy traffic signal controller). Moreover, using genetic algorithms we obtain an optimized fuzzy traffic signal controller (GA-fuzzy traffic signal controller). To evaluate and validate the proposed fuzzy and GA-fuzzy traffic signal controller, simulation results are presented.

#### 1. 서 론

도로 용량을 초과하는 자동차 대수의 급격한 증가로 인해 교통 체증 문제가 심각한 경제적 손실을 야기하고 있고 이미 여러 선진국들에서 이의 해결을 위한 다양한 방면의 연구들이 진행되고 있다[1]. 그러나 교통 상황 자체가 모델링이 어려운 복잡한 비선형 시스템중 하나이므로 기존의 선형화에 기반한 시스템 이론들을 적용하여 문제를 해결하는 데에는 한계가 있다. 그러한 문제에 대한 해결책으로서 인간의 의사 결정 방식을 모방한 퍼지 논리에 기반을 둔 퍼지 제어 시스템[2]이 제시되었고 많은 분야에서 성공적인 결과를 보이고 있다[3].

퍼지 논리를 이용해 교차로에서의 신호주기를 결정하려는 연구들[4,5]이 있긴 하였으나, 교차로의 모델이 지극히 간단하거나 교차로 사이의 연동을 고려하지 않은 단일 교차로만을 대상으로 하여 실제 적용 가능성은 크지 않았다. 더욱이 그러한 퍼지 제어를 설계하는 과정이 직관과 경험에 의존할 수밖에 없었

기 때문에 각 교통 상황에 맞는 최적의 제어를 얻지는 못했다.

본 논문에서는 제어를 위한 교차로 모델을 설정하고 그 모델에 대해 각 방향에서의 차량수에 따라 신호의 주기를 가변적으로 조절할 수 있는 퍼지 교통 신호 제어를 설계한 후 최적화 기법의 하나인 유전 알고리즘을 통해 설계된 제어를 최적화한다. 모의 실험을 통해 제안된 최적 퍼지 교통 신호 제어기(GA-퍼지 제어기)가 다른 신호 제어 방식에 비해 우수한 성능을 지님을 보인다.

#### 2. 교차로 모델

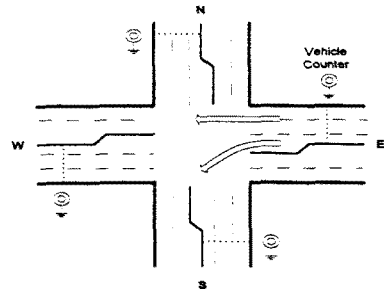


그림 1. 설정된 교차로 모델

본 논문에서 제어를 위해 설정한 교차로망을 구성하는 단일 교차로에 대한 모델은 그림 1과 같고 다음과 같은 가정들을 세운다.

- (1) 직진 차선과 좌회전 차선으로 구성된 4지 교차로
- (2) 좌회전 신호, 직진 신호, 정지 신호로 구성
- (3) 신호의 순서는 좌회전, 직진, 정지를 반복
- (4) 각 차선의 적정 위치에 정확한 차량계수기가 있고 이를 통해 차량 정보를 얻는다.

하나의 교차로에 대해,  $k$ 번째 단계에서  $i$ 번째 진입로에 존재하는 전체 차량수  $C_i(k)$ 는 식 (1)과 같다.

$$C_i(k) = C_i(k-1) + a_i(k-1) - e_i(k-1) \cdot s_i(k-1) \cdot f_i(k-1) \quad (1)$$

식 (1)에서  $a_i(k)$ ,  $e_i(k)$ ,  $s_i(k)$ 는 각각  $k$ 번째 단계에 대해  $i$ 번째 진입로에 차량이 도착할 경우, 차량이 존재할 경우, 통과 신호일 경우에 1의 값을 갖고 그 외의 경우에는 0값을 갖는 것으로 정의한다. 또한  $f_i(k)$ 는 통과 신호시 차량의 소통율이다. 식 (1)을 이용하면  $k$ 번째 단계에 대해 교차로 내의 모든 방향에 존재하는 전체 차량수는 식 (2)와 같다.

