

3차원 파괴조건식을 이용한 콘크리트 플러그의 안전도 평가

이연규¹⁾, 송원경²⁾, 박철환²⁾, 최병희^{3)*}

Stability Analysis of Concrete Plugs Using a 3-D Failure Criterion

Youn-Kyou Lee, Won-Kyoung Song, Chulwhan Park, Byung-Hee Choi

Abstract A new failure criterion for concrete, which takes into account the effect of the intermediate principal stress, is proposed. The new criterion, which takes the advantages from both the Mohr-Coulomb and the Willam-Warnke criteria, is linear in the meridian section, while its octahedral section is always smooth and convex. Fitting the triaxial compression data with the proposed criterion shows the high performance of the new criterion. A new formula for the factor of safety of concrete is defined based on the new failure criterion and it is employed in the stability analysis of the concrete plugs installed in the pilot plant. The new formula for the factor of safety measures the degree of closeness of a stress state to the failure surface in the octahedral plane. Finally, 3-D finite element analyses of pilot plant were carried out to obtain the stress distributions in the plugs. Then, the stress distributions are converted to those of factor of safety by use of the proposed formula. Based on the distribution of factor of safety in the concrete plugs, the stability of the tapered and wedge-shaped plugs is evaluated.

Key words Failure criterion, Intermediate principal stress, Concrete plug, Factor of safety

초 록 중간주응력을 고려할 수 있는 새로운 콘크리트 파괴조건식을 제안하였다. 제안된 파괴조건식은 Mohr-Coulomb 파괴조건식과 Willam-Warnke의 파괴조건식의 장점을 수용하고 있으므로 자오면에서는 선형 파괴식으로 나타나고 팔면체응력면에서는 항상 볼록인 궤적을 보이며 특이성을 갖지 않는다. 진삼축압축시험 결과를 이용한 회귀분석을 통하여 제안된 파괴조건식의 적합성을 검증하였다. 제안된 파괴조건식에 기초한 안전율 공식을 정의하고 이를 파일럿 플랜트에 설치된 콘크리트 플러그의 안전도 해석에 이용하였다. 제안된 안전율 공식은 팔면체응력면에서 응력상태 점의 파괴곡면에 대한 접근도를 의미한다. 마지막으로 플러그의 응력분포를 계산하기 위해 파일럿 플랜트에 대한 3차원 응력해석을 실시하였다. 플러그의 응력분포는 제안된 안전율 공식을 이용하여 안전율 분포로 변환시켰다. 콘크리트 플러그의 안전율 분포특성 분석을 통해 테이퍼형 및 쐐기형 플러그의 안전도를 평가하였다.

핵심어 파괴조건식, 중간주응력, 콘크리트 플러그, 안전율

1. 서 론

신재생에너지 개발에 대한 국가적 관심과 투자가 증가하고 있는 상황에서 대규모 전력저장 수단으로 압축공기 에너지 저장방식이 유력하게 검토되고 있다. 이에 따라 최근 국내에서도 압축공기를 이용한 가스터빈 발전의 상

업화를 목적으로 압축공기 지하저장에 대한 연구개발이 시작되었다(김택곤 외, 2008, 김형목 외, 2009a,b, 이연규 외, 2010). 압축공기를 이용한 가스터빈 발전의 도입 시 국내의 지형 특성상 암반터널에 압축공기를 저장하는 방식이 채택될 가능성이 매우 높다. 이 경우 압축공기 저장 구간을 외부와 격리하는 콘크리트 플러그가 압축공기 저장시설의 주요 구성요소가 되므로 콘크리트 플러그 설계기술의 개발이 필요하다.

고압의 공기압과 지압을 받는 콘크리트 플러그의 안전한 설계를 위해서는 플러그 형상별 콘크리트 파괴 특성을 수치해석적으로 파악할 수 있는 기술이 필요하며 이를 위해서는 정밀한 콘크리트 파괴기준식이 개발되

¹⁾ 군산대학교 해양건설공학과 교수

²⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

³⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2011년 11월 29일

심사 완료일 : 2011년 12월 12일

게재 확정일 : 2011년 12월 12일

어야 한다. 암석과 같은 취성재료의 진삼축압축시험(true triaxial compression test) 결과에 의하면 암석의 강도는 중간주응력의 크기에 상당한 영향을 받는 것으로 나타나고 있다(Mogi, 1967, Mogi, 1971, Chang & Haimson, 2000a,b). 콘크리트도 암석과 유사한 취성 파괴특성을 나타내므로 콘크리트의 강도 역시 중간주응력의 크기에 영향을 받는다는 것을 유추할 수 있으며 실험결과(Launay & Gachon, 1972)도 이를 뒷받침한다. 따라서 콘크리트 플러그의 정밀한 파괴거동 해석을 위해서는 중간주응력의 크기를 고려할 수 있는 파괴조건식의 도입이 필요하다.

