

# 통계추론을 이용한 지하암반공동에서의 스폐링 깊이와 폭에 대한 정량적 평가

방준호<sup>1</sup>, 이인모<sup>2\*</sup>

## Quantitative assessment of spalling depth and width using statistical inference theory in underground openings

Joon-Ho Bang, In-Mo Lee

**Abstract** Until now, the evaluation method of spalling depth using Martin et al. (1999)'s linear regression relations has long been known applicable. However, it is not likely that the proposed equation is applicable to the openings other than circular type and mostly overpredict the spalling depth in comparison with actual spalling cases. Moreover, the evaluation method to estimate the spalling width has not been presented yet; it is essential to evaluate the spalling width in addition to the spalling depth, because the shape of the spalled region influences the choice of suitable rock reinforcement. In this study, linear regression equations, in which normalized spalling depth ( $d_f/W_D$ ) and normalized spalling width ( $w_f/W_D$ ) are functions of three spalling evaluation indices,  $\sigma_1/\sigma_c$ ,  $D_{is}(=\sigma_{max}/\sigma_c)$  and  $\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$ , are established based on in-situ spalling observations and CWFS simulation results. Confidence intervals of 95% using the statistical inference theory are used in verifying the reliability of linear regression equations. Spalling depth ( $d_f$ ) and spalling width ( $w_f$ ) predicted from the proposed linear regression relations, which take three spalling evaluation indices into account, showed reasonable match with in-situ observations by adopting weighting factors considering the degree of variance of linear regression relations.

**Keywords:** Brittle failure, spalling depth, spalling width, statistical inference

**요 지** 지금까지 Martin 등(1999)의 선형관계식에 의한 스폐링 깊이 평가법이 널리 이용되어 왔으나, 이 방법은 원형 공동에만 적용될 수 있으며 실제 스폐링 발생현장에 적용한 결과 과대평가하는 결과를 보였다. 한편, 스폐링 폭을 평가하는 방법은 아직까지 제시되어 있지 않아 적절하게 평가가 이루어지지 못했다. 그러나, 스폐링 영역에 대한 적절한 보강을 위해서는 스폐링 깊이와 스폐링 폭에 대한 정량적인 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 스폐링 관측사례와 스폐링 발생현장의 CWFS 수치해석 사례를 통해 3가지 스폐링 평가인자의 함수로 표현되는 정규화 스폐링 깊이와 정규화 스폐링 폭의 선형회귀식을 도출하였고, 통계추론에 의한 95% 신뢰구간을 통해 회귀식의 신뢰성을 검증하였다. 제안된 선형회귀식으로부터 예측된 스폐링 깊이와 스폐링 폭은 회귀관계의 분산도를 고려한 가중치를 적용함으로써 현장관측결과를 합리적으로 예측할 수 있었다.

**주요어:** 취성파괴, 스폐링 깊이, 스폐링 폭, 통계추론

## 1. 서 론

취성암반의 공동 주변에서 발생하는 유도응력파괴(stress-induced failure)의 특징은 슬래빙(slabbing)과 스폐링(spalling)의 지속적인 생성과 발달로 인해 노치형상(notch shape)의 파괴영역이 발생한다는 점이다. 이러한 슬래브(slab)의 두께는 해외사례에 의하면 사각형

터널에서 통상 수 mm에서 수십 cm의 범위로 발생하는 것으로 알려져 있다.

Fairhurst와 Lin(1985)은 유도응력에 의한 슬래브의 생성과 발달 그리고 두께가 암반 내부의 변형에너지(strain energy)와 깊게 관련있다고 제안하였다. Martin (1997)은 캐나다 URL Mine-by 시험터널 주변에서의 파괴과정에 관한 관측결과를 통해 슬래브의 형성은 공동 막장의 진행과 관련하여 지속적으로 발생하며 공동의 응력조건이 평면변형률(plane strain) 상태에 이르면 노치형상의 파괴영역이 안정화된다고 하였다. 또한, Martin

<sup>1</sup>정회원, 쌍용건설(주) Downtown Line Stage2 C921 Project 설계과장, 공학박사

<sup>2</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

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

(1997)은 V자형 노치 형태로 나타나는 파괴영역에 대한 발생메커니즘 연구를 통해 그림 1과 같이 슬래빙 (slabbing)이 공동 주변에서의 외부하중에 의한 인장균열의 발달로 나타나며 인장균열로 생성된 슬래브간의 접착강도가 점차 약해져서 중력작용으로 인해 암편이 이탈되면서 최종적으로 노치형상의 파괴영역을 형성하게 된다고 제안하였다.

그림 2는 스폐링 관측사례를 통해 확인된 대표적인 노치형상의 파괴영역을 나타내고 있으며 최대 및 최소주응력 방향을 함께 표시하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 노치형상의 파괴영역에서는 미소파괴음 계측(micro-seismic monitoring)을 통해서만 감지할 수 있을 정도의 미소파괴(micro fracturing)을 동반하며 공동 경계면의 접선응력(tangential stress)이 약  $0.4\sigma_c$ 를 초과할 때 발생하였다. 또한, 노치형상의 발달방향은 공동 경계면에 평행하고 최소주응력에 수직한 방향으로 발생한다고 하였다.

상기 스폐링 관측사례를 통해 밝혀진 스폐링 파괴영역의 범위 예측은 록볼트, 철망 등과 같은 지보설계에 있어 필요한 정보가 되며 그림 2에 보는 바와 같이 파괴형상에 따라 지보설계가 달라질 수 밖에 없다(이희석 등, 2005; 천대성 등, 2008).

한편, 지금까지 스폐링 연구현황을 살펴보면 대부분이 스폐링의 발생유무에 대한 평가와 스폐링이 발생하였을 때의 깊이를 어떻게 산정할 것인가에 대한 문제에 주로 초점을 맞추어 연구가 진행되어 왔다(Martin et al., 1999; Kaiser et al., 2000; 천대성 등, 2007). 일반적인 스폐링의 특성 중 스폐링 발생여부와 스폐링 깊이가 중요한 인자임에는 틀림없지만 실제 스폐링이 발생하였을 때의

보강방안과 보강범위의 선택을 위해서는 이에 못지 않게 스폐링 폭(spalling width)에 대한 정량적인 평가가 필요하다. 해외의 스폐링 보강사례를 분석해보면 스폐링 발생깊이에 대한 보강은 주로 스폐링 영역의 채움(filling)과 암편의 이탈방지 개념으로 보강이 이루어지고 있어 실제 적용성 측면에서 무리가 없다고 판단되며, 오히려 스폐링 깊이보다는 스폐링 폭에 대한 정보가 실제 보강범위를 포함한 보강설계에 있어 기술적인 측면이나 경제적인 측면에서 중요한 인자가 될 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 스폐링 관측사례와 스폐링 발생현장의 CWFS 모델 수치해석 사례를 이용하여 공동의 폭( $W_D$ )으로 정규화한 정규화 스폐링 깊이( $d_f/W_D$ )와 정규화 스폐링 폭( $w_f/W_D$ )이 3가지 스폐링 평가인자( $\sigma_1/\sigma_c$ ,  $D_{is} = \sigma_{\max}/\sigma_c = (A\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c$ ,  $\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$ )의 함수로 표현되는 선형회귀식을 도출하였고 통계적 추론에 의한 선형회귀식의 95% 신뢰구간을 추정하여 도출된 선형회귀식과의 분산도를 비교함으로써 회귀식의 신뢰성을 검증하였다. 여기서, A는 Hoek과 Brown(1980)이 제안한 형상계수이다.

