

■ 論 文 ■

퍼지제어를 이용한 도시철도 분포수요 예측모형 구축

Modelling the Distribution Demand Estimation for Urban Rail Transit
using Fuzzy Control System

김 대 응

(영남대학교 건설환경공학부 교수)

박 철 구

((주)대원엔지니어링 이사)

최 한 규

(대구경북연구원 연구원)

목 차

- | | |
|------------------------|-------------------|
| I. 서론 | 1. 퍼지제어를 이용한 예측모형 |
| II. 퍼지제어의 개요 및 적용사례 | 2. 중력모형을 이용한 예측모형 |
| 1. 퍼지제어의 개요 | V. 모형의 적합성 검토 |
| 2. 퍼지제어의 적용사례 | 1. 모형의 재현성 |
| III. 자료의 수집과 분포수요 특성 | 2. 모형의 민감도 |
| 1. 자료의 수집 | VI. 결론 |
| 2. 도시철도의 분포수요 특성 | 참고문헌 |
| IV. 도시철도 분포수요 예측모형의 구축 | |

Key Words : 퍼지제어(fuzzy control), 중력모형, 도시철도, 분포수요, 예측모형

요 약

본 연구에서는 도시철도의 증장거리 통행 특성에 따른 통행거리에 대한 분포수요의 불규칙성을 반영하고 통행거리와 분포수요간의 다양한 함수관계를 고려하기 위해서 도시철도 분포수요 예측모형에 대한 퍼지제어를 이용한 접근방법을 제시하고자 하였다.

모형구축 및 검정을 위한 자료로는 대구시 지하철 1호선의 실제 통행량 자료와 통행거리 자료를 활용하였으며, 통행량 자료는 역무자동화 기기에서 하루동안 수집된 각 역별 발생량 및 집중량과 역간 분포량을 집계한 것이고 통행거리 자료는 대구시 지하철 1호선의 영업연장을 활용하여 출발역과 도착역간의 거리를 산정하여 집계한 것이다.

모형의 적합성 검토에서는 도시철도 역세권을 기반으로 한 동일한 자료를 이용하여 모형을 구축한 퍼지제어모형과 중력모형을 비교 검토하였다. 그 결과 중력모형에서는 통행거리 변수가 모형에 좋지 못한 영향을 미치는 반면, 각 변수간의 다양한 함수관계를 표현할 수 있는 퍼지제어모형에서는 통행거리가 상당히 유용한 자료로 활용되었을 뿐만 아니라 중력모형보다 높은 예측정도를 나타내는 것으로 분석되었다. 따라서 향후 도시철도만의 발생·집중량을 토대로 도시철도 분포수요 예측시에는 퍼지제어를 이용할 경우 양호한 예측결과가 기대되어지며, 본 연구에서 미진하였던 최적의 소속함수 정의와 퍼지규칙 설정문제는 신경망 이론과 조합하면 더욱 진보한 예측의 정도 향상과 모형간 절대비교가 가능할 것으로 판단된다.

In this study, we suggested a new approach method forecasting distribution demand of urban rail transit using fuzzy control, with intend to reflect irregularity and various functional relationship between trip length and distribution demand.

To establish fuzzy control model and test this model, the actual trip volume(production, attraction and distribution volume) and trip length(space distance between a departure and arrival station) of Daegu subway line 1 were used.

Firstly, using these data we established a fuzzy control model, and the estimation accuracy of the model was examined and compared with that of generalized gravity model.

The results showed that the fuzzy control model was superior to gravity model in accuracy of estimation. Therefore, we found that fuzzy control was able to be applied as a effective method to predict the distribution demand of urban rail transit.

Finally, to increase the estimation precision of the model, we expect studies that define membership functions and set up fuzzy rules organized with neural networks.

1. 서론

도시철도는 도로교통에 비하여 대량성과 정시성, 공간의 저잠식성, 안정성 등에서 월등히 우수한 교통수단이다. 그러나 도시철도의 건설에는 막대한 공사비가 소요되고 공사기간이 길 뿐 만 아니라 사후 노선변경이 불가능하기 때문에 도입초기 단계부터 정확한 수요 추정을 통해 각 노선대안별 타당성을 면밀히 검토하여 투자대비 효용을 극대화할 수 있는 노선의 선정이 요구되어진다.

지금까지 교통수요예측 방법으로는 거의 대부분의 경우 교통존을 기반으로 하여 통행발생, 통행분포, 수단선택, 통행배분의 단계를 거치는 전통적인 4단계 예측방법이 주로 이용되어져 왔다. 그러나 도시철도의 수요예측 방법으로서 기존의 4단계 예측방법을 적용할 경우, 각 단계마다 추정오차가 누적될 뿐만 아니라 집계단위인 교통존과 도시철도 서비스지역간의 괴리가 능성 등의 문제점으로 인해 예측의 정도 향상에 한계를 지니고 있다.

이러한 점을 감안하여 최근 손의영 등(2004)과 김대용 등(2004)은 교통존이 아닌 역세권을 기본단위로 하여 역세권 특성을 고려한 도시철도의 역별 수요추정 모형을 구축하기도 하였다.

이와 같이 역세권을 기본단위로 하여 도시철도 수송수요를 예측할 경우, 기존의 4단계 수요예측 과정은 통행발생(수단선택과 통합)과 통행분포(통행배분과 통합)의 2단계로 단순화될 수 있다. 본 연구에서는 이 2단계에서 두번째 과정 즉, 도시철도역의 각 역별 발생·집중 수요를 토대로 하여 도시철도의 역간 분포수요 예측 모형을 구축하는데 있다.

일반적으로 분포수요 추정을 위한 모형으로는 통행시간을 고려한 음지수함수 형태의 통행저항함수에 의한 중력모형이 널리 이용되고 있다. 그러나 도시철도 이용자의 경우, 타 교통수단과 달리 단거리 통행수요보다 중장거리 통행수요가 많을 뿐만 아니라 통행거리와 분포수요 간에 일정한 규칙성을 보이지 않고 있다.(그림 2, 3참조)

따라서 본 연구와 같이 모든 교통수단이 아닌 도시철도만의 발생·집중량을 토대로 도시철도의 분포수요를 추정하는 경우에는 통행량이 통행거리(소요시간 또는 비용)에 반비례한다고 가정하는 중력모형을 적용하기에는 다소 무리가 따른다.

