

## PC에서 퍼지셀을 이용한 아스팔트 포장의 기능수행가능성 추정

Serviceability Evaluation of Asphalt Pavement Using  
Fuzzy Set System on Personal Computer

김광우\* · 박제선\*\* · 이성남\*\*\*

Kim, Kwang Woo · Park, Je Seon · Lee, Seong Nam

## Abstract

This study was devised to apply fuzzy concepts to pavement serviceability evaluation. An evaluation model was developed based on workmanship of pavement during construction, external load on pavement and current distress level. Five rating fuzzy sets, three weight fuzzy sets were developed based on the concept that the most appropriate balance was achieved in Gd which was established for grading the fuzzy overall rating results. Evaluation criteria and corresponding fuzzy rating scale were suggested. A computer program for evaluating serviceability based on the criteria was developed. The program was operated by simply typing in input data on each question and producing output as Gd on the screen. It was possible to estimate the pavement serviceability level well using this fuzzy-set-based approach.

## 요 지

본 연구는 퍼지셀이론을 道路鋪裝의 共用性 평가에 응용하기 위하여 수행되었다. 포장의 堅實度와 포장에 가해지는 외력 및 포장의 현재상태에 근거하여 포장을 평가하는 모델을 개발하였다. 퍼지 종합평가를 위하여 설정된 거리등급지수(Gd)의 값이 가장 적절히 균형을 이루도록 5등급의 등급퍼지셀과 3등급의 輕重퍼지셀을 설정하였다. 또한 평가기준과 그에 상응하는 퍼지등급척도를 제시하였으며 설정된 평가기준에 준하여 공용성을 평가하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 각 항목에 대한 Input 값을 질의 문답식으로 화면을 통하여 문의하고 자판을 통하여 사용자가 넣어 주어 수행되도록 작성되었다. 본 연구에서 제시된 퍼지이론에 근거한 鋪裝共用性 추정기법을 실제 data를 이용하여 수행하여 본 결과 일정도도의 미래 기능수행가능성 추정과, 시범구간의 Gd 값과의 비교 수치를 사용하면 그 실용가능성이 높음을 알 수 있었다.

## 1. 서 론

아스팔트 포장의 기능은 供用性(Serviceability)으

로 나타내어진다. 延性鋪裝(Flexible Pavement)의 공용성은 포장에 작용하는 외력과 포장자체 저항력(내력)의 함수이므로 어떤시점에서 그 상태는 이 요인들의 상호관계에 의하여 변한다. 연성포장 표면상태의 질적 저하에 의한 기능파괴(Functional Failure)는 그 포장의 공용성이 상실되는 한계상태

\* 정희원 · 강원대학교 농공학과 교수

\*\* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 교수

\*\*\* 한국도로공사

이다. 그러나 공용성의 상실여부는 주관적 판정의 문제이며 파괴정도의 인식은 서로 다르다. 그러므로 포장상태의 측정을 통한 공용성 수준은 모호하고 오해의 소지가 많은 구어적 표현으로 판정되어 왔다.

또한 포장의 평가에 있어서 아스팔트 콘크리트의 각종 품질이나 개개의 외형적 손상에 대한 판정기준<sup>(20,24,34)</sup>은 있으나 재료의 품질, 구조적 견실도, 표면상태, 교통량 등을 포괄적으로 고려한 판정기준이 어떤 기관의 규정으로 제시된것은 드문 실정이다. 하지만 포장 공용성의 올바른 추정과 이해는 포장 관리를 위하여 중요하다. 특히 미국등 선진국도 근년에 와서는 새로운 포장의 건설보다는 Strategic Highway Research Program(SHRP) 등을 통하여 유지관리를 더 중시하는 단계에 있다. 이러한 관점에서 본 연구는 폐지개념에 의한 아스팔트포장의 공용성 추정에 관한 연구를 수행하였다.

따라서 본 연구의 목적은 아스팔트포장의 표층 기능으로서의 공용성을 폐지셀 개념으로 추정하는 방법을 개발하고, 이 방법을 누구나 쉽게 다룰 수 있게 하기 위한 PC용 프로그램을 개발하고 이를 이용하여 鋪裝의 판정을 포괄적으로 할 수 있도록 하는 것이다. 본 연구의 범위는 폐지평가기준의 설정, 적절한 폐지셀과 폐지종합평가 결과의 등급척도의 개발, PC용 컴퓨터 프로그램의 개발 그리고 예시용 관리지침의 제시를 통하여 폐지이론에 의한 아스팔트 포장표층의 판정 가능성을 보여 주는 것이다.

## 2. 폐지셀의 응용

### 2.1 건설분야에서의 폐지논리 응용

Zadeh<sup>(27,28)</sup>가 폐지 개념을 도입한 이래 여러 분야에서 이 논리가 적용되어 왔으나 토목공학에서의 응용은 1970년대 말까지 거의 찾아 볼 수 없었다. 1970년대 말 미국 씨애틀의 와싱턴 대학 Brown교수<sup>(2)</sup>가 미국토목학회지에 그리고 Munro<sup>(18)</sup>가 캐나다에서 폐지개념을 도입한 논문을 발표한 이래 1980년대에 미국등 서구를 중심으로 여러 논문이 발표되었다. 이중 그 동안 발표된 대표적인 것들을 요약하여 보면 다음과 같다.

전술한 Brown은 구조분야에서 ASCE에 단독<sup>(2,3)</sup>

또는 공동으로 당시 Purdue 대학의 Yao<sup>(4)</sup>와 대만의 Kam<sup>(10)</sup>과 여러 편의 논문을 발표하였다. 일본의 Shiraishi와 Furuta<sup>(22)</sup>는 파괴현상(Failure Event)의 정의 및 신뢰도 해석에, 호주의 Nguyen,<sup>(19)</sup> 미국 Clemson 대학의 Juang과 Kalidindi<sup>(9)</sup>는 입찰서류평가에 폐지셀 이론을 도입하였다. 특히 Juang등은 평가대상에 대한 등급을 가리는 방식으로 Ranking Index를 도입하였다. 미국 오하이오주립대학의 Hadipriono<sup>(7)</sup>와 대만의 Yeh등<sup>(26)</sup>은 구조물의 성능평가에 폐지이론을 도입하였다. Mullarkey와 Fenves<sup>(17)</sup>는 폐지이론을 토질 및 기초문제 해결을 위한 Knowledge Base로 이용하는 방안을 제시하였고 이후 폐지이론은 또한 전문가 시스템개발의 한 방안으로도 많이 이용되고 있다.

한편 국내에서, 조원신 등<sup>(33)</sup>은 교량의 안전도 평가를 위한 보정계수산정에, 이승렬<sup>(32)</sup>은 철근콘크리트보의 최적 설계에 폐지이론을 적용하는 연구를 수행하였고 Kim등<sup>(11,12,30)</sup>은 폐지이론에 의한 포장재료 및 성능평가에 관한 연구를 국 내외에 발표하였다.

