

퍼지확률이론과 손상지수를 이용한 지하암반공동에서의 스폐링 발생 평가

방준호¹, 이강현², 이인모^{3*}

Assessment of spalling occurrence using fuzzy probability theory and damage index in underground openings

Joon-Ho Bang, Kang-Hyun Lee, In-Mo Lee

Abstract Spalling is a kind of instability phenomenon of surrounding rock around underground openings subjected to high in-situ stress according to the development of extension fractures. Three kinds of spalling criteria have been presented so far; however, all spalling criteria have the range of values so that the fuzziness and vagueness of spalling criterion cannot be avoided. In this study, a new fuzzy probability model is proposed to predict the probability of spalling in a systematic way by using fuzzy probability theory. Many of the underground opening projects worldwide are evaluated with the proposed method. Prediction results expressed as the spalling probability agree well with the in-situ observations. In particular, a new fuzzy probability model considering all three evaluation indices of spalling by adopting weighting factors based on relative reliability among three evaluation indices is able to resolve erroneous prediction of spalling by choosing only one prediction method. Moreover, the more reasonable value of spalling probability could have been obtained by adopting the modified damage index to the newly proposed fuzzy probability model.

Keywords: Brittle failure, spalling, fuzzy probability theory, damage index

요 지 스폐링 현상은 높은 현지응력하에서 확장균열의 발달로 암반공동 주변에서 발생하는 파괴형태이다. 기존 연구에 의하면 3가지 스폐링 기준은 범위로 제시되어 있어 기준 자체의 애매모호함이 상존하고 있다. 본 연구에서는 퍼지확률이론을 적용한 새로운 스폐링 발생 종합 평가모델을 제안하였고 스폐링 발생현장에 평가모델을 적용한 결과 현장관측결과와 일치하는 결과를 보였으며, 정량적으로 스폐링 발생확률을 산정할 수 있었다. 특히, 3가지 스폐링 평가인자별 상대중요도를 고려한 가중치를 적용함으로써 실제 스폐링이 관측된 현장이 스폐링이 발생하지 않는 것으로 평가되는 오류를 해결하였다. 또한, Martin 등(1999)의 손상지수에 형상계수를 도입한 수정손상지수가 포함된 스폐링 평가인자를 스폐링 발생 종합 평가모델에 적용한 결과 합리적인 스폐링 발생확률을 산정할 수 있었다.

주요어: 취성파괴, 스폐링, 퍼지확률이론, 손상지수

1. 서 론

현지응력이 작용하고 있는 암반에서 터널과 같은 암반공동을 굴착하는 경우 현지응력의 크기, 무결암의 강도, 암반내의 불연속면에 의해 암반공동 주변에서 다양한 형태의 파괴가 발생하게 되며, 이러한 파괴는 그림 1과 같이 지질구조파괴(gravity-induced failure)와 응력유도파괴(stress-induced spalling)로 구분될 수 있다.

응력유도파괴(이하 스폐링)는 암질조건이 양호한 암

반이 높은 현지응력을 받는 경우 압축력에 의한 확장균열(extension fractures)의 발달로 굴착경계면에서 발생

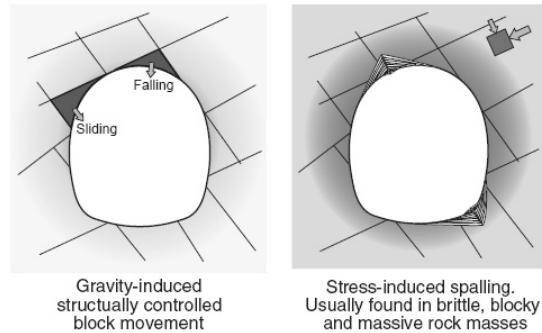


그림 1. 지하암반공동 굴착경계면에서의 파괴모드(Martin, 2005)

¹정회원, 쌍용건설(주) Downtown Line Stage2 C921 Project 설계과장, 공학박사

²비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

³정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

*교신저자: 이인모 (E-mail: inmollee@korea.ac.kr)

되며 굴착 중 파괴음(popping), 판상탈락(slabbing) 등을 동반하는 파괴현상이다. 이러한 스폐링 현상은 최근 들어 암반공동이 점차 대심도화 되어 높은 현지응력을 받고 천공, 발파와 같은 굴착에 의해 공동주변에서 균열 손상의 발생가능성이 점차 커짐에 따라 스폐링 특성 평가에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다(이희석 등, 2005)

스패링의 특성은 스폐링의 발생여부, 스폐링이 발생하는 응력수준 그리고 스폐링이 발생하는 경우 파괴정도를 나타내는 스폐링의 깊이와 폭, 지표면으로부터 스폐링이 발생하는 한계토포고 등으로 구분할 수 있다. 이 중에서 스폐링 발생여부와 스폐링 한계토포고에 대한 평가는 향후 스폐링의 특성 파악에 있어서 우선적으로 검토되어야 하는 사항이라 할 수 있다. 즉, 지하 암반공동에서 스폐링의 발생은 암반공동의 안정성 및 시공성에 상당한 영향을 주는 원인이 되므로 암반공동의 설계 단계에서부터 응력조건과 암반상태를 고려한 스폐링의 특성을 사전에 충분히 평가하는 것이 공학적인 의사결정에 매우 중요하다 할 수 있다(천대성 등, 2007; 천대성 등, 2008).

기존 결정론적 스폐링 발생 평가법은 현지응력과 무결암의 일축압축강도 또는 암반강도의 비인 응력강도비로 표현되는 스폐링 기준(spalling criterion)을 이용하여 평가되었으나 이 방법은 발생여부의 정성적인 평가만 이루어질 뿐 어느 정도의 파괴확률로 발생되었는지에 대한 정량적인 평가가 불가능하였다. 또한, 스폐링 기준이 모두 상한과 하한의 범위로 제시되어 있어 엔지니어의 기준 선택 시 주관성(subjectiveness)을 배제할 수 없고 기준 자체 역시 애매함(fuzziness)과 모호함(vagueness)이 있어 합리적으로 발생여부를 평가할 수 없다.

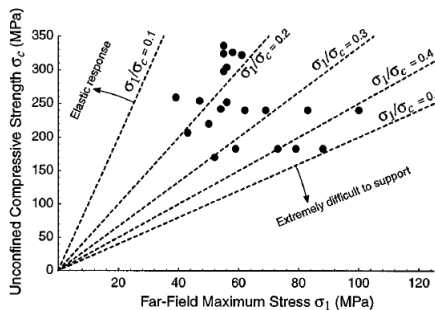


그림 2. 경험적 안정성 분류(Hoek et al., 1980)

이에 본 연구에서는 기존 결정론적 스폐링 발생 평가법의 문제점을 해결하기 위해 퍼지개념과 퍼지확률이론을 접목하여 스폐링의 발생여부와 발생확률을 산정할 수 있는 스폐링 발생 종합 평가모델을 개발하였다. 본 평가모델에서는 3가지 스폐링 기준을 퍼지개념을 통해 퍼지화하였고 이를 퍼지확률이론에 접목함으로써 스폐링 발생에 대한 정량적인 평가가 이루어지도록 구성하였다. 또한, 본 연구에서는 Martin 등(1999)의 손상지수(D_i)에서 고려하지 못한 형상계수(shape factor)를 적용한 수정손상지수(D_{is})를 이용하는 스폐링 발생 종합 평가모델에 적용하여 형상계수의 도입여부에 따른 스폐링 발생확률을 비교분석하였다.

2. 스폐링 기준과 손상지수의 고찰

현재까지 연구된 스폐링의 발생에 대한 평가는 현지응력(최대주응력, 최소주응력)과 무결암의 일축압축강도 그리고 암반강도의 비인 응력강도비로 표현되는 스폐링 기준에 의해 이루어져 왔다.

Ortlepp 등(1972)은 남아프리카의 금광산(gold mine)에서의 경험을 바탕으로 최대주응력(σ_1)과 무결암의 일축압축강도(σ_c)의 비인 σ_1/σ_c 가 0.2 이상이면 소규모 조각탈락(spalling)이 발생한다고 하였고, Hoek 등(1980)은 남아프리카 광산의 관측결과로부터 최대주응력과 무결암의 일축압축강도의 비를 그림 2와 같이 안정분류기준을 제안하여 σ_1/σ_c 가 0.1 이상이면 암반은 탄성거동을 벗어나 소규모 조각탈락이 발생한다고 하였다. 한편, Martin 등(1999)은 최대주응력과 무결암의 일축압축강도의 비(σ_1/σ_c)와 암반분류(RMR)로부터 파괴거동을

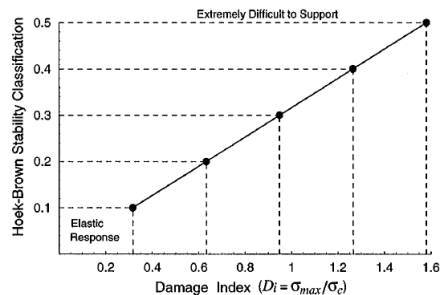


그림 3. 손상지수(D_i)에 의한 안정성 분류(Martin et al., 1999)

평가하는 터널거동 분류를 통해 스포링의 발생이 시작 되는 σ_1/σ_c 가 0.15 이상이라고 제시하였다.

