

대안경로 안내용 VMS 퍼지 피드백 제어기법

Design of VMS Fuzzy Feedback Controller for VMS Routing Information

박 은 미

(목원대학교 도시공학과 교수)

오 현 선

(목원대학교 도시공학과 석사과정)

양 태 규

(목원대학교 지능로봇공학과 교수)

목 차

- | | |
|-------------------------|--------------------|
| I. 문제제기 | 6. VMS 제어전략 산출 |
| II. VMS 퍼지 피드백 제어기 설계 | III. 피드백 제어기 성능 검증 |
| 1. 퍼지제어 개념 | 1. 시나리오 설정 |
| 2. 제어목표 및 입출력변수 설정 | 2. 제어기 안정화 |
| 3. 퍼지화(Fuzzification) | 3. 민감도 분석 |
| 4. 퍼지제어규칙(Rule Base) 설계 | IV. 결론 및 향후연구과제 |
| 5. 추론화 및 비퍼지화 과정 | 참고문헌 |

Key Words : VMS 제어, VMS 정보제공, 피드백 제어기, 퍼지 제어, 교통자동제어
VMS Control, VMS Information, Feedback Controller, Fuzzy Control, Traffic Control

요 약

VMS는 대안경로의 현황정보를 제공하는 정보수단의 역할뿐만 아니라, 경로선택에 영향을 줌으로써 통행 분산효과를 내는 제어 측면의 역할도 수행한다. 그러나 대안경로간 최적의 통행배분을 유도할 수 있는 VMS 제어기 없이, 교통관리 업무를 담당하는 센터 운영자 개인의 경험에 의존하여 대처하고 있는 실정이다.

퍼지 제어는 수학적 모델로 표현되기 어려운 복잡하고 애매한 시스템에 대하여, 전문가의 경험적 지식이나 실제 실험 데이터에 의해 제어시스템의 규칙 또는 제어알고리즘을 만들 수 있는 장점이 있다. 이에 이러한 퍼지 제어의 장점을 살려 대안경로간 통행시간 균형을 달성할 수 있는 VMS 퍼지 피드백 제어기를 설계하고 MATLAB/Simulink를 이용하여 그 성능을 검증하였다. 본 연구에서 제시한 제어기는 통행시간 균형이라는 제어목표에 수렴하고 있으나, 유출입교통량 증가와 Driver Compliance Rate 감소 등 외란에 민감하게 반응하여 수렴시간 과도하게 증가하는 현상이 나타났다. 이러한 외란에 보다 강한(Robust) 제어기로의 성능개선을 향후과제 남겨두며, 본 연구 결과를 발전시켜 실제 현장의 VMS 운영에 적용한다면 교통운영기술 진일보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Variable Message Signs have been used for providing information on the current traffic conditions. However, it is considered more important to achieve optimal traffic allocation among the alternative routes by strategic VMS information provision.

Fuzzy control is very effective and efficient to deal with such systems that are too complex and uncertain to build mathematical models. In this paper, a fuzzy feedback controller for VMS is proposed, whose goal is to achieve the travel time equilibrium between the two alternative routes. The performance of the suggested controller is implemented and examined using MATLAB/Simulink. More robust controller applicable to a real highway network is suggested for the further research.

1. 문제 제기

현재 VMS(Variable Message Sign)는 국내의 대안경로가 존재하는 고속도로 분기점 및 도로망에 설치되어 실시간으로 운전자들에게 대안경로에 대한 돌발 상황 또는 지체·정체와 같은 소통상황 정보를 제공해 준다. VMS는 이러한 대안경로의 현황정보를 제공하는 정보수단의 역할뿐만 아니라, 운전자를 우회도로로 유도하여 경로선택에 영향을 줌으로써, 도로망의 교통량 분산효과를 내는 제어 측면의 역할도 수행한다[1]. 그러나 대안경로간 최적의 통행배분을 유도할 수 있는 VMS 제어기 없이, 교통관리 업무를 담당하는 센터 운영자 개인의 경험에 의존하여 대처하고 있는 실정이다.