이에 본 연구에서는 도시철도의 중장거리 통행특성과 통행거리별로 불규칙한 분포수요와의 관계를 설명하는 방법으로서, 인간의 추론이나 판단과정의 유사성을 갖는 퍼지이론의 응용분야인 퍼지제어를 이용하여 도시철도의 분포수요 예측모형 구축을 시도하였다.

모형구축 및 검정을 위한 자료로는 실제 각 역별 발생량·집중량과 역간 분포량(OD) 그리고 역간 통행거리를 사용하였으며, 모형구축 결과는 기존의 중력모형과 비교하여 구축된 모형의 적합성을 검토하였다.

II. 퍼지제어의 개요 및 적용사례

1. 퍼지제어의 개요

퍼지제어란 퍼지집합개념을 이용하여 '애미한 정보를 가지고도 유연하고 뛰어난 적응성을 보이고 있는 인간이 행하는 조작방법'을 제어규칙으로 모형화하고 이를 퍼지추론을 통해 제어하는 것이다. 여기서 제어규칙은 과거의 조작경험과 프로세스의 특성파악을 통하여 축적된 지식으로 만들어진다.

퍼지제어의 기본이 되는 퍼지집합은 '아름다운 여성'의 집합, '키가 큰 사람의 집합', '큰 수의 집합' 등과 같이 경계가 명확하지 않은 집합을 말하며, 식 1과 같이 나타낼 수 있다.(Zadeh, 1965)

식 1에서 퍼지 부분집합 A 는 소속함수 $\mu_A(x)$ 에 의해 정의되는 집합이며, 소속함수 $\mu_A(x)$ 는 퍼지집합 A 에 있어서 전체집합 U 의 원소인 x 의 소속도(membership function)를 표시하게 된다. 즉, $\mu_A(x)$ 의 값이 1에 가까울수록 원소 x 가 퍼지집합 A 에 속하는 정도가 크고, 반대로 0에 가까우면 A 에 속하는 정도가 작다는 것을 의미한다.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) ; x \in U, \mu_A(x) \in [0, 1]\} \quad (1)$$

여기서, A : 퍼지 부분집합(fuzzy sub-sets)

U : 전체집합(universal sets),

x : 집합 U 의 원소

$\mu_A(x)$: 소속함수(membership function)

이러한 퍼지집합개념을 이용한 퍼지제어를 이용할

경우 일반적으로 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고, 부정확하며, 불확실한 경우에 기존 제어 방법들보다 우수한 제어결과를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 퍼지제어의 핵심은 순차적으로 입력과 출력을 제어할 수 있도록 다음과 같은 부분으로 구성된 퍼지제어기 설계에 있다.

1) 퍼지화 부문(fuzzification interface)

퍼지화 부문은 기저변수의 값을 측정하여 그 범위에 대응되는 전체집합으로 사상(mapping)시켜서 입력값의 퍼지화를 수행하는 것이다. 즉 기저변수와 그에 따른 퍼지집합을 설정하고 소속함수를 정의하는 절차를 의미한다.

먼저 퍼지집합은 언어적인 관계를 수리적으로 표현하는 방법으로, 기저변수의 범위를 몇 개의 퍼지집합으로 구분하게 된다.

다음으로 소속함수(membership function) 정의에서는 퍼지집합별 함수의 형태(삼각형, 포물선, 가우스형 등), 함수의 수, 함수의 높이 및 너비 등을 규정하는데, 소속함수 정의방법은 주로 출력변수와 실측치의 차이가 최소화될 때까지 함수를 반복적으로 조절해 나가는 것이 일반적인 방법이다.

2) 지식베이스 부문(knowledge base)

지식베이스 부문은 제어대상에 대한 지식을 기술하는 것으로, 퍼지규칙(fuzzy rule)을 설정하고 이를 퍼지관계(fuzzy relations)로 변환시키는 과정이다.

퍼지규칙의 설정은 전건부(if문)와 후건부(then문)를 갖춘 if-then형식의 언어적 표현으로 규칙성을 부여하는 것이고, 이러한 정성적인 퍼지규칙을 수리적인 관계로 변환하는 것이 퍼지관계 변환이다.

3) 의사결정 논리부문(decision-making logic)

의사결정 논리부문은 언어적인 형태로 기술된 퍼지 제어규칙을 적용하기 위한 논리적인 실행과정인 퍼지추론(fuzzy reasoning inference)과 여러 가지 퍼지관계의 의미를 복합적으로 고려하는 퍼지관계 합성으로 구성된다. 퍼지추론은 일반적인 추론모형과는 달리 현실상황에서 반드시 명확한 조건이 제시되지 않으므로 근사적인 결과를 추론한다고 하여 퍼지근사추론이라고

도 하는데, 후건부의 구조가 퍼지집합이고 추론속도가 빠른 Mamdani의 직접(direct)추론법이 가장 널리 이용되는 방법이다.

퍼지관계 합성에는 식 2와 같이 논리화한 전건부의 퍼지규칙들을 AND(min)연산하고 그에 따른 후건부의 값을 OR(max)연산하는 Mamdani에 의한 최대·최소(max-min) 합성이 주로 이용되고 있다.

$$R_1 \circ R_2 \circ \dots \circ R_m = [T, \max_y \{ \min \{ \mu_{R_1} T, \mu_{R_2} T, \dots, \mu_{R_m} T \} \}] \quad (2)$$

여기서, $T : (x_1, x_2, \dots, x_n, y)$.

x_i : 전건부의 i 번째 기저변수

y : 후건부의 기저변수

R_i : i 번째 퍼지규칙

n : 전건부 기저변수의 수

m : 퍼지규칙의 수

4) 비퍼지화 부문(defuzzification interface)

의사결정 논리부문의 직접추론과정에 의한 결과는 퍼지집합으로 구해지므로 퍼지집합으로 정의된 출력량을 명확한 비퍼지량으로 변환시키는 과정이 필요로 하다. 이 과정을 비퍼지화(defuzzification)라고 한다.