현재까지 콘크리트의 파괴조건식으로 널리 이용되고 있는 Mohr-Coulomb 식은 사용이 간편한 선형 파괴조건식이지만 중간주응력의 크기를 고려하지 못한다. 또한 주응력 공간에 표시된 Mohr-Coulomb 파괴곡면은 특이성(singularity)이 있는 6개의 모서리를 포함하므로 수치해석에 적용하는 과정에서 많은 불편함을 수반한다. 중간주응력을 고려하는 대표적인 3차원 파괴조건식으로는 Drucker-Prager 함수(Drucker & Prager, 1952), Mogi 함수(Mogi, 1971), 수정 Wiebols-Cook 함수(Zhou, 1994), 수정 Lade 함수(Ewy, 1999), Mogi-Coulomb 함수(Al-Ajmia & Zimmerman, 2005), Willam & Warnke (1974)의 함수 등이 있다. 국내에서도 최근 이연규 (2011)가 중간주응력의 영향을 고려할 수 있는 3차원 파괴조건식을 제안하였다. 이들 함수는 간편성과 정확성 측면에서 상호 장단점을 가지고 있다. 예를 들어 수정 Wiebols-Cook 함수는 삼축압축강도를 비교적 정확하게 예측하지만(Colmenares & Zoback, 2002) 파괴곡면이 특이성을 갖는다. Mogi-Coulomb 함수는 상대적으로 사용이 간편하지만 파괴함수의 불룩성이 보장되지 않는다. 또한 Willam & Warnke의 파괴함수는 특이성을 갖지 않으며 항상 불룩성이 보장된다는 장점이 있으나 입력자료의 수가 많다는 단점이 있다. 그러므로 플러그 콘크리트의 안정성 평가를 위한 파괴조건식은 사용의 간편성과 강도 예측의 정확성을 동시에 고려하여 개발될 필요가 있다.

이 연구에서는 Mohr-Coulomb 함수의 간편성과 Willam & Warnke 파괴곡면이 갖는 불룩성 및 무 특이성의 장점을 동시에 만족하는 새로운 3차원 파괴함수(이하 MC-WW로 표기)를 개발하였다. 개발된 파괴함수를 활용한 새로운 안전율 지표를 제안하고 이를 적용하여 압축공기 저장용 파이프 플랜트에 설치된 콘크리트 플러그의 형태별 안전도 평가를 시도하였다.

2. Mohr-Coulomb 함수의 기하학적 표현

Mohr-Coulomb 파괴조건식은 Nayak & Zienkiewicz (1972)의 응력불변량 ξ , ρ , θ 를 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다(이연규, 2011).

$$\frac{\rho}{g_{MC}(\theta)} - \frac{2\sqrt{2} \sin\phi}{3 - \sin\phi} \xi - \frac{\sqrt{6} \sigma_c (1 - \sin\phi)}{3 - \sin\phi} = 0 \quad (1a)$$

$$g_{MC}(\theta) = \frac{3 - \sin\phi}{3 \cos\theta + \sqrt{3} \sin\theta - \cos\theta \sin\theta + \sqrt{3} \sin\theta \sin\phi} \quad \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}\right) \quad (1b)$$

여기서 ϕ 는 마찰각이고, σ_c 는 일축압축강도이다. $g_{MC}(\theta)$ 는 다음의 조건을 만족하는 θ 의 함수로서 팔면체응력면(octahedral plane)에 도시된 Mohr-Coulomb 파괴곡면의 단면형상을 정의한다.

$$g_{MC}(0) = 1; \quad g_{MC}\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{3 - \sin\phi}{3 + \sin\phi} = k \quad (2)$$

$g_{MC}(\theta)$ 는 ξ 에 영향을 받지 않는 Lode각 θ 의 함수이므로 Mohr-Coulomb 파괴곡면의 단면형태는 일정하다. 세 주응력의 대칭성을 고려하면 Mohr-Coulomb 파괴곡면의 단면은 Fig. 1과 같은 육각형 형태로 나타난다.

또한 Mohr-Coulomb 파괴조건에서는 식 (1a)에서 볼 수 있듯이 주어진 θ 에 대해 ρ 와 ξ 의 관계가 선형이므로 ξ - ρ 평면(meridian plane, 자오면)에서 단면 형상은 Fig. 1과 같이 직선으로 나타난다. 예를 들어 삼축압축조건($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)에서는 $\theta = 0$ 이므로 $g_{MC}(\theta) = 1$ 이 되어 다음과 같이 ρ 가 ξ 의 선형함수로 표시된다.

$$\rho_{\theta=0} = \frac{2\sqrt{2} \sin\phi}{3 - \sin\phi} \xi + \frac{\sqrt{6} \sigma_c (1 - \sin\phi)}{3 - \sin\phi} \quad (3)$$

그러므로 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 식 (1a)과 같이 ξ , ρ , θ 의 함수로 표시하면 주응력좌표계에서 파괴곡면이 Fig. 1과 같이 육각뿔 형태로 나타남을 쉽게 이해할 수 있다. 식 (3)을 이용하면 원점으로부터 파괴곡면의 꼭지점에 이르는 거리가 $\sqrt{3} c \cot\phi$ 이 됨을 알 수 있다. Mohr-Coulomb 파괴곡면은 6개의 모서리에서 그 래디언트(gradient)가 정의되지 않는 특이성(singularity)을 갖기 때문에 수치해석에 적용시 불편함이 따르나 사용의 간편성과 그 동안 축적된 강도정수 자료의 풍부함 때문에 지반과 콘크리트의 파괴조건식으로 여전히 널리 이용되고 있다.