$$C_{TOTAL}(k) = C_{GREEN}(k) + C_{RED}(k) = \sum_{i=1}^n C_i(k) \quad (2)$$

식 (2)에서  $n$ 은 교차로 내의 가능한 진입경로의 수이다. 또한  $C_{GREEN}(k)$ ,  $C_{RED}(k)$ 는 각각 통과 신호를 받고 있는 방향과 정지 신호를 받고 있는 방향의 전체 차량수이고 식 (3)과 같이 표현된다.

$$C_{GREEN}(k) = \sum_{i=1}^n C_i(k) \cdot s_i(k) \quad (3a)$$

$$C_{RED}(k) = \sum_{i=1}^n C_i(k) \cdot (1 - s_i(k)) \quad (3b)$$

한편,  $k$ 로 표시되는 각 단계의 시간 길이를  $T$ 라고 하면  $k$ 번째 단계에 교차로 내의 차량들이 겪는 전체 지연 시간  $D_{TOTAL}(k)$ 는 식 (4)와 같다.

$$D_{TOTAL}(k) = \sum_{i=1}^n D_i(k) = \sum_{i=1}^n C_i(k) \cdot T \quad (4)$$

식 (4)에서  $D_i(k)$ 는  $i$ 번째 진입로에 있는 차량들이 겪는 지연 시간이다. 식 (4)와  $a_i(k)$ 를 이용하면 각 phase에 대해, 즉 신호가 시작되어 끝나기 까지 교차로 내의 각 차량들이 겪는 평균 지연 시간은 식 (5)와 같다.

$$D_{AVERAGE} = \frac{\sum_{phase} D_{TOTAL}(k)}{\sum_{phase} \sum_{i=1}^n a_i(k)} \quad (5)$$

### 3. GA-퍼지 교통 신호 제어기

#### 3.1 간략화 퍼지 추론 시스템

버클리 대학의 Lotfi Zadeh 교수에 의해 처음으로 제안된 퍼지 논리는 여러 가지 응용 분야에서 성공적으로 적용되고 있다. 일반적인 퍼지 추론 시스템은 소속 함수를 이용한 입력의 퍼지화, 지식과 규칙에 기반한 추론, 추론값의 비퍼지화 부분으로 구성된다.

본 논문에서 교차로의 신호 제어를 위해 사용하는 퍼지 추론 방식은 Takagi와 Sugeno[6]에 의해 제시된 간략화 퍼지 추론법이다. 이는 출력 변수의 값이 비퍼지화 과정 없이 바로 사용되는 경우에 대한 퍼지 추론 방식이다. 간략화 퍼지 추론에 대한 규칙은 식 (6)

과 같다.

IF  $x_1$  is  $A_1, \dots$ , and  $x_n$  is  $A_n$ , THEN  $y$  is  $w$  (6)

식 (6)에서  $x_j$ 는  $j$ 번째 입력 변수,  $y$ 는 출력 변수,  $w$ 는 출력 변수의 값을 나타낸다. 또한  $A_j$ 는  $j$ 번째 입력 변수에 대한 소속 함수이다. 본 논문에서는 입력 변수에 대해 삼각형 소속 함수를 사용한다.

간략화 퍼지 추론법을 이용한 퍼지 제어기를 설계할 경우 각 규칙에 대해, 입력 변수들에 대한 그 규칙의 적합도 값을 구한 후 식 (7)과 같은 가중 평균 방식에 의해 최종적인 퍼지 제어기의 출력값을 결정한다.

$$y_{final} = \frac{\sum_{k=1}^c \mu_k w_k}{\sum_{k=1}^c \mu_k} \quad (7)$$

식 (7)에서  $y_{final}$ 은 최종적인 출력값,  $\mu_k$ 는  $k$ 번째 규칙에 대한 입력부의 적합도 값,  $w_k$ 는  $k$ 번째 규칙에 대한 출력값,  $c$ 는 규칙의 수를 나타낸다.