비퍼지화 부문에서 가장 일반적으로 사용되는 방법은 식 3에 나타난 바와 같은 무게중심법이며, 무게중심법은 출력된 면적의 무게중심을 찾아 명확한 특정 값으로 변환함으로써 우월한 성능을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.

$$z_0 = \frac{\int \mu_c(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_c(z) \, dz} \quad (3)$$

여기서, z_0 : 비퍼지화 값

$\mu_c(z)$: 후건부 퍼지집합 C 의

원소값 z 일때의 소속도

2. 퍼지제어의 적용사례

다양한 분야에 응용되고 있는 퍼지제어는 교통분야에서도 존재하는 자료 및 결과해석 등에 애매모호함이 존재하는 경우 상당히 유용하게 적용될 수 있다.(Kikuchi,

1998)(Teodorović, 1999) 이러한 점에서 Pappis 등 (1977)이 교차로 신호제어에 퍼지제어를 처음 적용한 이래, 퍼지제어를 교통분야에 접목시키려는 노력은 꾸준히 진행되어져 왔다.

과거 퍼지제어 등 퍼지이론을 교통수요예측분야에 적용한 대표적인 예로는, Kalić 등(1997)이 통행발생 예측에 적용을 시도하였으며, Kikuchi 등(2000)은 버스 정류장별 발생수요예측을 위하여 퍼지추론모형을 구축하였고 그 결과를 회귀모형과 인공신경망과 비교하여 그 적합성을 검토하였다.

또한 Kalić 등(1996, 1997)이 통행분포모형에 적용하거나, Teodorović 등(1996)이 수단분담모형에 적용한 예도 있으며 특히 배분모형과 관련된 연구사례가 많이 보고 되고 있다.

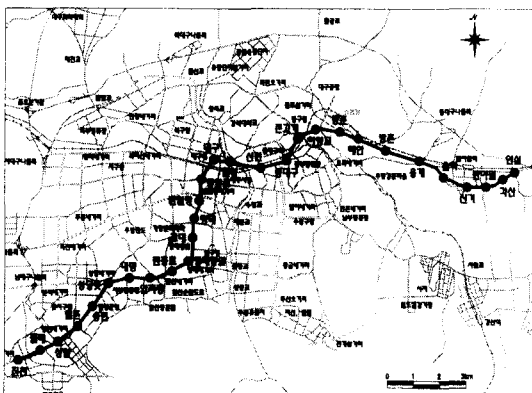
국내에서는 김경환 등(2004), 진현수 등(1991), 이영신 등(1997)의 연구와 같이 주로 독립교차로 제어 나 교통제어시스템 연구에 퍼지제어를 중심으로 퍼지이론이 적용되어져 왔다.

III. 자료의 수집과 분포수요 특성

1. 자료의 수집

본 연구에서는 모형 구축 및 검정을 위해 대구시 지하철 1호선을 연구대상으로 선정하여 분석 자료를 수집하였다.

대구시 지하철 1호선은 현재 30개 역으로 구성되어 있으나, <그림 1>에 나타난 바와 같이 대곡역을 제외한 진천~안심간 29개 역을 분석대상으로 하였다.



<그림 1> 대구시 지하철 1호선의 노선현황

1) 도시철도 통행량 자료

통행량 자료는 <표 1>에 나타난 바와 같이 2002년 5월 20일을 기준으로 대구시 지하철공사의 역무자동화 기기에서 중앙통제센터에 입력된 역간 OD 및 통행량 자료로서, 역별 발생량·집중량과 역간 분포량 자료를 수집하였다.

<표 1> 통행량 자료의 구분 및 수집방법

구분	조사방법	조사시기	총통행수 (통행)
역별 발생·집중량 역간 분포량	역무자동화기기 자료를 집계	2002.5.20 (월)	148,995

2) 도시철도 통행거리 자료

도시철도 통행거리 자료는 <표 2>에 나타난 바와 같이 대구시 지하철 1호선 노선의 영업연장에서 출발역과 도착역과의 거리를 산출하여 사용하였다.

<표 2> 진천역에서부터 각 역의 누적거리

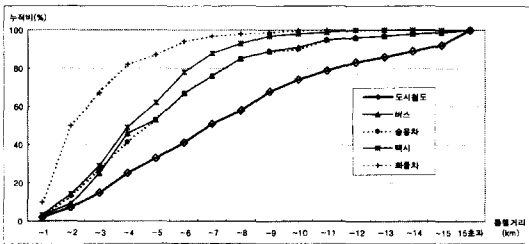
역명	~진천역(km)	역명	~진천역(km)
진천	0.0	칠성	11.8
월배	0.8	신천	13.0
상인	1.5	동대구	13.9
월촌	2.4	큰고개	14.8
송현	3.4	아양교	15.6
성당못	4.2	동촌	16.6
대명	5.0	해안	17.6
안지랑	5.8	방촌	18.6
현충로	6.5	용계	19.7
영대병원	7.2	울하	20.9
교대	8.1	신기	22.0
명덕	8.8	반야월	23.0
반월	9.6	각산	24.0
중앙로	10.3	안심	24.9
대구	11.0	-	-

2. 도시철도의 분포수요 특성

1) 통행거리에 대한 분포수요의 불규칙성

대구시의 교통수단별 통행거리와 분포수요와의 관계를 비교·분석한 결과는 <그림 2>에 나타난 바와 같다.(김대웅, 2000)

분석결과를 보면, 화물차의 통행거리는 다른 교통수단



〈그림 2〉 교통수단별 통행거리와 분포수요 관계

에 비해서 매우 짧고 버스, 승용차, 택시 등 다른 교통수단들도 3~6km의 통행거리에서 급격하게 상승하고 있으며, 전체 통행의 약 90% 이상이 10km이내에서 이루어지고 있다. 그러나 접근거리를 제외하여 분석한 도시철도 이용자의 통행거리는 평균 7.5km로서 다른 교통수단에 비하여 매우 긴 통행거리를 가지고 있으며 누적분포에 따른 증가량도 일정한 규칙성을 가지고 있지 못하다.