### 2.2 폐지종합평가

폐지 종합평가(Fuzzy Overall Rating)<sup>(21)</sup>는 주평가 기준과 그에 속하는 부 기준에 대하여 식 1을 이용해서 이루어진다. 종합평가는 여러 전문가로부터 얻은 모델을 표준수행모델로 통합하고 여러요소들의 성능을 조합하기 위하여 필요하다.<sup>(7)</sup>

$$R = \frac{\sum(R_i W_i)}{\sum W_i} \quad (1)$$

여기서 R은 어떤 대상의 종합평가를 나타내는 폐지셀, R<sub>i</sub>는 어떤 특정기준에 근거한 대상의 등급(Rating)을 나타내는 폐지셀, W<sub>i</sub>는 특정기준에 주어진 경중률(Weight)을 나타내는 폐지셀이다. R, W<sub>i</sub>는 폐지셀이므로 식 1의 계산은 폐지연산법을 따른다.

### 2.3 종합평가로 얻어진 폐지셀의 등급

기존의 연구들은 종합평가로 얻어진 폐지셀의 등급화를 위하여 등급지수(Ranking Index)를 사용하였다.<sup>(7,9,11)</sup> 그러나 이 방법으로는 폐지셀이 두개 이

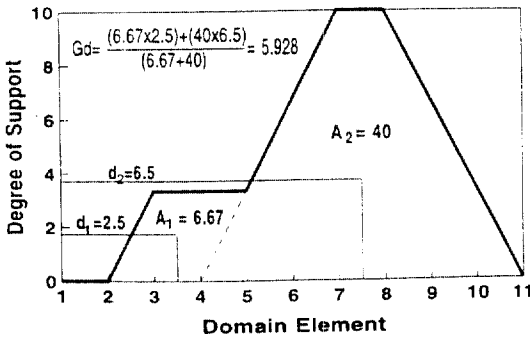


Fig. 1. Grade Distance (Gd) of an Example Fuzzy Set.

상의 정점을 가질 때 사용하기가 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 퍼지 귀속도 함수(Membership Function)로 만들어진 도형의 중심으로부터 좌측경계까지의 수평거리를 거리등급(Grade Distance: Gd) 지수<sup>(12)</sup>로 사용하였다. 즉,

$$Gd = \frac{\sum (d_i A_i)}{\sum A_i} \quad (2)$$

여기서  $A_i$ 는 퍼지 귀속도 함수에 의하여 설정된 도형을 분할한  $i$  번째 도형의 면적,  $d_i$ 는  $A_i$  도형의 중심으로부터 좌측경계까지의 수평거리이다.

이 Gd에 대한 설명을 Fig. 1을 통하여 보여주고 있다. 퍼지셀이 우수할수록 그 귀속도 함수가 이루는 도형의 중심은 우측의 경계에 근접하므로 Gd가 클수록 대상은 더 우수한 것으로 평가된다.

### 3. 鋪裝評價 모델

#### 3.1 鋪裝工事의 堅實度 (W)

연성포장 자체의 내력은 공사의 堅實度(Workmanship)를 나타내는 여러가지 성질에 따른다. 일반적으로 부실공사로 이루어진 포장은 운하중 및 기후 변화등 외력에 약하고 조기손상의 발생으로 곧 그 기능이 저하된다. 따라서 많은 도로관리 기관들은 공사의 견실도를 평가하기 위한 기준을 가지고 있다. 공사의 견실도는 여러가지 요소로 평가되며, 이를 W로 나타내면,

$$W = f(w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (3)$$

여기서 W= 포장의 전반적 공사견실도 추정치이

고,  $w_i$ =각각의 견실도 요소를 나타내는 변수이다.

도로기관들이 견실도로 가장 중요시 고려하는 사항은 아스팔트 콘크리트의 다짐, 지반의 支持力, 아스팔트 함량과 골재입도의 현장배합비(Job Mix Formula: JMF)에 대한 만족도와 鋪裝두께라고 할 수 있다. 이 5가지 요소는 鋪裝이 內的으로 외력에 抵抗하여 제 기능을 유지하는데 필요한 요건으로 工事의 堅實度에 좌우되는 것들이다. 따라서 이 5가지를 견실도의 부 평가기준으로 선정하였다.

#### 3.2 鋪裝에 影響을 주는 外力要素 (P)

포장에 작용하는 하중영향은 포장에 가해져 그 상태에 영향을 미치는 일정형태의 외력요소에 의해 발생하는 것이다. 이 하중영향은 여러외력의 조합으로 이루어질 것이다. 포장기능저하의 주 요인은 이 외력영향(External Load Effect)에 의한 것이며, 이를 P로 나타내면 이 외력영향은 여러 외력요소의 함수로 다음과 같이 표현될 것이다.

$$P = f(p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (4)$$

여기서 P=포장에 전반적으로 작용하는 외력의 측정치이고,  $p_i$ =각각의 외력의 요소를 나타내는 변수이다.

鋪裝에 가장 큰 영향을 미치는 외력은 輪荷重이고 다음이 氣候와 시간이라 할 수 있다. 車輪은 鋪裝에 荷重을 가하므로써 鋪裝内部에는 應力이 발생한다. 운하중의 세기가 크면 응력은 커지며 그 반복 횟수가 많아지면 잔류변형의 누적으로 영구변형을 야기한다. 추위는 아스팔트 콘크리트에 脆性破壞를 유발하며, 더위는 塑性變形과 Bleeding을 유발한다. 포장은 설계시 일정기간의 기대수명이 있고 시간에 따라 포장의 질이 저하되며 그 기대수명이 단축된다. 따라서 교통량 등급과 교통량 증가율 그리고 기후와 재령등 4가지가 외력요소의 부 평가기준으로 설정되었다.

#### 3.3 鋪裝의 현재상태 (Q)

어떤시점에서 포장의 상태는 당시 포장의 供用性을 나타내는 지표이며 포장의 잠재성능을 추정하는 기초가 될 것이다. 현재 포장의 供用性은 균열, 파손등 손상의 심각성 정도로 판정되어 질 수 있다. 따라서 포장의 현재의 손상정도를 나타내는 지수를

포장의 현재 상태라고 본 연구에서는 명명하였다. 그러면 현재 포장의 상태는 여러 손상기구들의 함수이며, 이를 Q로 나타낸다면,

$$Q = f(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (5)$$

여기서 Q=포장의 전반적 상태 측정치이고,  $q_i$ =각각의 상태요소(손상기구)를 나타내는 변수이다.

포장의 손상형태는 여러가지가 있으나 그중 포장의 성능에 가장 큰 영향을 주는 주요 손상인 표면의 균열과 Rut(소성변형) 그리고 아스팔트 혼합물의剝離(Stripping)의 측정치로 나타내도록 하였다. 따라서 균열과 Rut 그리고 바리를 현재상태의 보조 기준으로 선정하였다.