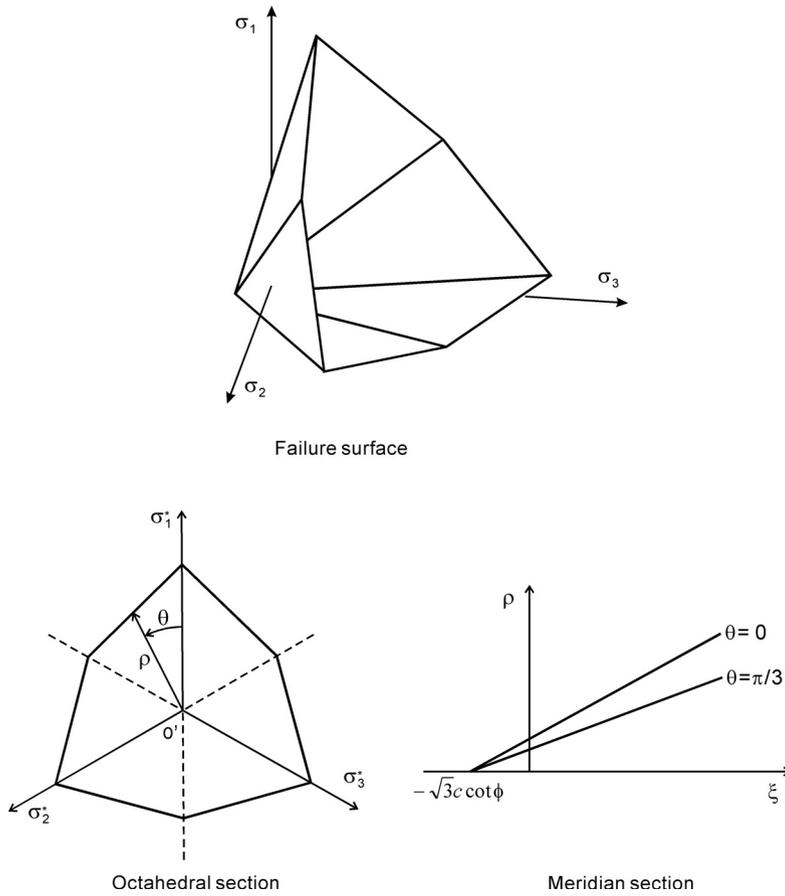


Fig. 1. Mohr-Coulomb failure criterion

3. 중간주응력을 고려하는 3차원 파괴함수

3.1 MC-WW 파괴함수

Mohr-Coulomb 파괴조건식을 기반으로 하는 3차원 선형 파괴조건식은 식 (1b)의 형상 함수 $g_{MC}(\theta)$ 의 선택에 따라 다양하게 개발될 수 있다. 이 연구에서는 자오단면의 파괴함수는 Mohr-Coulomb 함수와 동일하지만 팔면체응력면의 형상함수 $g_{MC}(\theta)$ 는 Willam & Warnke (1972)의 형상함수 $g_{WW}(\theta)$ 로 대체된 새로운 파괴조건식 MC-WW를 제안하였다. Willam & Warnke의 형상함수는 타원함수를 가정하여 유도되었으므로 Drucker (1959)의 소성 안정조건에서 요구하는 블록성이 항상 보장된다. 따라서 개발된 3차원 선형 파괴함수는 다음과 같이 표시된다.

$$\rho(\xi, \theta) = g_{WW}(\theta) \cdot \rho_{\theta=0} \tag{4a}$$

$$g_{WW}(\theta) = \frac{2(1-k^2)\cos(\theta-\pi/3) + (2k-1)\sqrt{4(1-k^2)\cos^2(\theta-\pi/3) + 5k^2 - 4k}}{4(1-k^2)\cos^2(\theta-\pi/3) + (2k-1)^2} \tag{4b}$$

식 (4)에서 볼 수 있듯이 MC-WW 파괴함수는 중간주응력이 파괴에 미치는 영향을 고려하고 있지만 Mohr-Coulomb 파괴함수와 마찬가지로 2개의 강도정수 즉, 마찰각(ϕ)과 점착강도(c) 혹은 마찰각과 일축압축강도(σ_c)만으로 정의된다. 따라서 MC-WW 파괴함수를 적용하는 경우 지금까지 축적된 Mohr-Coulomb 강도정수 자료들을 적극 활용할 수 있다는 장점도 예상된다. Fig. 2는 MC-WW 파괴곡면이 주응력좌표 공간에서 Mohr-Coulomb 파괴곡면의 6개 모서리에 부드럽게 접하고 있음을 잘 보여준다.

$\phi = 45^\circ$, $\sigma_c = 100\text{MPa}$ 를 가정한 MC-WW 파괴함수의 팔면체응력면 단면형상과 자오면($\xi-\rho$ 평면) 단면형상을 Mohr-Coulomb 파괴함수의 경우와 비교하여 Fig.