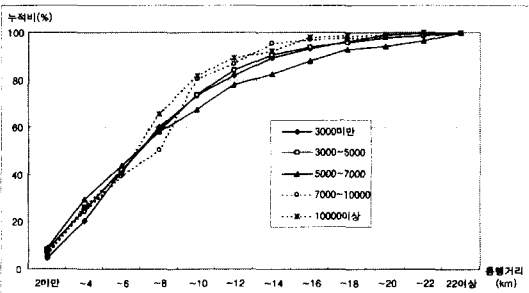
즉 이러한 의미는 분포수요가 통행거리에 반비례한다는 규칙성을 전제로 하는 중력모형에서는 도시철도 분포수요 예측시에 도시철도 분포수요 특성을 반영하기 어렵다는 한계를 가지게 된다고 볼 수 있다.

그러나 퍼지제어모형에서는 애매성과 모호성을 기초로 퍼지집합·소속함수·퍼지규칙 등을 통하여 이러한 불규칙성을 반영할 수 있다.

2) 통행거리와 분포수요간 다양한 함수관계

대구시 지하철 1호선에서 도착역의 집중량별 통행거리와 분포수요 관계는 〈그림 3〉에 나타난 바와 같이, 집중량의 대소에 따라 출발역과 도착역간의 통행거리와 분포수요간 함수관계가 차이가 발생한다.

일반적으로 중력모형에서도 이러한 차이를 고려하여 복수개의 분포수요 예측모형을 구축할 수 있으나 모형의 수 만큼 관측빈도가 줄어들기 때문에 이렇게 하면 모형의 정도에 영향을 줄 가능성이 높다.



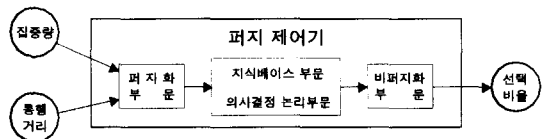
〈그림 3〉 집중량별 통행거리와 분포수요 관계

그러나 퍼지제어 모형에서는 소속함수 정의와 퍼지규칙 설정을 통하여 관측빈도를 줄이지 않고 하나의 모형으로써 집중량 등의 도입변수별로 통행거리와 분포수요간 다양한 함수관계를 고려할 수 있다.

N. 도시철도 분포수요 예측모형의 구축

1. 퍼지제어를 이용한 예측모형

본 연구에서는 순차적으로 입력출력되는 도시철도 분포수요 예측모형을 위하여 〈그림 4〉에 나타난 바와 같이 퍼지화 부문, 지식베이스 부문, 의사결정 논리부문, 비퍼지화 부분으로 구성되는 퍼지제어기를 설계하였으며 각 부문별 내용은 다음과 같다.



〈그림 4〉 모형구축을 위한 퍼지제어기의 부문별 설계

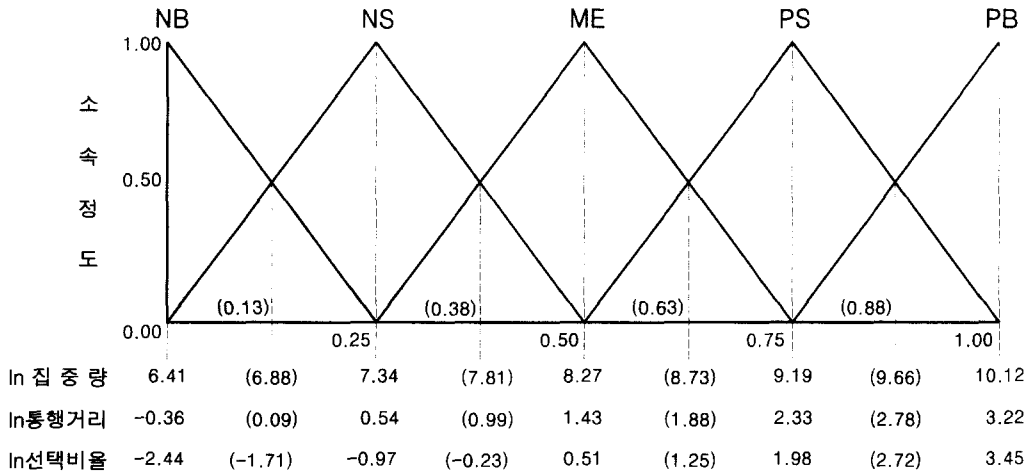
1) 퍼지화 부문

기저변수의 설정에서는 기저변수의 수가 많으면 지식베이스 부문에서 고려해야 할 퍼지규칙의 수가 급격히 증가한다.

그러므로 본 연구에서는 입력변수인 발생량과 출력변수인 분포량을 하나의 출력변수인 선택비율에 내재시켜서 다음과 같이 3개의 기저변수를 선정하여 그 수를 최소화 하였다.

- 도착역 j 에서의 총집중량 (a_j)
 - 출발역 i 와 도착역 j 간의 통행거리 (d_{ij})
 - 출발역 i 에서 도착역 j 간 선택비율
- $$(r_{ij} = (\text{분포량}/\text{출발역의 총발생량}) \times 100)$$

한편 대구시 지하철 1호선의 도심지에 위치한 중앙로역의 경우 집중량과 선택비율 값이 매우 높아서 기저변수값의 분산이 심하여 퍼지집합간 소속함수의 폭이 매우 넓어지므로, 이를 보완하기 위하여 각 기저변수값들을 자연로그로써 대수화하여 사용하였고 기저변수값들의 범위는 조사관측된 변수값들의 최소 및 최대값을



〈그림 5〉 소속함수의 정의

〈표 3〉 기저변수별 퍼지집합의 정의

구분	NB (Negative Big)	NS (Negative Small)	ME (Medium)	PS (Positive Small)	PB (Positive Big)
ln집중량	매우적다	적다	보통	많다	매우많다
ln통행거리	매우짧다	짧다	보통	길다	매우길다
ln선택비율	매우낮다	낮다	보통	높다	매우높다

한계로 하였다.

퍼지집합 정의는 〈표 3〉에서와 같이 양(量), 길이, 높이 등 기저변수의 측도에 따라 각각 5개의 퍼지집합으로 구분하여 정의하였다.

소속함수의 설정에서는 〈그림 5〉에 나타낸 바와 같이 함수의 형태는 퍼지집합별로 대소관계가 분명하고 일반적으로 가장 널리 이용되는 삼각형형태를 사용하였다.

