

## 암반사면의 안정성 평가 및 적용에 관한 연구

### A Study on the Stability Assessment and Application of Rock Slope

안 종필<sup>1)</sup>, Jong-Pil Ahn, 박 주원<sup>2)</sup>, Ju-Won Park, 오 수동<sup>3)</sup>, Su-Dong Oh

<sup>1)</sup> 조선대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chosun Univ.

<sup>2,3)</sup> 조선대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chosun Univ.

**SYNOPSIS** : In general the evaluation process of rock slope stability is an ambiguous system which is made up of ideas subjected to practical experience of an expert. This paper aims to propose more effective methods that helps engineers to evaluate the stability of rock slope by using RMR(Rock Mass Rating for the Geomechanics Classification) and Stereo-graphic Projection and Fuzzy Approximate Reasoning Concept. The result of this paper is that a rational evaluation of rock slope stability and countermeasures can be achieved through RMR and Stereo-graphic Projection and Fuzzy Approximate Reasoning Concept.

**Key words** : RMR, Stereo-graphic Projection, Fuzzy Approximate Reasoning Concept.

## 1. 서론

절취사면은 일반적으로 그 구성재료에 따라 토사사면과 암반사면으로 구분되며, 근래에 도로시설의 대규모 확충에 따른 암반사면의 파괴사태가 급증되면서 특히 암반사면의 안정성 문제에 대한 관심이 집중되고 있는 추세이다. 암반사면은 극히 불균질하며 암석고유의 특성, 풍화의 정도, 성층상태 및 불연속면의 특성 등에 따라 각 암반의 거동이 현저하게 다르기 때문에 암석역학과 암반공학 등의 모든 이론에 의거하여 그 상태를 정량적 지표로 정확히 평가할 수 없는 경우가 많다. 또한 설계, 시공 및 유지관리의 각 단계에서 암반사면의 안정성평가의 대상이 되는 구역 전체의 지반에 대한 상황을 파악하기가 곤란하다.

이러한 점에서 건설공사와 유지관리에 수반되는 암반사면의 공학적 평가, 즉 암반사면의 굴착면에 대한 안정성평가는 암반의 역학특성과 불연속면의 역학특성이 복합된 것으로서 과거의 시공실적이나 기존 암반사면실태 등의 경험적 자료를 참고로 하여 평가하는 것이 일반적인 실정이고, 검토의 대상이 되는 암반사면의 중요도에 따라 암반중에 발달한 개별 불연속면의 방향을 평사투영법으로 분석하여 암반의 안정성을 해석하는 방법이나 극한 평형 해석법에 의하여 계산된 안전율로부터 사면의 안정성을 평가하는 방법 등이 많이 활용되어 왔다.

그러나 최근에는 전체 대상 암반의 불연속망을 파악하기 위하여 한정된 조사자료를 토대로 통계적, 추계론적 방법으로 불연속망을 발생시키는 방법이 연구되고 있으며, 특히 Goodman, Gen-hua Shi(1985)<sup>6)</sup>에 의하여 제안된 블록이론을 이용하여 암반중에 발달한 불연속면에 의하여 형성되는 암반블록의 안정여부를 판단하는 방법이 사용되고 있다. 또한 암석의 전도파괴에서는 극한평형법으로 안전율을 계산하기 어렵고 블록이론으로도 판정할 수 없으므로 저면 마찰 모형실험이나 유한요소법(Goodman,1978)<sup>11)</sup> 혹은 개별요소법(Cundall,1975)<sup>12)</sup> 등의 수치해석모델에 의한 시뮬레이션 등에 의해 평가되어 지기도 한다. 이와 같은 시도에도 불구하고 암반사면은 설계 및 시공조건이나 장기간의 풍화, 열화 등의 변상작용으로 인해 시공단계나 유지관리단계에서 절취사면이 안정성을 잃고 큰 변형이나 파괴를 일으키는 경우가 자주 발생하게 되고, 절취사면 상층의 자연사면을 포함하여 대책공의 적용이나 보강공법의 선정을 명확한 근거없이 실시하는 것이 보통이다.

한편 근래에 일반적으로 이용되어지고 있는 암반분류법(RMR; Rock Mass Rating for the Geomechanics Classification)이나 사면평점법(SSR; Slope Stability Rating) 등에 의한 암반사면의 파괴가능성 평가는 평가의 종합적인 결론을 유추하는 과정이 명확하지 않고, 전문기술자의 경험적 주관에 따른 정성적인 판단에 의존하기 때문에 객관적으로 평가하는 것이 어려울 뿐만 아니라, 판단에 개인차를 수반하는 것이 현실이다. 또한 평사 투영법이나

극한 평형 해석법 등에 의한 방법에 있어서도 프로그램 입력내용의 정확성이나 신빙성이 평가자에 따라서 의문시 되는 경우가 많고, 결과분석의 과정이 체계화되지 못하다는 문제들을 지니고 있다.