### 3.4 포장평가기준의 모델링

위에 언급한 鋪裝의 견실도, 鋪裝에 가해지는 外力 영향, 鋪裝의 현재상태를 공용성 추정치 세가지 주 기준(Main Criteria)으로 정하였다. 각 주기준들은 그에 부수하는 부기준(Subcriteria)으로 구성되어 있으므로 어떤 시점에서 포장의 공용성은 위의 세가지 주 요인에 따르는 함수함수로 다음과 같이 표현될 것이다.

$$C = g(Q, W, P) \quad (6)$$

$$= g\{f(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5), f(p_1, p_2, p_3, p_4), f(q_1, q_2, q_3)\}$$

여기서 C=포장의 어떤 시점에서의 공용성 추정치를 나타내는 값이다.

Fig. 2는 이 세가지 요인과 포장의 공용성과의 관계를 보여주고 있다. 현재의 공용성은 가해진 외력, 현상태와 견실도의 함수이다. 기대 공용성의 추정은 포장 견실도, 기준상태로써의 현재상태 그리고 가해질 외력의 영향을 동시에 고려함으로써 가능할 것이다. 즉 식 6의 우측 항을 적절히 공식화하여 풀면 주어진 포장의 기대 공용성을 얻어낼 수 있을 것이다. 하지만 위의 세항을 동시에 고려할 때 이들이 이루는 函數關係는 模糊하고 數式을 통하여 明確히 표현하기가 쉽지 않다. 이러한 模糊한 현상에 대한 總括的인 분석의 한가지 방법으로 퍼지셀 論理를 적용할 수 있어 본 연구는 퍼지셀 개념을 이용한 모델링을 하여 이에 대한 도해적 解를 얻도록 하였다.

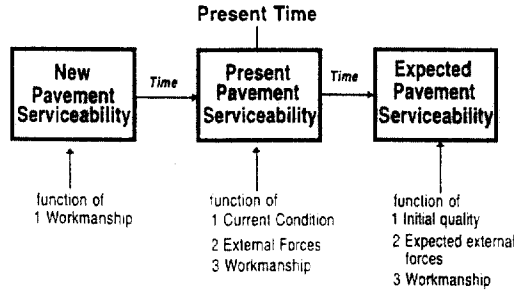


Fig. 2. Relation of Pavement Serviceability and Influential Factors.

\*Condition at Present Time.

### 3.5 평가 척도의 설정

각 주기준과 부기준에 대한 판정기준과 그에 대한 설명을 Table 1에서 보여주고 있다. 제시된 각 항목들의 각 등급에 따른 범위의 설정은 여러 문헌과 저자의 전문지식에 근거한 판단에 의하여 설정되었다.

CBR은 지반(surgrade)의 안정성을 나타내는 지표로 잘 알려져 있어 포장의 장기적인 성능을 추정하는데 중요한 요소이다. 아스팔트 가열혼합물(Hot-mix Asphalt)의 현장다짐은 밀도로 측정된다. 본 연구에서는 이론최대밀도(Maximum Theoretical Density: MTD)에 대한 현장다짐비율규정<sup>(8)</sup>을 적용하여 다짐정도를 평가하였다. 이 규정은 국내에서 사용되고 있는 JMF에 의한 마샬밀도비 규정보다 강화된 규정으로 인정되고 있다.<sup>(8,16)</sup> 다짐비율은 그 혼합물의 이론최대밀도에 대해 품목집단의 현장밀도의 평균치로 나타내어지며 대개 92%를 허용한계로 규정하고 있다.<sup>(8,16)</sup> Table 1의  $W_3, W_4$ 에서 JMF에 대한 표본평균의 편차는 JMF 허용한계로부터 품목집단의 평균이 얼마나 벗어나는가로 계산된다. 이것은 대부분 아스팔트 함량이나 골재입도등의 규정에 사용된다.<sup>(16)</sup> 따라서 아스팔트 함량과 골재중 충전재(#200체를 통과한 석분)를 JMF 항목으로 선정하였다. 표층의 두께는 지점마다 변하는 임의의 변수라 할 수 있다. 포장이 륜하중에 견디기 위하여는 적절한 두께가 필요하다. 따라서 설계 층두께를 얼마나 만족시키는지가 포장성능 평가에 중요한 지수가 된다.

교통량과 교통량 증가계수(TGR)는 매년에 걸쳐 측정될 수 있으며 그 증가계수가 정해진다면 누적

Table 1. Proposed Translation Scale for Fuzzy Overall Rating Input.

Main & Sub-criteria	Rating				
	Excellent (A)	Good (B)	Fair (C)	Poor (D)	Very Poor (E)
<b>Workmanship</b>					
W1:CBR	$X \geq 30$	$30 > X \geq 20$	$20 > X \geq 8$	$8 > X \geq 5$	$5 > X$
W2:Density(% Max.) <sup>1</sup>	$X \geq 94$	$94 > X \geq 93$	$93 > X \geq 92$	$92 > X \geq 89$	$89 > X$
W3:AC JMF Dev. <sup>2</sup>	$X = 0.0$	$0.0 < X \leq 0.17$	$0.17 < X \leq 0.34$	$0.34 < X \leq 0.44$	$0.44 < X$
W4:Filler JMF Dev. <sup>3</sup>	$X = 0.0$	$0.0 < X \leq 0.70$	$0.70 < X \leq 1.35$	$1.36 < X \leq 1.76$	$1.76 < X$
W5:Thickness (%) <sup>4</sup>	$X \geq 100$	$100 > X \geq 95$	$95 > X \geq 90$	$90 > X \geq 80$	$80 > X$
<b>External Forces</b>					
P1:Age(% Design Life)	$X \leq 15$	$15 < X \leq 30$	$30 < X \leq 45$	$45 < X \leq 60$	$60 < X$
P2:Traffic Class <sup>5</sup>	I & II	III	IV	V	VI
P3:Traffic Growth(%) <sup>6</sup>	$X \leq 20$	$20 < X \leq 40$	$40 < X \leq 60$	$60 < X \leq 80$	$80 < X$
P4:Regional Factor	$X \leq 1$	$1 < X \leq 2$	$2 < X \leq 3$	$3 < X \leq 4$	$4 < X$
<b>External Quality</b>					
q1:Stripping <sup>7</sup>	$X = 1.0$	$1.0 < X \leq 1.5$	$1.5 < X \leq 2.0$	$2.0 < X \leq 2.5$	$2.5 < X$
q2:Crack <sup>8</sup>	$X = 1.0$	$1.0 < X \leq 2.0$	$2.0 < X \leq 3.0$	$3.0 < X \leq 4.5$	$4.5 < X$
q3:Rut <sup>8</sup>	$X = 1.0$	$1.0 < X \leq 2.0$	$2.0 < X \leq 3.0$	$3.0 < X \leq 4.5$	$4.5 < X$

<sup>1</sup>  $X = (\text{Average field density/MTD}) \times 100$ .

<sup>2</sup>  $X = \text{Deviation of 3 test average from JMF for AC (\%)} \text{ for surface mixture.}^{(23)}$

<sup>3</sup>  $X = \text{Deviation of 3 test average from JMF for filler (\%)} \text{ for surface mixture.}^{(23)}$

<sup>4</sup>  $X = (\text{Avg. thickness/design thickness}) \times 100$ .