또한 함수의 수는 양단의 NB와 PB집합에는 1개, 그 외는 모두 2개의 선형함수를 가지도록 설계하였으며, 함수의 높이는 소속정도가 최소 0과 최대 1의 값을 가지도록 그 범위를 규정하였다.

특히 함수의 너비 설정은 특정 기저변수값이 인접한 2개의 퍼지집합에 대해서만 소속도가 산출되고 두 퍼지집합에 대한 소속도의 합이 항상 1.0이 되도록 설정하였다. (예를 들어 ln통행거리의 특정 기저변수값이 0.7일 경우, '짧다'라는 퍼지집합에 대한 소속도가 0.6, '보통'이라는 퍼지집합에 대한 소속도가 0.4임.)

2) 지식베이스 부문

지식베이스 부문에서는 관측된 OD간 기저변수값을

〈표 4〉 퍼지규칙의 설정 결과

구분	ln통행거리					
	NB	NS	ME	PS	PB	
ln 집중량	NB	NB	ME	NS	NS	NS
	NS	NS	ME	ME	NS	NS
	ME	ME	ME	ME	ME	ME
	PS	ME	PS	PS	PS	ME
	PB	ME	PS	PB	PB	PS

주 : 퍼지규칙은 「IF ln집중량 is PS and ln통행거리 is NS, Then ln선택비율 is PS」의 형식임.

관측하여 도출되는 버퍼지화 값을 반복수행하여 퍼지규칙(fuzzy rule)을 설정하고, 이를 다시 수리적인 퍼지관계(fuzzy relations)로 변환한다.

위의 방법을 이용하여 본 연구의 지식베이스 부문에서 설정된 퍼지규칙을 정리하면 〈표 4〉에 나타낸 바와 같다. 퍼지규칙은 25개의 규칙들로 구성되어 있으며, 퍼지관계 변환에서는 ln선택비율이 퍼지집합으로 산출된다.

이상의 퍼지규칙 설정의 근거는 〈표 5〉에 나타내 바와 같이 각 812개의 역간 분포통행에 대한 관측수에 대해서 퍼지집합에 대한 소속도가 큰 값을 기준으로 설정하였다.

동일한 ln집중량, ln통행거리의 퍼지집합을 가지고 있을 때에는 관측수가 많은 경우를 퍼지규칙으로 설정하였으며 이러한 방법에 따라 812개의 총 관측수 중 558개의 관측수가 선택되어 〈표 4〉에 나타낸 바와 같이 도시철도 분포통행 패턴을 최소 약 68.72% 설명할 수 있는 퍼지규칙이 결정되었다.

〈표 5〉 각 기저변수의 소속된 퍼지집합 분석 결과

ln 집중량	ln통행 거리	ln선택 비율	관측수 (개)	ln 집중량	ln통행 거리	ln선택 비율	관측수 (개)
NB	NB	NB	1	ME	PS	NS	7
NB	NB	NS	1	ME	PS	ME	153
NB	NS	ME	1	ME	PS	PS	78
NB	ME	NS	4	ME	PB	NS	14
NB	PS	NS	10	ME	PB	ME	53
NB	PS	ME	1	ME	PB	PS	11
NB	PB	NB	3	PS	NB	NS	1
NB	PB	NS	7	PS	NB	ME	6
NS	NB	NB	1	PS	NB	PS	1
NS	NB	NS	1	PS	NS	ME	2
NS	NS	NS	3	PS	NS	PS	9
NS	NS	ME	7	PS	ME	PS	31
NS	ME	NS	2	PS	PS	ME	2
NS	ME	ME	20	PS	PS	PS	48
NS	PS	NS	19	PS	PB	ME	7
NS	PS	ME	19	PS	PB	PS	5
NS	PB	NS	12	PB	NB	ME	1
ME	NB	NS	15	PB	NB	PS	1
ME	NB	ME	18	PB	NS	PS	2
ME	NB	PS	1	PB	NS	PB	1
ME	NS	NS	1	PB	ME	PB	10
ME	NS	ME	44	PB	PS	PB	13
ME	NS	PS	18	PB	PB	PS	0
ME	ME	ME	81				
ME	ME	PS	66	합계	-	-	812

3) 의사결정 논리부문

본 연구에서 의사결정 논리부문의 퍼지추론 부분은 후건부에서 퍼지집합을 도출해 내는 Mamdani의 직접 추론법을 이용하였으며, 복수의 퍼지규칙을 합성하는 방법으로는 Mamdani의 최대·최소 합성법(max-min composition)을 이용하였다.

4) 비퍼지화 부문

본 연구에서는 Mamdani의 직접추론법과 최대·최소 합성법에 의해 추론된 결과는 퍼지집합 및 합성된 퍼지집합들의 영역으로 산출되므로, 비퍼지화 부문에서는 가장 일반적으로 사용되고 우월한 성능을 가지고 있는 무게중심법을 이용하여 최종적인 ln선택비율을 산정하였다. 이상과 같이 본 연구에서의 비퍼지화 부문에 이르는 퍼지제어과정은 〈그림 6〉에 나타난 바와 같이,

ln집중량의 값이 8.89이고 ln통행거리의 값이 1.67인 경우에 25개의 퍼지규칙에 의해 제어되어 ln선택비율이 1.45인 값을 출력하게 된다.

5) 분포수요 예측치의 산정

이상과 같이 설계된 퍼지제어기의 출력값은 출발역 i 에서 도착역 j 를 선택할 비율이고 출력된 선택비율의 합은 정확히 100을 나타내지 않으므로, 두 역간 분포수요를 산정하기 위해서 다음과 같이 출발역 i 에 대해서 보정된 선택비율로써 산출하였다.

$$X_{ij} = g_i \times \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^{n-1} r_{ij}} \tag{4}$$

여기서, X_{ij} : 역 i, j 간의 분포량(수요)

g_i : 출발역 i 의 총발생량

r_{ij} : 출발역 i 에서 도착역 j 를 선택할 비율(%)

n : 도시철도 노선의 역수

2. 중력모형을 이용한 예측모형

1) 중력모형의 기본형태

중력모형에는 존간의 교통저항을 나타내는 함수 $f(d_{ij})$ 에 따라 기본형, 지수형, Gamma형이 있으며, 본 연구에서는 기본형 중력모형인 식 5를 사용하여 도시철도의 분포수요를 추정하였다.