또한, 3가지 스폐링 평가인자별 스폐링 깊이와 스폐링 폭의 회귀식들을 종합적으로 고려하기 위해 가중치를 적용하는 스폐링 깊이와 스폐링 폭에 관한 종합 평가모델을 개발하여 현장관측결과와 비교하였다. 또한, 평가모델에서 가중치를 적용함에 있어 스폐링 평가인자별 상대 중요도로 계산된 가중치를 적용하는 경우(Case I)와 스폐링 평가인자별 회귀식의 분산도를 고려하는 경우(Case II)로 가중치를 다르게 적용하여 가중치의 영향을 비교검토하였다.

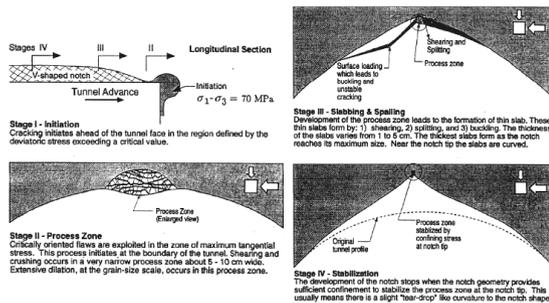


그림 1. V자형 노치 발생과정(Martin, 1997)

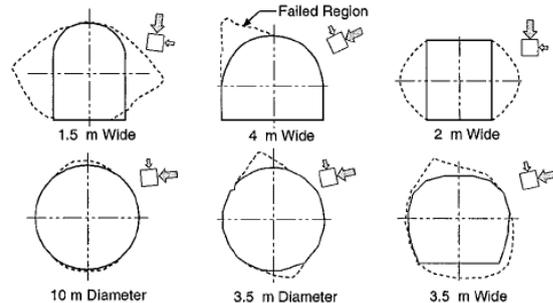


그림 2. 공동형상에 따른 노치형상의 파괴영역(Martin et al., 1999)

## 2. 취성암반에서의 스폐링 손상영역에 대한 평가법의 고찰

암반공동 주변에서의 스폐링 영역을 예측하기 위해 시도된 초기 연구는 Stacey(1981)에 의해 과상(massive)의 규암(quartzite) 터널에서 수행되었는데, 식 (1)로 계산된 확장변형률(extension strain)이 한계확장변형률(critical extension strain)보다 크면 스폐링이 발생하여 파괴시점과 깊이를 평가할 수 있다고 하였다.

$$\epsilon = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 각각 최대주응력, 중간주응력, 최소주응력을 나타내며  $\nu, E$ 는 각각 암석의 포아송비와 탄성계수를 나타낸다.

그러나, 이 방법은 실제로 적용면에서 문제점을 내포하고 있는데 그림 3에서 보는 바와 같이 한계확장변형률은 축방향 변형률과 횡방향 변형률간의 관계곡선에서 변곡점이 나타날 때의 횡방향 변형률로 정의하고 있고 구속압에 관계없이 일정한 값을 보인다고 하였는데 이 때 한계확장변형률을 구하기 위한 곡선상의 변곡점을

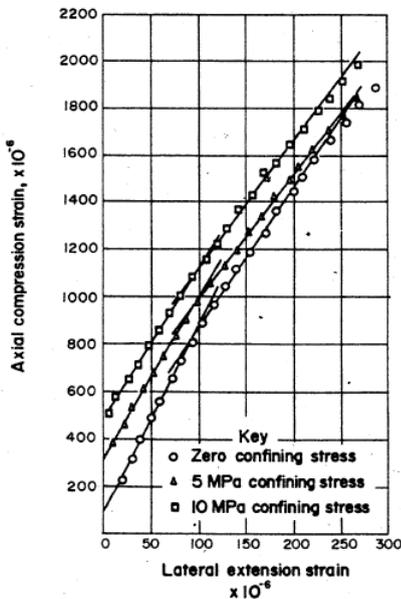


그림 3. 한계확장변형률의 정의(Stacey, 1981)

찾기가 쉽지 않고 암석의 종류에 따라 한계확장변형률이 제시되어 있지 않아 별도로 실내실험을 수행하여야 한다는 점에서 실제 적용상 한계가 있다.

Martin(1997)은 캐나다 URL Mine-by 시험터널에서의 미소파괴음 계측(micro-seismic monitoring)을 통해 파괴가 발생하기 시작하는 응력수준을 정의하였는데 식 (2)와 그림 4에서 나타난 바와 같이 축차응력비를 사용한 손상기준이 일정한 값을 가질 때 스폐링이 발생한다고 하였고 Hoek-Brown 파괴기준 형태를 준용하여 식 (3)과 같이 제시하였다. 식 (3)은 Hoek-Brown 파괴기준 식에서  $m = 0, \sqrt{s} = 1/3$ 을 대입하여 유도된 식이다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{1}{3}\sigma_c \approx 0.3\sigma_c \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{s\sigma_c^2} \quad (3)$$

한편, Kaiser 등(2000)은 Martin(1997)의 축차응력비를 사용한 손상기준이 하나의 일정한 값이 아닌 범위로 제시된 새로운 손상기준을 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}\right)\sigma_c \approx (0.3 \sim 0.5)\sigma_c \quad (4)$$

그러나, 이러한 축차응력비를 사용한 손상기준은 수치 해석을 통해 일정한 축차응력비 이상인 영역을 스폐링

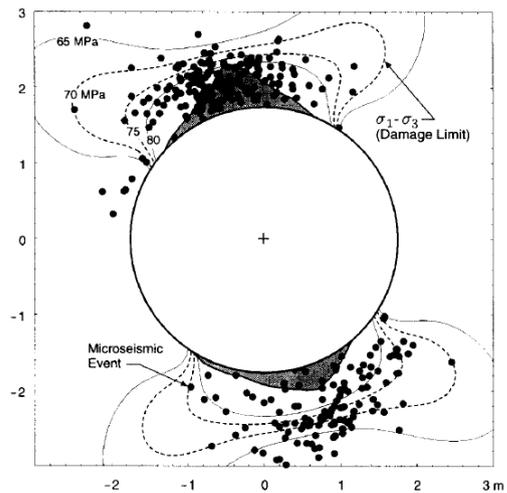


그림 4. 축차응력비로 정의된 손상기준(Martin, 1997)

발생영역으로 평가할 수 있으나 이는 캐나다 URL Mine-by 시험터널에서만 적용할 수 있는 기준일 뿐 일반화된 기준이 아니다. 예를 들어 스웨덴 HRL ZEDEX에서의 미소파괴음 모니터링 분석결과에 의하면 손상기준은  $\sigma_1 - \sigma_3 \approx 0.13\sigma_c$ 로 정의할 수 있었으며, 캐나다 URL Mine-by 시험터널에서는 이와같은 손상기준으로 스포링의 발생을 예측할 수 없었다.

한편, Martin 등(1999)은 그림 5와 같이 8개소의 원형과 D형 공동에서의 스포링 관측사례로부터 정규화 스포링 깊이와 손상지수( $D_i = \sigma_{\max}/\sigma_c = (3\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c$ ) 간의 선형관계식을 제안하였는데, 정규화 스포링 깊이( $R_f/a$ )는 최대접선응력( $\sigma_{\max}$ )과 무결암의 일축압축강도( $\sigma_c$ )를 이용하여 식 (5)로부터 구하고 실제 스포링 깊이( $d_f$ )는 정규화 스포링 깊이( $R_f/a$ )에 공동의 유효반경( $a$ )를 곱함으로써 식 (6)을 통해 구할 수 있다.