이 때문에 사면의 안정성평가에 있어 보다 광범위하고 다양한 파괴요인을 체계적이고 정량적으로 해석할 수 있는 평가법이 요구되어지고 있으며, 최근 일본<sup>10)</sup>이나 한국<sup>11)</sup>에서 부분적으로 암반사면이나 암반터널의 안정성평가에 있어 퍼지이론을 응용하는 연구가 이루어지고 있다. 이러한 암반사면의 안정성평가에 퍼지이론을 응용하는 문제는 토목구조물로서의 암반사면의 특수성을 고려하는 동시에 전문기술자의 경험적 주관이나 평가과정을 정량적이고 객관적으로 받아들일 수 있다는 점에서 암반사면의 안정성평가를 합리적으로 해결하는 방안으로서 유효한 측면을 지니고 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 건설 중인 천안~논산간 고속도로 공사구간 중 절취사면의 높이가 20m이상 되는 7개 암반사면 구간<sup>5)</sup>을 선택하여 각각의 암반사면에 대해 풍화상태, 지하수상태 및 식생상태 등과 불연속면의 방향, 빈도 및 거칠기 등의 설계자료를 토대로 암반사면의 지질 및 물리적 성질을 분석해 보았다. 또한 분석된 자료를 이용하여 각각의 암반사면에 대해 암반분류법(RMR)과 평사투영법(Stereo-graphic Projection)을 이용한 안정성 평가를 수행해 보았다. 동시에 암반사면의 변상 및 파괴요인을 지형 및 지질의 내적요인과 토공 및 시공의 외적요인으로 구분하고 이러한 요인에 의한 파괴형태를 평면활동파괴의 성능함수로 가정한 후에, 각 암반사면의 변상 및 파괴요인에 대한 전문기술자의 주관적 판단을 퍼지언어변수로 표현하는 퍼지근사추론법(Fuzzy Approximate Reasoning Concept)을 이용하여 암반사면의 안전성 평가를 수행해 보았다. 본 연구에서는 이와 같은 3가지 평가방법, 즉 암반분류법과 평사투영법 및 퍼지근사추론법에 의한 평가결과를 토대로 각각의 암반사면에 대해 파괴요인과 보강방안 등의 다양한 측면에서의 분석을 통해 보다 합리적인 암반사면의 안정성 평가방법을 제시해 보고자 한다.

## 2. 암반사면의 안정성 평가방법

일반적으로 암반사면의 안정성을 해석하는 방법은 암반분류법이나 사면평점법 등의 정성적인 방법과 평사투영법이나 극한평형해석법 등의 정량적인 방법이 있으며, 그 외에 사면의 안정성평가에 있어 보다 광범위하고 다양한 파괴요인을 체계적이고 정량적으로 해석할 수 있는 평가법으로서 본 연구에서 다루고자 하는 퍼지근사추론법 등을 들 수 있다. 본 장에서는 위와 같은 암반사면의 안정성 평가방법에 대해 기술하고자 한다.

### 2.1 정성적 방법

#### 2.1.1 암반분류법

암반분류법은 암반의 역학 성상에 관한 항목이나 사면의 안정성에 관한 모든 요인 즉 지형, 식생, 지하수 등에 대하여 관찰을 하고 경험적·통계적 견지에서 종합적으로 구분·평점하는 것이다. 이 방법은 육안관찰과 원위치시험 등에 의해 암반의 역학특성에 따라 암반을 몇 가지로 구분하는 방법으로 실제 사면의 설계에 있어서 중요한 역할을 한다. 즉 소규모의 사면이나 터널에 있어서는 암반분류결과로부터 사면의 절토구배나 터널의 시공방법 등이 직접 결정되며, 안정해석을 하는 경우에 있어서도 암반분류 등급별로 설계정수를 설정하여 해석을 하는 것이 일반적이다.

이러한 암반분류법은 국내·외에서 많은 방법이 고안되고 있으나, 보통 이용되고 있는 것으로는 Biniawski(1979)<sup>13)</sup>에 의한 정량적인 암반분류법인 RMR(Rock Mass Rating for the Geomechanics Classification)법과 Romana(1983)<sup>14)</sup>가 사면용으로 작성한 SMR(Slope Mass Rating)법 등이 있으며, 특히 RMR법은 암반분류 매개변수에 대한 평점에서 절리의 방향성에 의한 조정점을 가감한 최종적인 평점(0~100)으로 부터 암반분류의 구분이 정해지게 된다. 이러한 암반분류법은 일반적인 용도로 쓰기 위해 고안된 것과 특정의 목적을 위해 개발된 것으로 분류되나, 댐이나 터널에 대한 암반분류는 많이 제안되고 있는데 대해 사면을 직접 목적으로하여 만들어진 것은 의외로 적다. 이것은 사면안정에 대해서는 암반의 물성뿐 아니라 암반 속의 균열 등의 불연속면의 성질과 그 방향성이 강하게 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다.

#### 2.1.2 사면평점법

암반분류법이 주로 암반의 성상에만 착안하여 평가하는데 대해서 사면의 안정에 관여되는 것으로 생각되는 암반 이외의 모든 요인(지형, 식생, 지하수 등)을 고려하여 사면의 안정성을 점수로 평가하기도 하며, 이러한 방법을 사면평점법이라 한다. 사면평점법 중에는 평가항목 중에 암반분류를 포함한 것도 있으나, 절취구배의 결정 등에는 별로 쓰이지 않으며 자연사면 등 사면의 안정성을 판정하기 위해 이용하는 것이 일반적이다. 사면평점법으로는 Duncan(1969)<sup>15)</sup>이 사면공 시공장소의 우선순위설정을 목적으로 고안한 SSR(Slope Stability Rating)의 사면안정도 평점시스템이 이용되고 있고, 이 방법은 사면의 높이, 길이, 노년폭 및 교통량 등의 10가지 평가항목에 대한 종합평점으로 부터 암반사면의 낙석 또는 파괴가능성을 평가하는 방법이며, 이 밖에도 많은 방법이 고안되고 있다.