국내의 연구로는, 대안경로상의 VMS 메시지에 따른 과도반응과 통행집중 문제를 인식하고 피드백제어기의 설계 개념을 제시한 연구와 간단한 PID 제어기(Proportional-Integral-Derivative Controller) 구축방법을 제시한 연구 등이 있다[2,3,4]. 이들 연구에서는 제어기의 설계 개념 제시에 그쳐있어 제어기의 성능 평가가 부재하다. 국외 연구로는 M. Papageorgiou에 의해 시작되고 발전된 PID 제어기 연구사례들이 주를 이룬다[5-9]. 이들 연구에 교통환경의 특성을 고려하여 오늘날 보다 발전된 제어 기법을 접목시킨 연구개발이 요구된다. 그 밖에도 VMS를 통하여 네트워크 상의 최적통행배분 달성문제를 다룬 연구들이 있으나 현장 적용 가능한 대안을 제시하지는 못했다[10-11]. 이에 본 연구에서는 VMS를 통해 네트워크 상의 통행균형을 달성하는 문제를 다루되, 현장 적용 가능한 방안 도출을 목적으로 한다.

퍼지 제어기의 기본이 되는 퍼지 이론은 인간의 사고와 자연어의 개념에 더욱 가까우므로 제어대상의 수학적 기술이 어렵거나, 제어에 필요한 정보가 정성적이거나 부정확 또는 명료하지 않은 경우에 적합하다. 본

논문에서는, 여러 입력상황들을 종합적으로 추론하여 가장 적절한 판단을 내리는 VMS 운영자 사고 판단과정과 유사한 퍼지제어 방식을 도입한 VMS 퍼지피드백 제어기를 설계하고자 한다.

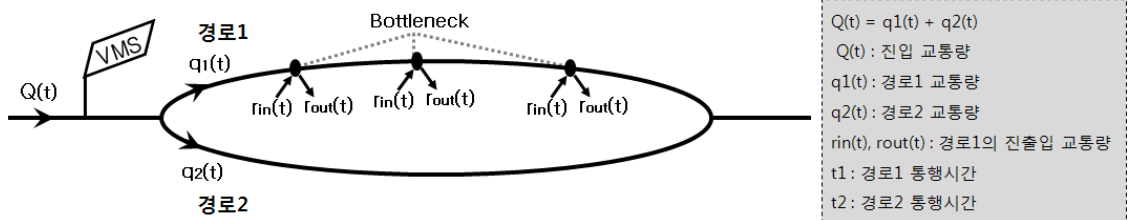
이를 위해 MATLAB Fuzzy Logic Toolbox를 사용하여 VMS 퍼지 피드백 제어기 설계를 수행하도록 한다. MATLAB/Simulink에 의해 제어기에 대한 시뮬레이션 실험을 수행하여 제어기를 안정화시키고 민감도 분석을 통하여 그 성능을 검증하도록 한다.

본 논문에서는 <그림 1>과 같이 대안경로가 있는 네트워크에 설치되어 있는 VMS를 대상으로 한 제어기를 설계하도록 한다. <그림 1>은 중부고속도로와 제2 중부고속도로로 분리된 두 대안경로 구간을 도식화한 것이며, 편의상 이들을 경로1과 경로2로 칭하도록 한다. 두 대안 경로의 거리는 약31km로 같으며, 경로1에는 진입·진출이 가능한 램프가 3곳이 있어 물리적 병목이 존재하고, 경로2는 진출입이 없는 Bypass로 구성된다.

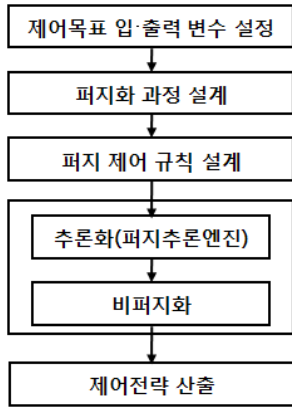
<그림 1>과 같은 상황에서, 통상 유출입을 제외한다면 나머지 통행은 경로2에 집중되기 쉽다. 또한 이러한 통행집중 문제를 조정하기 위해 VMS에 메시지를 표출할 경우, 이러한 메시지에 의한 과도반응으로 소통상황이 역전되고 역전되는 악순환이 반복되기 쉽다. 본 논문에서는 이러한 대안경로상에 발생하는 문제에 효과적으로 대응하여 통행균형을 달성하고 유지할 수 있는 VMS 제어기를 제시함을 그 목적으로 한다.

II. VMS 퍼지 피드백 제어기 설계

VMS 퍼지 제어기 설계는 <그림 2>에서 제시한 대로 다음의 과정을 통해서 수행되었으며, 이하에서는 퍼지제어의 개념에 대하여 설명한 후 다음의 각 과정별로 상세토록 한다.



