

## 사면관리를 위한 재원의 투자 우선 순위 평가

### Determining the Priority of Investment for Remedial Works of Slopes

김 상 규<sup>1)</sup>, Sang-Kyu Kim, 류 지 협<sup>2)</sup>, Chi-Hyob Ryu, 구 호 분<sup>3)</sup>, Ho-Bon Koo, 정 하 익<sup>3)</sup>, Ha-Ik Chung, 윤 수 호<sup>3)</sup> Soo-Ho Yoon

<sup>1)</sup> 동부산대학, 학장, President, Dongpusan College

<sup>2)</sup> 한려대학교, 토목공학과, 전임강사, Senior Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Hanlyo University

<sup>3)</sup> 한국건설기술연구원, 지반연구실, 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS :** The program ESRAS Ver 0.5 that can assess the risk of slopes by means of fuzzy inference is developed in this paper. The results of assessment involve the degree of stability of slopes, the possible travel distance of the soil mass being failed, and anticipated loss of life and properties. With this program, vulnerable slopes can be managed most effectively and the fuzzy inference is used to express quantitatively the judgement of an expert and the uncertainty of slope stability. The fuzzy rule base is composed of an evaluation list for slope stability together with the experience of an expert.

This program has been examined for 88 slopes which have been failed or shown a possibility of failure. With this examination, the standards to assess the stability of slopes can be presented and it is proven that this is particularly useful in determining the priority of investment for remedial works of slopes

**Key Words :** Risk assessment, Fuzzy inference, Slope stability, Program, Expert

## 1. 서 론

우리 나라에서는 강우시 자연사면이 갑자기 붕괴되는 산사태로 인하여 매년 전국 각 지방에서 많은 인적, 물적 피해를 초래하고 있다. 특히, 최근에는 인구의 도시집중화와 이에 따른 국토개발의 영향으로 산을 절취하여 도로를 건설하거나 축대를 쌓아 집을 짓는 등 자연지형을 끊임없이 변경시켜 왔다. 이에 따라 도로의 절취사면이나 도심지의 축대에서 붕괴사고가 빈번히 발생하고 있으며 이러한 붕괴사고는 자연사면에서 발생하는 산사태에 비하여 인적, 물적 관점에서 훨씬 심각한 피해를 주고 있다. 따라서 국가차원의 사면재해 경감을 위한 노력이 요구되고 있으며 특히, 사면재해의 발생 후 복구를 위한 사방공사보다는 미리 사면붕괴가 예측되는 지역에 대한 위험도를 작성하여 적절한 대책공법을 통한 안정성의 확보 노력이 매우 중요하다 하겠다.

본 연구에서는 사면재해의 발생시 큰 피해를 입을 수 있는 도심지와 도로의 사면에 대한 안정성을 확보하고 피해를 감소시키기 위하여 사면의 위험성(risk)을 평가할 수 있는 프로그램(ESRAS Ver 0.5)을 개발하였다. 위험성 평가에는 사면의 안전성을 나타내는 건전도와 파괴된 토체의 이동거리를 평가하는 파급도 및 사면의 파괴시 예상되는 최대의 인적, 물적 손실이 포함되었다. 또한 전문가의 정성적인 판단능력을 프로그램에 포함시키기 위하여 퍼지추론(fuzzy inference)을 사용하여 개발되었으며 퍼지룰베이

스(fuzzy rule base)을 구성하기 위하여 사면의 현장조사 결과와 국내외에서 사용되는 사면의 안정성 평가표를 이용하였다. 프로그램에는 전국에 산재한 파괴가 발생한 사면과 파괴가 우려되는 사면 88개의 현장조사 결과가 적용되어 사면의 안전성을 평가하는 기준이 되는 건전도의 값이 제안되었고 건전도에 파급도, 손실액을 곱하여 각 사면의 위험성을 평가하였다. 또한 이를 근거로 사면의 보강대책을 위한 재원의 투자 우선 순위를 결정할 수 있었다.