## 2.2 정량적 방법

### 2.2.1 평사투영법

암반중에 발달한 불연속면들의 우세한 방향을 해석하기 위해 일반적으로 많이 사용하는 평사투영법(Stereo-graphic projection) 해석은 3차원 지질구조를 2차원 평면도상에서 구하는 도해법으로 구면의 평면투영원리를 이용한 것이다. 좀더 구체적으로는 불연속면을 포함한 암반의 구조를 표시하는 방법으로서 불연속면의 경사방향(Dip Direction)과 경사(Dip)를 극좌표망과 자오좌표망에 표시하여 절리계의 분포상태, 집중 또는 분산성, 주절리 방향 등을 파악하고 불연속면간의 상관관계를 도해적으로 해석하는 방법을 평사투영법이라한다. :

평사투영법은 이미 오래 전에 Warner(1969)<sup>6)</sup>에 의하여 전산프로그램이 발표된 이후 현재는 우리나라에서도 평사투영법의 전산해석이 보편화되고 있는 실정이다. 평사투영망에 표시된 많은 자료를 처리하여 우세한 불연속의 방향을 알기 위해서는 Point type과 Full type계산법이 사용된다. 평사투영법은 사면, 터널, 기초 등과 같은 암반구조물 해석에 유용한 수단이 되고, 평사투영법에 의한 암반사면의 안정성 평가도는 사면의 안정성을 예비적으로 평가하는 단계에서 손쉽게 사용할 수 있다. 평사투영법에 의한 해석에 있어 파괴형태가 발생할 것으로 추정되는 조건을 살펴봄으로서 발생 가능한 암반사면의 파괴형태, 즉 원호, 평면, 썩기 및 전도파괴 등에 대해 예측할 수 있다.

### 2.2.2 극한평형해석법

암반사면의 파괴는 주로 층리나 절리 등의 지질 불연속면의 존재에 지배되고, 앵커와 같은 보강공이 없는 암반사면은 전술한 바와 같이 여러 가지 파괴형태로 파괴되며, 각각의 파괴형태에 따른 안정성의 평가에 있어 복잡한 해석을 필요로 한다. 사면안정해석에서 사용되는 극한평형해석법은 미끄러짐을 일으키고자하는 외력과 저항하고자 하는 전단저항력의 균형을 계산하는 극한평형이론에 의하며, 일정한 가정하에서 평면활동파괴의 성능함수(Performance function)는 다음의 식 (1)과 같이 구해진다.

$$k \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} - 1 \geq 0 \quad (1)$$

여기서,  $\varphi$  : 활동면 마찰각,  $\theta$  : 활동면 경사각,  $k$  : 균열부에 충전수가 있는 경우의 저감계수

지금까지 성능함수에 포함된 파라미터의 통계적 성질에 대해 많은 연구가 이루어져 왔으며, 각 항목의 분포함수에 대해서는  $\varphi$ 는 대수정규분포,  $\theta$ 는 정규분포,  $K$ 는 일정한 분포라는 가정을 채용함이 비교적 타당한 것으로 알려져 있다.

## 2.3 퍼지근사추론법에 의한 방법

### 2.3.1 퍼지이론에 따른 암반사면 파괴요인의 판정구분 설정

퍼지이론에 의한 방법은 암반사면의 변상 및 파괴요인을 지형 및 지질의 내적요인과 토공 및 시공의 외적요인으로 구분하고 이러한 요인에 의한 파괴형태를 평면활동파괴의 성능함수로 가정한 후에, 각 암반사면의 변상 및 파괴요인에 대한 전문기술자의 주관적 판단을 퍼지언어변수로 표현하는 퍼지근사추론법을 이용하여 암반사면의 안전성 평가를 수행하게 된다.

퍼지이론에 따른 암반사면에 대한 파괴요인의 내적요인은 SMR법의 7가지 분류요인을 사용하고, 외적요인은 SSR법의 10가지 요인을 사용하여 암반사면에 대한 파괴요인의 판정구분을 설정하게 되며, 퍼지이론에 의한 암반사면파괴에 대한 내적 및 외적요인의 판정구분은 표 1 및 2와 같이 된다.

표 1. 암반 사면에 대한 내적 요인의 판정구분

분류	요인	판정구분				
		A	B	C	D	E
X1	시료의 일축압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )	매우 큼 (>2500)	큼 (1000~2500)	중간 정도 (500~1000)	적음 (250~500)	매우 적음 (250~0)
X2	암질표시율(RQD) (%)	매우 양호 (90~100)	양호 (75~90)	보통 (50~75)	불량 (25~50)	매우 불량 (25>)
X3	절리면 간격(cm)	매우 넓음 (>200)	넓음 (60~200)	중간 정도 (20~60)	협소함 (6~20)	매우협소함 (25>)
X4	절리면 상태	매우 양호	양호	보통	불량	매우 불량
X5	지하수 상태	건조	습윤	젖음	소량 유출	대량 유출
X6	절리면의 경사에 따른 조정	매우 유리	유리	양호	불리	매우 불리
X7	굴착방법에 의한 조정	자연사면	프리스프리트	스무스프라스팅	통상의발파	불량한발파