<sup>5</sup> Given by the Asphalt Institute.<sup>(25)</sup>

<sup>6</sup>  $X = 100[(1+r)^n - 1]$ , where, r=average annual growth rate and n=number of year.

<sup>7</sup>  $X = (C+F)/2$ ; value of coarse (C) and fine (F) aggregates stripping.<sup>(5,11)</sup>

<sup>8</sup>  $X = (S+D)/2$ ; value of severity (S) and density (D) of each distress.(Table 2)

증가율은 지수식으로 계산가능하다. 만일 그 증가 계수가 일정하다면 누적량 계산은 Table 1에서 처럼 더 간편하다. 이 누적 증가량이 교통량 증가치로 사용되었다. 연성 포장은 동결융해, 고온, 다습등의 기후변화에 약하다. 이 기후의 심각성을 나타내는 지수로 AASHTO<sup>(1)</sup>의 지역기후계수(Regional Factor: RF)를 사용하였다. 포장은 설계시 일정기간의 기대수명이 있고 시간에 따라 포장의 질이 저하되며 그 기대수명이 단축된다. 도로포장 内の 아스팔트 시멘트는 재령의 증가에 따라 굳어지고<sup>(14)</sup> 아스팔트 콘크리트는 균열에 민감해진다.<sup>(15)</sup> 따라서 재령은 일정한 포장수명 비율로 환산될 수 있다.

박리현상(Stripping)은 다습한 지역에서 매우 심

각한 포장의 손상 형태이다. 이 박리현상은 포장의 혼합물 내부에서 일어나며 골재의 종류와 수분에 지배된다. 박리현상이 생기면 그 포장은 인장강도와 피로 수명의 손실로 곧 질이 급격히 저하된다.<sup>(5,29)</sup> 따라서 가열 혼합물 코어로부터 측정되는 박리의 정도를 본 연구에서 측정치로 사용하였다. 이 측정 등급은 굵은골재(C)와 잔골재(F)의 박리정도의 평균을 구하여 계산되며 그 척도는 Table 2에 제시되었다. 균열과 rut는 승차감을 저하시키고 주행성을 떨어뜨리는 아스팔트 포장외부로 나타나는 매우 치명적인 손상으로 알려져 있다.<sup>(6,25)</sup> 균열은 잘 알려진 손상이고, rut는 바퀴자국(wheel path)을 따라 움푹하게 종방향으로 들어가 주행에 방해로 준다. 이들은

Table 2. Stripping Values of Coarse and Fine Aggregates

Aggregate	Value	Definition
Coarse (C)	1	Less than 10 % stripping
	2	10% - 40% stripping
	3	More than 40% stripping
Fine (F)	1	Less than 10 % stripping
	2	10% - 25% stripping
	3	More than 40% stripping

Table 3. Description of Severity and Density of Crack and Rut<sup>(6)</sup>

Distress	Value				
	1	2	3	4	5
Crack					
S= 폭(cm)	<0.5	0.5-1	1-2	2-3	3<
D= 면적(%)	<10	10-20	20-50	50-80	80<
Rut					
S= 깊이(cm)	<0.5	0.5-1	1-2	3-5	5<
D= 길이(%)	<10	10-20	20-50	50-80	80<

아스팔트 콘크리트의 강도 손실을 가져와 심화되면 포장의 구조적 파괴를 일으킨다.<sup>(6,13,29)</sup> 따라서 이들을 그 측정치에 따라 5등급으로 구분하여 평가하도록 하였으며 Table 3에 주어졌다.

### 3.6 輕重率 지정

위에 언급된 판정기준들은 보는 관점에 따라 그 중요도가 큰 것과 작은 것이 있을 수 있다. 그러므로 퍼지 종합평가는 주 기준과 부 기준에 적절한 경중률을 주어 계산하도록 되어 있다. 예를 들어 한 기준이 여타 기준보다 중요하다고 보면 그것에 높은 경중률을 주고 나머지는 낮은 경중률을 주어 계산할 수 있다. 또는 수집된 data의 신빙성에 따라 경중률을 지정할 수 있다. 만일 수집된 data가 충분한 신빙성이 있다면 높은 경중률을 주지만 data의 수집 과정이 불분명 하다던가 숫자가 적어 그 신뢰도가 낮다면 낮은 경중률을 줄 수 있다.

## 4. 퍼지셀을 이용한 포장평가

### 4.1 퍼지셀의 설정

아스팔트 포장의 성능은 불량상태부터 우수상태까지 여러가지로 구분될 수 있고 이를 어떤 척도로 규정지을 수 있다. 본 연구에서는 이를 정의역 요소  $i$  로 지정하였고, 여기서  $i=1$  부터  $n$  까지 점차적으로 성능이 우수함을 나타내는 정수로 설정하였다. 여기서  $n$  값은 9, 10, 11, 12, 13 등이 고려되었다. 또한 여러 수준의 지지도를 각 정의역 요소마다 연계 고려하여 퍼지셀 설정에 가장 적절한 귀속도함수를 선정하였다.

5 등급의 퍼지셀 A, B, C, D, E를 등급퍼지셀(Rating Fuzzy Set)으로 설정하였다. 여기서 A는 意味上最優秀(Excellent), B는 優秀(Good), C는 良好(Fair), D는 不良(Poor), E는 매우 不良(Very Poor)을 나타낸다. 또한 3등급의 퍼지셀, H, M, L을 중요도를 나타내는 경중퍼지셀(Weight Fuzzy Set)으로 정의하였다. 의미상으로 H는 대단히 중요(Highly Important), M은 중요(Moderately Important), L은 덜 중요(Less Important)함을 나타낸다. 경중퍼지셀의 귀속도함수는 다음과 같다.

$$H = \{0|8, 3.33|9, 6.67|10, 10|11\}$$

$$M = \{0|3, 3.33|4, 6.67|5, 10|6, 6.67|7, 3.33|8, 0|9\}$$

$$L = \{10|1, 6.67|2, 3.33|3, 0|4\}$$

등급퍼지셀의 귀속도함수는 다음과 같다.

$$A = \{0|9, 10|10, 10|11\}$$

$$B = \{0|6, 5|7, 10|8, 5|9, 0|10\}$$

$$C = \{0|3, 3.33|4, 6.67|5, 10|6, 6.67|7, 3.33|8, 0|9\}$$

$$D = \{0|2, 5|3, 10|4, 5|5, 0|6\}$$

$$E = \{10|1, 10|2, 0|3\}$$

이들 퍼지셀을 각각 Fig.3과 4에서 보여주고 있다. 이 퍼지셀들은 앞서 언급한 여러 정의역 요소와, 지지도 중에서 각각의 등급과 경중률 조합에 의한 Gd 값이 가장 적절히 균형을 이루는 삼각 또는 사다리꼴(Triangular or Trapezoidal)로 10을 지지도의 상한치로, 그리고  $n=11$ 로 하여 결정된 것이다.