#### 3.2 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 적자 생존의 법칙에 의해 이루어지는 생물의 자연적인 진화 과정을 이용하여 문제에 대한 최적의 해를 구하는 방법이다. 특히 퍼지 제어 시스템에 유전 알고리즘을 적용하였을 경우 소속 함수와 규칙 및 규칙의 수를 최적화할 수 있음이 밝혀졌다[7,8].

유전 알고리즘을 이용하여 문제를 풀 경우 최적화하고자 하는 요소들을 하나의 스트링으로 표현한다. 또한 하나의 스트링에 대해 그 스트링이 풀고자 하는 문제에 대해 어느정도의 효용성을 지니고 있는가를 나타내는 적합도 값(fitness value)이 부여된다. 이러한 각각의 스트링이 모여 하나의 세대를 구성하고 이 세대에 대해 재생 연산, 교차 연산, 돌연변이 연산 등의 진화 연산을 적용한다. 재생 연산은 한 세대를 구성하는 여러 스트링 중에서 높은 적합도 값을 갖는 스트링을 선택하는 과정이다. 교차 연산은 선택된 스트링들에 대해 스트링의 일정 부분이 서로 교차되게 하는 과정(그림 2)이며, 돌연변이 연산은 각 스트링에 대해 임의의 수치 변화를 가하는 과정이다. 돌연변이 연산은 최적의 해를 탐색해 가는 과정에서 국부적인 최적 해로 수렴하는 것을 막기 위한 방법이다(그림 3).

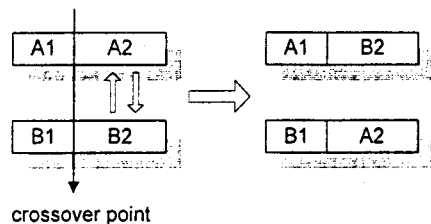


그림 2. 교차 연산 과정

#### 4. 모의 실험 및 결과 고찰

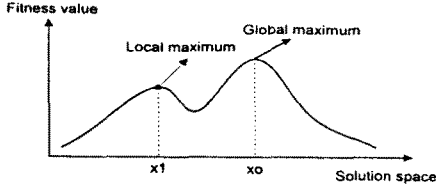


그림 3. 해의 조기 수렴

적합도 값이 일정 범위 내에 들어오거나 정해진 진화 횟수가 될 때까지 진화 연산을 반복하여 최적의 해를 얻는다.

본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 설계된 퍼지 제어기의 소속 함수에 대한 매개 변수와 규칙을 최적화 한다.

#### 3.3 GA-퍼지 교통 신호 제어기

3.1에서 설정된 교차로에 대해 통과 신호를 받고 있는 방향에서의 차량수와 정지 신호를 받고 있는 방향에서의 차량수를 입력 변수로 하고 각 두 입력 변수의 값에 따른 현재 신호의 연장값을 출력 변수의 값으로 할 경우, 이는 3.2절의 간략화 퍼지 추론 시스템이 된다. 설정된 입출력 변수와 퍼지 규칙을 이용해 교차로의 신호를 제어하는 과정은 다음과 같다.

- (1)  $C_{GREEN}(k)$ ,  $C_{RED}(k)$ 를 입력 받는다.
- (2) 입력 변수의 값과 퍼지 규칙을 이용하여 현 신호에 대한 연장 시간을 결정한다.
- (3) (a) 결정된 연장 시간이 일정값 이하이거나 각 신호길이에 대해 설정된 최대 시간에 이르면 신호를 바꾸고 다음 phase를 시작한다.  
(b) 결정된 연장 시간이 일정값 이상이면 이를 이용해 신호 길이를 연장한다.

또한 설계된 퍼지 교통 신호 제어기를 3.2의 유전 알고리즘을 이용하여 최적화한다. 유전 알고리즘을 이용한 최적해 탐색시 탐색의 중단 조건으로는 문제의 특성상 정해진 횟수만큼 세대를 진화시키는 것으로 한다.