표 2. 암반사면에 대한 외적요인의 판정구분

분류	요인	판정구분				
		A	B	C	D	E
Y1	사면의 높이	<5m	5~8m	8~11m	11~14m	>14m
Y2	사면의 길이	<15m	15~30m	30~45m	45~60m	>60m
Y3	간파/노견폭	매우 양호 노견 충분	양호 노견 넓다	중간 정도 노견 넓음	좁다 노견은 넓다	대단히 좁다 노견 없음
Y4	교통량	대단히 적다	적다	중간 정도	많다	대단히 많다
Y5	낙석방지구의규모	Ritchie기준 에 합치	폭 충분하나 깊이 불충분	중간 정도의 규모	한정된 규모	없음
Y6	지질	괴상, 흐름반의 균열 없음	비연속성균열의 랜덤한 배열	균열이 쇄기상을 형성	흐름반 방향의 비연속성 균열	흐름반 방향의 연속성 균열
Y7	블록사이즈	<0.15m	0.15~0.3m	0.3~0.6m	0.6~1.5m	>1.5m
Y8	바위의 마찰	매우 거칠다 불규칙	거칠다	평면상	평활(판판함)	점토, 파쇄대 단층점토
Y9	물/얼음	건조하고 온난한 지역	중간정도강우 온난한 지역	중간정도강우 약간 동결	중간정도강우 한냉한 지역	강우가 많고 한냉한 지역
Y10	낙석	없음	가끔 소규모	가끔 낙석	수시로 낙석	큰 낙석/활동

퍼지이론에서 필요한 각 요인의 소속도함수(membership function)는 암반분류 작성자의 경험이나 지식에 기초하여 주관적으로 정해지므로 내적 및 외적 요인별 판정구분의 소속도함수의 설정에 있어 A, B, C, D, E의 5단계 언어변수로 표현하면 퍼지집합의 소속도함수는 각각  $\mu_{A_i}(A)=0.5/4.5+1.0/5.0$ ,  $\mu_{A_i}(B)=0.5/3.5+1.0/4.0+0.5/4.5$ ,  $\mu_{A_i}(C)=0.5/2.5+1.0/3.0+0.5/3.5$ ,  $\mu_{A_i}(D)=0.5/1.5+1.0/2.0+0.5/2.5$  및  $\mu_{A_i}(E)=1.0/1.0+0.5/1.5$ 로서 표현된다.<sup>34)</sup>

또한 암반사면의 파괴 및 변상을 유발하는 내적 및 외적요인별 소속도함수를 결정하고, 각 요인별에 대한 비율을 중요도계수로 하는 가중치평균개념을 이용한 종합적 판정의 근사화과정에 있어 Kaufmann의 해밍거리(hamming distance)<sup>13,4)</sup>의 개념을 도입하게 된다. 이 때 중요도계수는 원위치암반의 성상에 기초하여 암반분류자의 경험이나 지식과 통계적 자료에 의해 정해지는 계수로서 각 변상요인별의 판정구분에 대한 중요도계수는 표 3과 같이 된다.

표 3. 내적 및 외적요인의 중요도계수

구분	내적 요인							외적 요인									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
중요도계수	0.5	0.7	1.0	1.0	1.0	0.5	0.3	1.0	1.0	0.7	0.4	0.5	1.0	0.7	0.3	0.7	0.7

### 2.3.2 암반사면에 대한 활동요인의 성능평가기준

평면활동의 성능함수식에서 활동면의 내부마찰각( $\phi$ )과 활동면의 경사각( $\theta$ ) 및 균열부에 충전수가 있는 경우 저감계수(k)의 영향을 받아 암반사면이 파괴된다고 가정하여 암반사면에 대한 활동요인의 상태평가는 다음의 식 (2)와 같은 예측파괴확률에 대응하는 예측상태지수  $X_0$ 로부터 구해지며, 예측파괴확률  $p'_0$ 는 문헌·4)의 퍼지-베이스 신뢰성해석모델로 계산되어 진다. 또한 지금까지 명확한 기준은 없으나 본 연구에서는 Meyerhof 등<sup>9)</sup>의 연구에 의한 목표파괴확률로서  $p'_0=1.0 \times 10^{-3}$  ( $\beta_0=3.10$ )를 채용하였다. 따라서 암반사면에 대한 활동요인의 상태평가기준은 표 4와 같이 된다.

$$X_0 = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p'_0))^3} \quad (2)$$

여기서,  $k=1/\log(1/p'_0)$ ,  $p'_0$ =예측파괴확률(사후파괴확률),  $p_0$ =활동의 목표파괴확률

표 4. 암반사면에 대한 활동요인의 상태평가기준

평가등급	예측상태지수( $X_0$ )	상태평가기준	보강방법	
A	A1	0.00~0.05	붕괴가능성 없음	필요 없음
	A2	0.05~0.10	매우 안정된 상태	낙석가능요인 제거
B	B1	0.10~0.20	안정된 상태	사면하단측구 및 펜스설치 또는 구간 불딩
	B2	0.20~0.30	비교적 안정된 상태	사면하단측구 및 펜스/네트설치 또는 일률적불딩
C	C1	0.30~0.45	보통상태	사면하단측구 및 펜스설치 또는 구간 슛크리트
	C2	0.45~0.55	한계상태	일률적인 불딩/앵커, 전면스프리트, 하단벽체설치
D	D1	0.55~0.70	불안정상태	앵커, 전면스프리트, 하단벽체, 재굴착 및 배수
	D2	0.70~0.85	심각한 불안정상태	전면스프리트, 하단벽체, 재굴착 및 깊은배수
E	E1	0.85~0.95	극히 심각한 불안정상태	중력식 또는 앵커를 가진 벽체, 재굴착
	E2	0.95~1.00	파괴상태	보강불능