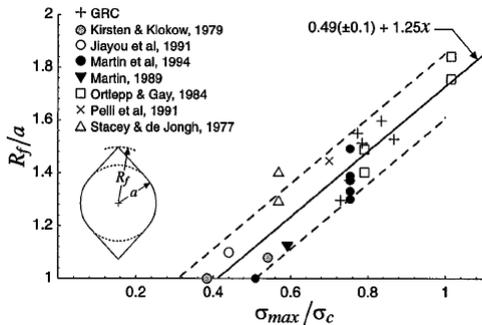


그림 5. 원형 공동에서의 손상지수( $D_i$ )와 정규화 스포링 깊이의 선형관계(Martin et al., 1999)

$$\frac{R_f}{a} = 0.49(\pm 0.1) + 1.25 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} \quad (5)$$

$$d_f = R_f - a = (1.25 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} - 0.51)a \quad (6)$$

그러나, Martin 등(1999)의 선형관계식은 다양한 형상의 공동에 공동의 유효반경이  $a$ 인 원형 공동으로 환산하여 적용할 수 있는 식으로 실제 공동의 제원이 폭(width)과 높이(height)로 제시되는 현실을 감안할 때 인위적으로 공동의 유효반경( $a$ )을 산정하는 과정 중 실제 공동의 제원과는 다른 결과를 보일 수 있다. 또한, 원형 이외의 공동 형상은 수치해석을 통한 최대접선응력( $\sigma_{\max}$ )을 이용하도록 제안하고 있어 별도로 수치해석을 수행하여야 한다는 문제점이 있기 때문에 선형관계식이 가지는 범용적 의미가 매우 작다고 할 수 있다. 그림 2의 공동 형상에 따른 파괴영역의 관측결과에 의하면 공동의 형상이 파괴영역의 형성에 큰 영향을 줄 수 있음을 시사하고 있으나 Martin 등(1999)의 선형관계식은 형상계수를 3으로 고정하여 최대접선응력( $\sigma_{\max}$ )을 산정하므로 다양한 공동의 형상을 고려할 수 없다는 것이 문제점이라 할 수 있다. 한편, 실제 스포링 관측현장에 대해 Martin 등(1999)의 선형관계식을 적용한 결과 표 1과 같이 현장관측 결과와 다른 양상을 보이고 있다. 이러한 결과는 Diederichs(2007)의 연구결과에 따르면 Martin 등(1999)의 선형관계식에 사용된 스포링 관측사례와 다양한 축압계수 조건에서의 스포링 관측사례가 포함되어 전반적으로 과대평가한다고 언급하고 있어 선형관계식의 적용에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

표 1. Martin 등(1999)의 선형관계식으로 산정된 스포링 깊이와 현장관측 결과와의 비교

현장	선형관계식으로 계산된 스포링 깊이(m)	현장관측 결과
URL Room 415	1.47	천정에서 깊이 0.3 m
Golden Giant Mine Shaft	1.52	공벽에서 깊이 2 m
Lötschberg Base Tunnel	0.95	측벽에서 깊이 0.6 m
Garpenberg Mine Raise	1.87	공벽에서 깊이 0.05 m
Renström Mine Raise	1.30	공벽에서 깊이 0.1~0.2 m
Kobbskaret Tunnel	1.18	천정에서 깊이 0.05~0.3 m
Heggura Tunnel	1.03	천정에서 깊이 0.4 m
Yeosu Oil Storage Cavern	1.10	갤러리 측벽에서 깊이 0.5~0.8 m

앞서 설명한 바와 같이 기존의 스폴링 깊이 평가법은 암석시험으로부터 결정된 한계확장변형률, 축차응력비를 사용한 손상기준에 의한 수치해석 및 경험식을 이용하여 스폴링 깊이를 평가하였는데 이들 방법은 한계확장변형률 산정의 어려움, 축차응력비를 사용한 손상기준 적용의 제한성, 공동 형상과 공동의 유효반경 환산 과정상의 오류가 고려되지 못함에 따른 스폴링 깊이의 과대평가 등의 문제점이 있었다.

한편, 그림 6은 노르웨이의 Kobbskaret Tunnel과 Heggura Tunnel에서 발생한 스폴링 현상에 대한 보강사례를 보여주고 있다. 현재까지 스폴링 폭을 평가하는 방법은 제시되어 있지 않으나 그림 6의 스폴링 보강사례에서 보는 바와 같이 실제 스폴링 발생영역에 대한 보강설계 시 스폴링 깊이에 대한 정보 뿐만 아니라 스폴링이 발생한 폭에 대한 정보 또한 주요 영향인자로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

### 3. 통계추론이론의 고찰

#### 3.1 정의

통계의 기본 목적은 모집단의 특성에 대한 추론, 즉 모수에 대한 추정 및 검정이라 할 수 있다. 모집단에 대

한 대표적인 모수로서 통상 모집단의 중심 성향을 나타내는 모평균  $\mu$ 와 개개의 값이 모평균에서 떨어진 정도, 즉 산포를 나타내는 모분산  $\sigma^2$ (또는 모표준편차  $\sigma$ )을 들고 있다. 모평균, 모분산 등과 같은 모수에 대한 어떤 판단을 내리기 위하여 모집단에서 표본을 추출하여 데이터를 얻고 이 데이터를 기초로 하여 통계이론에 의한 결론을 내리게 되는데 이러한 추론과정을 통계적 추론 (statistical inference)이라고 하며, 이러한 모수들은 일반적으로 아무도 모르는 상수로 취급된다. 모수의 추정 은 표본분포의 이론에 근거하여 추정량 또는 추정치의 신뢰한계를 계산하는 구간추정(interval estimation)과 모집단과 한 개의 값으로 추정하는 점추정(point estimation) 이 있다. 그림 7은 모수의 추정과정을 보이고 있는데 모집단에서  $n$ 개의 표본을 추출한 후 이를 토대로 표본평균, 표본분산 등의 통계량을 계산하고 적절한 방법을 이용하여 모집단의 모평균, 모분산 등과 같은 모수의 값을 산출하는 과정이다.

모평균, 모분산 등 모집단의 특성을 나타내는 모수 (parameter)를  $\theta$ 로 표시하고, 표본평균, 표본분산 등 표본의 특성을 나타내는 통계량(statistic)을  $T$ 로 나타내며 확률밀도함수가  $f(x; \theta)$ 인 모집단으로부터 추출한 크

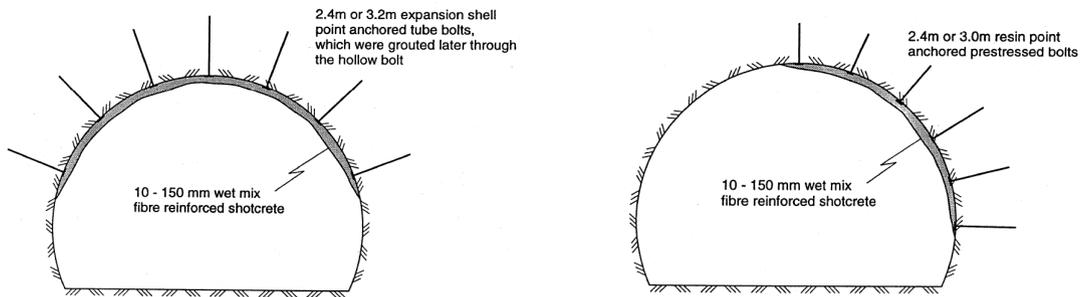


그림 6. 노르웨이 도로터널에서 발생한 스폴링 영역의 보강사례(Myrvang & Davik, 1997)

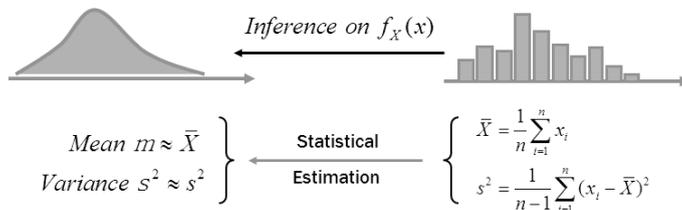


그림 7. 모수에 대한 추정 과정(김계수, 2008)

기  $n$ 인 표본을  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 이라 할 때 통계량  $T$ 는 이것의 함수로서 일정한 확률분포(표본분포)를 갖으며 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = T(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (7)$$

모수  $\theta$ 는 일반적으로 미지이고, 통계량  $T$ 는 변수이지만 조사의 결과에 따라 그 값이 결정된다.