Martin 등(1999)은 그림 3과 같이 최대점선응력(σ_{max} = $3\sigma_1 - \sigma_3$)와 무결암의 일축압축강도(σ_c)의 비로 표현 되는 손상지수(D_i , Damage index)를 제안하면서 손상 지수의 범위가 0.3~0.5에서 스포링이 발생한다고 제시 하였다. 또한, Kaiser 등(2000)은 최대주응력과 무결암 의 일축압축강도의 비(σ_1/σ_c)와 암반분류(RMR)로부터 스포링을 평가하는 Martin 등(1999)의 터널거동 분류에 서 최대점선응력과 무결암의 일축압축강도의 비(D_i = σ_{max}/σ_c)를 추가하여 보다 종합적으로 암반공동의 파괴 거동 평가가 가능하도록 개선하였는데 Kaiser 등(2000) 에 의하면 그림 4에서와 같이 스포링은 σ_{max}/σ_c 의 범위 가 0.3~0.5일 때 발생한다고 제시하고 있다.

한편, Cai 등(2004)은 캐나다 URL Mine-by test tunnel, 스위스 Lötschberg base tunnel 등의 관측사례분석을 통 해 그림 5와 같이 스포링의 발생여부를 평가할 수 있는 축차응력과 암반강도($\sigma_{cm} = \sqrt{s}\sigma_c$)의 비(σ_{dev}/σ_{cm})를 제안하였고 축차응력과 암반강도의 비가 0.4~0.6일 때 스포링이 발생한다고 제시하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 여러 학자에 의해 스포링

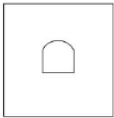

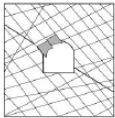


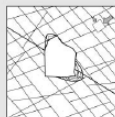


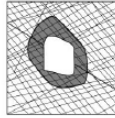
	Massive (RMR > 75)	Moderately Fractured (50 > RMR > 75)	Highly Fractured (RMR < 50)	
Low In-Situ Stress ($\sigma_1/\sigma_3 < 0.15$)	 Linear elastic response.	 Falling or sliding of blocks and wedges.	 Unravelling of blocks from the excavation surface.	Low Mining-Induced Stress $\sigma_{max}/\sigma_c < 0.3 \pm 0.1$
Intermediate In-Situ Stress ($0.15 < \sigma_1/\sigma_3 < 0.4$)	 Brittle failure adjacent to excavation boundary.	 Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks.	 Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities.	Intermediate Induced Stress $0.3 \pm 0.1 < \sigma_{max}/\sigma_c < 1.15 \pm 0.1$
High In-Situ Stress ($\sigma_1/\sigma_3 > 0.4$)	 Failure Zone Brittle failure around the excavation.	 Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks.	 Squeezing and swelling rocks. Elastic/plastic centrium.	High Mining-Induced Stress $\sigma_{max}/\sigma_c > 1.15 \pm 0.1$

그림 4. 개정된 터널거동 분류(Kaiser et al., 2000)

의 발생여부를 평가하는 기준이 제시되었고 이는 각각 3가지 응력강도비의 범위로 나타낼 수 있다. 이러한 3가지 스포링 기준은 퍼지확률을 이용한 스포링 종합 평가 모델에서 퍼지변수(fuzzy variable)로 고려되었다.

- 최대주응력과 무결암의 일축압축강도의 비(σ_1/σ_c) : 0.1~0.2
- 최대점선응력과 무결암의 일축압축강도의 비(D_i = σ_{max}/σ_c): 0.3~0.5
- 축차응력과 암반강도의 비(σ_{dev}/σ_{cm}): 0.4~0.6

지금까지 지표면으로부터 스포링이 발생하는 토피고 를 산정하기 위한 방법으로는 Martin 등(1999)이 제안 한 손상지수(D_i , damage index)가 식 (1)과 같은 조건일 때 스포링이 시작되는 것으로 평가하여 스포링 한계토 피고를 산정하여 왔다.

$$D_i = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} = \frac{A\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} = \frac{3\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \geq 0.4 \quad (1)$$

즉, 지반조사로부터 구해진 심도별 최대주응력(σ_1)과 최소주응력(σ_3)에 무결암의 일축압축강도(σ_c)를 고려하여 계산된 손상지수(D_i)가 0.4 이상일 때의 깊이를 스포링 한계토피고(critical spalling cover depth)로 정의하였다. 그러나, Martin 등(1999)의 손상지수는 분자항인 최대점선응력(σ_{max})을 구할 때 형상계수 A를 항상 3으로 고정한 값을 사용하기 때문에 공동 형상에 대한 고려가 없다는 문제점을 가지고 있으며, 원형 공동이외의 형상에 대해서는 별도의 수치해석으로 구한 최대점선응력

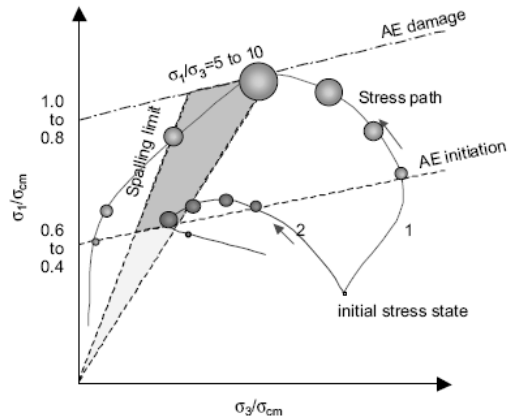


그림 5. 암반강도를 고려한 스포링 기준(Cai et al., 2004)

(σ_{max}) 을 사용하도록 권장하고 있다.

그림 6은 스웨덴 Äspö HRL(Hard Rock Laboratory) 내 공동을 대상으로 Martin 등(1999)의 손상지수(D_i)로부터 산정된 공동의 위치심도와 각 주응력 방향으로 공동을 위치시켰을 때의 스폐링 발생여부를 분석한 사례이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 Martin 등(1999)의 손상지수 0.4를 적용한 스폐링 한계토포고와 3가지 주응력 방향으로 공동을 위치시켰을 때의 스폐링 발생여부를 분석한 결과 중간주응력(σ_2)와 최소주응력(σ_3)의 방향으로 위치시켰을 때 약 300 m 깊이에서부터 스폐링의 발생이 예측되었으나 최대주응력(σ_1)의 방향으로 위치시켰을 때는 스폐링이 발생하지 않는 것으로 평가되었다. 이러한 분석내용은 실제 약 420 m 깊이에서 스폐링이 발생한 관측결과와 상이하므로 Martin 등(1999)의 손상지수(D_i)를 이용한 스폐링 한계토포고 산정 시 손상지수에 대한 충분한 검토가 필요하다는 점을 시사하고 있다.

3. 퍼지개념과 퍼지확률이론의 고찰

3.1 퍼지집합과 소속함수

퍼지이론은 자연 현상의 불확실한 상태를 수학적인 개념을 통해 표현해 주는 방법으로 Zadeh(1965)에 의해

최초로 제안되었다. 퍼지이론은 흔히 많이 사용되는 보통집합(crisp set)의 개념을 확장 또는 일반화한 것으로 일정한 구간으로 표현된 값이나 언어적 표현(linguistic expression) 등과 같이 애매하거나 불확실한 정보를 모델화하고 수식으로 처리할 수 있는 수학적인 도구로 다양한 분야에서 활용되고 있다.