<그림 1> 제어 대상 네트워크



〈그림 2〉 VMS 퍼지 피드백 제어기 설계 과정

1. 제어목표 및 입출력 변수 설정
2. 퍼지화: 멤버십함수 설계
3. 퍼지제어규칙 설계
4. 추론화 및 비퍼지화
5. 제어전략 산출

1. 퍼지제어 개념

퍼지 제어는 1974년 Mamdani에 의해 증기기관 제어에 적용되어 실용화의 가능성을 보여준 이후 그 응용범위가 급속히 확대되었다.

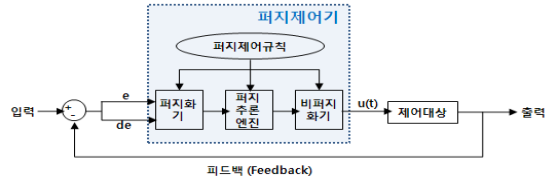
현재에는 시스템 제어, 교통신호 제어, 정수장 제어, 로봇 제어 등 공학 분야뿐 아니라, 병의 진단 등 의학 분야, 판결, 경영의사결정, 정책결정 등 사회과학분야, 그 밖에 다방면에서 적용되고 있다[10].

퍼지제어 기법은 복잡한 수학적 모델에 의존하지 않으면서, 전문가의 경험적 지식이나 실제 실험 데이터에 의해 제어시스템의 규칙 또는 제어알고리즘을 만들 수 있는 장점이 있다.

퍼지제어기는 숙련자의 경험적 지식을 시스템 제어에 필요한 제어 규칙(Rule Base)으로 기술하여 제어기에 판단능력을 부여하는 시스템이다. 〈그림 3〉은 일반적인 퍼지 제어시스템의 구조를 나타내며, 퍼지제어기는 다음의 4가지 구성 요소로 되어 있다.

1. 퍼지화기(Fuzzifier)
2. 퍼지제어규칙(Fuzzy Rule base)
3. 퍼지추론엔진(Fuzzy Inference Engine)
4. 비퍼지화기(Defuzzifier)

퍼지 제어 시스템 구조로 입력이 들어가면 피드백된



〈그림 3〉 일반적 퍼지 제어시스템 구조

출력과 에러가 계산된다. 퍼지화기에서는 이를 퍼지제어기에서 사용할 수 있는 퍼지값으로 변환시켜주고, 변환된 값을 퍼지 제어 규칙을 적용한 퍼지 추론 엔진과 비퍼지화 과정에 거치도록 하여 제어대상에 적용할 제어량을 구한다.

2. 제어목표 및 입출력변수 설정

VMS 제어 목표는 제Ⅱ장에서 제시한 바 대로 〈그림 1〉의 경로간 통행시간 균형 달성으로 한다. 따라서 입력변수는 통행시간차(e)와 통행시간차 변화율(de)로 설정한다.

$$e(t) = t_1(t) - t_2(t)$$

$$de(t) = e(t) - e(t-1)$$

Where, $e(t)$: 경로간통행시간차

$de(t)$: 통행시간차변화율

$t_1(t)$: 경로1 통행시간

$t_2(t)$: 경로2 통행시간

출력변수는 VMS 제어에 적용하는 제어량(u)으로 한다. 이들 입출력변수가 퍼지제어기에서 작동하는 메카니즘에 대하여는 이하에서 설명하도록 한다.

3. 퍼지화(Fuzzification) : 입·출력변수 소속함수 설정

퍼지화(Fuzzification)는 입력변수를 가지고 퍼지 추론을 행할 수 있는 퍼지집합으로 변환하는 과정이다. 입·출력변수에 각각에 대하여 NB(Negative Big), NS(Negative Small), ZE(Zero), PS(Positive Small), PB(Positive Big)과 같이 언어 파라미터 값으로 이루어진 다섯 개의 퍼지 집합을 설정하였으며, 퍼지집합의 소속함수(Membership Function)를 정의하였다. 설정된 퍼지 집합과 소속함수는 〈표 1〉에 제시되어 있다.