### 2.3.3 퍼지근사추론법에 의한 안정성평가

기존의 암반사면에 대한 안정성평가는 SMR법의 암반상태분석과 SSR법의 사면평가분석에 의한 수치등급의 평점 합계를 분류하여 평가하였다. 그러나 퍼지근사추론법에 의한 방법은 변상상태로부터 기인되는 세 가지 변상인자, 즉 내적변상요인(X), 외적변상요인(Y) 및 활동상태요인(Z)에 대한 표현을 하나의 특정한 인자로 변형시키는 것이 아니고 중요도계수와 퍼지언어변수를 이용하고 각 변상인자의 퍼지언어변수값은 근사추론법에 의해 합성하므로써 종래의 안정성평가 분석방법보다 더욱 정밀하게 평가하게 된다.

X, Y, Z 및 S를 각각 내적요인, 외적요인, 활동상태요인 및 안정성판정에 대한 술어집합이라 하고,  $P_X, P_Y, P_Z$  및  $P_S$ 를 각각 X, Y, Z 및 S에 관한 퍼지명제라고 하면 퍼지논리에 의한 안정성분석의 퍼지조건문 및 퍼지관계는 식 (3)과 같이 된다.

$$IF (X = P_X) \cap (Y = P_Y) \cap (Z = P_Z) THEN S = P_S \quad (3a)$$

$$R = R_X \cap R_Y \cap R_Z \quad (3b)$$

여기서,  $R_X, R_Y$  및  $R_Z$ 은 각각 내적요인, 외적요인, 활동상태요인 및 안정성판정의 퍼지관계를 나타내는 것으로 식 (4)와 같은 조건문으로 풀이할 수 있다.

$$\begin{aligned} IF X = P_X THEN S = P_S &\Rightarrow R_X = P_X \times P_S \\ IF Y = P_Y THEN S = P_S &\Rightarrow R_Y = P_Y \times P_S \\ IF Z = P_Z THEN S = P_S &\Rightarrow R_Z = P_Z \times P_S \end{aligned} \quad (4)$$

다음으로 각 요인에 대한 조건이 변할 때 퍼지합성규칙(fuzzy compositional rule)<sup>3,4)</sup>에 의한 근사추론법을 이용하여 안정성판정을 추론할 수 있으며, 각 요인의 조건이  $X=P_X', Y=P_Y'$  및  $Z=P_Z'$ 로 변하였다고 가정할 때, 합성규칙에 의해 결정되는 안정성판정은 식 (5)와 같이 된다.

$$S(F_S) = \bigwedge_{i=X,Y,Z} [\bigvee_{f_i \in F_i} (P_i'(F_i) \wedge r_i(F_i : F_S))] \quad (5)$$

여기서,  $\wedge = \text{Min}, \vee = \text{Max}$

다음은 안정성판정을 다시 언어표현으로 전환시키는 과정으로 Kaufuman<sup>1,3,4)</sup>의 해밍거리(hamming distance)의 개념을 도입하여 근사추론에 의한 안정성판정과 퍼지부분집합과의 해밍거리를 최소화하는 S내의 한 퍼지부분집합을 선택하게 되며, A와 B가 집합 F의 퍼지부분집합일 때 A와 B간의 해밍거리는 식 (6)과 같이 되고, 도출된  $d \in (1, 2, 3 \dots, m)$ 의 퍼지집합  $S_d^0 = (S_{d1}^0, S_{d2}^0, S_{d3}^0, \dots, S_{dm}^0)$ 에 근사화되는 S내의 한 퍼지부분집합  $S_d^*$ 은 식 (7)과 같이 된다.

$$d(A, B) = \sum_{i=1}^m |\mu_A(F_i) - \mu_B(F_i)| \quad (6)$$

$$S_d^* = \text{Min } d(S_d^0, S_d) = \text{Min } \sum_{i=1}^m |S_{di}^0 - S_{di}| \quad (7)$$

따라서 퍼지근사추론으로 해석한 암반사면의 안정성평가기준과 기존의 안정성평가기준을 비교하면 표 5와 같이 된다.

표 5. 퍼지이론에 의한 암반사면의 안정성평가기준

평가등급	기존의 방법		퍼지이론에 의한방법					
	암반상태 (SMR)	위험도 (SSR)	내적요인 (X)	외적요인 (Y)	활동상태요인 (Z)	안정성 평가기준 및 유지관리사항		
						안정성 평가기준	파괴가능성	보수·보강
A1	매우 양호 (81~100)	최소 (150이하)	매우 양호	매우 낮음	매우 안정	완전히 안정	없음	필요없음
A2								
B1	양호 (61~80)	매우 낮음 (150~250)	양호	낮음	안정	안정	일부 불력	때때로 필요
B2								
C1	보통 (41~60)	낮음 (250~400)	보통	중간 정도	중간 정도	부분적 안정	일부 절리 혹은 썩기파괴	체계적인 보강
C2								
D1	불량 (21~40)	중간 정도 (400~500)	불량	높음	불안정	불안정	평면 또는 대규모 썩기파괴	중요/보완
D2								
E1	매우 불량 (0~20)	높음 (500이상)	매우 불량	매우 높음	위험	완전히 불안정	대규모 썩기파괴 토층과 유사한파괴	재굴착
E2								