## 2. 사면재해의 예지 기술

사면재해로 인한 피해를 경감하기 위하여 연구자들은 사면재해를 발생시키는 주요 인자와 재해발생과의 관계를 분석하여 예, 경보 기준으로 사용하여 왔다. 또한 미리 사면의 안정성 평가기준을 경험적, 통계적으로 작성하여 각 나라마다 사면재해에 취약한 지역을 선정하는 사면재해 위험도를 마련하여 재해에 대응하여 왔다. 우리 나라에서는 산림청, 건설부, 국방부 등에서 사면의 안전성 평가기준을 작성하여 사용하고 있으며 김(1994)은 과거의 강우와 사면재해 발생자료를 분석하여 표 1과 같은 사면재해의 예, 경보 기준을 제안하였다.

표 1. 사면재해의 예, 경보를 위한 기준

	사면재해 주의보	사면재해 경보
2일 연속강우량(mm)	100	200
일강우량(mm)	80	140
최대시우량(mm)	15	30

## 3. 사면의 위험도(risk) 평가

사면재해로 인한 피해를 경감하기 위하여 재해의 예, 경보에 못지 않게 중요한 사항이 미리 사면의 위험도를 평가하는 것이다. 본 연구에서는 사면붕괴의 발생시 그 피해정도를 평가하기 위하여 식 (1)과 같이 사면의 위험성을 결정하였으며 건전도, 파급도, 최대 손실액 등이 포함되었다.

$$\text{Risk} = \text{건전도}(P_f) \times \text{파급도} \times (\text{명목})\text{손실액} \quad (1)$$

여기서, Risk = 사면의 위험도, 건전도( $P_f$ ) = 사면의 안정성을 확률로 표현

파급도 = 사면파괴시 그 피해의 정도

손실액 = 사면파괴시 예상되는 최대 피해액

사면의 건전도 평가는 사면의 안정에 영향을 미치는 항목에 가중치를 부여하여 계산할 수 있다. 또한 항목에서 고려할 수 없는 지반재료와 배수에 대한 보강공법의 고려와 사면내 사질층, 연약지반의 존재와 같은 특수한 경우를 고려하기 위하여 표 2와 같은 보강할인지수, 극한할증지수를 사용하였다. 표 3은 건전도를 계산하기 위하여 선정한 항목을 나타낸다.

표 2. 보강할인지수와 극한할증지수의 값의 변화

		심 층	표 층
보강할인지수	지반보호공	$0 \leq \alpha_1 \leq 1.0$	$0.5 \leq \alpha_2 \leq 1.0$
	배수보호공	$0 \leq \beta_1 \leq 1.0$	$0.5 \leq \beta_2 \leq 1.0$
극한할증지수	사질층, 연약층	$1.0 \leq \gamma \leq 2.0$	
	집중강우, 지진	$1.0 \leq \gamma \leq 2.0$	