기본형 중력모형의 계수 산정방법은 식 6에 나타난 바와 같이 식 5의 양변을 대수화하여 최소자승법으로 모형의 계수를 추정할 수 있다.

$$X_{ij} = K \cdot g_i^\alpha \cdot a_j^\beta \cdot d_{ij}^{-\lambda} \tag{5}$$

$$\ln X_{ij} = \ln K + \alpha \ln g_i + \beta \ln a_j - \lambda \ln d_{ij} \tag{6}$$

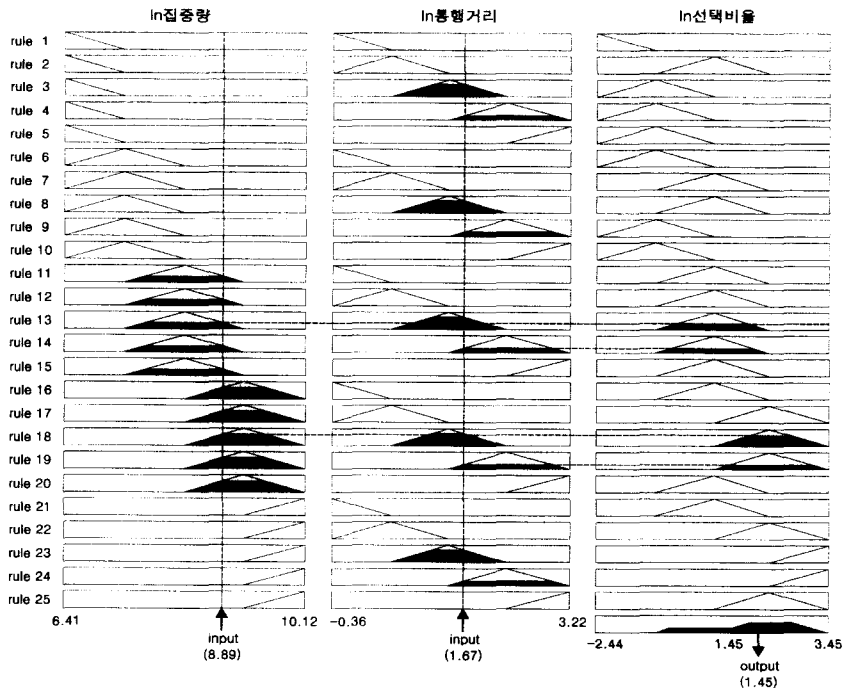
여기서, X_{ij} : 역 i, j 간의 분포량(수요)

g_i : 출발역 i 의 총발생량

a_j : 도착역 j 의 총집중량

K, α, β : 모형의 계수

d_{ij} : i 역과 j 역간의 통행거리



〈그림 6〉 설계한 분포모형 퍼지제어기의 퍼지제어 예시

2) 모형의 계수 추정

역별 발생량 및 집중량, 역간 통행거리를 모두 변수로 도입한 모형1과 통행거리를 제외하고 2가지 변수만 도입한 모형2로 구분하여 기본형 중력모형의 계수를 추정한 결과는 〈표 6〉과 같다.

3가지 변수 모두를 사용한 모형1에서는 역별 발생량

및 집중량 변수와 모형 전체에 대한 신뢰도가 높고 R^2 값이 77.9로 설명력이 양호한 모형이 구축되었으나 중력모형의 λ 의 계수값은 통상의 기대치와 다르게 부호가 음수로서 매우 적은 값을 나타내어 모형에 있어서 통행거리가 변수로서 좋은 영향을 주지 않고 있다. 또한 모형2에서는 통행거리를 변수에서 제외하더라도 R^2 값이 전혀 변하지 않으며 각 계수 추정치 및 모형 전체에 대해서 통계적으로 더욱 안정됨으로써, 중력모형을 이용한 도시철도 분포수요 예측에서는 역간 통행거리는 변수로서 의미가 전혀 없는 것으로 판단된다.

〈표 6〉 중력모형을 이용한 분포모형 구축결과

변수	계수	t값	R^2	F값	
모형1	(상수)	2.488E-6 (K)	-38.05 (0.001)	77.9	951.04 (0.001)
	g_i	1.048 (a)	36.96 (0.001)		
	a_i	1.056 (β)	39.54 (0.001)		
	d_{ij}	0.005 (- λ)	0.25 (0.810)		
모형2	(상수)	-12.884 (K)	-39.22 (0.001)	77.9	1428.20 (0.001)
	g_i	1.048 (a)	37.11 (0.001)		
	a_i	1.056 (β)	39.74 (0.001)		

주 : ()는 t값 및 F값에 대한 유의수준임.

V. 모형의 적합성 검토

1. 모형의 재현성

1) 평가지표

구축된 모형의 적합성 즉, 예측치가 실측치를 얼마나 정도 높게 재현할 수 있는가를 검토하기 위하여 평가 지표로는 일반적으로 널리 이용되고 있는 평균절대오차, RMS오차, 평균오차율, χ^2 , 상관계수(R) 등을

사용하였다.

- 평균절대오차 = $\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |T_i^e - T_i^a|$
- RMS 오차 = $\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (T_i^e - T_i^a)^2}{n}}$
- 평균오차율 = $\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left| \frac{T_i^e - T_i^a}{T_i^e} \right| \times 100$
- $\chi^2 = \sum_{i=0}^n \frac{(T_i^e - T_i^a)^2}{T_i^e}$
- $R = \frac{\sum_{i=0}^n T_i^e T_i^a - (\sum_{i=0}^n T_i^e \sum_{i=0}^n T_i^a) / n}{\sqrt{\left\{ \sum_{i=0}^n T_i^e{}^2 - (\sum_{i=0}^n T_i^e)^2 / n \right\} \left\{ \sum_{i=0}^n T_i^a{}^2 - (\sum_{i=0}^n T_i^a)^2 / n \right\}}}$

여기서, T_i^a : i 번째 관측시 실측치
 T_i^e : i 번째 관측시 예측치
 n : 관측수(또는 자료수)