유전 알고리즘을 통한 최적 퍼지 교통 신호 제어기(GA-퍼지 교통 신호 제어기)의 전체 구조는 그림 4와 같다. 그림 4에서 Actuator는 퍼지 제어기로부터의 출력값을 이용해 신호를 조절하는 조정기(regulator)이고 제어 대상 프로세스는 교차로의 신호등이다.

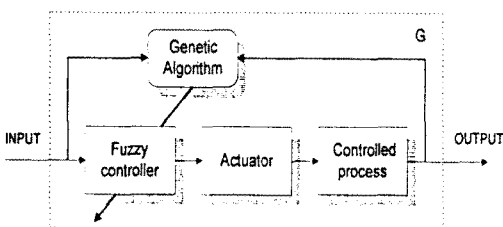


그림 4. GA-퍼지 교통 신호 제어기

3.1에서 설정된 단일 교차로가 두 개 연결된 교차로 망에 대해 모의 실험을 수행하였다. 비교를 위해 동일한 교차로 환경 하에 고정 주기 신호 제어기, 퍼지 제어기, 최적 퍼지 제어기(GA-퍼지 제어기)를 이용하여 신호의 길이를 제어하였다. 교차로 각 방향으로부터의 차량 유입율은 일정하게 하였고 실험 시간은 15분으로 하였다. 고정 주기 신호 제어의 경우 모든 신호의 길이를 30초로 고정하였고, 퍼지 제어의 경우에는 신호의 길이를 각 방향의 교통량에 따라 10초와 30초 사이에서 가변적으로 조절할 수 있게 하였다. 퍼지 제어기의 퍼지 규칙은 직관에 의해 임의로 설정하였다. 또한 입력 변수는 삼각형 소속 함수와 5개의 퍼지 분할을 갖는다. 유전 알고리즘을 이용하여 최적 퍼지 제어기를 구하는 과정에서는 세대수를 100으로 하였고 각 세대당 개체수는 50으로 하였다. 교차 확률은 90%, 돌연변이 확률은 10%로 설정하였다. 돌연변이 방법은 일정 범위 내의 임의의 값을 더하거나 빼는 것으로 하였다. 모든 경우에 대해 비교의 기준은 차량당 평균 지체 시간과 두 개의 교차로를 통과할 경우에 필요한 평균 소비 시간으로 선정하였다.

각 제어기를 이용하여 교차로의 신호를 조절하였을 경우에 대한 차량당 평균 대기 시간은 표 1과 같다. 결과를 통해 현재의 일반적인 신호 제어 방식인 고정 주기 신호 제어 방식에 비해 퍼지 제어기가 훨씬 효율적인 제어를 수행함을 알 수 있고 유전 알고리즘을 통해 이를 최적화 하였을 경우 더욱 우수한 성능의 제어기를 얻어냄을 확인할 수 있다.

표 1. 각 신호 제어 방식에 대한 차량당 평균 대기 시간

Controller	Average Delay (secs/veh)	Improvement (%)
Fixed length control	46.3	—
Fuzzy control	14.4	69
GA-fuzzy control	12.7	72.6

또한 두 개의 교차로를 통과하는 경우에 대한 평균 소비 시간은 표 2와 같다. 표 2의 결과를 통해 교차로 사이의 연동성이 고려되어야 하는 상황에서도 GA-퍼지 제어기가 가장 우수한 성능을 지님을 알 수 있다.

최적화 된 퍼지 제어 규칙과 입력 변수의 소속 함수 형태는 각각 표 3, 그림 5와 같다. 표 3과 그림 5의 퍼지 규칙 및 소속 함수가 직관적인 이해는 힘들지만 실제로는 최적의 해가 된다는 점에서 직관적인 설계만으로는 한계를 지니는 퍼지 제어기에 대한 유전 알고리즘의 자동 최적화 기능의 타당성을 확인할

표 2. 두 개의 교차로를 통과할 경우의 평균 소비 시간

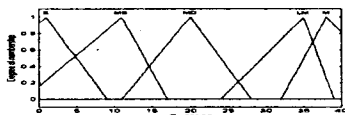
Controller	Average Traverse Delay (secs/veh)	Improvement (%)
Fixed length control	110.6	—
Fuzzy control	48.7	56
GA-fuzzy control	42.5	61.6

수 있다. 또한 유전 알고리즘을 통한 최적해의 탐색 과정에서의 각 세대당 최소 평균 대기시간은 그림 6과 같다.