표 3. 사면의 건전도 평가를 위한 항목 배정

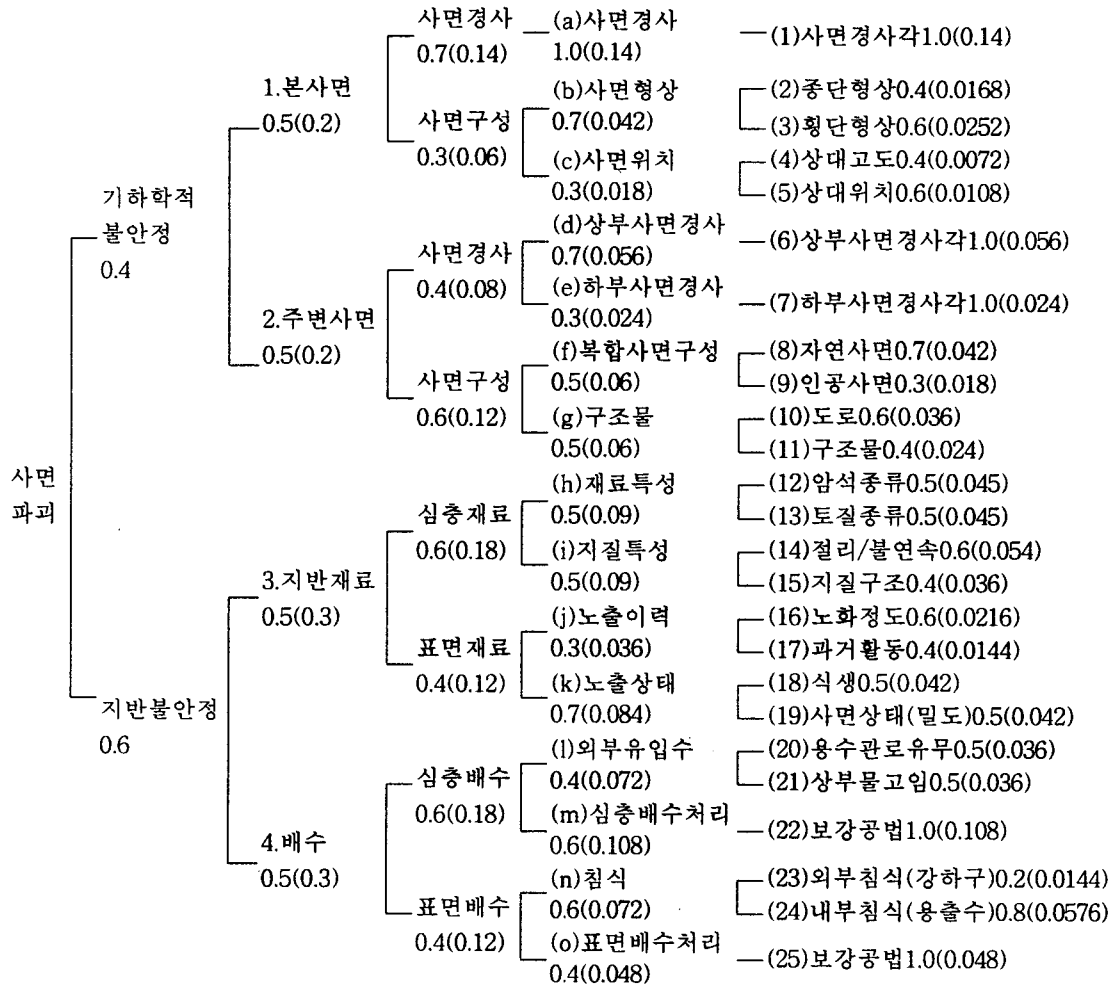


표 2에서 지수  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 보호공법이 심층공법으로만 이루어진 경우는  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ 을 사용하고 표층공법으로 보강된 경우는  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$ 을 사용하며, 심층공법과 표층공법의 두가지 공법이 병행된 경우는 심층공법의 지수  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ 을 사용한다. 극한할증지수  $\gamma$ 은 영향정도에 따라 1.0~2.0의 범위를 갖는다.

보강할인과 극한할증 지수를 고려하면 사면의 건전도는 1.본사면, 2.주변사면, 3.지반재료, 4.배수의 항목에 대하여 비보강사면과 보강사면의 경우 식 (2)과 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{비보강사면 건전도} = \sum\{1 + 2 + \gamma(3 + 4)\} \quad (2)$$

$$\text{보강사면 건전도} = \sum\{1 + 2 + \gamma(\alpha 3 + \beta 4)\} \quad (3)$$

여기서, 건전도 = 사면의 안정성을 표현  
 $\alpha$  = 지반보강지수,  $\beta$  = 배수보강지수  
 $\gamma$  = 극한할증지수

사면재해는 파괴의 발생시 그 파급효과에 의하여 피해의 정도가 영향을 받는다. 특히, 사면의 상부에서 재해가 발생하면 토괴와 암석이 토석류의 형태로 발전하여 흙입자와 물이 섞인 하나의 점성체와 같이 이동한다. 따라서 토석류가 어느정도까지 흘러내리느냐가 사면재해로 인하여 입는 피해의 범위를 예측하는데 매우 중요하다. 본 연구에서는 토괴의 파급효과를 파급도라 정의하고 식 (4)와 같이 계산하였다. 토괴의 이동은 사면높

이의 2배의 거리까지 이동되어 구조물에 영향을 미치는 것으로 간주하였다. 간격 D가 2P 보다 크면 파급효과는 0이고 D가 0이면 파급효과는 1로 계산된다.

$$\text{파급도} = 1 - \frac{D}{2P} \quad (4)$$

여기서, 파급도 = 토피의 파급효과

D = 사면의 하부에서 구조물까지의 거리

P = 사면길이(L) × sin(α) = 사면높이(H)