### 3. 암반사면의 안정성평가 적용 예

본 연구에서는 천안권의 3개 구간과 공주권의 4개 암반사면 구간을 선택하고, 각 구간의 지질자료와 설계자료 등을 토대로 하여 각각의 암반사면에 대해 RMR법과 평사투영법 및 퍼지근사추론법을 이용한 안정성 평가를 수행해 보았다. 본 연구에서 적용한 천안권 지역의 암반분포는 대략적으로 지질구조 분할구상 경기육괴에 속하는 선캠브리아기의 편마암류와 이를 관입한 주라기의 화강암류로 양분되어 있고, 공주권 지역은 퇴적암류 및 단층선의 주향과 평행한 발달을 보이고 있다.

#### 3.1 RMR분류법에 의한 안정성평가

암반사면 안정성평가의 대상구간에 대한 RMR분류에 있어 암석코어의 채취에 따른 암석의 점착력과 내부 마찰각, 풍화정도, 경도, 암석학적 특징 및 절리 등의 불연속면 특성과 절리간격, 코어 회수율(TCR : Total Core Recovery) 및 암질 표시율(RQD : Rock Quality Designation) 등의 분석자료를 이용하여 Bieniawski(1979)<sup>13)</sup>의 RMR법에 적용하여 보았으며, 표 6은 RMR법에 의한 평가결과를 정리한 것이다.

표 6. 평가 대상구간의 RMR분류 결과

구분	압축강도	RQD	절리간격	절리상태	지하수	절리방향성	점착력	내부마찰각	평점합계	등급	구분	
천안권	1구간	450	450	0.33	다소 거칠, 틈새<1mm	없음	유리	10.00	40	51	III	양호
	평점	4	8	9	20	15	-5					
	2구간	1,370	73	0.26	다소 거칠, 틈새<1mm	없음	유리	15.00	45	65	II	우수
	평점	12	13	10	20	15	-5					
3구간	1,380	24	0.15	다소 거칠, 틈새<1mm	없음	유리	10.00	50	53	III	양호	
평점	12	3	8	20	15	-5						
공주권	4구간	830	49.5	0.50	다소 거칠, 틈새<1mm	없음	유리	2.95	34.5	59	III	양호
	평점	8	10	11	20	15	-5					
	5구간	1,630	85	0.20	다소 거칠, 틈새<1mm	없음	유리	3.40	39	68	II	우수
	평점	13	17	8	20	15	-5					
	6구간	950	52	0.30	다소 거칠, 틈새<1mm	없음	유리	2.90	34	58	III	양호
	평점	9	10	9	20	15	-5					
7구간	1,260	78	0.20	다소 거칠, 틈새<1mm	없음	유리	3.20	37	64	II	우수	
평점	11	15	8	20	15	-5						

#### 3.2 평사투영법에 의한 안정성평가

천안권 및 공주권지역의 7개 평가 대상구간에 대해 지표지질조사, 시추조사 등을 통하여 얻어진 자료들을 이용하여 평사투영법으로 암반사면의 안정성을 평가한 결과는 표 7과 같다.

표 7. 평사투영법에 의한 암반사면의 안정성 평가결과

구분	평가결과	
천안권	1구간	사면의 상단부에서는 쉼기파괴가 일어날 가능성이 있고, 전도파괴의 가능성 또한 있으며, 경사각이 가파라 낙석이 우려되는 것으로 평가됨.
	2구간	사면의 절리면에서 쉼기파괴가 일어날 가능성이 예상되나, 그 규모는 미미할 것으로 평가됨.
	3구간	면·경암층 사면의 절리가 부분적으로 전도파괴를 일으킬 수 있는 가능성이 있으나, 대규모적인 전도파괴보다는 부분적인 낙석 형태의 파괴가 진행될 것으로 평가됨.
공주권	4구간	절리에 의한 평면파괴의 가능성은 적으나, 절리들에 의한 전도파괴 및 낙석의 가능성이 다소 있음.
	5구간	소수의 절리가 평면 및 전도파괴의 영역에 분포하는 것으로 나타날 뿐, 절리들은 사면안정에 유리하게 발달되어 있으므로 소수의 절리에 의한 평면 및 전도파괴의 우려만이 있는 것으로 평가됨.
	6구간	사면의 주절리군에 의한 전도파괴 및 낙석의 우려가 예상되며, 일부 부절리군에 의한 평면파괴의 가능성은 적음.
	7구간	절리 중 일부가 전도파괴 및 낙석의 우려가 예상되는 것으로 나타났으며, 다른 형태의 파괴가능성은 적음.

#### 3.3 퍼지근사추론법에 의한 안정성평가

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 암반사면의 안정성평가에 있어 퍼지근사추론에 의한 평가분석기법을 적용해 보았으며, 이 때 암반사면의 안정성분석평가를 구성하고 있는 각각의 내·외적 요인들에 대해서 전문가의 주관적판단을 기초로 하여 언어학적 판단을 정량적으로 평가할 수 있는 퍼지집합의 개념을 응용하여 수행하였다. 퍼지근사추론에 의한 암반사면의 안정성평가에 있어 각 구간별 입력데이터는 표 8과 같고, 전절의 분석절차를 통해 목표파괴확률( $p_f$ )을  $1.0 \times 10^{-3}$ 으로 한 안정성평가의 결과는 표 9와 같다.