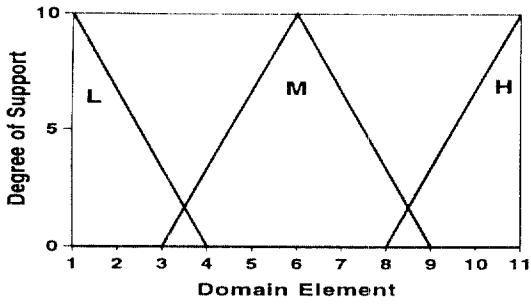


Fig. 3. Fuzzy Sets for Weight H, M and L.

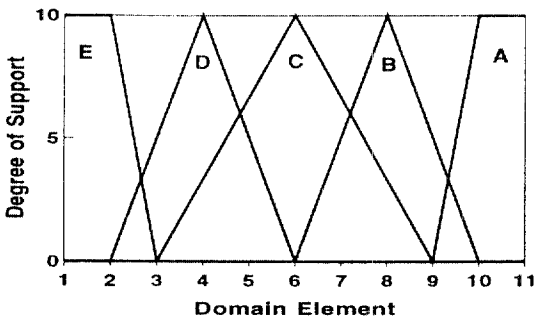


Fig. 4. Fuzzy Sets for Rating A, B, C, D and E.

Table 4. Gd Values from Fuzzy Overall Rating

Rating Weight	A	B	C	D	E
H	9.00	7.44	5.00	3.00	0.78
M	8.08	6.14	5.00	4.20	1.31
L	7.61	5.50	5.07	4.36	1.94

Table 4에서 보여 주듯이 어떤 종합평가에서 이견 얻을 수 있는 최대 Gd 값은 9.00이고 최소값은 0.78이다. 등급 A와 E 사이에서 Gd 값으로 가장 큰 차이는 각각에 최고의 경중률 H를 지정하므로써 얻어졌고, 가장 작은 차이는 최하의 경중률 L을 주므로써 얻어졌다. 이에 대한 계산은 식 1을 이용하여 얻은 퍼지셀에서 식 2를 이용하여 Gd를 구한 것이다. 예를 들어 Table 4의 A와 H의 조합은  $R=A*H/H=[\{10|10, 10|11\}*\{3.33|9, 6.67|10, 10|11\}]/\{3.33|9, 6.67|10, 10|11\}=\{3.33|9, 10|10,$

$10|11\}$ 이며 이에 대한 Gd는 9.00이다.

#### 4.2 Program의 개발

컴퓨터 프로그램은 Fortran 언어를 사용하여 개발하였으며 이를 IBM 호환기종 퍼스널 컴퓨터에서 수행토록 하였다. 이 프로그램은 주어진 평가기준에 따라 화면에서 직접 자료를 입력하고 결과가 출력되도록 하였으며 주 프로그램, 부 프로그램과 Data Block 등으로 이루어졌다.

주 프로그램은 Data 블록에서 퍼지 귀속도함수(앞절에서 설정)의 값들을 읽고 평가할 포장의 입력자료를 화면에서 문답식으로 받아 들인다. 입력항목은 각 주기준의 경중률과 보조기준의 등급및 경중률이며 첫째 주기준의 보조기준에 대한 자료가 자판을 통하여 화면에서 입력되면 부프로그램 SUB-CRT를 불러  $R_j = \sum(R_{sj} * W_{sj}) / \sum W_{sj}$ 를 계산한다. 여기서  $R_{sj}$ 과  $W_{sj}$ 은 보조기준들의 등급과 경중퍼지셀을 나타낸다. 이 과정은 부프로그램 PRODCT(곱셈), SUMM(덧셈), DIVI(나눗셈), REORD(정리)를 통하여 수행되고 그로부터 얻어진 퍼지셀  $R_j$ 의 귀속도함수를 구한다(Fig. 5). 둘째와 세째 주기준에 대하

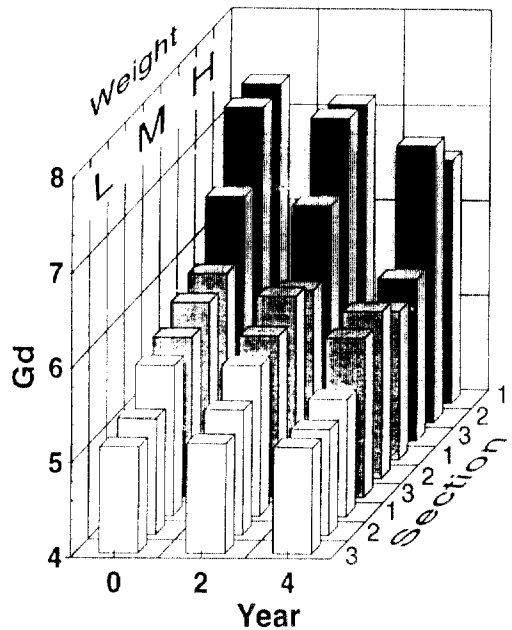


Fig. 5. Gd Change due to Different Wt. for All Main and Subcriteria.

여도 같은 방식으로 각각  $R_2$ 와  $R_3$ 를 구한다. 그리고 주 프로그램은 이 퍼지셀들과 주어진 각 주기준의 경중률을 이용하여 최종 퍼지종합평가 값(식 1)을 계산하고 부 프로그램 GRADE를 호출하여 Gd 값을 구하고 그 값을 화면을 통하여 제시한다.

### 4.3 자료수집 및 평가수행

본 연구에서 개발된 평가기법은 국내외의 적용을 위해 각종 외국 문헌의 기준을 사용했으며 이에 의한 공용성 평가를 국내의 도로에 적용하기 위해 영동고속도로 강원도 일부구간의 자료를 사용하였다. 그 수집된 자료들은 Table 5에, 그것을 Table 1의 척도에 의하여 등급으로 전환한 값들은 Table 6과 같다. 자료는 이 도로의 대표적인 3구간의 상하행선에 대한 것이며 여기서 적용된 구간은 1989년 중반에 덧포장(Overlay)되어 92년말 현재 3년이 조금 넘었다. 각 구간별로 92년말 현재 공용성과 그 시점을 기준으로 2년 후와 4년 후의 공용성을 추정하였다.

개발된 프로그램과 주어진 데이터를 이용하여 모든 주기준과 부기준에 같은 경중률 H, M 또는 L을 주었을 때 그에 따른 Gd 값의 변화를 보았다. 그리고 실제 평가를 위하여 다음과 같이 경중률을 지정하였다. 첫째 주기준에서 밀도는 우수하였고, 아스팔트 함량, 충전재의 측정치들도 모두 규정치를 벗어나지

않았다. CBR 값은 입수치 못하여 입력에서 제외했다. 이 세 구간은 모두 한 가지 배합설계에 준하여 이루어진 것으로 데이터도 구간별의 차이가 없어 평가 비교시 주 기준중 제일 낮은 경중률 L을 주었다. 현재 공용성 평가에서 제 2주기준의 교통중가치는 제외되었다. 92년말 현재 세 구간의 교통량은 IV급으로 환산되었고 2년과 4년 후 V와 VI급으로 변하는 것으로 추정되었다. 둘째 주기준은 포장에 가해지는 하중등이므로 가장 주요시 다루어 H를 주었으며 셋째 주기준은 평가시에 기준이 되는 포장의 상태이므로 중간(M)의 경중률을 부여하였다.