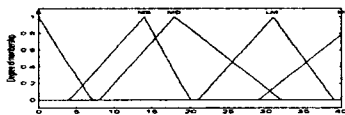
표 3. 최적화된 퍼지 규칙

S: small, MS: more than small,  
MD: medium, LM: less than many,  
M: many

		Cred				
		S	MS	MD	LM	M
Cgreen	S	2 초	1 초	1 초	0 초	0 초
	MS	9 초	3 초	0 초	1 초	0 초
	MD	4 초	3 초	1 초	0 초	0 초
	LM	8 초	5 초	4 초	1 초	0 초
	M	7 초	2 초	3 초	1 초	1 초



(a)



(b)

그림 5. 최적화된 입력 변수의 소속 함수 형태  
(a) CGREEN (b) CRED

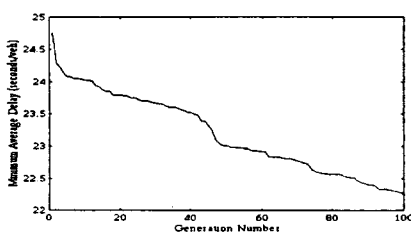


그림 6. 각 세대당 최소 평균 대기 시간

## 5. 결 론

본 논문에서는 날로 심각해져 가는 교통 체증 문제를 적절한 신호 제어 방식에 의해 해결할 수 있는 가능성을 검토하였다. 특히 교차로의 특성이 수학적 모델이 어려운 복잡한 비선형 시스템이라는 것에 주목해 그에 대해 강인성을 지니는 퍼지 논리를 이용하여 퍼지 교통 신호 제어기를 설계하였고 유전 알고리즘을 통해 이를 최적화 하였다. 두 개의 연결된 교차로에 대해 모의 실험을 수행한 결과 유전 알고리즘으로 최적화 된 퍼지 교통 신호 제어기(GA-퍼지 교통 신호 제어기)가 현재의 일반적인 신호 제어 방식인 고정 주기 신호 제어에 비해 상당히 효율적인 제어 성능을 지님을 입증 하였다.

본 연구는 1996년도 산학협동재단 학술연구비 지원으로 수행되었음.

## [참 고 문 헌]

- [1] Robert E. Fenton, "IVHS/AHS: Driving into the Future," *IEEE Control Systems*, pp. 13-20, December 1994.
- [2] Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I," *IEEE Trans. Syst, Man, and Cybern.*, Vol. 20, No. 2, pp 404-418, March/April 1990.
- [3] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant," *Proc. IEEE*, Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588, 1976.
- [4] C. P. Pappis, and E. H. Mamdani, "A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction," *IEEE Trans. Syst. Man. and Cybern.*, SMC-7, pp. 707-717, 1977.
- [5] R. Kelsey *et al.*, "A Simulation Environment for Fuzzy Control of Traffic Systems," *12th IFAC World Congress*, Sydney, Australia, Vol. 5, pp. 553-556, 1993.
- [6] T. Takagi, and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern.*, Vol. 15, pp. 116-132, 1985.
- [7] Wook Chang, You Seok Son, Jin Bae Park, and Young Hoon Joo, "Numerical Data-Based GA Fuzzy Modeling with Fine Tuning Method," *SOCO'97(2nd Int. ICSC Symp. Soft Computing)*, September 16-19, 1997, to be published.
- [8] 장욱, 손유석, 박진배, 주영훈, "유전 알고리즘을 이용한 지능형 퍼지 제어기에 관한 연구," *Proc. 11th KACC*, Oct. 1996, pp. 960-963.