### 3.2 구간추정

모수에 대한 점추정은 간단하기는 하지만 단지 하나의 값으로 모수의 추정치를 제공하므로 신빙성이 떨어질 수 있다. 하나의 값이 실제 모수와 일치한다는 것은 불가능하며, 특히 어떤 표본을 선택하느냐에 따라서도 각기 다른 값이 얻어질 수 있기 때문이다. 이에 따라 모수의 추정치를 하나의 값으로 나타내기 보다는 실제 모수가 존재할 가능성이 높은 구간을 제시하는 방식이 보다 바람직할 수 있는데 이를 구간추정(interval estimation)이라고 한다.

$n$ 개의 표본  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 이 있을 때 모평균  $\mu$ 가 존재할 것으로 추정되는 자연스러운 구간으로  $\bar{X}$ 를 중심으로 한  $\bar{X} \pm d$ , 즉  $(\bar{X} - d, \bar{X} + d)$ 를 생각할 수 있는데, 이 때 구간의 크기  $d$ 를 어떻게 결정할 것인가가 문제가 된다. 왜냐하면  $d$ 를 너무 크게 정하면 추정의 정도가 떨어지고  $d$ 를 너무 작게 정하면 이 구간내에 실제 모평균이 포함될 가능성이 적어지기 때문이다.

$d$ 를 정하기 위해서는 우선 구간  $(\bar{X} - d, \bar{X} + d)$ 에 모수  $\mu$ 가 포함될 확률을 몇 %로 설정할 것인지 결정하여야 하는데, 이 확률을 신뢰수준(confidence level)이라 한다. 신뢰수준은 보통 %단위로 표시되며, 90%, 95% 등을 주로 선택한다. 그리고 이러한 신뢰수준에 대응하여 도출되는  $\mu$ 의 추정구간을 신뢰구간(confidence interval)이라 한다. 모평균  $\mu$ 에 대한 95% 신뢰구간이  $(\bar{X} - d, \bar{X} + d)$ 라는 의미는 똑같은 방법으로 100회 표본을 추출하여 신뢰구간을 구하였을 때 그 100개의 신뢰구간 중 95개 정도가 모수  $\mu$ 를 포함하게 됨을 의미한다. 이런 의미에서 이 구간에 모수  $\mu$ 가 포함될 것이라는 말을 95% 신뢰할 수 있다고 해석할 수 있다. 100%를 신뢰할 수 있는 모수  $\mu$ 에 대한 신뢰구간은  $(-\infty, \infty)$ 으로 의미가 없게 되므로 신뢰수준을 조금 낮추더라도 좀 더

좁은 구간을 이용하면 된다. 모평균  $\mu$ 에 대한 구간추정 방법은 모분산  $\sigma^2$ 을 아는 경우와 모르는 경우의 두가지로 구분하여 고려할 수 있다.

본 연구에서는 스폐링 특성에서 스폐링의 발생여부와 함께 중요한 평가항목인 스폐링 깊이(spalling depth) 및 스폐링 폭(spalling width)을 합리적으로 평가하기 위해 Martin 등(1999)의 스폐링 관측사례와 추가로 수집된 스폐링 관측사례, 스폐링 발생현장의 CWFS 모델 수치 해석 사례를 통해 3가지 스폐링 평가인자( $\sigma_1/\sigma_c, D_{is} = \sigma_{max}/\sigma_c = A\sigma_1 - \sigma_3/\sigma_c, \sigma_{dev}/\sigma_{em}$ )의 함수로 표현되는 정규화 스폐링 깊이 및 정규화 스폐링 폭에 대한 선형회귀식을 도출하였다. 여기서,  $D_{is}$ 는 Martin 등(1999)의 손상지수에 형상계수를 도입한 수정손상지수(이강현, 2009)이며,  $A$ 는 Hoek과 Brown(1980)의 형상계수를 나타낸다. 그러나, 여기서의 정규화 스폐링 깊이 및 정규화 스폐링 폭은 표본수량이 극히 제한적인 상태에서의 회귀분석으로 구한 관계식에 의해 구해지기 때문에 만약 표본의 편차가 상당한 수준이라면 회귀식은 무의미한 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 도출된 회귀식의 신뢰성 확보를 위하여  $t$ -분포를 이용한 통계분석으로 95% 신뢰구간을 추정하여 회귀관계의 분산도를 평가함으로써 회귀식의 현장 적용성을 검토하였다.

또한, 개별적으로 3가지 스폐링 평가인자별 정규화 스폐링 깊이 및 정규화 스폐링 폭에 대한 회귀식을 이용하여 스폐링 깊이 및 스폐링 폭을 유추할 수 있지만 본 연구에서는 3가지 스폐링 평가인자를 종합적으로 고려하여 스폐링 깊이 및 스폐링 폭을 평가하기 위해 가중치를 적용하여 95% 신뢰구간의 스폐링 깊이 및 스폐링 폭을 산정하는 종합 평가모델을 개발하였다. 기수집된 스폐링 관측사례와 95% 신뢰구간에서의 스폐링 깊이 및 스폐링 폭을 비교함으로써 평가모델의 신뢰성을 검증하였다.

## 4. 정규화 스폐링 깊이 및 정규화 스폐링 폭에 대한 선형회귀식의 제안

### 4.1 선형회귀식의 도출

스포링 관측사례와 스폐링 발생현장의 CWFS 모델 수치해석 사례를 이용하여 공동의 폭( $W_D$ )으로 정규화

(normalization)한 정규화 스펀링 깊이( $d_f/W_D$ )와 정규화 스펀링 폭( $w_f/W_D$ )이 3가지 스펀링 평가인자( $\sigma_1/\sigma_c$ ,  $D_{is}$ ,  $\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$ )의 함수로 표현되는 선형회귀식을 그림 8과 9와 같이 도출하였다. 그림 8과 9는 각각  $\sigma_1/\sigma_c$ ,  $D_{is}$ ,  $\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$ 에 대한 정규화 스펀링 깊이 및 정규화 스펀링 폭의 회귀관계를 도시한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 상관계수( $R^2$ )가 0.82 이상으로 우수한 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다. 이 회귀식에 현지응력과 암석강도, 암반분류로부터 계산된 3가지 응력강도비를 대입하여 정규화 스펀링 깊이( $d_f/W_D$ )와 정규화 스펀링 폭( $w_f/W_D$ )을 구하고 여기에 공동의 폭( $W_D$ )를 곱

함으로써 각각 스펀링 평가인자별 스펀링 깊이( $d_f$ )와 스펀링 폭( $w_f$ )을 구할 수 있도록 구성하였다.