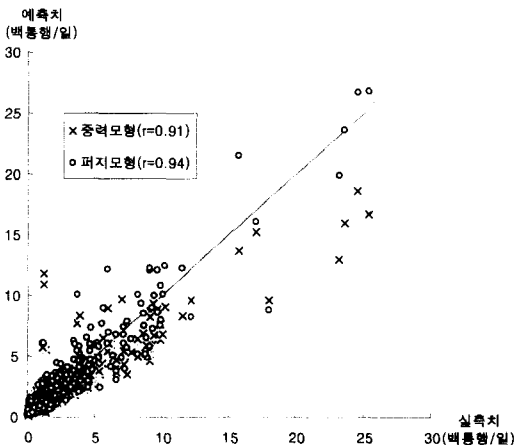
2) 모형간 재현결과 비교

퍼지모형과 중력모형을 이용하여 구축된 도시철도

<표 7> 발생·집중모형의 재현결과

구분	평균 절대오차	RMS 오차	평균 오차율	χ^2	R
중력모형	50	104	50.80 (11.60)	70321	0.91
퍼지모형	45	97	46.37 (0.36)	19105	0.94

주 : ()는 총 분포량 합계에 대한 평균 오차율임.



<그림 7> 분포량의 예측치와 실측치 비교

분포수요 예측모형의 예측력 분석결과는 <표 7>과 <그림 7>에 나타낸 바와 같다.

예측치와 실측치간 5개의 평가지표에 대해서 두 모형 모두 양호한 재현결과를 보이고 있다. 이는 본 연구에서 구축한 중력모형도 집계단위가 교통존이 아닌 각 역을 중심으로한 역세권으로 수집된 자료를 활용하였기 때문이다.

그러나 두 모형의 예측정도 개선측면에서 본다면 모든 평가지표값에 대해서 퍼지제어를 이용한 분포모형이 중력모형을 이용한 분포모형 보다 양호한 재현성을 보이고 있어서, 퍼지제어를 이용한 분포모형이 도시철도 분포수요 예측의 정도향상에 기여도가 더 높을 것을 판단된다.

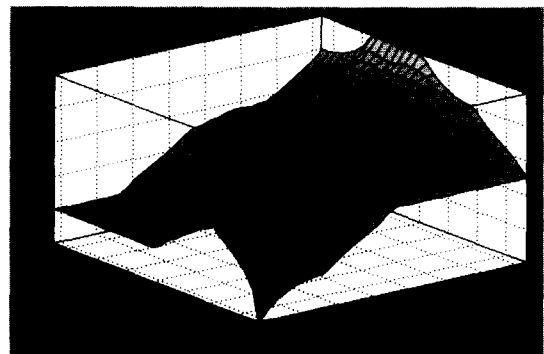
2. 모형의 민감도

본 연구에서 구축한 퍼지제어를 이용한 도시철도 분포모형에서는 역간 통행거리와 도착역의 집중량에 따라 출발역에서 도착역을 선택할 비율을 다양한 함수로써 표현할 수 있다.

이러한 통행거리와 집중량에 따른 선택비율의 변화는 <그림 8>에 나타낸 바와 같이, 각 중·횡단면의 함수는 집중량별 통행거리와 선택비율간의 관계, 통행거리별 집중량과 선택비율간의 관계를 다양하게 고려하고 있다.

기존연구에서는 중장거리 통행장(trip length)을 가지는 도시철도 이용특성 때문에 분포모형 구축시 역간 통행거리를 고려하지 않거나 모형에 도입하였더라도 모형구축결과에 큰 영향을 주지 못 하였다.

그러나 도시철도 통행거리 분포특성은 도시철도 고유의 수단특성을 가지고 있기 때문에 퍼지제어를 이용하면 다양한 통행거리의 변화에 따른 분포량의 변화를



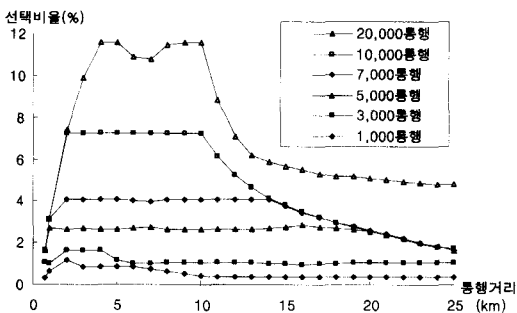
<그림 8> 역간거리와 집중량에 따른 선택비율의 변화

설명하기에 더욱 적절하다.

1) 집중량 변화에 따른 통행거리와 선택비율 관계

집중량의 변화에 따른 통행거리와 선택비율의 관계는 <그림 9>에 나타낸 바와 같이, 퍼지제어를 적용하면 통행거리와 선택비율간의 다양한 함수관계를 표현할 수 있다.

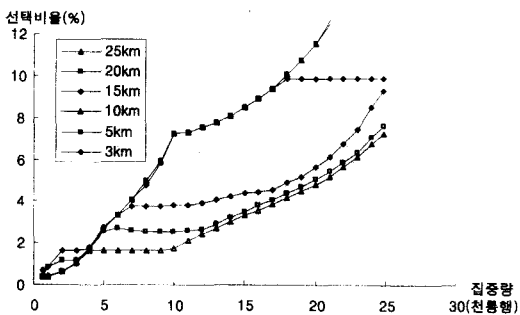
집중량이 3천통행 이하일 경우에는 통행거리별로 도착역 선택비율은 큰 변화를 보이지 않지만 집중량이 증가할수록 통행거리별 선택비율은 큰 폭으로 변화를 보인다. 특히 집중량이 2만통행 이상인 경우에는 최초 통행거리가 증가할수록 선택비율이 증가하다가 통행거리 5~10km간에 다소 불규칙한 특성을 가지고 있으며 10 km 이후에는 통행거리가 증가할수록 그 선택비율은 점차적으로 감소한다.



<그림 9> 집중량 변화에 따른 통행거리와 선택비율의 관계

2) 통행거리 변화에 따른 집중량과 선택비율 관계

통행거리의 변화에 따른 집중량과 선택비율은 <그림 10>에 나타낸 바와 같이, 통행거리의 변화에 따라 집중량과 선택비율은 모두 증가경향을 보이고 있으나 그 증가량은 통행거리 값에 따라 다르다.