보통집합(crisp set)에서는 임의의 원소(element) x 가 집합 A 에 소속되어 있으면 식 (2)와 같이 표시하고, x 가 집합 A 의 원소 또는 멤버(member)라고 한다.

$$x \in A \tag{2}$$

또한, 원소 x 가 집합 A 의 원소가 아니면 식 (3)과 같이 표시한다.

$$x \notin A \tag{3}$$

이러한 개념은 소속함수(membership function), μ_A 를 통해 표현될 수 있는데, 원소 x 가 집합 A 에 소속되는가 그렇지 않은가를 식 (4)와 같이 소속함수를 통해 나타내게 된다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \tag{4}$$

즉, 원소 x 가 집합 A 에 소속되었을 경우 소속함수의

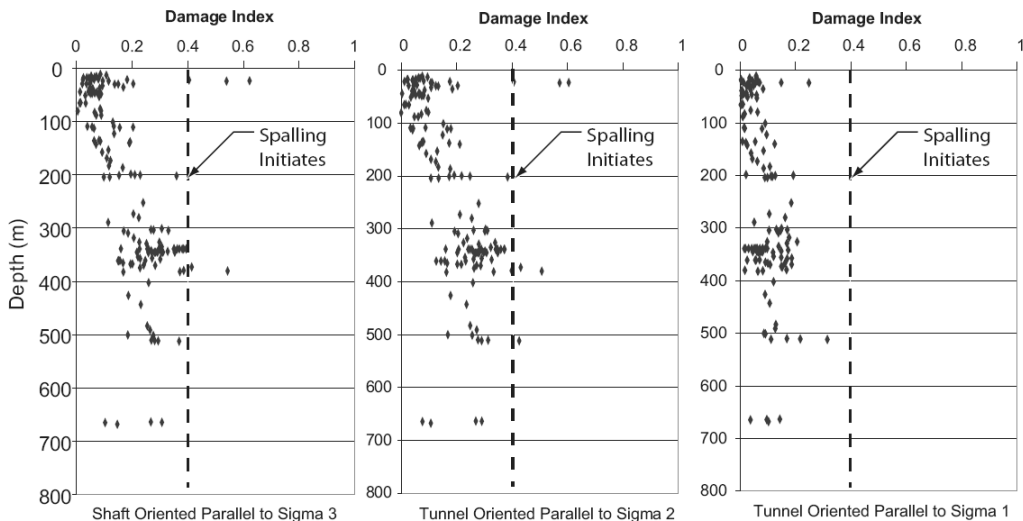


그림 6. 손상지수(D_i)로 평가된 공동의 위치심도와 공동의 방향(Martin, 2001)

값은 1, 포함되지 않을 경우 0의 소속함수 값을 보인다. 따라서, 그림 7에서와 같이 보통집합에서 소속함수의 값은 $\{0,1\}$ 두가지 값만 존재하는 반면에 퍼지집합에서는 보통집합과는 달리 원소 x 가 집합 A 에 포함되는가를 판단하는 뚜렷하거나 정확한 경계가 존재하지 않게 된다.

그 결과 퍼지집합에서는 원소 x 의 소속함수가 전혀 소속되어 있지 않은 상태를 의미하는 0에서 소속되었음을 의미하는 1 사이에 존재하게 되며 퍼지집합의 소속함수는 소속정도에 따라 0~1 사이의 어떠한 숫자로도 표현될 수 있다.

한편, 퍼지집합에서 소속함수(membership function)는 다양한 형태의 함수로 표현될 수 있으며 원소의 불확실성이나 애매함을 표현하는데 매우 중요한 역할을 한다. 원소의 값이 연속값인 경우 다양한 형태의 함수를 적용할 수 있으며 선형, 종형, 삼각형, 사다리형 등이 주로 많이 사용된다.

암반공학 분야에서 퍼지이론은 1980년대 중반 이후 터널 지보설계를 위한 의사결정수단으로 퍼지이론이 적용될 수 있음을 발견한 후 경험적 암반분류인 *RMR*이나 *Q-System*이 조사자나 전문가 개개인의 주관적인 판단에 전적으로 의존하여 결정되었기 때문에 이 부분에 퍼지이론을 접목하여 많은 성과를 얻은 바 있다. 최근에는 암석의 일축압축강도를 퍼지이론을 이용하여 추정하기 위해 반발경도계수의 일종인 *L-value*와 암석의 밀도 그리고 공극률을 입력변수로 하여 일축압축강도를 추정하기 위한 퍼지모델을 설계한 바 있다. 국내에서도 암반공학 분야에서 다양한 퍼지기법이 적용되고

있는데 터널의 안전진단 시 발생하는 여러가지 문제들 중 콘크리트 라이닝의 상태평가를 보다 정량적이고 객관적으로 수행하기 위해 퍼지이론을 적용하였고, 국내 터널현장 자료를 바탕으로 퍼지이론 및 인공신경망과 퍼지이론을 접목시킨 뉴로-퍼지이론을 통해 *RMR* 분류를 시도하였다. 또한, 퍼지이론에 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 조합한 퍼지 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 암반사면의 파괴확률을 산정하는 방법이 제안되었다.

3.2 퍼지관계

수학에서 다루는 기본적인 관계인 이항관계(binary relation)는 두 집합 X, Y 에 각각 속하는 임의의 원소 $x \in X$ 와 $y \in Y$ 가 서로 관계가 있거나 또는 서로 관계가 없거나 둘 중의 하나만을 의미하는 소위 이치적 관계이다. 그러나, 자연 현상에서의 모든 관계는 관계가 있거나 관계가 없는 두가지 현상으로 명확하게 구분할 수 없고 애매모호함이 상존하므로 이러한 관계를 규정하기 위해 퍼지관계(fuzzy relation)의 설정이 필요하다. 예를 들어 상호간의 닮은 관계를 표현할 때 “닮았다”와 “안 닮았다”로 구분되는 관계로 설정할 수 있는데, 이와 같은 관계를 이항관계(binary relation)라고 하며 X 의 원소와 Y 의 원소가 R 의 관계에 있을 때 그 값을 1, R 의 관계에 있지 않을 때 그 값을 0으로 매길 수 있다. 즉, 이항관계 R 을 $X \times Y$ 에서 $\{0,1\}$ 로의 함수로 생각할 수 있다.

그러나, 일반적으로 상호간의 관계가 애매모호함이 없는 관계로 판단하지만 실제 현상은 그렇게 구분되어지지 않는다. 닮은 관계는 그 정도가 “닮았다(1)”와 “안 닮았다(0)”로 구분되는 것은 아니고 그 중간적인 위치가 있을 수 있으므로 이항관계 $R: X \times Y \rightarrow \{0,1\}$ 을 퍼지관계 $R: X \times Y \rightarrow [0,1]$ 로 확장할 수 있다(이병수 등, 2004).

X, Y 를 임의의 집합이라고 하자. R 이 $X \times Y$ 에서 퍼지관계(fuzzy relation)라는 것은 소속정도의 함수 μ_R 이 주어져 있는 $X \times Y$ 에서의 퍼지집합을 의미하며 $X \times Y$ 에서 $[0,1]$ 로의 함수를 말한다. 따라서, 퍼지관계 R 은 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$R = \{((x,y), \mu_R(x,y)) | (x,y) \in X \times Y, \mu_R(x,y) \in [0,1]\} \quad (5)$$

모든 $x \in X, y \in Y$ 에 대해 $\mu_R(x,y) = 1$ 이면 퍼지관계 R 은 보통관계(crisp relation)이며, 식 (6)과 같이 표현된다.

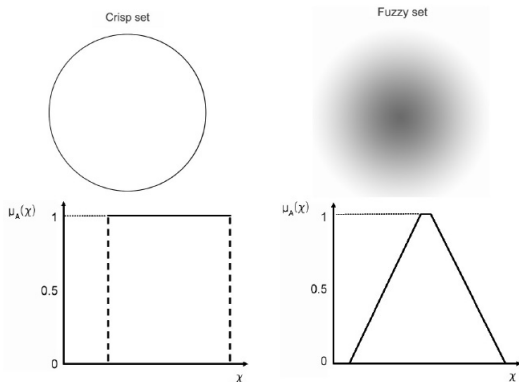


그림 7. 보통집합과 퍼지집합(박혁진, 2007)

$$R = \{(x, y) | x \in X, y \in Y\} = X \times Y \quad (6)$$

퍼지관계이론은 여러 인자들 간의 상호 연결관계를 퍼지함수를 이용하여 설정하는 방법으로 암반공학 분야에서는 암반폭렬현상(rockburst)의 발생여부 평가와 광산의 안전관리 평가를 위한 수단으로 적용되어 그 적용성이 입증된 바 있다(Liu et al., 2008).

3.3 퍼지확률

전통적으로 지반구조물 설계의 타당성 평가를 위해 허용응력설계법의 안전율(factor of safety) 개념을 이용하였으며, 안전율은 저항과 하중의 비로 표현될 수 있다. 그러나, 기존의 안전율 개념은 지반구조물의 상대적인 신뢰성을 측정하는데 한계를 가지고 있으며, 실제 적용되고 있는 파라미터(재료특성, 강도, 하중 등)가 불확실성을 가지고 있음에도 각 설계정수에 대한 대표값을 할당해야 한다는 문제점을 가지고 있다. 이와 같이 대표값을 이용하여 해석하는 방법을 결정론적(deterministic) 방법이라 한다. 안전율에 대한 또 다른 방법인 확률론적 접근법은 파라미터의 불확실성을 보다 명료하게 하여 안전율의 개념을 확대한 것이다. 이러한 불확실성은 기존의 데이터나 판단에 의해 할당된 데이터를 통계 분석하여 정량화 시킬 수 있다.