사면의 안정성과 더불어 중요한 것은 재해의 발생시 예상되는 피해액을 산정하는 것이다. 이는 도심지와 산지의 사면을 대상으로 고려하면 재해의 발생시 산지의 사면보다 도심지의 사면의 파괴로 인하여 많은 피해를 입을 수 있기 때문이다. 재해의 발생으로 예상되는 손실은 인명손실과 재산손실로 나눌 수 있다. 또한 사면재해도 홍수재해의 한 부분으로 생각할 수 있으므로 홍수로 인한 재해시 고려되는 항목을 고려하면 1.이재민, 2.인명, 3.침수면적, 4.건물, 5.선박, 6.농경지, 7.농작물, 8.공공시설, 9.기타 등 9가지의 항목으로 분류할 수 있다. 이들 항목은 다시 1.인명손실, 2.사유재산, 3.공공시설 등으로 나눌 수 있으며 이들 각 항목에 대한 명목금액을 계산하여 최대 피해액을 산출한다. 학교, 군인막사, 병원, 집단주거시설의 피해규모는 안에 드는 인원에 대하여 파급도를 계산하여 파급도 만큼의 %을 사망, 실종으로 예상하고 그 외의 %을 부상으로 산정한다.

#### 4. 사면의 위험도 평가를 위한 프로그램 개발

사면의 위험성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 사면의 건전도, 파급도, 손실액을 결정하여 사용하였다. 또한 전문가의 정성적인 판단능력을 정량적으로 표현할 수 있는 퍼지집합을 이용하여 사면의 건전도를 결정하였고 파급도와 손실액을 포함하는 퍼지 전문가 시스템을 구성하여 프로그램(ESRAS Ver 0.5)을 개발하였다.

전문가 시스템은 대화식 컴퓨터 프로그램으로 최근 몇 년 사이에 다양한 분야에 적용되고 있는 새로운 CAE(computer aided engineering) 분야이다. 컴퓨터 프로그램 자체가 마치 사람처럼 어떤 분야에 대한 정보를 인식하여 질문을 받으면 스스로 추론하여 답을 주는 시스템으로 기존의 컴퓨터 프로그램이 할 수 있었던 역할보다 한 단계 향상된 프로그램이다. 따라서 경험적이고 불확실성을 많이 내포하는 지반공학 분야의 문제 해결을 위하여 전문가 시스템의 적용은 매우 적절하며 앞으로도 계속해서 매우 폭넓게 적용할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 전문가 시스템은 지식베이스, 추론기관, 지식획득기능, 설명기능, 사용자인터페이스, 전후관계 등으로 구성되어 있다. 이 중에서 지식베이스와 추론기관이 시스템의 핵을 이루고 있으며 사용자 인터페이스로 입력된 사용자의 명령에 대해서 전문지식을 이용한 추론과정을 통해 답을 출력하게 된다.

##### 4.1 퍼지이론

퍼지이론이란 불분명한 수량적 정보를 다루는 수학적 기법의 하나로 인간의 사고나 판단의 애매모호함을 다루기 위하여 1965년 미국 University of California, Berkely의 L. Zadeh 교수에 의해서 제안되었다. 퍼지시스템으로 모델링이 되는 분야는 기본적으로 수학적 모델링이 불가능하거나 모델링이 가능하더라도 관련 변수가 많고 복잡하여 적절한 시스템 모델링이 불가능한 경우가 적절하다. 따라서 주관적이고 모호한 언어표현을 사용하는 인간의 의사결정은 퍼지집합으로 잘 표현될 수 있다. 퍼지시스템은 언어적인 알고리즘(linguistic algorithm)의 도출에 다소 어려움이 있다는 점을 제외하고는 구성이 쉽기 때문에 학문적인 이론 연구보다는 실용화에 대한 비중이 크다. 일반적으로 과학의 계산범위는 이분법적으로 “예” 또는 “아니오”, 논리적으로 “참” 또는 “거짓”, 집합의 경우는 원소가 집합에 속하는가 속하지 않는가를 표현하며 컴퓨터상에서는 “0” 또는 “1” 중에서 한 값만을 갖는 명확한 계산영역을 가졌

다. 그러나 인간의 의사결정은 객관적이고 명확한 것이 아닌 주관적이고 모호한 언어표현을 사용하기 때문에 사건, 현상, 명제들에 대한 의미가 불명확하고 애매하게 나타나는 경우가 많다. 이러한 것을 취급하기 위해 제안된 개념이 퍼지집합이다.