<그림 10> 통행거리 변화에 따른 집중량과 선택비율의 관계

집중량 변화에 따른 통행거리와 선택비율간의 관계 보다는 함수형태의 변화가 크지는 않지만 통행거리가 약 10km이내에서는 집중량이 증가할수록 선택비율이 증가하는 경향을 가지고 있으나 통행거리 약 10km를 넘어서면 집중량이 5천~1만통행의 구간에서 선택비율이 일정하게 유지되다가 다시 증가하는 형태를 띄고 있다. 이와 같이 퍼지제어를 이용한 분포수요 예측에서는 통행거리 변화에 따라 집중량과 선택비율의 함수관계를 다양하게 고려할 수 있다.

V. 결론

본 연구는 정도 높은 도시철도의 역간 분포 수요 예측모형을 구축하는 데 있어서 퍼지제어의 적용가능성을 시험하는데 목적을 두었다.

이는 도시철도의 경우 일반적으로 단거리수요보다 중장거리 통행수요가 많은 분포특성을 가지고 있기 때문에 통행량이 통행거리(소요시간 또는 비용)에 반비례한다고 전제하는 중력모형을 적용하는 것은 불합리하다는 것이 연구수행의 시작이었다.

이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 도시철도의 중장거리 통행 특성에 따른 통행거리에 대한 분포수요의 불규칙성을 반영하고 통행거리와 분포수요간의 다양한 함수관계를 고려하기 위해서 퍼지이론 응용분야인 퍼지제어의 전개과정을 이용한 분포수요 모형에 대한 접근 방법을 제시하고자 하였다.

모형 구축 및 검정을 위한 자료로는 대구시 지하철 1호선의 실제 역별 발생량·집중량과 역간 분포량 자료 그리고 역간 통행거리 자료를 활용하였으며, 구축된 모형은 기존의 중력모형과 비교하여 그 적합성을 검토하였다. 그 결과 중력모형은 통행거리 분포특성을 제대로 설명하지 못하고 오히려 통행거리가 모형에 좋지 못한 영향을 미치는 반면, 통행거리를 다양하게 함수화 할 수 있는 퍼지제어를 이용한 모형에서는 통행거리가 상당히 유용한 자료로 활용되었을 뿐만 아니라 중력모형보다 좋은 재현성을 보이는 것으로 분석되었다.

그러나 본 연구에서는 중력모형에서도 각 역을 집계 단위로 하여 중력모형의 정도가 다소 향상되고 퍼지제어 모형에서는 최적의 소속함수 및 퍼지규칙 설정을 수행하지 못 하였으므로, 퍼지제어를 이용한 모형의 재현성은 월등히 높지는 않았다.

그러므로 향후에는 퍼지제어를 이용한 도시철도 분

포수요 예측모형에서는 소속함수의 정의와 퍼지규칙의 설정을 신경망 이론 등과 조합하여, 자료의 패턴을 학습시킴으로써 퍼지제어모형의 정도를 향상시킴과 동시에 다른 모형과의 절대비교를 통하여 모형의 우수성을 검증할 필요가 있다.

참고문헌

1. 김경환·하만복·강덕호(2004), "퍼지추론을 이용한 신호교차로에서의 포화차두시간 분석", 대한교통학회지, 제22권 제1호, 대한교통학회, pp.73~82.
2. 김대웅(2000), "도로계획", 형설출판사, p.661.
3. 김대웅·박철구·최한규·이진욱(2004), "역세권 특성을 고려한 도시철도 수송수요 예측모형 구축", 대한토목학회논문집, 제24권 제6D호, pp.863~872.
4. 손의영·권병우·이만호(2004), "카테고리별 다중회귀분석 방법을 이용한 지하철역별 수요추정 모형 개발", 대한교통학회지, 제122호 제1호, 대한교통학회, pp.33~42.
5. 이영신·이윤배(1997), "퍼지 제어를 적용한 교차로에서의 최적 교통 신호 시스템", 한국정보처리학회 논문집, pp.167~176.
6. 진현수·홍완희·김성환(1991), "퍼지이론을 이용한 도시 교통신호등의 제어에 관한 연구", 서울시립부설 수도권개발연구소 연구논총 제 17집, pp.97~103.
7. C. Pappis and E. Mamdani(1977), "A fuzzy controller for a traffic junction", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC-7, pp.707~717.
8. D. Teodorović(1999), "Fuzzy logic systems for transportation engineering : the state of the art", Transportation Research Part A 33, p.337.

9. D. Teodorović and M. Kalić(1996), "Solving the modal split problem by fuzzy rules generated by learning from examples", Proceedings Information Technologies, Yugoslavia, pp.47~54.
10. L.A. Zadeh(1965), "Fuzzy Sets", Information and Control Vol.8, No.3, pp.338~353.
11. M. Kalić and D. Teodorović(1996), "Solving the trip distribution problem of fuzzy rules generated by learning from examples", Proceedings of the Yugoslav Symposium on Operations Research, Zlatibor Yugoslavia, pp.777~780.
12. M. Kalić and D. Teodorović(1997), "A soft computing approach to trip generation modeling", the 9th Mini EURO conference Fuzzy sets in traffic and transport systems, Budva Yugoslavia.
13. M. Kalić and D. Teodorović(1997), "Trip distribution modeling using soft computing techniques", Paper presented at the EURO... Barcelona.
14. Shinya Kikuchi(1998), "Treatment of Uncertainty in Study of Transportation : Fuzzy Set Theory and Evidence Theory", Journal of Transportation Engineering Vol. 124 No.1, p.2.
15. Shinya Kikuchi and Dragana Miljkovic (2000), "Use of Fuzzy Inference for Modeling Prediction of Transit Ridership at Individual Stops", Paper submitted for Presentation at the 2001 annual meeting of Transportation Research Board Record, TRB ID 01-2669.

✉ 주 작성자 : 최한규
 ✉ 논문투고일 : 2004. 6. 28
 논문심사일 : 2004. 7. 14 (1차)
 2004. 11. 1 (2차)
 2005. 2. 15 (3차)
 2005. 4. 12 (4차)
 심사판정일 : 2005. 4. 12
 ✉ 반론접수기한 : 2005. 8. 31