공학적인 문제에 필연적으로 내재될 수 밖에 없는 임의성(randomness), 불확실성(uncertainty)에 대한 대비를 위해 기존의 결정론적 방법에서는 주로 경험에 입각한 안전율을 사용하여 여유강도를 두어 이론상 파괴의 위험이 없는 것으로 가정하지만 불확실성 자체를 정량적으로 고려하는 신뢰성 해석에서는 작지만 0 이 아닌 파

괴의 가능성을 고려하여 공학문제에서의 안정성 평가를 수행하는 것이 기존의 방법과 다른 점이라 할 수 있다.

신뢰성 해석에서는 기존의 방법에서 고려하지 않았던 파괴의 발생 가능성이 항상 존재한다는 사실에 입각하여 이를 정량화하여 해석에 포함시키는 것 이외에는 기존의 전통적인 방법과 다를 바가 없다. 따라서, 신뢰성 해석은 파괴의 발생 가능성을 정량적인 파괴확률(probability of failure)로서 산정하고 표현할 수 있다는 점에서 기존의 정성적인 안전율을 이용하는 방법보다 더욱 합리적이라 할 수 있다.

공학적인 문제에 신뢰성 해석을 수행하려면 먼저 지반의 안전과 파괴를 판단할 수 있는 설계기준(design criterion) Z 가 식 (7)과 같이 지반에 가해지는 하중 L 과 그에 저항하는 저항 R 의 한계상태식으로 표현되어야 한다.

$$Z = R - L \quad (7)$$

만일 그림 8에서와 같이 저항 R 이 확률분포함수가 $F_R(r)$ 인 확률변수이고 L 은 대표값 l 을 갖는 하중성분이라고 하면 파괴확률은 식 (8)과 같이 표현될 수 있고, 반대로 R 이 대표값 r 을 갖는 저항성분이고 L 이 확률분포함수가 $F_L(l)$ 인 확률변수라고 하면 파괴확률은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = P[Z \leq 0] = P[R \leq l] = F_R(l) \quad (8)$$

$$P_f = P[Z \leq 0] = P[r \leq L] = \int F_R(r) f_L(l) dl \quad (9)$$

퍼지개념을 접목한 퍼지확률이론은 구조공학에서 널

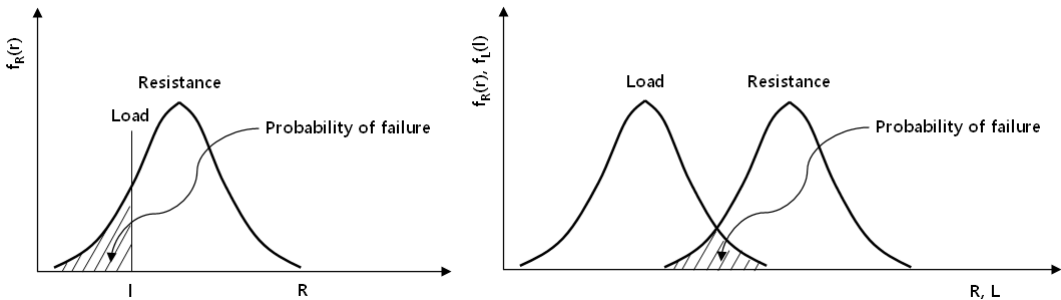


그림 8. 대표값과 확률분포를 고려한 파괴확률 개념(양영순 등, 1999)

리 적용되고 있는 신뢰성 해석의 변형된 해석방법으로 제안되었다. 전통적인 신뢰성 해석에서는 파괴기준으로 대표되는 저항성분과 응력으로 대표되는 하중성분을 확률분포로 고려하여 상호 비교를 통해 파괴확률을 구하는 과정을 거치게 되는데 반해 퍼지확률 해석에서는 저항성분인 파괴기준을 퍼지변수(fuzzy variable)로 고려하고 확률분포 또는 대표값인 하중성분과 상호 비교함으로써 파괴확률을 산정하는 방법이다. 여기서 저항성분인 파괴기준을 퍼지변수로 고려할 수 있는 이유는 파괴기준이 전문가 개개인의 경험과 판단에 따라 다르게 적용될 수 있는 주관성(subjectiveness)이 있고 파괴기준 자체가 모호함(fuzziness)과 애매함(vagueness)을 내포하고 있음에 기인한 것이다.

일반적으로 암반의 파괴는 암반의 저항과 하중 효과의 상호관계에 따라 변하게 되며, 암반의 기하학적, 재료적 특성은 확률분포 또는 대표값으로 고려할 수 있으며 암반의 파괴기준은 분명(distinctive)하거나 또는 모호(fuzzy)하다고 볼 수 있다. 만일 암반의 파괴기준이 명확하게 규정된다면 암반의 파괴확률은 주어진 파괴기준에서 신뢰성 이론에 입각하여 평가할 수 있다. 그러나, 실무에서는 파괴기준 자체의 애매모호한 특성으로 인해 암반의 파괴기준을 명확하게 정의하기 어렵고, 엔지니어 개개인의 경험, 예상과 다른 요인에 의해 달라질 수 있다. 따라서, 그림 9에서와 같이 퍼지확률이론을 통해 저항성분인 파괴기준을 퍼지변수로 고려하고, 하중성분을 확률분포 또는 대표값으로 고려함으로써 파괴확률을 구하게 된다. 상기 식 (8)과 (9)는 퍼지확률이론을 적용함으로써 식 (10)과 (11)을 통해 파괴확률을 구하게 된다.

$$P_f = P[R \leq L] = F_R(x) = \mu_R(x) \quad (10)$$

$$P_f = P[R \leq L] = \int F_R(x) f_L(x) dx = \int \mu_R(x) f_L(x) dx \quad (11)$$

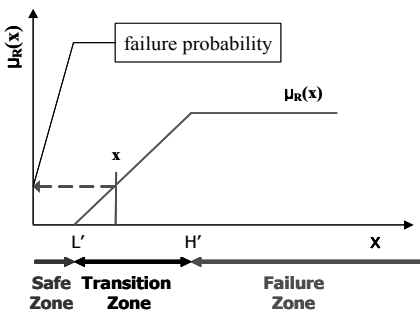
여기서, $\mu_R(x)$ 는 저항성분의 퍼지소속함수이고 $f_L(x)$ 는 하중성분의 확률밀도함수이다.

암반공학 분야에서의 퍼지확률이론은 터널 주변 암반의 손상도를 평가하기 위해 도입되는 한계손상계수(critical damage index)가 연구자에 따라 크게 다르다는 점에 착안하여 한계손상계수의 기준설정에 대한 모호성을 합리적으로 고려하기 위해 이방성 암반에서 발파하중으로 인한 손상범위의 산정과 굴착경계선의 결정에 적용된 바 있다(Wu et al., 2003; 이민도 등, 2003).

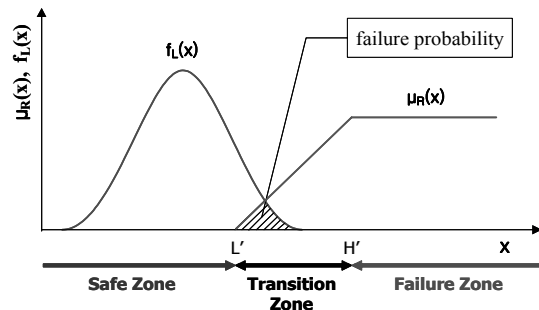
이상에서 서술한 퍼지개념과 퍼지확률이론을 접목한 스폐링 발생 종합 평가모델에서는 저항성분인 스폐링 기준을 퍼지변수로 고려하고, 하중성분인 응력강도비를 대표값 또는 확률분포로 적용함에 따라 각각 fuzzy criterion-deterministic load model과 fuzzy criterion-random load model의 두가지 형태로 구분하여 적용하도록 구성하였다.

4. 스폐링 발생 종합 평가모델의 개발

3절에서 제시된 퍼지개념과 퍼지확률이론에 기반한 스폐링 발생 종합 평가모델은 그림 10과 같은 세부 과정을 통해 적용될 수 있다. 스폐링 평가인자와 스폐링 평가등급을 결정하고 이를 동시에 고려하기 위해 퍼지판



(a) Fuzzy criterion-Deterministic load model



(b) Fuzzy criterion-Random load model

그림 9. 퍼지확률이론에서의 파괴확률 개념

계를 이용한다. 설정된 스폐링 평가인자와 평가등급간의 퍼지관계 소속함수 그래프에 현장의 현지응력강도비 또는 유도응력강도비를 적용하여 퍼지관계 행렬을 구한다. 여기에 스폐링 평가인자들을 종합적으로 고려하기 위해 가중치를 적용함으로써 스폐링의 발생여부와 스폐링 발생확률을 평가할 수 있는 의사결정 행렬을 산정하게 된다.