표 8. 적용암반사면의 축점번호에 따른 내·외적 요인의 입력데이터

구 분		내적요인							외적요인									
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
천안권	1구간	D	D	C	C	A	B	D	E	B	C	D	A	B	E	A	C	C
	2구간	B	C	C	C	A	B	D	E	B	C	D	A	C	E	A	C	B
	3구간	B	E	D	C	A	B	D	C	B	C	D	A	C	E	A	C	C
공주권	4구간	C	D	C	C	A	B	D	E	B	C	D	A	B	E	C	C	B
	5구간	B	B	D	C	A	B	D	E	B	C	D	A	B	E	B	C	C
	6구간	C	C	C	C	A	B	D	E	B	C	D	A	B	E	C	C	C
	7구간	B	B	D	C	A	B	D	E	B	C	D	A	B	E	B	C	C

표 9. 퍼지이론에 의한 암반사면의 안정성 평가결과(괄호안은 예측상태지수  $X_0$ )

구 분	천안권			공주권			
	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간	7구간
내적요인(X)	C	C	C	C	B	C	B
외적요인(Y)	B	C	C	C	B	C	B
활동상태요인(Z)	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1
안정성평가등급	B2(0.37)	B1(0.31)	B2(0.41)	B2(0.35)	B1(0.32)	B1(0.33)	B1(0.33)

#### 4. 결과분석 및 고찰

본 연구에서는 암반사면의 안정성 평가방법에 대한 고찰과 함께 천안권 및 공주권 7개 구간의 암반사면을 대상으로 각 구간의 지질 및 물리적 성질을 분석해 보았으며, 분석된 자료를 이용하여 각각의 암반사면에 대해 암반분류법과 평사투영법 및 퍼지근사추론법을 이용한 안정성 평가를 수행해 보았다.

RMR분류법에 의한 각 암반사면의 안정성 평가 결과 제 2구간과 제 5구간 및 제 7구간은 평가등급이 II로서 우수한 상태를 나타내었고, 제 1구간, 제 3구간, 제 4구간 및 제 6구간은 평가등급이 III로서 양호의 상태를 나타내었다. RMR분류법에서의 분석과정을 살펴보면 판정에 영향을 미치는 인자 중 암석코어의 일축압축강도와 RQD값이 차지하는 비중이 큰 것으로 나타났으며, 이로부터 암석코어실험의 정확도에 따라 RMR분류법에 의한 암반사면의 안정성 평가 결과가 크게 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

평사투영법에 의한 각 암반사면의 안정성을 평가한 결과 제 1구간은 썩기, 전도파괴 및 낙석의 우려가 있는 것으로 나타났고, 제 2구간은 썩기파괴의 우려가 있는 것으로 나타났으며, 제 3, 4, 6, 7구간에서는 전도파괴와 낙석의 우려가 있는 것으로 나타났고, 제 5구간은 평면 및 전도파괴의 우려가 있는 것으로 나타났다.

퍼지근사추론법에 의한 각 암반사면의 안정성을 평가한 결과 파괴가능성이 가장 높은 구간은 제 1구간, 제 3구간 및 제 4구간으로서 퍼지근사추론법에 따른 안정성평가 항목 중 일축압축강도(X1), 암질표시율(X2), 사면높이(Y1), 사면길이(Y2) 및 지질(Y3)항목의 영향을 비교적 크게 받는 것으로 판단되었다. 또한 제 2구간, 제 5구간, 제 6구간 및 제 7구간은 비교적 안전한 상태인 B1등급으로서 사면하단측구 및 펜스설치 또는 구간 불팅 등의 방법으로 보강이 필요하고, 제 1구간, 제 3구간 및 제 4구간은 안전한 상태인 B1등급으로서 사면하단측구 및 펜스나 네트설치 또는 일률적인 불팅 등의 방법으로 보강이 필요함을 알 수 있었다.

표 10. 암반사면의 안정성 평가결과에 대한 종합분석

구 분	천안권			공주권			
	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간	7구간
RMR 분류법	III 양호	II 우수	III 양호	III 양호	II 우수	III 양호	II 우수
평사투영법	썩기, 전도파괴 낙석우려있음	썩기파괴 우려있음	전도파괴, 낙석 우려있음	전도파괴, 낙석 우려있음	평면, 전도파괴 우려있음	전도파괴, 낙석 우려있음	전도파괴, 낙석 우려있음
퍼지근사 추론법	B2 비교적 안정	B1 안정	B2 비교적 안정	B2 비교적 안정	B1 안정	B1 안정	B1 안정
보강대책	사면하단측구, 펜스/네트설치 또는 일률불팅	사면하단측구 및 펜스설치 또는 구간불팅	사면하단측구, 펜스/네트설치 또는 일률불팅	사면하단측구, 펜스/네트설치 또는 일률불팅	사면하단측구 및 펜스설치 또는 구간불팅	사면하단측구 및 펜스설치 또는 구간불팅	사면하단측구 및 펜스설치 또는 구간불팅

표 10은 암반사면의 안정성평가에 대한 종합적인 분석결과를 보여 주고 있다. 표 10에서 RMR분류법에 의한 결과와 퍼지근사추론법에 의한 결과를 비교해 보면 전반적으로 RMR분류법에 비해 퍼지근사추론법에 의한 결과가 좀 더 안정적으로 해석되어지고 있는 바, 이는 본 연구에서 퍼지근사추론법에 있어서의 목표파괴확률( $p_f$ )을 경제분석

의 의사결정에 따른 낙관적분석<sup>1)</sup>의  $1.0 \times 10^{-3}$ 으로 적용하였기 때문에 사료되었다. 그러나 제 6구간을 제외한 모든 구간에서 상대적으로 유사한 결과를 나타내고 있기 때문에 암반사면의 안정성평가에 있어 두 가지 방법의 비교를 통한 평가결과의 정확한 검증이 가능할 것으로 판단되었다.