〈표 1〉 입출력변수의 퍼지집합 및 소속함수

변수		퍼지집합		소속함수	
입력 변수	통행시간차 (<i>e</i>)	NB	경로2 통행시간 매우 큼		
		NS	경로2 통행시간 큼		
		ZE	통행시간 차이 없음		
		PS	경로1 통행시간 큼		
		PB	경로1 통행시간 매우 큼		
	통행시간차 변화율 (<i>de</i>)	NB	통행시간차변화 매우작아짐		
		NS	통행시간차변화 작아짐		
		ZE	변화없음		
		PS	통행시간차변화 커짐		
		PB	통행시간차변화 매우커짐		
출력 변수	제어량 (<i>u</i>)	NB	경로2 제어할 량 매우큼		
		NS	경로2 제어할 량 큼		
		ZE	균형		
		PS	경로1 제어할 량 큼		
		PB	경로1 제어할 량 매우큼		

주) NB: Negative Big, NS: Negative Small, ZE: Zero, PS: Positive Small, PB: Positive Big

입출력 변수에 대하여 정의된 퍼지집합의 의미는 〈표 1〉에 설명하여 놓았으며, 이들 집합에 대한 소속함수는 퍼지제어에서 가장 일반적으로 쓰이는 삼각형 함수를 선택하였다. 퍼지집합의 범위는 -1에서 1로 정규화하고, 0을 ZE의 중심점이 되게 하고, -1에서 0은 NB와 NS의 그리고 0에서 1은 PS와 PB의 소속함수로 정의하였다.

이때 이들 각 퍼지집합의 소속함수 간격 설정에 대하여는 제Ⅲ장에서 설명하도록 한다.

4. 퍼지제어규칙(Fuzzy Rule) 설계

퍼지 제어 규칙은 입력값(*e, de*)에 대한 출력값 즉 제어량(*u*)을 정의하는 단계로 전문가의 지식으로 추출한다. 제어규칙을 추출하기 위해 우선 각 입력변수에 정의된 5개의 퍼지집합의 25개 조합에 대하여 제어대상지의 상황을 유추해 보면 〈표 2〉와 같다. 제어효과로 나타난 제어대상지의 상황에 따라 다음시간대의 제어량을 결정하는 거시 제어규칙인데, 〈표 2〉의 상황해석에 따라 도출한 제어규칙은 〈표 3〉과 같다. 〈표 3〉

에 제시된 25개의 각 셀은 하나의 제어규칙이 되며, IF (*e = XX AND de = YY*) THEN (*u = ZZ*)와 같은 조건문으로 대입된다.

〈표 2〉 제어규칙 설계

<i>e</i> \ <i>de</i>	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	역전현상 ¹		균형 도달	제어효과 큼	
NS	제어 역효과 ²			제어효과 있음	
ZE	답보상태 ³			답보상태	
PS	제어효과 있음			제어 역효과	
PB	제어효과 큼			역전현상	

- 주) 1. 대안경로 소통 우월상태가 뒤 바뀌어 소통 불균형 상태로 있는 경우
- 2. 제어에 의해 불균형상태가 더 악화된 경우
- 3. 제어에 의해 상황 개선이 없는 경우

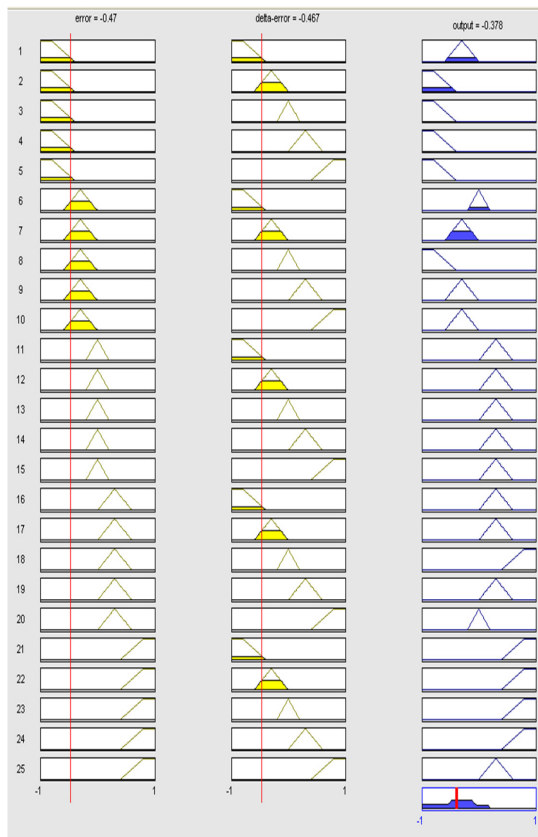
〈표 3〉 제어규칙

<i>e</i> \ <i>de</i>	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NS	ZE	ZE	PS	PB
NS	NB	NS	ZE	PS	PB
ZE	NB	NB	ZE	PB	PB
PS	NB	NS	ZE	PS	PB
PB	NB	NS	ZE	ZE	PS

5. 추론화 및 비퍼지화 과정

본 연구에서는 퍼지제어규칙을 이용한 퍼지추론 방법으로 Mamdani의 Max-Min 추론방법을 선택하였으며, 비퍼지화 방법으로는 간략화된 무게중심법을 사용하였다.