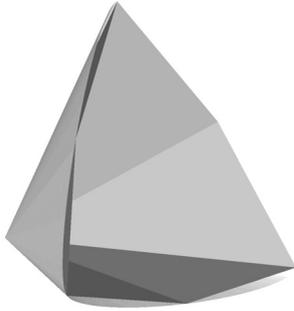


Fig. 2. MC-WW failure surface circumscribing the Mohr-Coulomb surface

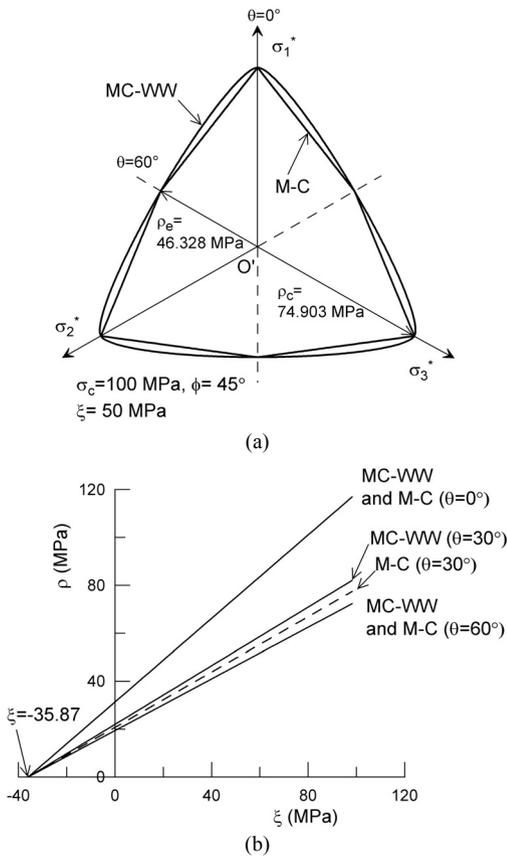


Fig. 3. MC-WW and Mohr-Coulomb failure criteria on (a) the octahedral plane and (b) the meridian plane

3에 도시하였다. 자오면 단면 형상에서 볼 수 있듯이 MC-WW 파괴함수는 선형이므로 ξ 의 증가에 따라 ρ 는 선형적으로 증가한다. $\theta = 0, 60^\circ$ 일 때 두 파괴함수의 ρ 값은 일치하지만 $0 < \theta < 60^\circ$ 범위에서는 MC-WW 파괴

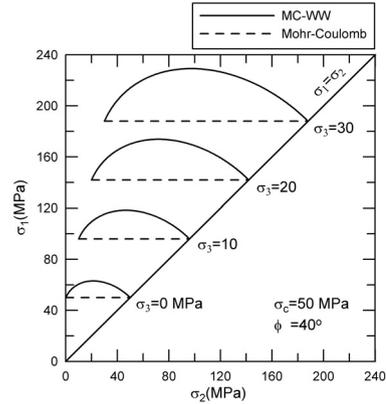


Fig. 4. Effect of the intermediate principal stress σ_2 on the triaxial strength σ_1 in the MC-WW and Mohr-Coulomb failure criteria

함수의 ρ 값이 Mohr-Coulomb 함수의 경우보다 크를 잘 보여준다.

MC-WW 파괴조건 식 (4)에서는 Mohr-Coulomb 조건식과 달리 중간주응력 σ_2 의 크기가 삼축압축강도에 미치는 영향을 고려할 수 있다. $\phi = 40^\circ$, $\sigma_c = 50 \text{ MPa}$ 를 가정할 때 4가지 최소주응력 즉, $\sigma_3 = 0, 10, 20, 30 \text{ MPa}$ 에 대해 σ_2 값의 변화에 따라 MC-WW 파괴조건식이 예측하는 삼축압축강도 σ_1 을 Fig. 4에 도시하였다. 비교를 목적으로 Mohr-Coulomb 파괴조건식에 의해 예측되는 값도 함께 도시되었다. 예상한 바와 같이 Mohr-Coulomb 식에서 예측하는 삼축압축강도 σ_1 은 중간주응력 σ_2 의 크기에 영향을 받지 않는 반면에 MC-WW 파괴조건식에 의해 예측되는 σ_1 은 중간주응력 σ_2 의 크기에 상당한 영향을 받고 있음을 잘 보여준다. MC-WW 파괴곡면은 Mohr-Coulomb 곡면과 6개 모서리에서 접하므로 삼축압축조건($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, $\theta = 0$)과 삼축신장조건($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, $\theta = 60^\circ$)에서 두 파괴함수가 예측하는 진삼축압축강도 σ_1 은 동일하다. 가정한 강도정수 조건에서 $\sigma_3 = 0, 10, 20, 30 \text{ MPa}$ 에 대해 MC-WW식이 예측하는 진삼축압축강도는 Mohr-Coulomb식의 예측 강도에 비해 각각 최대 26.10%, 23.38%, 22.43%, 21.94% 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로 MC-WW 파괴조건식에서는 최소주응력 σ_3 의 크기가 작을수록 중간주응력의 크기가 삼축압축강도 증가에 미치는 영향이 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