퍼지집합은 한 개의 원소  $x$ 가 주어진 집합  $A$ 에 포함되지 포함되지 않는지의 구분이 모호한 것을 다룰 수 있는 새로운 개념의 집합이다. 퍼지집합은 정성적인 모호한 표현에 대한 정도를 정량적으로 나타내기 위해서 멤버십 함수(membership function)를 사용한다.  $X$ 를 전체집합(universal set)이라고 하고  $X$ 의 원소  $x$ 가 퍼지집합  $A$ 에 속하는 정도를 나타내는 멤버십 함수  $\mu_A(x)$ 는 보통 식 (5)와 같은 형태로 정의된다.

$$\mu_A(x) : X \quad [ 0, 1 ] \quad (5)$$

따라서 멤버십 함수는 a grade of membership, degree of membership이라고도 하고 구간  $[0, 1]$ 사이의 양의 실수 값을 갖는다. 그림 1은 어린사람에 대한 멤버십 함수를 나타낸다.

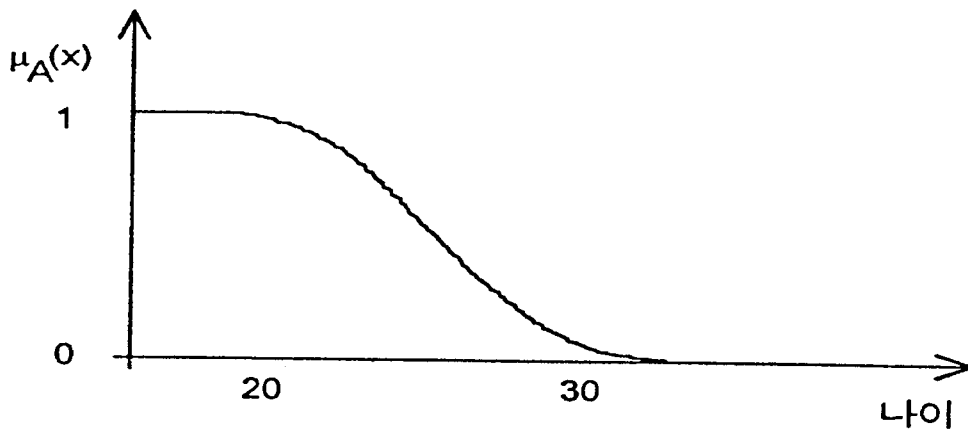


그림 1. 퍼지집합 “어린사람”에 대한 멤버십 함수

## 4.2 퍼지 전문가 시스템

전문가 시스템은 목적에 따라 지식베이스와 추론기관에 다른 이론을 사용할 수 있으며 본 연구에서는 퍼지 이론을 사용하였다. 퍼지전문가 시스템은 그림 2과 같이 개략적인 구성을 갖으며 퍼지룰베이스(fuzzy rule-base)와 퍼지 추론기관(fuzzy inference engine)의 두가지 주요 요소를 기본으로 기존의 전문가시스템의 전 처리와 후 처리 기능을 퍼지화장치(fuzzifier)와 비퍼지화장치(defuzzifier)가 담당한다.

퍼지 전문가 시스템은 기존의 전문가 시스템과 유사한 구조를 가지고 있고 기존의 전문가 시스템이 2진 논리에 기초하여 rule에 정의된 입력값과 출력값의 경우만 처리할 수 있는 것에 대하여 퍼지 전문가 시스템은 rule에 근사한 입력값에 대하여 근사한 추론 결과를 낼 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서 다루는 사

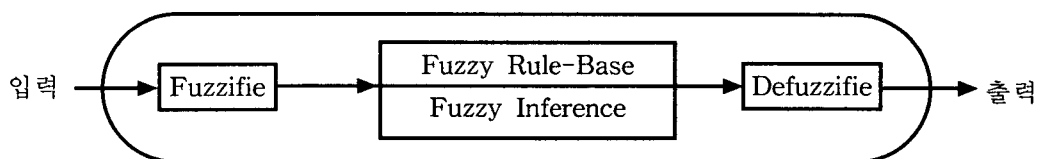


그림 2. 퍼지 전문가 시스템의 개념도

면의 안전성 평가에 사용되는 항목이 정성적인 판단을 요하는 경우가 많으므로 안정성 평가에 퍼지이론을 이용하면 전문가 시스템의 장점인 전문가의 경험, 지식처리를 구현하면서 좀 더 불확실성에 대한 처리효율이 좋은 시스템을 개발할 수 있다.