또한 표 10에서 평사투영법에 의한 결과와 퍼지근사추론법에 의한 결과를 비교해 보면 평사투영법에 의한 경우 켄기, 전도, 평면파괴 및 낙석 등의 파괴유형별 파괴가능성 분석이 가능한 반면, 퍼지근사추론법에 의한 경우 안정성평가의 결과에 따른 보강방법을 구체적으로 제시할 수 있기 때문에 암반사면의 안정성평가에 있어 평사투영법과 퍼지근사추론법을 상호 보완하므로서 보다 효율적이고 안전한 보수·보강대책의 수립이 가능할 것으로 사료되었다.

본 연구에서는 RMR분류법과 평사투영법 및 퍼지근사추론법에 의한 암반사면의 안정성평가기법을 고찰해 보았으며, 이상과 같은 3가지 방법을 통해 암반사면의 안정성평가를 수행할 경우 정성적인 측면과 정량적인 측면에서의 분석 뿐만 아니라 토목구조물로서의 암반사면의 특수성을 종합적으로 고려하는 동시에 평가과정을 좀더 객관적으로 받아들일 수 있다는 점에서 유효한 것으로 사료되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 현재 건설 중인 천안~논산간 고속도로 공사구간 중 7개 암반사면 구간에 대한 설계자료 및 분석 자료를 토대로 각각의 암반사면에 대해 RMR분류법과 평사투영법 및 퍼지근사추론법을 이용한 안정성 평가를 수행해 보았으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) RMR분류법과 퍼지근사추론법에 의한 암반사면의 안정성 평가결과 상대적으로 유사한 결과를 나타내고 있기 때문에 두 가지 방법의 비교를 통한 평가결과의 정확한 검증이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 평사투영법에 의한 경우 파괴유형별 파괴가능성 분석이 가능하고, 퍼지근사추론법에 의한 경우 평가결과에 따라 보강방법을 구체적으로 제시할 수 있으므로 두 가지 방법의 상호 보완을 통해 암반사면의 보다 효율적인 보강 대책의 수립이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) RMR분류법과 평사투영법 및 퍼지근사추론법에 의해 암반사면의 안정성평가를 수행할 경우 정성적인 측면과 정량적인 측면에서의 분석 뿐만 아니라 토목구조물로서의 암반사면의 특수성을 종합적으로 고려할 수 있다는 점에서 보다 유효할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 안중필, 이증빈, 박경환, 박주원(1998), "퍼지근사추론을 이용한 암반사면의 안전성 평가모형", 한국구조물진단학회 가을학술 발표회 논문집, 제2권 제2호, pp.113~118
2. 안중필, 박주원(1999), "지반보강에 따른 경사호안의 안정해석에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제19권 III-4호, pp.753~765
3. 이증빈, 장영부, 박주원(1998), "퍼지근사추론법에 의한 손상구조물의 진전도평가 시스템개발", 한국구조물진단학회 봄학술발표회 논문집, 제2권 제1호, pp.41~48.
4. 이증빈, 손용우, 박주원(1998), "구조시스템의 퍼지신뢰성해석 및 상태평가모델", 한국전산구조공학회 가을학술발표회논문집, 제11권, 제2집, pp.61~68.
5. 오수동(1999), "암반사면의 안정성평가에 관한 연구", 석사학위논문, 조선대학교.
6. 이정인(1997), "암반 불연속면의 역학적인 성질과 사면안정해석", 한국지반공학회 사면안정 학술발표회 논문집, pp.21~47.
7. 김영수(1988), "사면안정의 확률론적 해석", 대한토목학회 논문집, 제 8권, 제 3호, pp.85~90.
8. 정형식, 이승호(1997), "절토사면의 안정해석시 SMR평가법의 적용사례", 한국지반공학회사면안정 학술발표회논문집, pp.51~60.
9. 편집부(1996), "암반사면의 안정해석과 계획", 기술경영사, pp.301~313.
10. 西 邦正·古川浩平·中川浩二(1992), "ファジイ理論を用いたのり面崩壊要因および崩壊可能性の評価について", 土木學會論文集, 第445号/III-18, pp.109~118
11. Goodman, R. E.(1978), "不連續巖盤の地質工學", pp.41~46.
12. Cundall, p.(1975), "Computerized design of rock slopes using interactive graphics", 16th US Rock Mechanics Symposium.
13. Bieniawski, Z. T.(1979), "The geotechnics classification in rock engineering applications", pro. 4th Int. Cong.on Rock Mech (Montreux), ISRM, Balkema, Vol.2, pp.41~48
14. Romana, M.R.(1993), "A geomechanical classification for slope: SMR, in Comprehensive Rock Eng, Pergamon Press, Vol.3.
15. Duncan, N.(1969), "Engineering geology and Rock mechanics", Vol. I, Leonard Hill,