3.2 MC-WW 파괴함수의 검증

제한한 3차원 파괴조건식 MC-WW의 삼축압축강도

예측 성능을 평가하기 위하여 여러 문헌에 보고된 11개의 진삼축압축시험(true triaxial compression test) 자료들을 활용하였다. 활용한 11개 자료에는 Yuubari 셰일 (Takahashi & Koide, 1989; Al-Ajmi & Zimmerman, 2005), Solnhofen 석회암(Mogi, 2007), Shirahama 사암(Takahashi & Koide, 2000; Al-Ajmi & Zimmerman, 2005), KTB 각섬암(Colmenares & Zoback, 2002; Chang & Haimson, 2000b), Dunham 백운암(Mogi, 2007), Mizuho 조면암(Mogi, 2007), Orikabe 몬조나이트(Mogi, 2007), Westerly 화강암(Al-Ajmi & Zimmerman, 2005; Chang & Haimson, 2000a), Manazuru 안산암(Mogi, 2007), Inada 화강암(Mogi, 2007), Yamaguchi 대리암(Mogi, 2007)이 포함된다.

MC-WW 및 Mohr-Coulomb 파괴함수에서 ρ 는 ξ 와 θ 의 양함수(explicit function) 형태이며 Lode 각 θ 에 대해 비선형이다. 그러므로 최적 강도정수 ϕ 와 σ_c 는 ρ 를 종속변수, ξ 와 θ 를 두 독립변수로 하는 비선형 회귀분석을 통하여 구할 수 있다.

최적 강도정수를 적용한 파괴함수의 적합도는 다음과

같이 정의되는 잔차표준편차(RSD, Residual Standard Deviation)를 계산하여 평가하였다.

$$RSD = \sqrt{\frac{1}{DOF} \sum_{i=1}^n (\rho_i - \rho_i^*)^2} \quad (5)$$

여기서 n 은 실험자료의 개수, ρ_i 는 실험값, ρ_i^* 는 최적 적합식의 예측 값이다. 또한 DOF는 회귀분석의 자유도로서 이 연구에서는 탐색하는 강도정수의 개수가 2이므로 $DOF = (n - 2)$ 이다. RSD가 0에 가까울수록 파괴함수의 실험값에 대한 적합도가 우수한 것으로 판단할 수 있다.

암석의 파괴조건을 MC-WW 함수 및 Mohr-Coulomb 함수로 가정하고 비선형 회귀분석으로 구한 각 암석의 강도정수와 RSD를 Table 1에 나타내었다. 암종들의 파괴강도가 서로 다르므로 표에 제시된 RSD 값들의 암종 간 직접 비교는 의미가 없음을 주의할 필요가 있다. RSD 값을 비교한 결과 11개 암종 모두 MC-WW 함수의 적합도가 Mohr-Coulomb 함수에 비해 매우 뛰어나

Table 1. Summary of the nonlinear regressions for the best fit strength parameters

Rock type	Best fit strength parameters, $\phi(^{\circ})$ and σ_c (MPa)		RSD (MPa) for M-C	RSD (MPa) for MC-WW
	M-C	MC-WW		
Yuubari shale	$\phi = 30.67$ $\sigma_c = 104$	$\phi = 28.00$ $\sigma_c = 94$	5.86	3.47
Solnhofen limestone	$\phi = 35.11$ $\sigma_c = 326$	$\phi = 27.38$ $\sigma_c = 325$	16.23	8.94
Shirahama sandstone	$\phi = 39.43$ $\sigma_c = 85$	$\phi = 36.04$ $\sigma_c = 76$	4.44	3.54
KTB amphibolite	$\phi = 47.09$ $\sigma_c = 324$	$\phi = 43.64$ $\sigma_c = 296$	27.29	21.92
Dunham dolomite	$\phi = 36.55$ $\sigma_c = 387$	$\phi = 30.52$ $\sigma_c = 374$	22.10	10.10
Mizuho trachyte	$\phi = 30.36$ $\sigma_c = 188$	$\phi = 25.10$ $\sigma_c = 193$	11.32	5.91
Orikabe monzonite	$\phi = 36.99$ $\sigma_c = 512$	$\phi = 32.99$ $\sigma_c = 499$	32.97	15.85
Westerly granite	$\phi = 52.00$ $\sigma_c = 328$	$\phi = 49.80$ $\sigma_c = 286$	14.51	11.54
Manazuru andesite	$\phi = 49.40$ $\sigma_c = 284$	$\phi = 43.49$ $\sigma_c = 296$	15.46	8.19
Inada granite	$\phi = 40.62$ $\sigma_c = 538$	$\phi = 39.86$ $\sigma_c = 477$	26.65	15.44
Yamaguchi marble	$\phi = 41.83$ $\sigma_c = 111$	$\phi = 36.01$ $\sigma_c = 111$	8.10	4.76