3가지 스펀링 평가인자별 정규화 스펀링 깊이( $d_f/W_D$ )와 정규화 스펀링 폭( $w_f/W_D$ )의 선형회귀식에 대한 적합성을 검토하기 위한 방안으로 회귀관계로부터 결정된 결정계수(coefficient of determination)로부터 평가하는 방법을 적용하였으며 3가지 회귀식 모두 결정계수가 0.82 이상의 값을 나타내고 있어 회귀관계가 독립변수와 종속변수의 관계를 적절하게 설명하고 있다고 평가할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 결정계수에 의한 적합성 평가 이외에 총변동량을 나타내는 총제곱합을 회귀

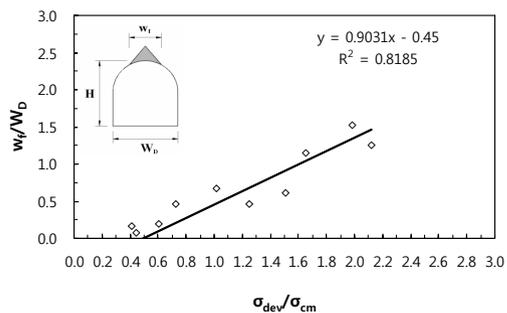
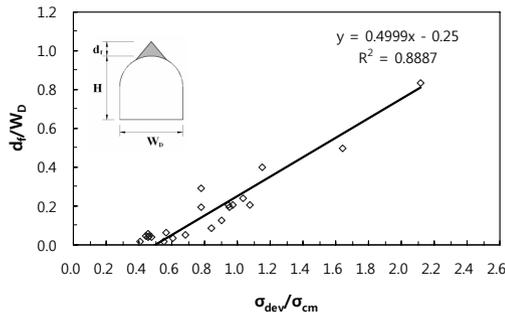
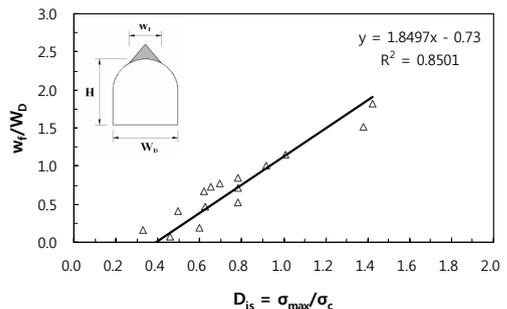
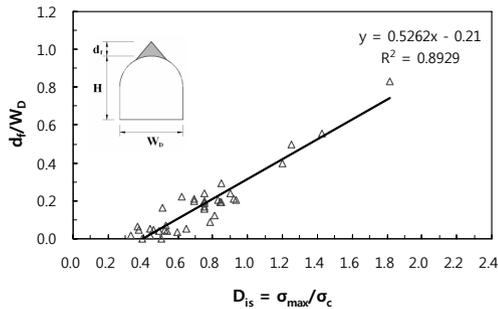
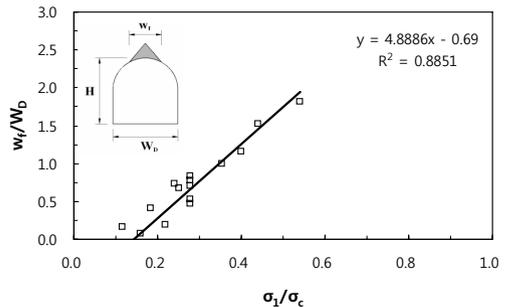
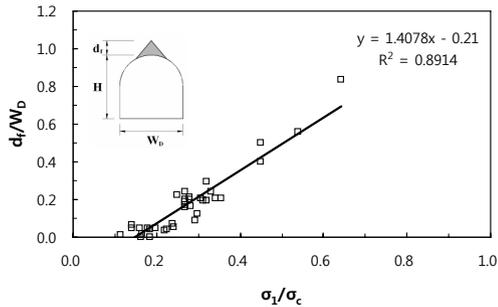


그림 8. 스펀링 평가인자와 정규화 깊이( $d_f/W_D$ )와의 회귀관계

그림 9. 스펀링 평가인자와 정규화 폭( $w_f/W_D$ )과의 회귀관계

제곱합(regression sum of squares,  $SSR$ )과 잔차제곱합(residual sum of squares,  $SSE$ )으로 나누고 이로부터 산정된 회귀평균제곱(regression mean square,  $S_R^2$ )과 잔차평균제곱(residual mean square,  $S_E^2$ )를 이용하여 그 관계를 정리한 분산분석표(analysis of variable table)를 통해 회귀관계의 적합성을 평가하였다. 3가지 스폐링 평가인자별 정규화 스폐링 깊이와 정규화 스폐링 폭의 회귀관계에 대한 분산분석결과 회귀식에 대한  $F$ 검정통계량이 임계값보다 크고,  $p$ -value가 0.05 보다 작은 값을 보이기 때문에 회귀관계가 독립변수와 종속 변수를 적합하게 설명하고 있다고 평가하였다.

#### 4.2 선형회귀식에 대한 95% 신뢰구간의 설정

그림 8과 9에 제시된 3가지 스폐링 평가인자별 정규화 스폐링 깊이와 정규화 스폐링 폭의 선형회귀식에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 그림 10의 통계적 추론기법 중  $t$ -분포를 이용하여 95% 신뢰구간을 설정하였다.

그림 8과 9의 회귀식을 도출할 때 이용한 표본데이터로부터 평균, 표준편차, 표본오차와 함께 95% 신뢰구간에 대한 상한값과 하한값을 구하고, 표본오차와 95% 신뢰수준의  $t$ -분포값을 이용하여 3가지 회귀관계에 대한

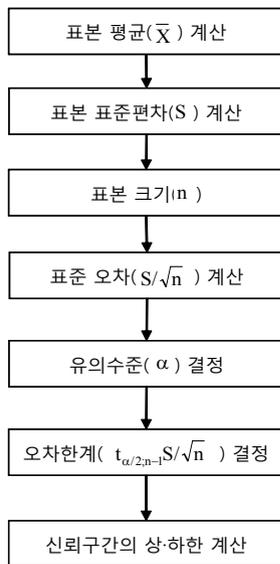


그림 10.  $t$ -분포를 이용한 95% 신뢰구간 추정 순서

신뢰수준 95% 하한식과 신뢰수준 95% 상한식을 도출하여 그림 11과 12에 각각 도시하였다. 본 연구에서 수행된 3가지 스폐링 평가인자별 정규화 스폐링 깊이와 정규화 스폐링 폭의 회귀관계에 대한 95% 신뢰구간의 도시는 기댓값에 대한 회귀관계에 비해 큰 편차가 없는 것으로 나타나 실무적용이 가능한 것으로 판단되었다. 여기서, 특이한 사항은  $\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$ 의 회귀식에 대한 95% 신뢰구간이 넓게 분포하는데 이것은 표본수가 다른 2가지 스폐링 평가인자에 비해 상대적으로 작음에 기인한 것이라 할 수 있다.