4.1 스폐링 평가인자와 평가등급의 선택

기존 문헌 연구를 토대로 본 평가모델에서는 스폐링 평가인자를 σ_1/σ_c , D_i , σ_{dev}/σ_{cm} 의 3가지 응력강도비로 채택하여 평가인자 집합을 구성하였고 식 (12)와 같이 나타내었다.

$$X = [x_i]_{1 \times 3} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3] \\ = [\sigma_1/\sigma_c \quad D_i \quad \sigma_{dev}/\sigma_{cm}], \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

동시에 평가등급을 *No damage*, *Spalling*의 2가지 등급으로 채택하여 평가등급 집합을 구성하여 식 (13)에

나타내었다.

$$Y = [y_j]_{1 \times 2} = [y_1 \quad y_2] \\ = [No \text{ damage} \quad Spalling], \quad j = 1, 2 \quad (13)$$

스포링 평가인자와 평가등급을 동시에 조합하기 위해 퍼지관계를 이용하면 스폐링 평가인자 $x_i (i = 1, 2, 3)$ 와 스폐링 평가등급 $y_j (j = 1, 2)$ 간의 퍼지관계 구성은 표 1과 같으며, 스폐링 평가인자의 수 만큼 퍼지관계 소속함수 그래프가 결정된다.

4.2 스폐링 평가인자에 대한 퍼지구간의 결정

본 평가모델에서 고려되는 스폐링 평가인자인 3가지 응력강도비의 범위를 이용하여 스폐링 기준을 퍼지변수

표 1. 스폐링 평가인자와 평가등급간의 관계

평가인자 평가등급	σ_1/σ_c	$D_i (= \sigma_{max}/\sigma_c)$	σ_{dev}/σ_{cm}
<i>No damage</i>	< 0.1	< 0.3	< 0.4
<i>Spalling</i>	≥ 0.1~0.2	≥ 0.3~0.5	≥ 0.4~0.6

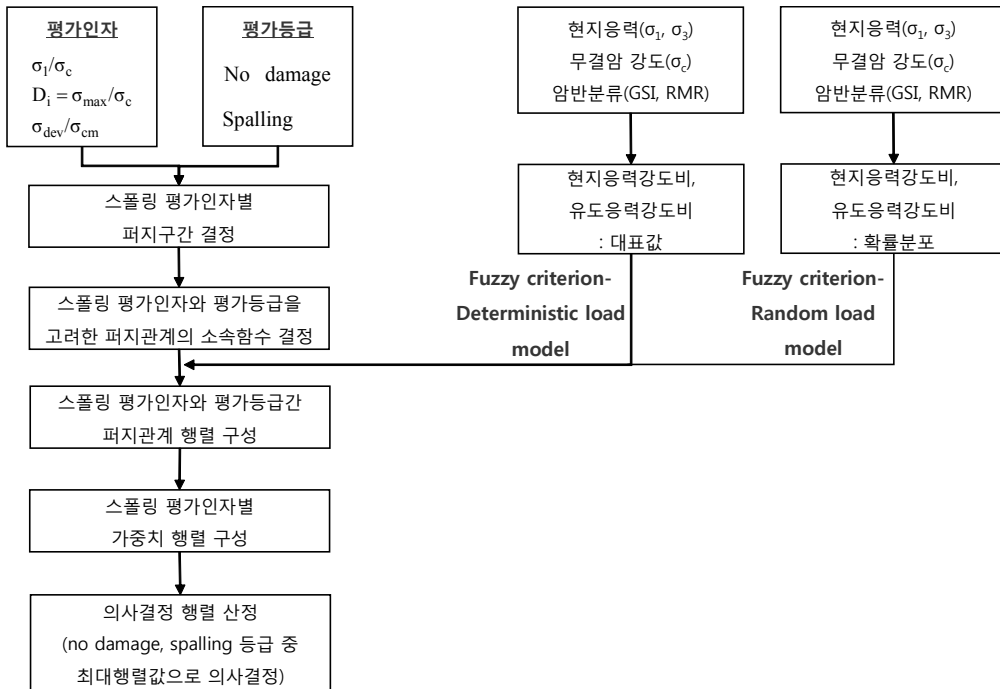


그림 10. 퍼지확률을 이용한 스폐링 발생 종합 평가모델의 적용 흐름

로 고려하였다. 각각의 응력강도비 범위 중 상한값 이상에서는 100% 스폐링이 발생하는 것으로 고려하여 퍼지 소속도가 1이 되도록 하였고, 응력강도비 범위 중 하한값에서 2가지 평가등급의 소속정도가 모호(fuzzy)하다는 점에 착안하여 2가지 평가등급의 퍼지소속도가 0.5에서 교차하도록 식 (14)를 이용하여 퍼지구간을 설정하였다. 표 2는 스폐링 평가인자인 3가지의 응력강도비에 대한 범위값과 퍼지구간을 나타낸 것이다.

퍼지하한:

$$\begin{aligned} L' &= M - 3(M - L) & M - 3(M - L) > 0 \\ L' &= 0 & M - 3(M - L) \leq 0 \end{aligned}$$

퍼지상한:

$$\begin{aligned} H' &= M + (H - M) & M + (H - M) < 1 \\ H' &= 0 & M + (H - M) \geq 1 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, L, M, H는 응력강도비의 최소값, 중간값, 최대값을 나타내며, L', H'는 퍼지하한과 퍼지상한을 의미한다.

암반공동에서의 스폐링은 현지응력강도비(σ_1/σ_c)와 유도응력강도비($D_i = \sigma_{max}/\sigma_c, \sigma_{dev}/\sigma_{cm}$)가 스폐링 기준을 초과하는 경우에 발생한다. 스폐링 기준은 여러 가지 인자들에 의해 결정되며 학자들마다 주관적으로 적용하고 있다. 따라서, 스폐링 기준을 일률적으로 정의하는 것은 매우 어려우므로 스폐링 발생 경계인 스폐링 기준에 확률적으로 전이영역(transition zone)을 정의하는 것이 논리적이다. 표 2는 3가지 스폐링 기준의 범위로부터 구한 퍼지구간을 나타내고 있으며, 이러한 퍼지구간의 의미는 다음과 같다.

- 퍼지상한보다 큰 응력강도비인 경우 파괴구역에 있는 것이며 파괴확률이 100%를 의미한다.
- 퍼지하한보다 작은 응력강도비인 경우 안전한 구역에 있는 것이며 파괴확률이 0%을 의미한다.
- 응력강도비가 퍼지구간 내에 있는 경우 퍼지영역으로 파괴확률은 소속함수에 따라 분포한다.

표 2. 스폐링 기준의 범위와 퍼지구간

스팸링 평가인자	범위	퍼지구간(L' ~ H')
σ_1/σ_c	0.1 ~ 0.2	0.0 ~ 0.2
$D_i (= \sigma_{max}/\sigma_c)$	0.3 ~ 0.5	0.1 ~ 0.5
σ_{dev}/σ_{cm}	0.4 ~ 0.6	0.2 ~ 0.6

4.3 스폐링 평가인자와 평가등급을 고려한 퍼지관계 소속함수의 결정

4.2절에서 구한 퍼지구간의 상한과 하한값을 이용하고 3가지 스폐링 평가인자와 2가지 평가등급간의 관계를 설정하기 위해 퍼지관계이론을 통해 3가지 스폐링 평가인자별 퍼지관계 소속함수 그래프를 그림 11과 같이 구하였다. 퍼지관계 소속함수 그래프의 형태는 각 스폐링 기준의 퍼지상하한과 식 (15)를 통해 Spalling 등급의 경우 선형 증가형(linear ascending)으로 결정하였고, No damage 등급의 경우는 선형 감소형(linear descending)으로 결정하였다.