퍼지 전문가 시스템의 퍼지화장치는 입력되는 crisp한 수치적인 변수값을 퍼지집합변수로 변환시키는 기능을 한다. 본 연구에서는 주어진 x에 대하여 멤버십 함수를 삼각형으로 정의하는 방법을 사용하였다. 전문가 시스템에서 가장 중요한 요소중 하나인 퍼지룰베이스는 IF/THEN 룰로 구성하였다. 이러한 퍼지룰베이스에 기초하여 추론기관은 입력되는 변수들의 퍼지 멤버십 함수값에 대하여 각각의 룰에 대한 추론을 하게 되는데 본 연구에서는 각 룰에 대하여 전건부(antecedent statement)의 최소 멤버십 함수값을 후건부(consequent statement)의 멤버십 함수값으로 결정하는 최소연산규칙인 Mamdani의 추론방법(max · min composition)을 사용하였다. 또한 퍼지추론의 결과를 비퍼지화된 수치적인 출력값으로 바꿔주는 비퍼지화장치는 일반적으로 가장 많이 사용되는 무게중심법을 사용하였다.

#### 4.2.1 퍼지룰베이스의 구성을 위한 지식의 획득

본 연구에서는 현장조사 data 가 많지 않은 관계로 사면의 건전도 평가를 위한 항목의 선택 등 지식을 획득하는데 기존의 국내외에서 사용되는 평가기준과 전문가의 경험이 적극 활용되었다. 얻어진 지식은 표 3와 같으며 퍼지룰베이스의 작성에 사용되었다. 전문가 시스템에서 가장 중요한 부분이 지식베이스로 이 지식베이스의 범위와 깊이는 시스템 개발자가 계속적으로 확장시키고 개선할 필요가 있다. 특히, 추론기관에 학습기능을 부여하면 얻는 data에 따라 계속적으로 시스템을 새로운 버전으로 만들 수 있다.

#### 4.2.2 퍼지 전문가 시스템의 구성

본 연구에서 개발된 전문가 시스템은 그림 3와 같은 구성으로 만들어졌다. 본 전문가시스템은 퍼지룰베이스를 이루는 부분이 4개의 그룹, 즉, 본사면, 주변사면, 지반재료, 배수 등으로 구성되었다는 특징이 있다. 데이터 입력은 직접입력과 파일입력이 가능하도록 하였으며 추론결과도 화면출력과 파일출력이 가능하도록 구성되었다. 각 항목은 그림 4와 같은 퍼지집합의 멤버십 함수로 입력되었다.