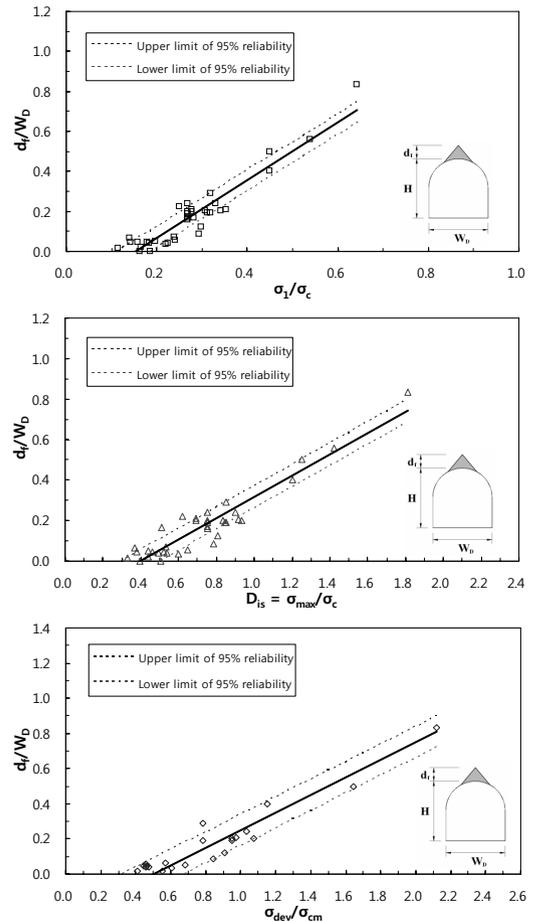


그림 11. 스폐링 평가인자와 정규화 깊이( $d_f/W_D$ )와의 회귀관계에 대한 95% 신뢰구간

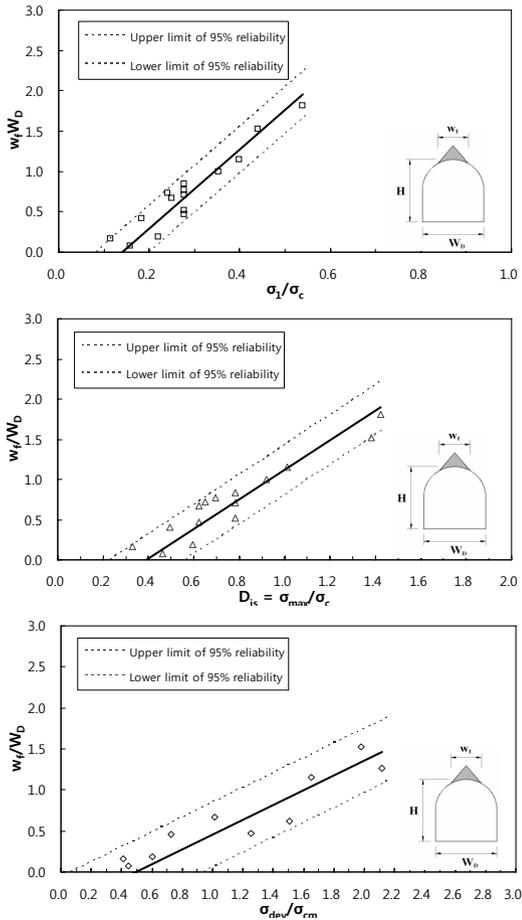


그림 12. 스포링 평가인자와 정규화 폭( $w_f/W_D$ )과의 회귀관계에 대한 95% 신뢰구간

## 5. 선형회귀식을 이용한 스포링 깊이 및 스포링 폭의 종합 평가

### 5.1 스포링 평가인자와 통계분포값의 선정

스포링 발생깊이와 발생폭에 대한 합리적인 평가를 위해 3가지 스포링 평가인자별 정규화 스포링 깊이 및 정규화 스포링 폭의 회귀관계에 가중치를 적용하여 스포링 깊이와 스포링 폭의 95% 신뢰구간을 산정하는 스포링 깊이와 스포링 폭에 관한 종합 평가모델을 개발하였다. 본 모델에서는 스포링 평가인자를  $\sigma_1/\sigma_c$ ,  $D_{is}$ ,  $\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$ 의 3가지 응력강도비로 고려하여 식 (8)과 같이 스포링 평가인자 집합을 구성하였다.

$$X = [x_i]_{1 \times 3} = [x_1 \ x_2 \ x_3] \\ = [\sigma_1/\sigma_c \ D_{is} \ \sigma_{dev}/\sigma_{cm}], \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

동시에 각 스포링 평가인자값을 회귀식과 95% 신뢰수준의 상하한식에 대입하여 구한 기댓값(expected value)과 95% 신뢰수준의 하한값과 상한값을  $LL$ ,  $EV$ ,  $UL$ 로 구하여 식 (9)와 같이 기댓값(expected value)과 95% 신뢰수준의 상하한값으로 이루어진 통계분포값의 집합을 구성하였다.

$$Y = [y_j]_{1 \times 3} = [y_1 \ y_2 \ y_3] \\ = [LL \ EV \ UL], \quad j = 1, 2, 3 \quad (9)$$

### 5.2 스포링 평가인자와 통계분포값을 고려한 정규화 스포링 깊이 및 폭 행렬의 산정

5.1절에서 정의한 스포링 평가인자의 집합과 통계분포값의 집합을 동시에 고려한 정규화 스포링 깊이 행렬( $DF$ )과 정규화 스포링 폭 행렬( $WF$ )을 식 (10)과 (11)과 같이 산정하였다. 정규화 스포링 깊이 행렬과 정규화 스포링 폭 행렬은 행방향으로는  $\sigma_1/\sigma_c$ ,  $D_{is}$ ,  $\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$ 의 3가지 스포링 평가인자를, 열방향으로는 95% 신뢰수준의 하한값, 기댓값, 95% 신뢰수준의 상한값 순으로 행렬요소를 구성하게 된다.

$$DF = \begin{bmatrix} df_{1LL} & df_{1EV} & df_{1UL} \\ df_{2LL} & df_{2EV} & df_{2UL} \\ df_{3LL} & df_{3EV} & df_{3UL} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$WF = \begin{bmatrix} wf_{1LL} & wf_{1EV} & wf_{1UL} \\ wf_{2LL} & wf_{2EV} & wf_{2UL} \\ wf_{3LL} & wf_{3EV} & wf_{3UL} \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 5.3 스포링 평가인자별 가중치 행렬의 산정

본 평가모델에서는 3가지 스포링 평가인자별 회귀관계를 종합적으로 고려하여 스포링 깊이와 폭을 평가하기 위해 가중치를 적용하는데, 계층분석기법(Alytic Hierarchy Process)의 의사결정요소에 대한 상대 중요도 결정과정(9점 척도)을 활용하여 스포링 평가인자별 가중치를 결정하였다.

계층분석기법은 상호비교, 동질성, 독립성, 기대성의

기본공리에 바탕을 두며, 문제해결을 위한 효과적인 인간사고는 계층적 구조설정(Hierarchical Structuring)의 원리, 상대적 중요성 설정(weighting)의 원리, 논리적 일관성(consistency)의 원리가 지켜진다는 특징에 착안하여 개발된 의사결정기법의 하나이다(Saaty, 1980). 이러한 원리들은 모델의 계층적 구조를 설정하고, 설정된 구조를 구성하는 평가요소들에 대하여 상대적 중요도를 측정하며, 이러한 판단이 일관성이 있는지를 검증함으로써 모델의 구축이 완료된다. 계층구조에 대한 상대적 가중치의 추정에는 쌍대비교를 통한 요소간 상대적 중요도의 측정결과를 종합하여 결정한다. 가중치 산정을 위하여 쌍대비교를 통한 상대평가가 이루어지는데 표 2와 같이 9점 척도를 기본형으로 이용하고 있다.

표 3과 같이 쌍대비교행렬(comparison matrix)의 작성시  $a_{ij}$ 는 구하려는 판단기준과 비교하는 판단기준과의 비로 나타낸다. 이 때 쌍대비교행렬의 대각원소는 모두 1이 되고, 이를 중심으로 서로 반대쪽은 역수관계에 있게 된다.

따라서, 행렬  $A$ 의 요소  $a_{ij}$ 를  $w_i/w_j$ 로써 치환하고  $n$

개 요소의 가중치  $w = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n]$ 를 곱하면 식 (12)와 같고 이를 간단히 표현하면 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$A_w = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & w_1/w_3 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & w_2/w_3 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & w_n/w_3 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$(A - nI) \cdot w = 0 \quad (13)$$

이 때  $n$ 은 선형대수의 고유치  $\lambda$ 로 특성방정식  $D(\lambda) = \det(A - \lambda I) = 0$ 의 근이며,  $\Sigma \lambda = n$ (대각선 요소의 합)이고  $w$ 는 고유치  $\lambda$ 에 대한 행렬  $A$ 의 고유벡터이다. 만약 0 이 아닌 유일한  $\lambda$ 를  $\lambda_{\max}$ (최대고유치)라 하면  $\lambda_{\max} = n$ ,  $\lambda_i = 0$ 이 되며, 이 때 쌍대비교 행렬  $A$ 와  $\Sigma w = 1$ 로부터 최대고유치( $\lambda_{\max}$ )와 고유벡터( $w$ )를 구하면 고유벡터가 가중치가 된다.