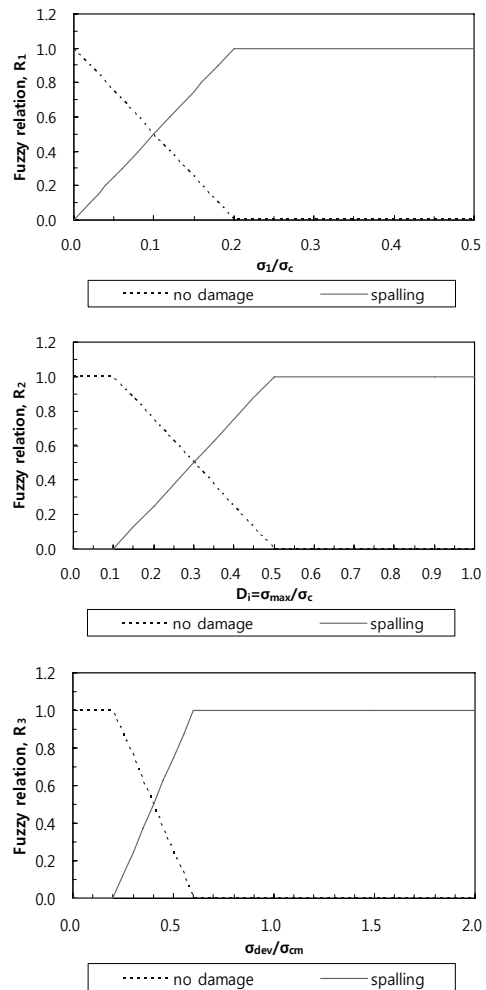


그림 11. $\sigma_1/\sigma_c, D_i, \sigma_{dev}/\sigma_{cm}$ 와 평가등급간 퍼지관계 소속함수 그래프

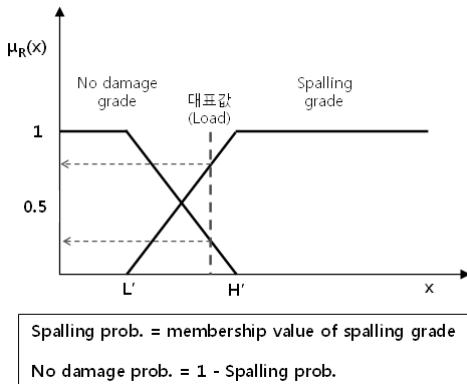
으로 선정하여 임의의 응력강도비에서 계산된 2가지 평가등급의 퍼지소속도합이 1이 되도록 하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{No damage: } \mu(x) &= \begin{cases} 1 & x \leq L' \\ \frac{H-x}{H-L'} & L' < x \leq H \\ 0 & x > H \end{cases} \\
 \text{Spalling: } \mu(x) &= \begin{cases} 0 & x \leq L' \\ \frac{x-L'}{H-L'} & L' < x \leq H \\ 1 & x > H \end{cases} \quad (15)
 \end{aligned}$$

4.4 스펠링 평가인자와 평가등급간의 퍼지관계 행렬(fuzzy relation matrix)의 산정

4.3절에서 구한 3가지 스펠링 평가인자별 소속함수 그래프로부터 현지응력, 일축압축강도 그리고 암반분류를 통해 구해진 현지응력강도비(σ_1/σ_c)와 유도응력강도비($D_i, \sigma_{dev}/\sigma_{cm}$)를 대입하여 그 때의 퍼지소속도값 또는 현지응력강도비와 유도응력강도비의 확률밀도함수와 겹쳐지는 면적으로부터 퍼지관계 행렬을 그림 12와 같은 개념으로 산정하게 된다. 식 (16)은 fuzzy criterion-deterministic load 모델에서의 퍼지관계 행렬이고, 식 (17)은 fuzzy criterion-random load 모델에서의 퍼지관계 행렬을 나타낸 것이다.

$$R = [\mu_R(x_i, y_j)]_{3 \times 2} = \begin{bmatrix} \mu_R(x_1, y_1) & \mu_R(x_1, y_2) \\ \mu_R(x_2, y_1) & \mu_R(x_2, y_2) \\ \mu_R(x_3, y_1) & \mu_R(x_3, y_2) \end{bmatrix} \quad (16)$$



(a) Fuzzy criterion-Deterministic load model

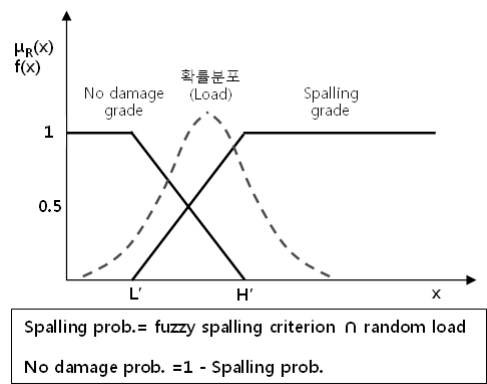
$$\begin{aligned}
 R &= [\mu_R(x_i, y_j)]_{3 \times 2} \\
 &= \begin{bmatrix} \int_{-\infty}^H \mu_R(x_1, y_1) \cdot f(x_1) dx_1 & \int_{L'}^{\infty} \mu_R(x_1, y_2) \cdot f(x_1) dx_1 \\ \int_{-\infty}^H \mu_R(x_2, y_1) \cdot f(x_2) dx_2 & \int_{L'}^{\infty} \mu_R(x_2, y_2) \cdot f(x_2) dx_2 \\ \int_{-\infty}^H \mu_R(x_3, y_1) \cdot f(x_3) dx_3 & \int_{L'}^{\infty} \mu_R(x_3, y_2) \cdot f(x_3) dx_3 \end{bmatrix} \quad (17)
 \end{aligned}$$

4.5 스펠링 평가인자별 가중치 행렬(weight matrix)의 산정

4.4절에서 제시된 퍼지관계 소속함수 그래프는 스펠링 평가인자의 수 만큼 구해지고, 스펠링 평가인자를 종합적으로 고려하기 위해 본 평가모델에서는 평가인자별 가중치를 적용하였다.

가중치 결정방법으로는 계층분석기법(Alytic Hierarchy Process)을 적용하였는데, 의사결정요소에 대한 상대 중요도 결정 시 Saaty(1980)의 상대적 중요도 척도(표 3)를 이용하여 쌍대비교행렬(pairwise comparison matrix)을 구성하였고 이를 통해 스펠링 평가인자별 가중치를 결정하였으며, 본 평가모델에서는 3가지 스펠링 평가인자간의 상대 중요도를 다음과 같은 기준에 의하여 평가하였다.

- 스펠링은 암반공동에 작용하는 현지응력 중에서 암반공동에 작용하는 최대주응력에 영향을 받고 구속압의 작용으로 스펠링의 진전이 제한되는 효과가 있는 것으로 보고되고 있어 스펠링 기준 중 최대주응력과 최소주응력을 모두 고려하고 있는 최대접선응



(b) Fuzzy criterion-Random load model

그림 12. 퍼지관계 행렬의 산정 개념

력과 무결암의 일축압축강도의 비($D_i = \sigma_{max}/\sigma_c$)를 최대주응력과 무결암의 일축압축강도의 비(σ_1/σ_c)와 축차응력과 암반강도의 비(σ_{dev}/σ_{cm}) 보다 상대 중요도가 높은 것으로 고려하였다.

- 축차응력과 암반강도의 비(σ_{dev}/σ_{cm})는 구속압의 효과와 현장의 암반강도를 고려하고 있으므로 최대주응력과 무결암의 일축압축강도의 비(σ_1/σ_c) 보다 상대 중요도를 높게 고려하였다.
- 반면에 최대주응력과 무결암의 일축압축강도의 비(σ_1/σ_c)는 구속압에 대한 고려가 없으므로 축차응력과 암반강도의 비(σ_{dev}/σ_{cm}) 보다 상대 중요도를 낮게 고려하였다.

표 4는 3가지 스폐링 평가인자간의 상대중요도를 고려한 쌍대비교 결과를 나타낸 것으로 최대접선응력과 무결암의 일축압축강도의 비(D_i), 축차응력과 암반강도의 비(σ_{dev}/σ_{cm}), 최대주응력과 무결암의 일축압축강도의 비(σ_1/σ_c) 순으로 가중치가 크게 평가되었다. 3가지 스폐링 평가인자에 대한 쌍대비교의 일관성을 검증하기 위해 일관성지수(CI)와 난수지수(RI)의 비인 일관성 비율(CR)을 구하였고, 일관성 비율이 10% 이내의 값을 보이고 있어 쌍대비교의 적정성을 확인하였다. 3가지 스폐링 평가인자에 대한 가중치 산정 결과는 식 (18)과 같다.