첫째 주기준의 보조기준에 있어서, 포장의 두께를 제외하고는 모두 H를 부여했다. 두께의 자료는 요철을 측정한 소성<sup>(34)</sup>으로부터의 추정치이기 때문에 신빙성이 덜해 M을 부여했다. 둘째 주기준의 보조기준의 경중률은 설계수명과 기후를 제외하고 H를 부여했다. 이 포장의 설계수명은 가정치 10년으로부터 추정한 것이고 지역기후에 따른 RI 값은 AA-SHTO 기준에 의하여 강원도 고지대및 대관령 지역을 추정한 것으로 불확실한 자료이므로 낮은 경중률이 부여되었다. 셋째 주기준의 보조기준중 rut와 균열은 도로공사의 기준으로 얻어진 값, 울, 병, 정을 Table 1의 등급척도에 의하여 전환하였다. 박리는 국내 포장에 있어서 매우 낮은 값을 보이므로 판정시

Table 5. Input Data Collected from a Highway in 1992.

Main Criteria	Sub Criteria	Data
W	CBR	—
	Density	Ratio to MTD 95.5—96.2 (%)
	AC JMF Deviation	Deviation=0 from Specification Limit
	Filler JMF Dev.	Deviation=0 from Specification Limit
P	Thickness	Design Value = 5 cm
	Age	% Design Life = $4/10 \times 100 = 40\%$
	Traffic	Avg. Daily Traffics = 5,516 (trucks + buses, 1992)
	TGR	Avg. = $(-0.8 + 26.8 + 28.4 + 18.1)/4 = 18.1\%$ (1989—1992)
Q	Weather	RI = 2.5 (Estimated)
	Stripping	less than 5%
	Crack	1 구간 = 병, 2 구간 = 울, 3 구간 = 울
	Rut	1 구간 = 병, 2 구간 = 울, 3 구간 = 정

1 구간 = 137—139.25 Km, 2 구간 = 167.5—172 Km, 3 구간 = 188.6—192.0 Km



Table 6. Input Values, Rating, Weight and Result (Gd) of Overall Rating.

Section	Year	Main Criter. (Weight)	Workmanship				External Forces				External Qual			Gd	
			(L)				(H)				(M)				
		Sub-Criter. (Weight)	W1	W2	W3	W4	W5	P1	P2	P3	P4	Q1	Q2		Q3
			(-)	(H)	(H)	(H)	(M)	(H)	(H)	(H)	(M)	(L)	(H)		(H)
1구간	0	Value Rating	-	96.0	0	0	90	35	IV	-	2.5	1.0	3	3	5.92
			-	A	A	A	C	C	C	-	C	A	C	C	
	2	Value Rating	-	96.0	0	0	90	55	V	39.5	2.5	1.0	3	3	5.70
			-	A	A	A	C	D	D	C	C	A	C	C	
	4	Value Rating	-	96.0	0	0	90	75	VI	94.5	2.5	1.0	3	3	4.68
			-	A	A	A	C	E	E	E	C	A	C	C	
2구간	0	Value Rating	-	96.2	0	0	95	35	IV	-	2.5	1.0	2	2	6.41
			-	A	A	A	B	C	C	-	C	A	B	B	
	2	Value Rating	-	96.2	0	0	95	55	V	39.5	2.5	1.0	2	2	5.86
			-	A	A	A	B	D	D	C	C	A	B	B	
	4	Value Rating	-	96.2	0	0	95	75	VI	94.5	2.5	1.0	2	2	5.35
			-	A	A	A	B	E	E	E	C	A	B	B	
3구간	0	Value Rating	-	95.5	0	0	85	35	IV	-	2.5	1.0	3	3.5	5.76
			-	A	A	A	D	C	C	-	C	A	C	D	
	2	Value Rating	-	95.5	0	0	85	55	V	39.5	2.5	1.0	3	3.5	5.45
			-	A	A	A	D	D	D	C	C	A	C	D	
	4	Value Rating	-	95.5	0	0	85	75	VI	94.5	2.5	1.0	3	3.5	4.02
			-	A	A	A	D	E	E	E	C	A	C	D	

중요도가 낮아 경중률 L을 부여하고 나머지는 H를 부여하였다.

#### 4.4 결과 및 고찰

모든 주기준과 부기준에 같은 경중률 H, M 또는 L을 주었을 때 그에 따른 Gd 값의 변화를 Fig. 6에 보여 준다. 그림에서 보듯이 모든 기준에 H가 지정되었을 때 구간별, 년수별로 큰 차이를 보였으나 M과 L에서는 그 차이가 점차 줄어들었다. 또한 H를 지정했을 때 Gd가 M이나 L을 지정했을 때보다 전반적으로 높은 값을 보여 Gd 값이 경중률 지정에 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 그리고 초기(0)에

는 1구간이 2구간과 Gd가 비슷하거나 높았으나 L의 경우를 제외하고 2, 4년 후에는 2구간이 제일 높게 나타났다. 이는 제 2구간의 건설도가 우수한 것에 기인하는 것으로 보여지며, L의 경우 2구간이 낮게 평가된 것은 우수한 건설도에 낮은 경중률이 주어진 때문으로 보여진다.

앞의 4.3 절에 설명한 과정에 따라 각 구간마다 시간의 변화에 따른 공용성 평가를 수행하여 얻어진 Gd 값이 Table 6에 주어졌다. 1구간은 Gd 값이 초기 5.92에서 4년 후 4.68로 1.24 저하되었고, 2구간은 6.42에서 5.35로 1.07, 3구간은 5.75에서 4.02으로 1.73 저하되었다. 이와같은 변화를 퍼지 귀속도 함

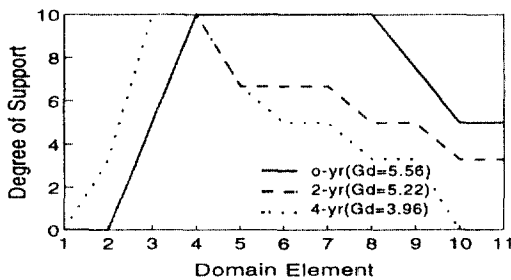
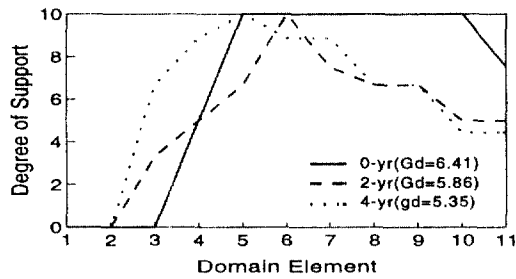
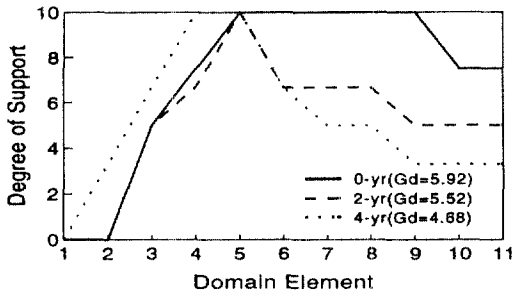


Fig. 6. Change of Fuzzy Membership Functions for 3 Sections by the Time.