〈그림 4〉는 입력값 $e = -0.47$, $de = -0.467$ 이라고 할 때 Mamdani Max-Min 추론과 무게중심법에 의해 출력값 $u = -0.378$ 이 산출되는 MATLAB/Simulink 추론과정의 예를 보여준다. 25개의 제어규칙에 대하여 입력값에 해당하는 음영으로 표시된 소속함수 면적을 구하고, 각 제어규칙에서 두 개의 입력값 면적 중 작은 값을 취하여 각 규칙의 출력값을 생성한다. 그리고 이들 출력값을 합하여 무게중심점을 구하면 그것이 입력값에 대한 출력값이 된다 (〈그림 4〉 참조).



주) $e = -0.47$, $de = -0.467$, $u = -0.376$

〈그림 4〉 MATLAB/Simulink Mamdani의 추론과정 예

6. VMS 제어전략 산출

앞서 설명한 Mamdani 추론과정과 무게중심법을 통해 실수항으로 출력된 제어량에 따른 VMS 메시지 표출 전략을 〈표 4〉와 같이 설정하였다. VMS 메시지 표출 전략은 메시지 내용, 강도, 지속시간에 대한 결정이 포함된다. 이 중 지속시간은 따로 산정하지 않고 주기적으로 피드백 제어를 수행하면서 메시지 지속 혹은 갱신 여부를 판단하도록 하고, 메시지 내용과 강도에 대한 것만 정의하였다.

〈표 4〉 제어량에 따른 VMS 메시지 표출 전략

제어량(u)	메세지 표출 전략	
	메시지 내용	메시지 강도 ²
-1 ~ -0.6	경로1로 통행 유도	강
-0.6 ~ -0.2	경로1로 통행 유도	약
-0.2 ~ 0.2	중립적 메시지 ¹	-
0.2 ~ 0.6	경로2로 통행 유도	약
0.6 ~ 1	경로2로 통행 유도	강

주) 1. 특정 경로에 대한 통행유도를 유발하지 않는 메시지
2. 특정 경로에 통행유도를 유발하는 효과의 정도

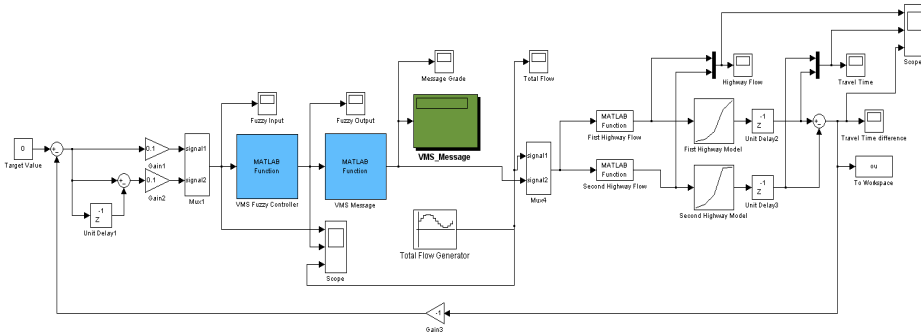
III. VMS 퍼지 피드백 제어기 성능 검증

본 장에서는 VMS 퍼지 피드백 제어기를 MATLAB/Simulink를 이용하여 구축하고 그 성능 검증 결과를 제시하도록 한다. 〈그림 5〉는 MATLAB/Simulink를 이용하여, 제IV장에서 설계된 퍼지 제어기 모듈에 제어대상지(〈그림 1〉 참고) 경로간 통행배분과 통행시간 산정 모듈을 연계하고 통행시간 균등화를 위한 피드백 루프를 생성하여 구축한 VMS 퍼지 피드백 제어기 이다.

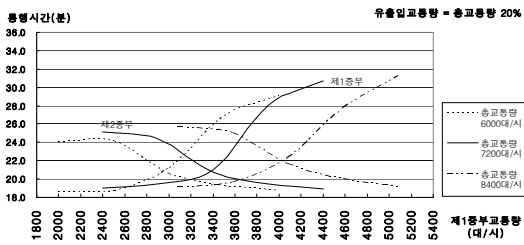
1. 시나리오 설정

본 연구에서는 VMS 피드백 제어기 성능 검증에 있어 〈표 5〉와 같은 교통량 시나리오를 설정하였다. 총 교통량 시나리오 $Q(t)$ 는 시간당 6000대/시, 8400대/시로 설정하였고, 이들 교통량의 시간대별 변화패턴은 사인곡선을 가정하였다. 또한 〈그림 1〉 경로1 유출입 교통량은 총교통량의 15%, 20%, 25% 를 차지한다고 가정하여, 총 6개의 교통량 시나리오를 설정하였다.