을 잘 보여준다. 최적 마찰각 ϕ 는 11개 암종 모두 MC-WW 함수를 적용한 경우에서 작게 나타났다. 최적 일축압축강도 σ_c 도 Mizuho 조면암과 Manzuru 안산암을 제외하면 마찰각의 경우와 마찬가지로 경향을 보인다. 최적 강도정수 탐색을 통한 강도예측 적합도 분석결과 전체적으로 이 연구에서 제안한 파괴함수 MC-WW가 Mohr-Coulomb 함수에 비해 강도예측 성능이 매우 뛰어난 것으로 나타났다. 이는 파괴함수 MC-WW가 중간주응력의 크기가 파괴에 미치는 영향을 고려하고 있기 때문으로 생각된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 Yuubari 셰일과 Solnhofen 석회암에 대해 회귀분석으로 구한 최적 강도정수를 적용

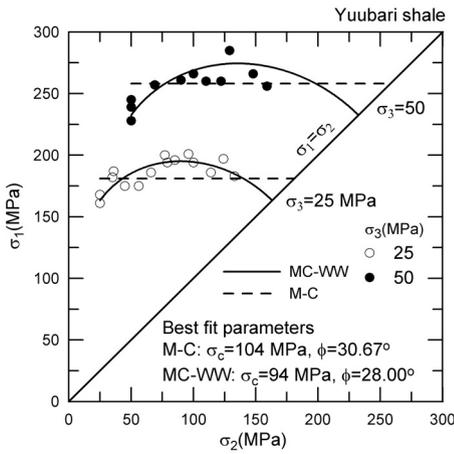


Fig. 5. Estimated and experimental triaxial strength of Yuubari shale

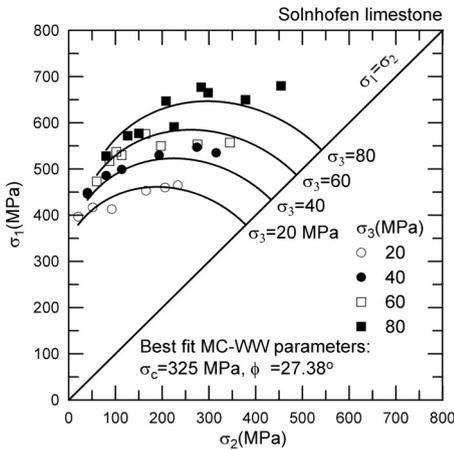


Fig. 6. Estimated and experimental triaxial strength of Solnhofen limestone

하였을 때 MC-WW 파괴조건식이 예측하는 삼축압축강도와 실험에서 구한 삼축압축강도를 비교하여 $\sigma_1 - \sigma_2$ 평면에 도시한 것이다. 삼축압축조건($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)과 삼축신장조건($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)에서 MC-WW 파괴곡면과 Mohr-Coulomb 파괴곡면이 접하므로 두 조건에서 삼축압축강도의 예측값은 동일하게 나타난다. 진삼축압축시험 결과는 삼축압축강도 σ_1 가 중간주응력 σ_2 의 크기의 증가에 따라 정점 값까지 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보여준다. MC-WW 파괴조건식의 예측 값 역시 이러한 경향성을 잘 반영하고 있음을 보여준다. 반면에 Fig. 5의 Yuubari 셰일의 경우에서 볼 수 있듯이 Mohr-Coulomb 파괴조건식은 중간주응력 σ_2 의 크기가 삼축압축강도에 미치는 영향을 반영하지 못하므로 진삼축압축시험 결과에 대한 적합성이 상대적으로 낮음을 보여준다. 이 연구에서 제안된 MC-WW 파괴함수에 의한 삼축압축강도 예측곡선은 진삼축압축시험 결과를 잘 모사하고 있음을 두 그림은 잘 보여준다.

4. 콘크리트 플러그의 안전율 분포 해석

4.1 안전율의 정의

플러그 콘크리트의 파괴에 대한 안전율(FS, Factor of Safety)은 주응력 좌표계에서 표시된 편차주응력 벡터의 크기 즉, Nayak & Zienkiewicz(1972)의 응력불변량 ρ 을 이용하여 정의할 수 있다. Fig. 7은 임의의 응력상태 점 p 를 지나는 자오단면과 팔면체응력면을 보여준다. 그림에서 파괴에 대한 안전율은 공간대각선(space diagonal, ξ -축)에서 점 p 에 이르는 반경거리(ρ)에 대한 파괴곡면까지의 반경거리(ρ_f)의 비로 다음과 같이 정의하였다.

$$FS = \frac{\rho_f}{\rho} = \frac{g(\theta) \cdot \rho|_{\theta=0}}{\rho} \quad (6)$$