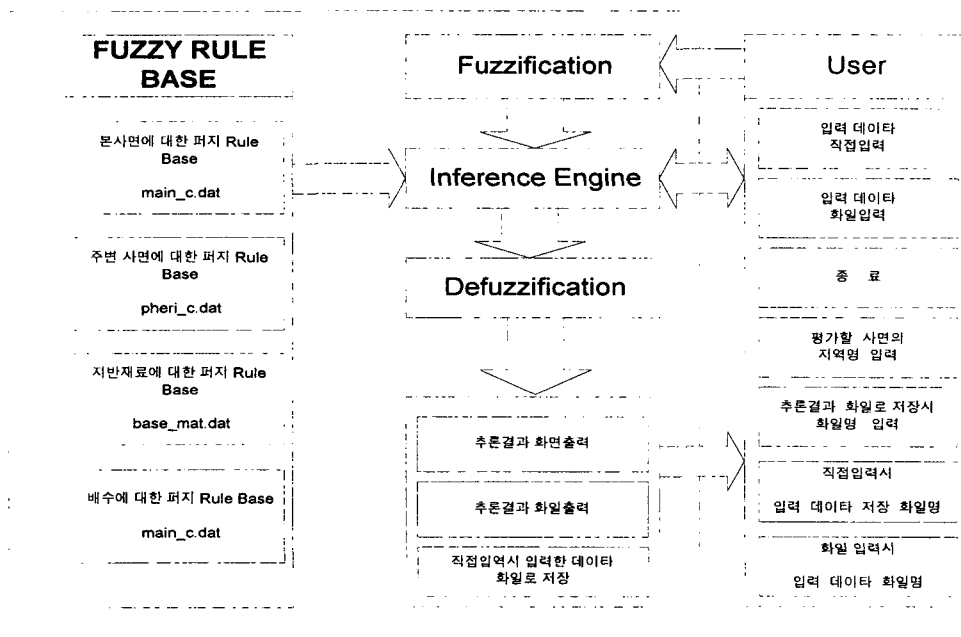


그림 3. 사면의 위험도 평가 전문가 시스템의 구성도

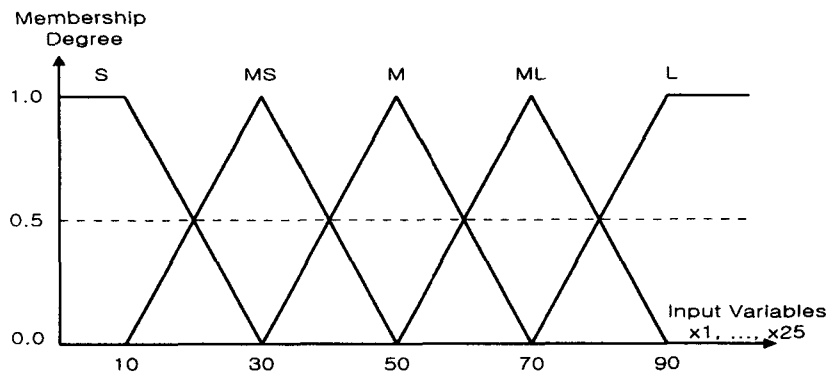


그림 4. 추론에 사용된 5점 척도의 퍼지집합의 멤버십함수

### 4.3 현장조사 data의 적용성 평가

본 연구에서 개발된 전문가시스템의 적용성을 평가하기 위하여 현장조사 data를 이용하여 시스템의 적용성을 알아보았다. 샘플은 1997년 8월 집중호우에 의하여 많은 피해를 입은 경기북부지역의 붕괴 및 붕괴우려가 매우 큰 사면 41개소와 강원도 일대의 도로 절개사면 47개소를 선정하였다. 사면에 대해서는 각 25항목에 대하여 정리하였으며 붕괴시 예상되는 피해에 대한 명목금액과 인명손실을 고려하였다. 현장적용 결과는 그림 5와 같이 나타났으며 그래프는 계산된 건전도의 분포를 나타낸다. 해석 결과 대체로 경기북부지역 사면의 불안정성이 도로 절개사면보다 더 큰값을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 실제 현장조사 결과와 일치하는 것으로 경기북부지역에서 붕괴된 사면이 많이 조사되었다. 계산된 건전도값의 분포로 사면의 안정성의 정도를 나타내는 기준을 제안할 수 있었다. 즉, 사면의 안정성을 나타내는 건전도가 0.50 이상인 경우는 사면재해가 발생할 확률이 매우 높은 사면으로 분류되며 또한 건전도가 0.35 보다 작은 경우는 안전한 사면으로 간주할 수 있다. 건전도가 결정되면 파급도와 손실액을 고려하여 사면의 위험도를 평가할 수 있다. 또한 이를 근거로 사면의 보강을 위한 재원의 투자 우선 순위를 결정할 수 있다.