〈그림 1〉 경로1과 경로2의 교통량에 따른 통행시간 산정은 박은미 등(2010년)이 수행한 연구의VISSIM 시뮬레이션 결과를 쓰도록 한다 (〈그림 6〉 참고).



〈그림 5〉 VMS 퍼지 피드백 제어기



출처: 김낙완·박은미·고명석·장현진·장정아(2009), 고속도로 대안경로 VMS 피드백제어기 설계, 제61회 학술발표회 발표집, 대한교통학회, pp.271~274.

〈그림 6〉 통행배분에 따른 통행시간 변화

〈표 5〉 교통량 시나리오

구분 (대/시)	구분	유출입교통량, $\Sigma \Gamma_{in}(t)$, $\Sigma \Gamma_{out}(t)$		
		Q(t)의 15%	Q(t)의 20%	Q(t)의 25%
총 교통량 Q(t)	6000	시나리오 1	시나리오 3	시나리오 5
	8400	시나리오 2	시나리오 4	시나리오 6

〈표 6〉 Driver Compliance 시나리오

메시지 강도	Driver Compliance		
	시나리오 A	시나리오 B	시나리오 C
강	90%	80%	80%
약	80%	70%	60%
중립	60%	60%	50%

VMS 메시지를 따라 경로선택을 하는 Driver Compliance Rate 시나리오를 〈표 6〉과 같이 설정하였다. 반드시 경로1로 통행해야하는 램프 유출입 교통량을 제외한 나머지 통행의 VMS 메시지를 따르는 비율을 메시지 강도에 따라 세 가지 시나리오로 가정하였다.

2. 제어기 안정화

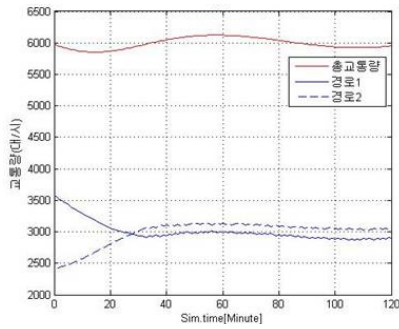
VMS 메시지 갱신주기는 1분으로 설정하였으며, 총

120분의 시뮬레이션을 수행하였다. 제어기 안정화는 〈표 5〉의 교통량 시나리오 3과 〈표 6〉의 Driver Compliance 시나리오 A를 기본 시나리오로 하여 시행했으며, 입출력 변수의 소속 함수 값 조정을 통하여 〈그림 7〉과 같이 통행시간 균형 목표를 달성하였다. 초기에 경로1의 통행시간이 8분 더 걸리는 정체상황에서, VMS 제어가 시작되고 20분 후부터 두 경로는 통행시간 차가 0에 가깝게 수렴하여 유지되고 있음을 보여주고 있다.

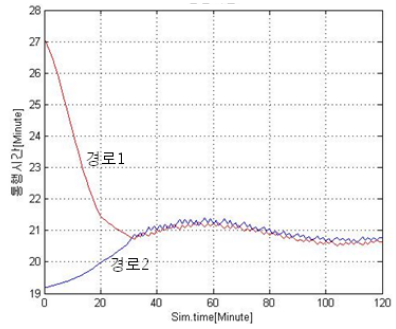
3. 민감도 분석

제어기를 안정화시킨 후, 통행량 증가, 유출입량 증감, Driver Compliance Rate 감소에 따른 제어기의 성능을 평가하였다. 〈그림 8〉은 통행량 증가와 유출입량 증감에 따른 제어기 민감도 나타난 것이며, 이때 Driver Compliance Rate는 〈표 6〉의 시나리오 A로 고정하였다. 또한 〈그림 9〉는 교통량 시나리오 3으로 고정하였을 때 Driver Compliance Rate 감소에 따른 제어기 민감도를 나타낸 것이다.