표 3. 상대적 중요도의 척도 및 언어적 의미(Saaty, 1980)

척도	정의
1	비슷하게(equal importance)
3	약간 더 중요(slight importance)
5	매우 더 중요(strong importance)
7	확실히 더 중요(demonstrated importance)
9	절대적으로 더 중요(absolute importance)
2,4,6,8	위에서 정의된 척도들의 중간 척도
위 척도의 역수	두 요소 a, b에 대하여 만약 a/b의 측정값이 k라면 b/a는 1/k가 됨

표 4. 스폐링 평가인자별 상대중요도를 고려한 쌍대비교행렬

C	σ_1/σ_c	D_i	σ_{dev}/σ_{cm}
σ_1/σ_c	1	1/5	1/3
D_i	5	1	5/3
σ_{dev}/σ_{cm}	3	3/5	1

$$W = [w_i]_{1 \times 3} = [w_1, w_2, w_3] \\ = [0.11, 0.56, 0.33], \quad i = 1, 2, 3 \quad (18)$$

4.6 퍼지관계 행렬과 가중치 행렬을 결합한 의사결정 행렬(decision-making matrix)의 산정

4.4절과 4.5절에서 결정된 퍼지관계 행렬과 가중치 행렬의 곱을 통해 2가지 평가등급에 대한 행렬값을 산정할 수 있다. 2가지 평가등급에 대한 행렬값의 비교에 통해 스폐링의 발생여부를 평가하는데, 스폐링 등급의 행렬값이 크면 스폐링이 발생하는 것으로 평가할 수 있고 이 때의 행렬값이 스폐링 발생확률이 된다. 식 (19)는 의사결정 행렬을 나타낸 것으로 그 적용방식에 따라 2가지로 구분될 수 있는데, 식 (20)은 fuzzy criterion-deterministic load model에서의 의사결정 행렬식, 식 (21)은 fuzzy criterion-random load model에서의 의사결정 행렬식이 된다.

$$D = W \cdot R = [d_1 \quad d_2] \\ = [no \ damage \ probability \ spalling \ probability] \quad (19)$$

$$D = W \cdot R = [d_1 \quad d_2] = [w_i]_{1 \times 3} \cdot [\mu_R(x_i, y_j)]_{3 \times 2} \\ = \left[\sum_{i=1,2,3} w_i \cdot \mu_R(x_i, y_j) \quad \sum_{i=1,2,3} w_i \cdot \mu_R(x_i, y_j) \right] \quad (20)$$

$$D = W \cdot R = [d_1 d_2] = [w_i]_{1 \times 3} \cdot \left[\int \mu_R(x_i, y_j) \cdot f(x_i) dx_i \right]_{3 \times 2} \quad (21) \\ = \left[\sum_{i=1,2,3} w_i \int_{-\infty}^H \mu_R(x_i, y_j) \cdot f(x_i) dx_i \quad \sum_{i=1,2,3} w_i \int_L^{\infty} \mu_R(x_i, y_j) \cdot f(x_i) dx_i \right]$$

5. 스폐링 발생 종합 평가모델을 이용한 스폐링 사례 분석

4절에서 제시된 퍼지확률을 이용한 스폐링 발생 종합 평가모델을 이용하여 스폐링이 발생한 현장에 대해 스폐링 평가를 실시하였다. 표 5는 fuzzy criterion-deterministic load model을 적용한 결과로 스폐링 발생여부와 발생확률을 정리한 것이다.

평가모델에 의한 분석결과 현장관측결과에서와 같이 대부분의 현장에서 스폐링이 발생하는 것으로 평가되었고 고 현장별로 스폐링 발생확률을 산정할 수 있었다. 여기

서, 특이한 사항은 대부분의 현장에서 동일한 평가모형을 적용함에 있어 3가지 스폐링 평가인자를 각각 개별적으로 적용하여 평가한 경우와 3가지 스폐링 평가인자에 스폐링 평가인자별 가중치를 적용하여 종합적으로 평가한 경우 모두 스폐링이 발생하는 것으로 평가되었다. 그러나, 캐나다 URL Room 413과 스웨덴 Brofjorden cavern access tunnel 현장에서는 각각 $D_i (= \sigma_{\max} / \sigma_c)$ 과 $\sigma_{dev} / \sigma_{cm}$ 의 스폐링 기준을 사용하는 경우 스폐링이 발생한 현장임에도 불구하고 스폐링이 발생하지 않는 현장으로 평가되는 결과를 보였으나 본 연구에서 제안한 3가지 스폐링 평가인자에 가중치를 적용하는 방법을 적용함으로써 현장관측결과와 부합되는 결론에 도달할 수 있었다.

또한, 본 연구에서는 Hoek과 Brown(1980)의 형상계수가 고려된 수정손상지수(D_{is} , modified damage index)를 포함하는 스폐링 평가인자에 대해 퍼지확률 스폐링

발생 종합 평가모델에 적용하여 스폐링 평가인자 중 σ_{\max} / σ_c 산정 시 형상계수의 도입여부에 따른 스폐링 발생확률을 산정하였다. 3가지 스폐링 평가인자(σ_1 / σ_c , $D_i = \sigma_{\max} / \sigma_c = (3\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_c$, $\sigma_{dev} / \sigma_{cm}$)에서 형상계수를 항상 3으로 고정하는 Martin 등(1999)의 손상지수(D_i)를 형상계수가 도입된 수정손상지수(D_{is})로 대체한 스폐링 평가인자(σ_1 / σ_c , $D_{is} = \sigma_{\max} / \sigma_c = (A\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_c$, $\sigma_{dev} / \sigma_{cm}$)를 적용하여 스폐링의 발생유무와 발생확률을 비교하였다. 여기서, 수정손상지수(D_{is})는 Martin 등(1999)의 손상지수(식 22)에서 분자항인 최대접선응력(σ_{\max}) 산정 시 형상계수 A 를 3으로 고정하였던 것을 Hoek과 Brown(1980)이 제시한 형상계수가 도입될 수 있도록 식 (23)과 식 (24)와 같이 수정된 값이다. 공동의 위치심도가 깊고 축압계수가 큰 조건에서는 천정에서 스폐링의 발생이 예상되므로 식 (23)을 이용하여 스폐링 한계 토피고를 평가하고, 공동의 위치심도가 매우 깊고 축압

표 5. 스폐링 발생현장에 대한 평가모델의 적용결과

현장	현장관측결과	평가모델의 예측결과	
		스포링 발생유무	스포링 발생확률(%)
URL Mine-by test tunnel	천정에서 깊이 약 0.5 m로 스폐링 발생	○	88.1
URL Room 413	천정에서 소규모 스폐링 발생	○	76.4
URL Room 405	인버트에서 깊이 약 0.3 m로 스폐링 발생	○	88.1
Donkin-Morien Tunnel	천정에서 깊이 약 1.0~1.4 m로 스폐링 발생	○	85.3
Canadian Mine Drift	측벽에서 깊이 약 2 m로 스폐링 발생	○	91.3
Golden Giant Mine Drift	천정에서 깊이 약 1 m로 스폐링 발생	○	100.0
Lötschberg Base Tunnel	측벽에서 깊이 약 0.6 m로 스폐링 발생	○	75.9
Furka Fenster Tunnel	측벽에서 깊이 약 0.4 m로 스폐링 발생	○	56.5
Garpenberg Mine Raise	측벽에서 깊이 약 0.05 m로 스폐링 발생	○	100.0
Renström Mine Raise	측벽에서 깊이 약 0.1~0.2 m로 스폐링 발생	○	100.0
Brofjorden Cavern Access Tunnel	천정에서 두께 약 0.02~0.15 m로 슬래빙 발생	○	52.7
HRL ZEDEX	측벽에서 깊이 약 0.03 m로 스폐링 발생	○	85.6
HRL ASPE	측벽에서 깊이 약 0.07~0.08 m로 스폐링 발생	○	68.5
Zinkgruvan Mine Drift	천정에서 깊이 약 0.1~0.2 m로 스폐링 발생	○	82.8
Kristineberg Mine Drift	천정에서 깊이 약 1.0 m로 스폐링 발생	○	100.0
Heggura Tunnel	천정에서 깊이 약 0.4 m로 스폐링 발생	○	74.8
Kobbskaret Tunnel	천정에서 깊이 약 0.05~0.3 m로 스폐링 발생	○	100.0
Gold Mine Drift	우측상부코너, 좌측 측벽에서 스폐링 발생	○	83.6
East Rand Proprietary Mine Drift	측벽 좌우에서 깊이 약 1.25 m로 스폐링 발생	○	100.0
Yeosu Oil Storage Cavern	갤러리 측벽에서 깊이 약 0.4 m로 스폐링 발생	○	97.2

계수가 작은 조건에서는 측벽에서 스폐링의 발생이 예상되므로 식 (24)를 이용하여 스폐링 한계토포고를 평가할 수 있다(이강현, 2009).

$$D_i = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} = \frac{3\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \quad (22)$$

$$D_{is} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} = \frac{A\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \quad (23)$$

$$D_{is} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} = \frac{B\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \quad (24)$$

표 7은 각각 Martin 등(1999)의 손상지수(D_i)와 수정 손상지수(D_{is})를 포함한 스폐링 평가인자로 산정된 스폐링 발생 결과를 나타낸 것이다.