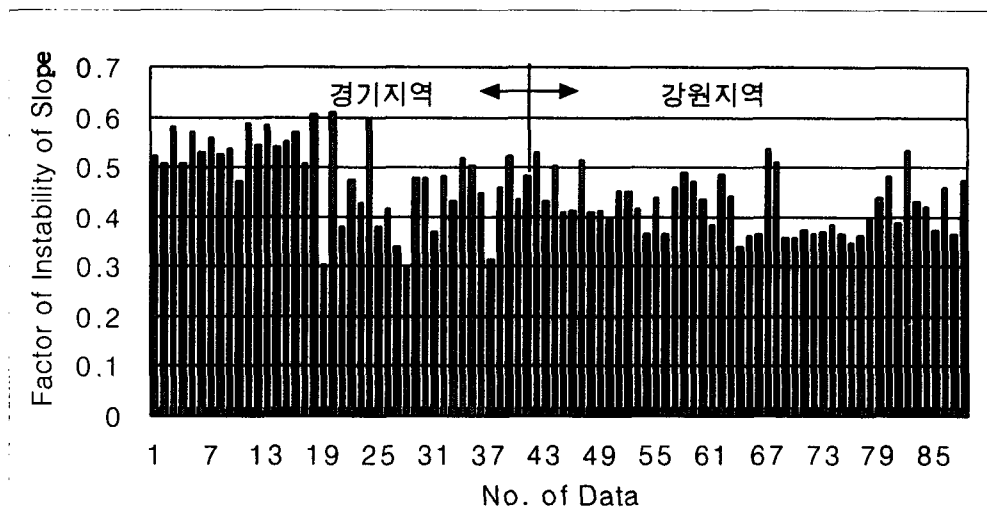


그림 5. 사면의 건전도 분포도

## 5. 결 론

사면재해는 이상기후와 계속되는 국토개발로 증가하는 추세에 있다. 본 연구에서는 사면에 대한 보다 효율적인 관리와 보강공사를 목적으로 퍼지집합을 이용하여 사면의 위험도를 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 국내외 사면의 안정성 평가표와 전문가의 경험을 바탕으로 사면의 안정성에 영향을 미치는 항목을 기하학적불안정과 지반불안정의 두 그룹으로 나누어 선정하였다. 선정된 각 항목에는 가중치를 주어 항목이 사면의 안정성에 미치는 영향의 정도를 나타내었다.
- (2) 사면의 위험도를 평가하기 위하여 건전도, 파급도, 손실액을 정의하였으며 보강공법의 영향을 나타내는 보강할인과 사면내 연약층의 영향을 나타내는 극한할증 지수를 정의하여 사면의 안정성에 대한 건전도를 얻었다. 여기에 사면파괴시 그 파급효과를 나타내는 파급도와 최대예상 손실액을 정의하여 파괴시 예상되는 피해규모를 산정하였다.
- (3) 사면의 안정성 평가에 사용되는 항목들이 정성적인 인간의 판단에 의존하는 경우가 많아 퍼지집합을 적용하여 퍼지 전문가 시스템을 구축하였고 C언어를 이용하여 사면의 위험성을 평가할 수 있는 프로그램(ESRAS Ver 0.5)을 개발하였다. 퍼지룰베이스를 구성하기 위하여 국내외 안정성 평가표와 전문가의 경험이 사용되었으며 전문가 시스템을 이용하여 사면의 위험도를 평가할 수 있었다. 각 사면에 대한 위험도가 평가되면 예상피해가 높은 지역부터 안정성 확보를 위한 재원을 효율적으로 투자할 수 있다.

## 참고문헌

1. 김병일(1994), 선형재하 공법 설계를 위한 전문가 시스템, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
2. 김상규 외(1998), 위험 절개면 및 축대의 조사 및 투자 우선 순위 결정방법 연구, 한국건설기술연구원.
3. 박민용(1990), Fuzzy 시스템의 산업적 응용, 대한전자공학회 단기강좌.
4. 이광형, 오길록(1991), 퍼지이론 및 응용, 홍릉과학출판사.
5. Alonso, E. E.(1976), "Risk Analysis of Slopes and its Application to Slopes in Canadian Sensitive Clays," *Geotechnique* 26, No.3, pp.453-472.
6. Bunce, C. M., D. M. Cruden, and N. R. Morgenstern(1997), "Assessment of the Hazard from Rock Fall on a Highway," *Can. Geotech. J.* 34, pp.344-356.
7. Fell, R.(1994), "Landslide Risk Assessment and Acceptable Risk," *Can. Geotech. J.* 31, pp.261-272.
8. GCO(1995), *Guide to Slope Maintenance*, Geotechnical Engineering Office.
9. Kim, S. K.(1994), "Landslides in Korea," *Proc. North-East Asian Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows(presentation)*, Seoul, pp.75-99.
10. Malone, A. W. and W. K. Pun(1997), "New Engineering Tools for Landslip Risk Control," *A Short Course of Landslide, Slope Stability Analysis and Remedial Methods*, Dongguk University, pp.3-29.
11. Mayoraz, F., T. Cornu, and L. Vulliet(1996), "Using Neural Networks to Predict Slope Movements," *Proc. 7th Int. Symposium on Landslides*, Trondheim, Vol. 1, pp.295-300.
12. Ragozin, A. L.(1996), "Modern Problems and Quantitative Methods of Landslide Risk Assessment," *Proc. 7th Int. Symposium on Landslides*, Trondheim, Vol. 1, pp.339-344.
13. Whitman, R. V.(1984), "Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering," *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.110, No.2, pp.145-188.