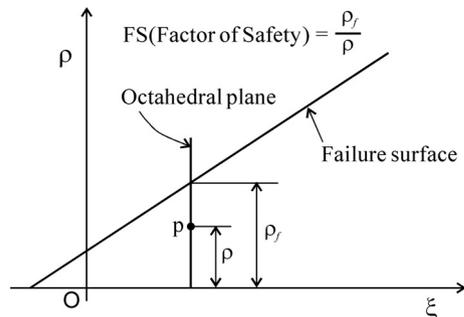


Fig. 7. Definition of factor of safety

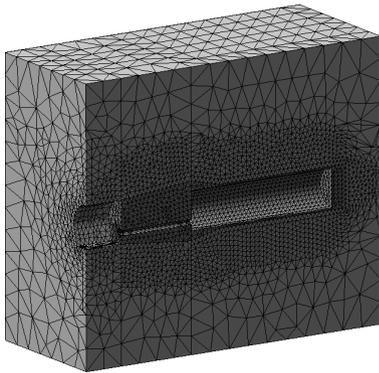


Fig. 8. Finite element mesh for the pilot plant with tapered plug

그러므로 식 (6)에서 $g(\theta) = g_{MC}(\theta)$ 이면 Mohr-Coulomb 파괴함수에 대한 안전율이 계산되며 $g(\theta) = g_{WW}(\theta)$ 이면 MC-WW 파괴함수에 대한 안전율이 계산된다.

4.2 pilot plant의 3차원 유한요소해석

제안된 안전율 공식을 활용하여 한국지질자원연구원 (2010)에 의해 시험 중인 압축공기 저장용 파일럿 플랜트에 설치된 테이퍼형 및 썸기형 플러그의 안전도 분석이 시도되었다.

콘크리트 플러그의 안전도 분석은 2단계 절차를 거쳐 이루어졌다. 첫 번째 단계에서는 플러그 구조체에 분포하는 3차원 탄성응력분포를 계산하였다. 두 번째 단계에서는 첫번째 단계에서 계산된 3차원응력 분포를 안전율 공식(6) 대입하여 플러그 구조체 내의 파괴안전율 분포를 계산하였다. 플러그의 부재의 안전율 분포 형태를 바탕으로 플러그 콘크리트의 예상 파괴 형태와 플러그 형태에 따른 플러그 구조체의 안전성을 분석하였다.

플러그에 분포하는 탄성응력은 CAD기반의 3차원 범용 유한요소 프로그램인 Solidworks(2007)를 이용하여 계산하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 탄성응력분포 계산에 이용한 3차원 유소망이다. 해석모델의 대칭성을 활용하여 pilot plant의 종단 대칭면을 기준으로 1/2 영역만을 해석대상으로 하였다. 테이퍼형 플러그와 썸기형 플러그를 적용한 파일럿 플랜트 해석모델의 가로, 세로, 높이는 각각 42 m × 18 m × 36 m, 31 m × 18 m × 36 m이다. 요소망은 10절점 4면체요소로 구성하였으며 테이퍼형 플러그를 적용한 모델의 경우 총 요소 수는 76068개이고 썸기형 플러그를 적용한 모델의 경우 총 요소 수는 86283개이다. 콘크리트부와 암반의 접촉부는 상대변위의 발생에 따라 절점의 분리가 가능하도록 접촉요

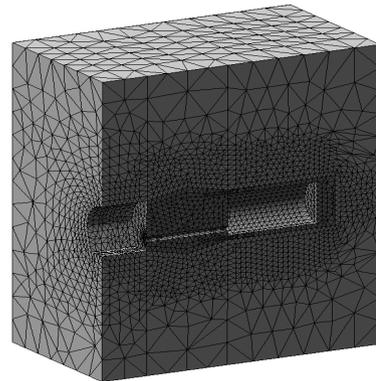


Fig. 9. Finite element mesh for the pilot plant with the plug of wedge shape

Table 2. Mechanical properties of rock mass and concrete

Properties	Rock mass	Concrete
Unit weight, γ (kN/m ³)	27.2	25.0
Poisson's ratio, ν	0.14	0.2
Deformation modulus, E_m (GPa)	9.5	15
Friction angle (°)		42

소 조건을 부여하였다.

모델의 상부면에 작용하는 압력 σ_v 는 파일럿 플랜트의 심도를 고려하여 14MPa로 설정하였고 측압비는 수압파쇄법을 적용한 현장의 초기응력 측정결과(KIGAM, 2010)에 근거하여 1.1로 가정하였다. 저장터널 내부 면에는 최대 운전공기압 $p_i = 5.0$ MPa이 작용하는 것으로 가정하였다. 해석에 적용한 콘크리트 및 암반의 물성은 현장의 지질조사 결과(KIGAM, 2010) 및 문헌조사를 바탕으로 Table 2와 같이 결정하였다.

4.3 콘크리트 플러그 종단면의 안전율 분포 해석

콘크리트 플러그에 대한 3차원 응력분포 해석결과를 이용하여 수직 종단면에 대해 안전율 분포해석을 수행하였다. 안전율 분석에서 콘크리트의 마찰각은 $\phi = 42^\circ$ 를 가정하였으며 콘크리트의 일축압축강도는 $\sigma_c = 40$ MPa를 가정하였다. Mohr-Coulomb 및 MC-WW 파괴함수를 적용한 파괴 안전율 해석결과를 비교 분석함으로써 중간주응력의 영향을 고려하는 3차원 콘크리트 파괴함수 도입의 필요성을 검토하였다.