〈그림 8〉을 보면, 통행량 증가와 유출입 교통량 증가에 따라 통행시간 균형에 도달하는 시간이 길어짐을 알 수 있다. 통행량 증가보다는 유출입량 증가에 제어기가 더 민감하게 반응하며, 유출입량 증가에 따라 제어기의 성능이 현저히 저하됨을 보이고 있다. 특히 유출입 교통량이 20%까지 될 경우 제어기가 수렴하는 시간이 50분 이상 되는데, 이때는 현장에 적용 가능한 수준으로 현재 제어기에 대한 성능개선이 필요하다. 〈그림 9〉를 보면 Driver Compliance Rate 저하에 따라 제어기 수렴시간이 급격히 늘어나며, 가장 낮은 시나리오 C의 경우 제어기가 수렴하지 않는 것을 보여주고 있다. 이러한 외란(Disturbances)에 보다 효과적으로 대응하는 제어기로의 개선은 향후과제로 남겨둔다.

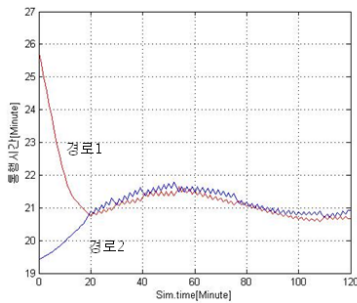


(a) 경로간 교통량 변화

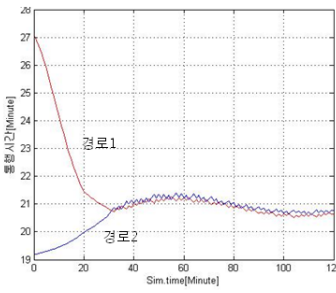


(b) 경로간 통행시간 변화

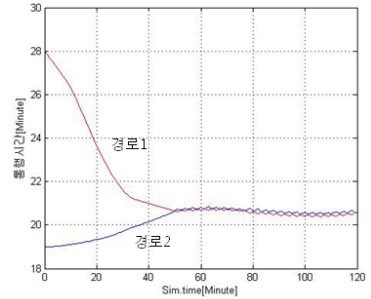
〈그림 7〉 제어기 성능



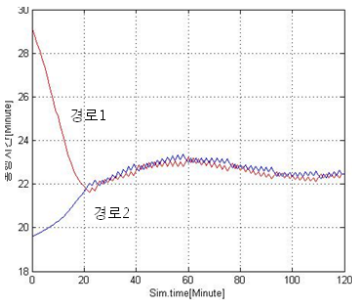
(a) 시나리오1



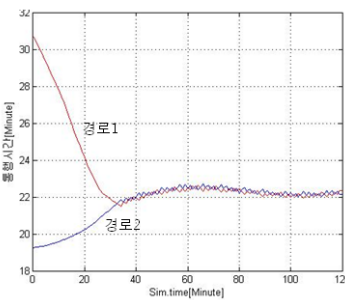
(c) 시나리오3



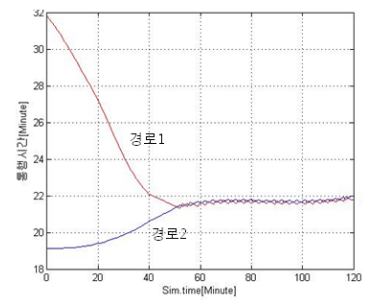
(e) 시나리오5



(b) 시나리오2

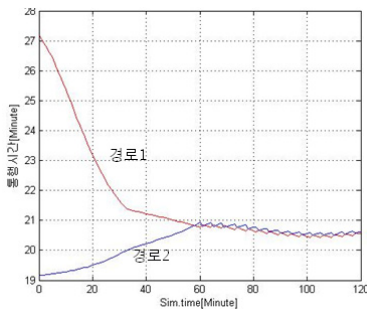


(d) 시나리오4

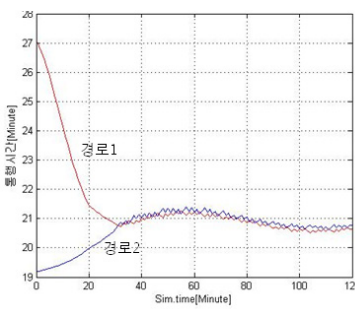


(f) 시나리오6

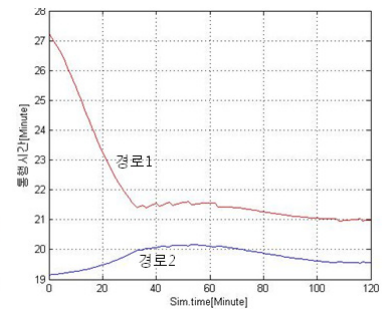
〈그림 8〉 통행량 변화에 따른 제어기 민감도



(a) 시나리오 A



(b) 시나리오 B



(c) 시나리오 C

〈그림 9〉 Driver Compliance 변화에 따른 제어기 민감도

IV. 결론 및 향후과제

1. 연구결과 요약

퍼지 제어는 수학적 모델로 표현되기 어려운 복잡하고 애매한 시스템에 대하여, 전문가의 경험적 지식이나 실제 실험 데이터에 의해 제어시스템의 규칙 또는 제어 알고리즘을 만들 수 있는 장점이 있다. 이에 이러한 퍼지 제어의 장점을 살려 대안경로간 통행시간 균형을 달성할 수 있는 VMS 피드백 제어기를 설계하고 MATLAB/Simulink를 이용하여 그 성능을 검증하였다.

2. 향후과제

본 연구에서 제시한 제어기는 통행시간 균형이라는 제어목표에 수렴하고 있으나, 유출입교통량 증가와 Driver Compliance Rate 감소 등 외란(Disturbances)에 민감하게 반응하여 수렴시간이 과도하게 증가하는 단점이 나타났다. 피드백 제어기가 가진 본래의 강점은, 불규칙한 외란을 정확하게 예측하지 않아도 현장에서 적용하여 설정해 놓은 목표치-본 논문의 경우는 소통 균형상태-에 도달하고 유지될 수 있다는 것이다. 현재 외란에 민감하게 반응하여 제어기의 성능이 급격히 저하되는 문제점을 보완하기 위하여, 외란에 의해 목표한 소통 균형 상태에 도달하지 못한 만큼 VMS 메시지 강도를 조절해 주는 모듈을 첨가하는 것이 필요하다. 본 연구에서 제시한 제어기를 외란에 보다 강하게(Robust) 성능개선하는 것은 향후과제로 남긴다. 본 연구 결과를 발전시켜 실제 현장의 VMS 운영에 적용한다면 교통 운영기술 진일보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 이창우·정진혁(2006), 운전자 행태를 고려한 VMS의 실시간 경로안내 정보제공에 관한 연구, 대한교통학회지, 제24권 제7호, 대한교통학회, pp.65~79.