Table 7. Example of Standard Serviceability Based on Gd.

Gd 범위	공용성	유지관리 가이드
9.0>Gd≥8.3	아주 좋음	거의 완전한 상태
8.3>Gd≥7.5	매우 좋음	정기적 관리만 필요
7.5>Gd≥6.7	좋음	정기적 관리와 소소한 보수 필요
6.7>Gd≥5.9	약간 좋음	계속적으로 소소한 보수 필요
5.9>Gd≥5.0	보통	부분적 주요 보수 필요
5.0>Gd≥4.0	약간 불량	주요 보수와 부분적 재포장 필요
4.0>Gd≥3.0	불량	얇은 덧씌우기 필요
3.0>Gd≥1.9	매우 불량	전반적 덧씌우기 필요
1.9>Gd≥0.78	아주 불량	완전 재포장 필요

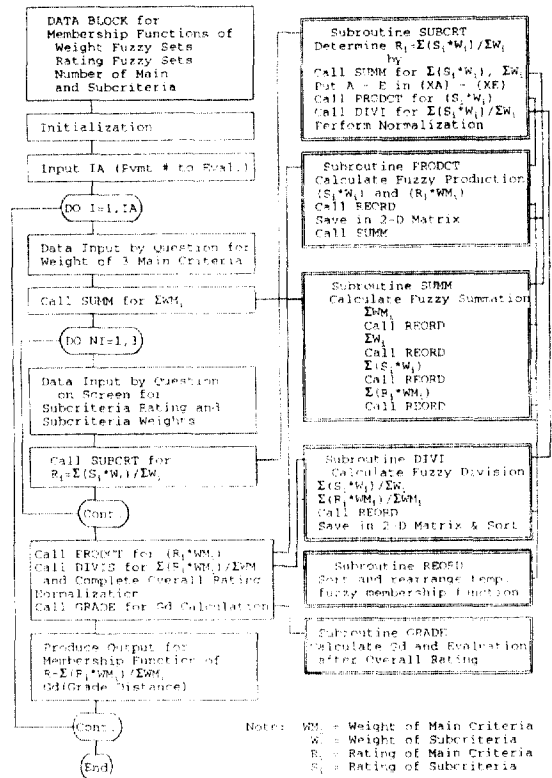


Fig. 7. Flow Chart of Program for Pavement Fuzzy Overall Rating.

수의 변화로 Fig. 7을 통하여 보여주고 있으며 이로부터 각 구간마다 종합평가로 얻어진 퍼지셀이 이루는 도형의 중심이 시간에 따라 좌측으로 이동함을 보여주며 이는 공용성이 점차 저하됨을 나타내는 것임을 알 수 있었다. 특히 건설도가 좋고 현 표면상태가 좋은 2구간보다 건설도가 나쁘고 표면상태도 나쁜 3구간의 Gd가 더 크게 저하되는 것을 Table 6과 Fig. 7에서 알 수 있었다. 따라서 본 관정에서는 같은 교통량이나 기후조건 하에서도 포장의 공용성 변화에 건설도와 기준시점에서의 표면상태가 고려되어 판정되는 점을 알 수 있었다. 이외에도 교통량이 다른 도로, 다른 기후지역의 도로, 보다 많은 자료의 수집등을 통하여 본 연구에서 제시된 방법을 보다 다양하게 공용성 추정에 사용할 수 있을 것이다.

일반적인 공용성 추정에는 도로공사등 여러 기구의 규정을 통하여 수행할 수 있다. 하지만 기존의 이

방법들은 포장표면에 나타난 현 상태에 대한 공용성 판정방법일 뿐 포장구조의 건설도나 교통량을 고려한 미래의 공용성 추정방법은 아니다. 예를 들어 상당히 포괄적인 방법으로 인정되는 Ontario 방법에서는 종, 횡균열 및 Rut 등 표면에 나타난 여러 결함을 평가하여 이를 100점 만점으로 점수화하여 현재 얻어진 점수에 따라 앞으로의 유지관리방안을 제시하고 있다. 만일 어떤 구간에서 평가된 점수가 50-65점이면 그 조치는 "3년 내에 표면처리 필요함"과 같이 되어 있다. 하지만 이는 기존 포장이 받게 될 교통량의 차이에 따른 영향을 고려치 않았으며, 또한 현재 같은 점수로 평가된 포장이라도 포장 자체의 건설도에 따라 미래의 상태가 차이가 난다는 점을 고려치 않고 있다. 하지만 본 연구는 포장의 현 상태, 향후의 교통량과 포장의 건설도를 고려하여 미래의 공용성을 추정토록 하는 방안을 제시하고 있다. 따라서 이 방법에서 얻어진 결과를 상기 방법과 직접 비교하기는 어려우며 여기서 추정된 미래 공용성 값과 실제상태의 비교는 시간을 가지고 향후 연구하여야 할 중요한 과제이다.

판정결과를 보다 이해하기 쉽게 이용하기 위하여는 Gd 값을 공용성에 대한 절대적인 수치로 사용하기 보다는 여러 구간의 판정시 구간별 상대비교의 지수로 사용하는 것이 좋을 것이다. 그리고 만일 어떤 도로에 기준이 되는 포장구간(예를 들어 시험포장)과의 상대적 비교수치로써 Gd를 사용한다면 그 기준포장의 공용성 수준에 따라 일례로 Table 7과 같이 공용성 수준표를 만들 수도 있을 것이다. 그렇게 되면 그 도로에 한하여 상대적 비교를 통하여 Gd가 포장공용성 수준의 판정에 효과적인 기준이 될 것이다. 하지만 이러한 기준을 개발하기 위하여는 공용성 지수로써 Gd 값과 실제 표면의 상태간의 많은 상관관계의 연구가 수행되어야 할 것이며 그것은 상당한 시간을 요하는 연구가 될 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 논문은 퍼지론리를 포장 평가에 응용하고 이를 PC프로그램을 이용하여 수행토록 하기 위한 연구로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

우선 퍼지 종합평가로 여러 등급의 입력자료를

통합하여 여러 조건 하의 포장의 공용성 예측을 위한 간단한 추정치 (Gd)를 얻어낼 수 있었다. 또한 평가예에서 보여 주었듯이 같은 외력영향 하에서 재령과 교통량증가에 따른 공용성의 변화를 가늠할 수 있었고 건설도와 현상태의 차이가 공용성 추정에 반영될 수 있음을 보여 주었다. 그러므로 포장의 공용성 추정에 퍼지론리가 잘 이용될 수 있음을 알 수 있었고 이 방법으로 모호한 구어적 표현보다 합리적으로 공용성을 나타낼 수 있게 되었다. 또한 이 방법은 기존의 알려진 몇몇 방법이 단순히 현재 공용성을 판정하는데 비하여 장래의 추정치를 제시하는 잇점이 있다. 그리고 이 추정치는 향후 연구를 통하여 시범구간 등의 판정을 통한 Gd와 공용성과의 상대비교 기준이 확립되면 그 도로에 대하여 Gd가 포장공용성 수준의 판정에 효과적인 기준이 될 것으로 사료된다.