쌍대비교 요소의 개수( $n$ )보다 크거나 같기 때문에  $\lambda_{\max}$ 가  $n$ 에 근접할수록 쌍대비교행렬  $A$ 의 수치들이 일관성

표 2. 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 3. 쌍대비교행렬

구분	A	B	C	D	E
A	1	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
B	$a_{21}$	1	$a_{23}$	$a_{24}$	$a_{25}$
C	$a_{31}$	$a_{32}$	1	$a_{34}$	$a_{35}$
D	$a_{41}$	$a_{42}$	$a_{43}$	1	$a_{45}$
E	$a_{51}$	$a_{52}$	$a_{53}$	$a_{54}$	1

여기서,  $a_{ij} = w_i/w_j$

$a_{ij}$  :  $i$ 번째 판단기준과  $j$ 번째 판단기준과의 비교값

$w_i$  : 구하려는 판단기준

$w_j$  : 비교하는 판단기준

을 가지고 있다고 할 수 있으며, 다음의 일관성 지수(CI)와 일관성 비율(CR)을 통하여 구할 수 있다.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (14)$$

$$CR(\%) = \frac{CI}{RI} \times 100 \quad (15)$$

여기서, RI는 난수지수(random index)이고 n이 1에서 10까지 변화할 때의 난수지수는 표 4와 같으며, 식(15)에서 구한 일관성 비율이 10% 이내에 들 경우 해당 쌍대비교행렬은 일관성이 있다고 규정한다.

이에 본 연구에서는 가중치를 결정함에 있어 스포링 평가인자별 상대중요도로 계산된 가중치를 적용하는 경우(Case I)와 스포링 평가인자별 회귀식의 분산도를 고려하는 경우(Case II)로 가중치를 다르게 적용하여 가중치의 영향을 비교검토했다.

표 5와 식 (16)은 3가지 스포링 평가인자별 상대 중요도를 고려한 쌍대비교행렬과 가중치를 나타낸 것이며, 표 6과 식 (17)은 3가지 스포링 평가인자별 정규화 스포링 깊이의 회귀식의 분산도를 고려한 쌍대비교행렬과 가중치를 나타내고 있다.

$$W = [w_i]_{1 \times 3} = [w_1 \quad w_2 \quad w_3] \\ = [0.11 \quad 0.56 \quad 0.33], \quad i = 1, 2, 3 \quad (16)$$

표 4. 난수지수

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

표 5. 스포링 평가인자에 대한 쌍대비교행렬(Case I)

C	$\sigma_1/\sigma_c$	$D_{is}$	$\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$
$\sigma_1/\sigma_c$	1	1/5	1/3
$D_{is}$	5	1	5/3
$\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$	3	3/5	1

표 6. 스포링 평가인자별 회귀식의 분산도를 고려한 쌍대비교행렬(Case II)

C	$\sigma_1/\sigma_c$	$D_{is}$	$\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$
$\sigma_1/\sigma_c$	1	5/5	5/1
$D_{is}$	5/5	1	5/1
$\sigma_{dev}/\sigma_{cm}$	1/5	1/5	1

$$W = [w_i]_{1 \times 3} = [w_1 \quad w_2 \quad w_3] \\ = [0.48 \quad 0.41 \quad 0.11], \quad i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

#### 5.4 정규화 스포링 깊이와 정규화 스포링 폭의 95% 신뢰수준 행렬의 산정

5.2절과 5.3절에 제시된 정규화 스포링 깊이 행렬 및 정규화 스포링 폭 행렬에 가중치 행렬을 곱함으로써 식(18)과 (19)에서와 같이 3가지 스포링 평가인자에 대한 정규화 스포링 깊이와 정규화 스포링 폭의 기댓값과 95% 신뢰수준의 상·하한값으로 구성된 95% 신뢰수준의 범위 행렬이 도출되어 정규화 스포링 깊이와 정규화 스포링 폭의 95% 신뢰구간을 구하게 된다.

$$\frac{d_f}{W_D} = DF \cdot W = [df_{ij}]_{3 \times 3} \cdot [w_i]_{1 \times 3} \quad (18) \\ = \left[ \sum_{i=1,2,3} w_i \cdot df_{ij} \quad \sum_{i=1,2,3} w_i \cdot df_{ij} \quad \sum_{i=1,2,3} w_i \cdot df_{ij} \right]$$

$$\frac{w_f}{W_D} = WF \cdot W = [wf_{ij}]_{3 \times 3} \cdot [w_i]_{1 \times 3} \quad (19) \\ = \left[ \sum_{i=1,2,3} w_i \cdot wf_{ij} \quad \sum_{i=1,2,3} w_i \cdot wf_{ij} \quad \sum_{i=1,2,3} w_i \cdot wf_{ij} \right]$$

#### 5.5 스포링 깊이와 스포링 폭의 95% 신뢰구간의 산정

5.4절에서 구한 정규화 스포링 깊이와 정규화 스포링

폭의 95% 신뢰수준 범위 행렬로부터 정규화 스포링 깊이와 정규화 스포링 폭의 95% 신뢰구간이 결정되면 공동의 폭( $W_D$ )를 고려함으로써 식 (20)과 (21)에서와 같이 스포링 깊이와 스포링 폭에 대한 95% 신뢰수준의 범위가 산정되고 현장관측결과와의 비교를 통해 상기 과정을 통해 구해진 95% 신뢰구간 내에 현장관측결과가 포함되면 본 평가모델의 적용성 및 신뢰성이 검증되었다고 평가할 수 있다.

$$d_f = \frac{d_f}{W_D} \cdot W_D = [df_{LL} \quad df_{EV} \quad df_{UL}] \quad (20)$$

$$w_f = \frac{w_f}{W_D} \cdot W_D = [wf_{LL} \quad wf_{EV} \quad wf_{UL}] \quad (21)$$

### 5.6 선형회귀식을 이용한 스포링 깊이와 스포링 폭의 종합 평가모델 검증

제안된 스포링 깊이와 스포링 폭에 관한 종합 평가모델 검증을 위해 스포링 발생현장을 대상으로 5.3절에서 설명한 바와 같이 가중치 조건(Case I, Case II)을 다르게 적용하여 스포링 깊이와 스포링 폭에 대한 평가를 실시하였다. 현장에서 구한 3가지 응력강도비를 회귀식에 대입하면 95% 신뢰구간의 정규화 스포링 깊이와 정규화 스포링 폭이 산정되고 이를 행렬로 변환하여 가중치 행렬과 곱하면 가중치가 고려된 정규화 스포링 깊이

와 정규화 스포링 폭의 95% 신뢰구간이 계산된다. 여기에 공동의 폭( $W_D$ )을 다시 곱함으로써 최종적으로 실제 스포링 깊이와 스포링 폭의 95% 신뢰구간을 산정하게 된다.

4개소의 스포링 발생현장에 상기 과정으로 제안된 스포링 깊이와 스포링 폭에 관한 종합 평가모델을 적용한 결과는 각각 표 7, 표 8과 같다. 표 7과 표 8에서 보는 바와 같이 현장에서 관측된 스포링 깊이와 스포링 폭이 95% 신뢰구간에 포함되고 있어 본 평가모델이 비교적 정확하게 현장에서 발생한 스포링 깊이와 스포링 폭을 예측하고 있음을 알 수 있었다.

여기서, 특이한 사항은 3가지 스포링 평가인자별 회귀식을 개별적으로 적용하여 구한 스포링 깊이, 스포링 폭과 현장의 관측결과를 비교한 결과 일부 현장에서 예측이 불가능하였으나 3가지 스포링 평가인자별 회귀관계에 가중치를 적용하여 종합적으로 고려한 경우 비교적 근사하게 스포링 깊이와 스포링 폭을 예측할 수 있었다.

또한, 평가모델 상 가중치를 적용함에 있어 3가지 스포링 평가인자별 상대중요도로 산정된 가중치를 적용한 경우(Case I)에 비해 3가지 스포링 평가인자별 회귀관계의 분산도를 고려하여 산정된 가중치를 적용한 경우(Case II)가 95% 신뢰구간이 좁게 형성되고 있어 3가지 스포링 평가인자별 회귀관계의 분산도를 고려하여 가중치를 결정하는 것이 합리적인 방안이라 판단된다.