2. 박은미(2002), VMS 자동제어 알고리즘 설계, 대한교통학회지, 제20권 제7호, 대한교통학회, pp.177~183.
3. 박은미(2004), VMS의 과도반응과 통행집중 문제를 고려한 예측적인 운영전략, 대한교통학회지,

- 제22권 제4호, 대한교통학회, pp.107~115.
4. 김낙완·박은미·고명석·장현진·장정아(2009), 고속도로 대안경로 VMS 피드백제어기 설계, 제61회 학술발표회 발표집, 대한교통학회, pp.271~274.
5. M.Papageorgiou(1990), "Dynamic Modeling, Assignment, and Route Guidance in Traffic Networks," TR 24B, No. 6.
6. A.Messmer & M.Papageorgiou(1994), "Automatic Control Methods Applied to Freeway Network Traffic," Automatica 30, No. 4.
7. S. Mammar, and et. al.(1996), "Automatic Control of Variable Message Signs in Aalborg," Trans. Res. C, Vol.4, No.3.
8. A. Messmer and et. al.(1998), "Automatic Control of Variable Message Signs in the Interurban Scottish Highway Network," TR C, Vol.6, pp.173~187.
9. Y. Pavlis and M. Papageorgiou(1999), "Simple Decentralized Feedback Strategies for Route Guidance in Traffic Networks," Transportation Science, Vol.33, No.3.
10. D.M. Valdes-Diaz, Y. Chiu, and H.S. Mahmassani(2000), "Optimal Time-dependent Variable Message Sign Diversion Strategy," 79th Annual Meeting of the TRB, Washington DC.
11. Jun S. Oh and R. Jayakrishnan(2001), "Temporal Control of Variable Message Signs towards Achieving Dynamic System Optimum." Paper no.01-3363, 80th Annual Meeting of the TRB, Washington DC..
12. 채석·오영석(1995), 퍼지이론과 제어, 청문각.

- ✉ 주 작성자 : 박은미
- ✉ 교신저자 : 오현선
- ✉ 논문투고일 : 2011. 8. 25
- ✉ 논문심사일 : 2011. 10. 12 (1차)
- 2011. 11. 8 (2차)
- 2011. 11. 29 (3차)
- ✉ 심사판정일 : 2011. 11. 29
- ✉ 반론접수기한 : 2012. 4. 30
- ✉ 3인 익명 심사필
- ✉ 1인 abstract 교정필