표 7에서 보는 바와 같이 수정손상지수(D_{is})와 Martin 등(1999)의 손상지수(D_i)를 포함한 스폐링 평가인자에 대해 평가모형을 적용한 결과 검토 현장에 대해 모두 스폐링이 발생하는 것으로 평가되었으나, Furka Fenster

Tunnel과 Brofjorden Cavern Access Tunnel 현장의 경우 Martin 등(1999)의 손상지수(D_i)를 포함한 스폐링 평가인자로 산정된 스폐링 발생확률이 수정손상지수(D_{is})를 포함한 스폐링 평가인자로 산정된 스폐링 발생 확률에 비해 스폐링 발생유무를 판단하는 기준 확률값인 50%에 상대적으로 근접하는 값을 보이고 있어 스폐링이 발생하지 않는 현장으로 평가될 가능성이 많다. 이에 반해 수정손상지수(D_{is})를 포함한 스폐링 평가인자로 산정된 스폐링 발생확률은 Martin 등(1999)의 손상지수(D_i)를 적용한 경우의 스폐링 발생확률보다 상대적으로 큰 값을 보이고 있어 스폐링이 확실하게 발생하는 것으로 평가할 수 있으므로 형상계수를 도입한 수정손상지수를 적용하는 것이 현실적인 스폐링 발생 평가방법이라 판단된다. 또한, 공동형상이 파괴영역의 발생에 큰 영향을 주고 있음을 감안할 때 형상계수가 도입된 수정손상지수(D_{is})를 이용하는 것이 보다 합리적이라 판단된다.

표 6. 공동의 형상계수(Hoek et al., 1980)










									
A	5.0	4.0	3.9	3.2	3.1	3.0	2.0	1.9	1.8
B	2.0	1.5	1.8	2.3	2.7	3.0	5.0	1.9	3.9

표 7. 형상계수 도입여부에 따른 스폐링 발생 평가의 비교

현장	수정손상지수(D_{is})를 포함한 스폐링 평가인자 적용 (형상계수 고려)		손상지수(D_i)를 포함한 스폐링 평가인자 적용 (형상계수 미고려)	
	스�폐링 발생유무	스�폐링 발생확률(%)	스�폐링 발생유무	스�폐링 발생확률(%)
Canadian Mine Drift	발생	91.3	발생	91.3
Golden Giant Mine Drift	발생	90.3	발생	100.0
Brofjorden Cavern Access Tunnel	발생	55.9	발생	52.7
Furka Fenster Tunnel	발생	62.0	발생	56.5
Zinkgruvan Mine Drift	발생	88.0	발생	82.8
Kristineberg Mine Drift	발생	100.0	발생	100.0
Heggura Tunnel	발생	79.2	발생	74.8
Kobbskaret Tunnel	발생	100.0	발생	100.0
Yeosu Oil Storage Cavern	발생	98.8	발생	97.2
East Rand Proprietary Mine Drift	발생	100.0	발생	100.0

6. 결 론

본 연구에서는 기존 결정론적 스폐링 발생 평가법의 문제점에 대한 고찰을 통해 퍼지개념과 퍼지확률이론을 적용한 새로운 스폐링 발생 종합 평가모형을 개발하였고, 개발된 평가모형을 스폐링 발생현장에 적용하여 평가모형의 신뢰성을 검증하였다. 또한, 퍼지확률을 이용한 스폐링 발생 종합 평가모형을 통해 형상계수 도입여부에 따른 스폐링 발생여부를 평가하여 형상계수의 적용성을 논하였다.

이상의 연구로부터 도출된 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 암반공동에서의 스폐링 발생 평가를 위해 적용되는 기존의 스폐링 기준은 범위값으로 제시되어 있어 기준 자체가 모호하고(fuzzy)와 애매한(vague) 특성이 있어 이를 해결하기 위해 퍼지개념(fuzzy concept)과 퍼지확률이론(fuzzy probability theory)을 도입하고 스폐링 평가인자별 상대 중요도에 따른 가중치를 고려함으로써 스폐링 발생유무와 스폐링 발생확률의 정량적인 평가가 가능한 스폐링 발생 종합 평가모형을 개발하였고 국내외 스폐링 발생현장에 적용함으로써 평가모형의 신뢰성을 검증하였다.
2. 스폐링 발생 종합 평가모형은 현장 설계물성치의 획득형태(대표값 또는 확률분포)에 따라 fuzzy criterion-deterministic load model과 fuzzy criterion-random load model로 구분하여 유도하였고 스폐링 발생현장에 적용하여 정량적인 스폐링 발생평가가 가능하였다.
3. 스폐링 발생 종합 평가모형을 적용함에 있어 3가지 스폐링 평가인자에 대한 상대적 중요도로 결정된 가중치를 적절하게 고려함으로써 실제 스폐링이 관측된 현장이 스폐링이 발생하지 않는 것으로 평가되는 오류를 해결하였다.
4. 스폐링 발생 종합 평가모형을 이용하여 스폐링 평가인자 중 σ_{\max}/σ_c 산정 시 형상계수의 도입여부에 따른 스폐링 발생양상을 평가결과 모든 현장에서 스폐링이 발생하는 것으로 평가되었으나, 일부 현장의 경우 Martin 등(1999)의 손상지수(D_i)를 포함한 스폐링 평가인자로 산정된 스폐링 발생확률이 수정손상지수(D_{is})를 포함한 스폐링 평가인자로 산정된 스폐링

발생확률에 비해 스폐링 발생 종합 평가모형에서 스폐링 발생유무를 판단하는 기준 확률값인 50%에 상대적으로 근접한 값을 보이고 있어 스폐링이 발생하지 않는 현상으로 평가될 여지가 많다. 그러나, 수정손상지수(D_{is})를 포함한 스폐링 평가인자로 산정된 스폐링 발생확률은 Martin 등(1999)의 손상지수를 적용한 경우의 스폐링 발생확률보다 큰 값을 보이고 있으므로 확실하게 스폐링이 발생하는 것으로 평가할 수 있으므로 형상계수를 도입한 수정손상지수(D_{is})를 적용하는 것이 합리적인 평가방법이라 판단된다.

5. 지하 암반공동에서 스폐링의 발생은 대심도 암반공동의 안정성 및 시공성에 상당한 영향을 주는 원인이 되므로 암반공동의 설계단계에서부터 응력조건과 암반상태를 고려한 스폐링의 특성을 사전에 충분히 평가하는 것이 매우 중요하다. 이에 본 평가모형을 이용한 스폐링 발생 평가를 통해 사전에 대심도 암반공동에서의 스폐링 발생양상과 파괴확률을 평가함으로써 보다 합리적인 대처방안과 계획계획의 수립에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술 C01)에 의해서 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박혁진 (2007), Fuzzy set theory와 Monte Carlo Simulation을 이용한 암반사면의 파괴확률 산정기법 연구, 한국지반공학회 논문집, 제23권, 11호, pp. 109-117.
2. 양영순, 서용석, 이재옥 (1999), 구조 신뢰성 공학, 서울대학교 출판부.
3. 이강현 (2009), 지하공동의 취성파괴 예측을 위한 손상지수의 평가, 고려대학교 대학원 석사학위논문.
4. 이병수, 강미광, 조성진 (2004), 퍼지수학의 기초와 응용, (주)복스힐.
5. 이인모, 윤현진, 이형주, 이상돈, 박봉기 (2003), 굴착전 주변공 발파의 암반손상을 고려한 터널 안정성 검토,

- 한국지반공학회 논문집, 제19권 제4호, pp. 167-178.
6. 이희석, 이대혁, 김호영, 홍지수, 최영태, 김석진, 박연준 (2005), 과지압 암반 내 대규모 지하 유류비축기지 안전성 평가 및 Microseismic 계측, KTA Annual Conference: 189-201.
 7. 천대성, 박의섭, 정용복, 신중호 (2008), 고심도 터널에서 예상되는 취성파괴영역 평가, KTA Annual Conference: 197-209.
 8. 천대성, 정용복, 박찬, 전석원 (2007), CWFS 모델변수 결정을 위한 손상제어시험 및 이를 활용한 취성파괴 모델링, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제3호, pp. 263-273.
 9. Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H. and Minami, M., 2004, Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 833-847.
 10. Hoek, E. and Brown, E. T., 1980, *Underground excavations in rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London.
 11. Kaiser, P. K., Diederichs, M. S., Martin, C. D., Sharp, J. and Steiner, W., 2000, *Underground works in hard rock tunnelling and mining*, Proceeding of GeoEng2000, Melbourne, Australia.
 12. Liu, Z., Yuan, Q. and Li, J., 2008, Application of fuzzy probability model to prediction of classification of rockburst intensity, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol. 27, pp. 3095-3103.
 13. Martin, C. D., 2001, Rock stability considerations for siting and construction a KBS-3 repository, SKB Technical Report.
 14. Martin, C. D., 2005, Preliminary assessment of potential underground stability at Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites, SKB Technical Report.
 15. Martin, C. D., Kaiser, P. K. and McCreath, D. R., 1999, Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, pp. 136-151.
 16. Saaty, T. L., 1980, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York.
 17. Wu, C., Hao, H. and Zhou, Y., 2003, Distinctive and fuzzy probability analysis of an anisotropic rock mass to explosion load, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 56, pp. 767-786.
-
- 접수일(2009.7.20), 수정일(2009.9.4), 게재확정일(2009.9.9)