표 7. 스포링 현장에 대한 95% 신뢰구간의 스포링 깊이와 현장관측결과와의 비교

현장	현장관측결과	Case I		Case II	
		95% 신뢰구간	기대값	95% 신뢰구간	기대값
URL Room 417	천정에서 깊이 1.1 m 발생	0.524~1.394 m	0.959 m	0.571~1.327 m	0.949 m
El Teniente Mine Drift	천정에서 깊이 1.06 m 발생	0.831~1.516 m	1.174 m	0.867~1.463 m	1.165 m
HRL ZEDEX	측벽에서 깊이 0.1 m 발생	0.000~0.444 m	0.114 m	0.000~0.396 m	0.109 m
Heggura Tunnel	천정에서 깊이 0.4 m 발생	0.000~0.768 m	0.175 m	0.000~0.694 m	0.178 m

표 8. 스포링 현장에 대한 95% 신뢰구간의 스포링 폭과 현장관측결과와의 비교

현장	현장관측결과	Case I		Case II	
		95% 신뢰구간	기대값	95% 신뢰구간	기대값
URL Room 417	천정에서 폭 4.08 m 발생	1.414~5.485 m	3.271 m	1.831~5.687 m	3.654 m
Heggura Tunnel	천정에서 폭 0.63 m 발생	0.000~3.715 m	0.696 m	0.000~3.571 m	0.799 m
Kobbskaret Tunnel	천정에서 폭 1.69 m 발생	0.404~5.557 m	2.537 m	0.642~5.891 m	3.119 m
Kristineberg Mine Drift	천정에서 폭 4.80 m 발생	2.217~5.438 m	3.828 m	3.077~6.034 m	4.556 m

## 6. 결 론

본 연구에서는 스폐링 관측사례 및 스폐링 발생현장에 대한 CWFS 모델 수치해석 사례를 통해 3가지 스폐링 평가인자별 정규화 스폐링 깊이와 정규화 스폐링 폭의 선형회귀식을 도출하였고, 통계적 추론을 통해 회귀식의 신뢰성을 검증하였다. 스폐링 평가인자별 3가지 회귀관계를 종합적으로 고려하기 위해 가중치를 적용함으로써 스폐링 깊이와 스폐링 폭의 95% 신뢰구간을 산정하는 스폐링 깊이와 스폐링 폭에 관한 종합 평가모델을 개발하였고 이를 스폐링 발생현장에 적용하여 신뢰성을 검증하였다.

이상의 연구로부터 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 스폐링 관측사례 및 스폐링 발생현장의 CWFS 모델 수치해석 사례에 대한 분석을 통해 3가지 스폐링 평가인자별 정규화 스폐링 깊이( $d_f/W_D$ )와 정규화 스폐링 폭( $w_f/W_D$ )의 선형회귀식을 유도하였고 통계적 추론의  $t$ -분포를 통해 정규화 스폐링 깊이( $d_f/W_D$ )과 정규화 스폐링 폭( $w_f/W_D$ )의 회귀식을 검증하였다.
2. 정규화 스폐링 깊이( $d_f/W_D$ )과 정규화 스폐링 폭( $w_f/W_D$ )에 대한 95% 신뢰구간 상하한식과 기댓값의 회귀식과의 분산정도를 평가한 결과 기댓값의 회귀식에 비해 큰 편차가 없는 것으로 나타나 현장 적용이 가능한 것으로 판단되었다.
3. 3가지 스폐링 평가인자별 정규화 스폐링 깊이( $d_f/W_D$ )과 정규화 스폐링 폭( $w_f/W_D$ )의 회귀식을 종합적으로 고려할 수 있도록 가중치를 적용함으로써 스폐링 깊이와 스폐링 폭의 95% 신뢰구간을 산정할 수 있는 종합 평가모델을 개발하였고 스폐링 발생현장에 적용한 결과 현장관측결과가 95% 신뢰구간 내에 포함되고 있어 평가모델의 적용성 및 신뢰성이 입증되었다.
4. 3가지 스폐링 평가인자별 정규화 스폐링 깊이( $d_f/W_D$ )과 정규화 스폐링 폭( $w_f/W_D$ ) 회귀식을 개별적으로 적용하여 구한 결과와 현장관측결과를 비교한 결과 몇몇 현장에서 예측이 불가능하였으나 3가지 스폐링 평가인자별 회귀관계를 종합적으로 고려한 본 평가모델을 적용함으로써 비교적 정확하게 스폐링 깊이

와 스폐링 폭을 예측할 수 있었다.

5. 스폐링 깊이와 스폐링 폭에 관한 종합 평가모델에서 가중치를 적용함에 있어 3가지 스폐링 평가인자별 상대 중요도로 결정된 가중치를 적용한 경우(Case I)와 스폐링 평가인자별 정규화 스폐링 폭에 대한 회귀식의 분산도를 고려한 경우(Case II)를 비교한 결과 Case II가 Case I에 비해 스폐링 폭의 95% 신뢰구간이 좀 더 좁게 형성되고 있어 3가지 스폐링 평가인자별 회귀관계의 분산도를 고려하여 가중치를 결정하는 것이 합리적인 방안이라 판단되었다.
6. 상기 개발된 종합 평가모델을 이용하여 스폐링 깊이와 스폐링 폭에 대한 사전 평가를 함으로써 실제 스폐링 발생영역을 예측할 수 있고 이를 통해 스폐링 손상영역에서의 보강방안과 보강범위를 포함한 보강 설계방향을 결정하는데 있어 상당히 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 제한된 스폐링 관측사례를 바탕으로 전개된 연구로 향후 평가모델의 현장 적용성 및 신뢰성을 높이기 위해 추가적인 스폐링 관측사례를 수집하여 스폐링 깊이와 스폐링 폭에 관한 회귀식의 신뢰성을 향상시킬 예정이다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 김계수, 2008, Excel 2007를 이용한 통계분석, 한나래아카데미.
2. 이강현, 2009, 지하공동의 취성파괴 예측을 위한 손상지수의 평가, 고려대학교 대학원 석사학위논문.
3. 이희석, 이대혁, 김호영, 홍지수, 최영태, 김석진, 박연준, 2005, 과지압 암반 내 대규모 지하 유류비축기지 안정성 평가 및 Microseismic 계측, KTA Annual Conference: 189-201.
4. 천대성, 박익섭, 정용복, 신중호, 2008, 고심도 터널에서 예상되는 취성파괴영역 평가, KTA Annual Conference: 197-209.

- 
5. 천대성, 정용복, 박찬, 전석원, 2007, CWFS 모델변수 결정을 위한 손상제어시험 및 이를 활용한 취성파괴 모델링, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제3호, pp. 263-273.
  6. Diederichs, M. S. 2007, Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 44, pp. 1082-1116.
  7. Grimstad, E. and Bhasin, R., 1997, Rock support in hard rock tunnels under high stress, International Symposium on Rock Support: 504-513.
  8. Fairhurst, C. and Lin, D., 1985, Fuzzy methodology in tunnel support design, Proceedings of 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, SD: 269-278.
  9. Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, Underground excavations in rock, Institution of Mining and Metallurgy, London.
  10. 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.
  11. Martin, C. D., 1997, The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 34, pp. 698-725.
  12. 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.
  13. Myrvang, A. M. and Davik, K. I., 1997, Heavy spalling problems in road tunnels in Norway-Long time stability and performance of sprayed concrete as rock support, Proceeding of International Symposium on Rock Support: 751-764.
  14. Saaty, T. L., 1980, The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York.
  15. Stacey, T. R., 1981, A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 18, pp. 469-474.
- 

접수일(2009.7.20), 수정일(09.9.8), 게재확정일(2009.9.9)