## 辭 謝

본 논문은 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1986.
2. Brown, C.B., "A Fuzzy Safety Measure", *J. of Eng. Mechanics*, ASCE, 105 (5), 1979.
3. Brown, C.B., "The Merging of Fuzzy and Crisp Information", *J. of Eng. Mechanics*, ASCE, 106 (1), 1980.
4. Brown, C.B. and Yao, J.T.P., "Fuzzy Sets and Structural Engineering", *J. of Structural Eng.*, ASCE, 109 (5), 1983.
5. Busching, H.W., Burati, Jr.J.L. and Amirghanian, S.N., "An Investigation of Stripping in Asphalt Concrete in South Carolina", *Report No. FHWA-SC-86-02*, Clemson University, Clemson, SC, June, 1986.
6. Chong, G.J., Phang, W.A. and Wrong, G.A., *Manual for Condition Rating of Flexible Pavements*, The Research & Development Branch, Ontario Minis-

- try of Transportation and Communications, Ontario, 1982.
7. Hadipriono, F.C., "Fuzzy Set Concepts for Evaluating Performance of Constructed Facilities", *J. of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 2 (4), 1988.
  8. Hughes, C.S., "A Density Specification with Pay Factors", *Proceedings, AAPT*, Vol. 52, 1983.
  9. Juang, C.H. and Kalidindi, S.N., "Development and Implementation of A Fuzzy System for Tender Evaluation on Microcomputer", *NAFIPS Proceedings* 1987.
  10. Kam, T.Y. and Brown, C.B., "Updating Parameters with Fuzzy Entropies", *J. of Eng. Mechanics*, ASCE, 109 (6), 1983.
  11. Kim, K.W. and Amirkhani, S.N., "Evaluation of Effectiveness of Anti-stripping Additives Using Fuzzy Set Procedure", TRR 1323, TRB, Washington, D.C., 1991, pp. 112-122.
  12. Kim, K.W., Amirkhani, S.N. and Lee, B.H., "A Qualitative Evaluation of Asphalt Pavement Condition Based on Fuzzy Set Concept", *Proceedings, the 7th REAAA Conference*, Singapore, June, 1992.
  13. Kim, K.W. and Burati, J.L., "Probabilistic Approach to Evaluating Critical Tensile Strength for Bituminous Surface Course", TRR 1171, TRB, Washington, D.C., 1988, pp. 131-138.
  14. Kim, K.W. and Burati, J.L., "Use of GPC Chromatogram to Characterize Aged Asphalt Cements", *J. of Materials in Civil Eng.*, ASCE, 5 (1), Feb., 1993.
  15. Kim, K.W., Burati, J.L. and Amirkhani, S.N., "Relation of HP-GPC Profile with Mechanical Properties of AC Mixtures", In-press, *J. of Materials in Civil Eng.*, ASCE, 1993.
  16. Mirchandani, H.C. and Burati, J.L., "Effect of Testing Variability on Contractor Payment for Asphalt Concrete Pavements", *Eng. Report*, Civil Eng. Dept., Clemson University, Clemson, SC, 1987.
  17. Mullarkey, P.W. and Fenves, S.J., "Fuzzy Logic in a Geotechnical Knowledge Based System: CONE", *Proceedings NSF Workshop on CE Application of Fuzzy Sets*, Purdue University, W. Lafayette, IN, 1987.
  18. Munro, J., "Uncertainty and Fuzziness in Engineering Decision Making", *Proceedings of the 1st Canadian Seminar on Systems Theory for the Civil Engineering*, Calgary, Alberta, Canada, 1979, pp. 18-19.
  19. Nguyen, V.U., "Tender Evaluation by Fuzzy Set", *J. of Construction Eng. and Management*, ASCE, 111 (3), 1985.
  20. Phang, W.A., "Pavement Condition Ratings and Rehabilitation Needs", TRR 700, TRB, Washington, D.C., 1979.
  21. Schmucker, K.J., *Fuzzy Sets, Natural Language Computations, and Risk Analysis*, Computer Science Press, Rockville, MD, 1984.
  22. Shiraiishi, N and Furuta, H., "Reliability Based on Fuzzy Probability", *J. of Eng. Mechanics*, ASCE, 109 (6), 1983.
  23. South Carolina Department of Highways and Public Transportation, "Control and Acceptance of Hot Laid Asphalt Mixes by Statistical Methods", Rev. 6-12-85, Standard Specifications, Columbia, SC, 1985.
  24. The Asphalt Institute, A Pavement Rating System for Low-Volume Asphalt Loads, Information Series No. 169 (IS-169), 1977.
  25. The Asphalt Institute, Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation, MS-17, 1983.
  26. Yeh, Y.C., Hsu, D.S. and Kuo, Y.H., "Expert System for Diagnosing Damage of Prestressed Concrete Pile", *J. of Construction Eng. and Management*, ASCE, 117 (1), 1991.
  27. Zadeh, L., "Fuzzy Sets", *Information and Control*, Vol. 8, 1965.
  28. Zadeh, L., "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex System and Decision Processes", Institute of Electrical and Electronics Engineers Transaction on System, Man and Cybernetics, Vol. SMC-3, 1, 1973.
  29. 金光宇, "Correlation between Mixture Distresses and Strength of Bituminous Concretes", 韓國農工學會誌, 제 32권 영문판, 1990, pp. 67-73.
  30. 金光宇, 朴濟善, "模糊集合 論理에 의한 延性鋪裝의 評價技法 提示", 大韓土木學會論文集, 11 (1), 1991.
  31. 金光宇, "PC에서 퍼지셀을 이용한 아스팔트 포장의 기능수행 가능성 추정", 학술진흥재단 연구보고서, 1993.
  32. 이승열, "Fuzzy 집합론을 이용한 칠근콘크리트보의 최적설계", 연세대학교 대학원 토목공학과, 석사학위논문, 1991.
  33. 조원신, 박기태, 김상효, 황학주, "퍼지를 이용한 교량 안전도 평가의 보정계수 산정", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 1992. 10, pp. 240-244.
  34. 한국도로공사, "고속도로 유지관리요령", 1985, pp. 43-46.

(接受: 1993. 4. 15)