Fig. 10은 테이퍼형 플러그의 수직 종단면의 안전율 분포를 도시한 것으로서 MC-WW 파괴함수를 적용한 경우와 Mohr-Coulomb 파괴함수를 적용한 경우를 비교

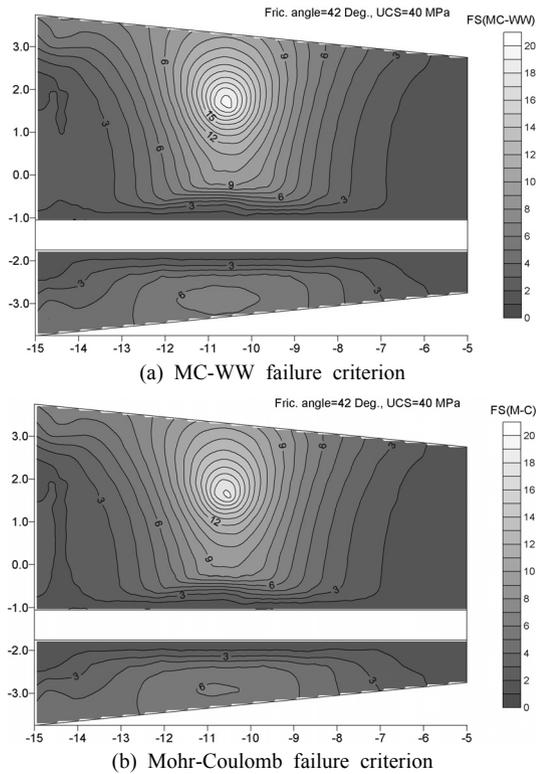


Fig. 10. Distribution of factor of safety in tapered plug

하여 제시하였다. 플러그의 중앙부에 비해 양 끝 부분의 안전율이 상대적으로 낮게 나타남을 볼 수 있다. 또한 MC-WW 파괴함수를 적용한 안전율이 Mohr-Coulomb 파괴함수를 적용한 안전율에 비해 높게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 MC-WW 파괴함수에서는 중간주응력의 크기가 파괴에 미치는 영향을 고려하고 있기 때문으로 판단된다.

테이퍼형 플러그에 대한 안전율 해석의 경우와 마찬가지로 쐐기형 플러그에 대해 콘크리트 압축강도를 $\sigma_c = 40$ MPa로 가정하고 수직 종단면의 안전율 분포 해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 전반적인 안전율은 테이퍼형 플러그에 비해 매우 낮게 나타나고 있음을 보여준다. 예를 들어 테이퍼형 플러그의 경우 안전율이 10 이상인 영역이 플러그 중앙 상부 영역에서 상당히 넓게 나타나지만 쐐기형 플러그의 경우 대응되는 영역에서 안전율은 1.4~1.6을 넘지 못하고 있다. 또한 매우 제한된 깊이이지만 쐐기형 플러그의 경우 유지보수공 인접 영역에서 $FS < 1$ 인 영역이 나타나고 있다.

플러그 구조체의 전체적인 안전율 분포특성 분석결과 테이퍼형 플러그가 쐐기형 플러그에 비해 구조적으로

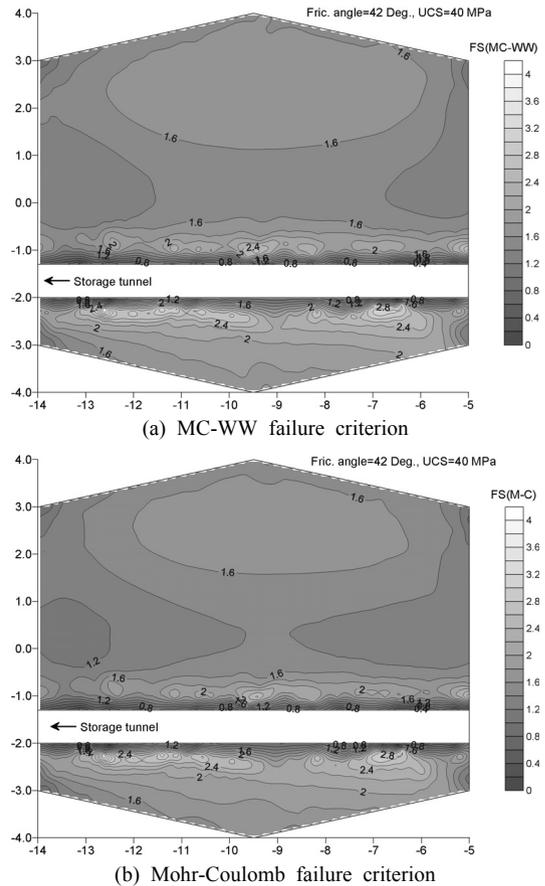


Fig. 11. Distribution of factor of safety in the wedge-shaped plug

훨씬 안전한 것으로 나타났다. 유지보수공 상부 영역의 안전율 분포 특성을 살펴보면 테이퍼형 플러그의 경우 중앙부에서 최대 안전율이 약 18까지 나타나지만 쐐기형 플러그의 중앙부에서는 최대 안전율이 1.4를 넘지 못하는 것으로 나타났다. 테이퍼형 플러그의 경우 유지보수공 주변에서 $FS < 1$ 인 영역이 거의 나타나지 않고 있지만 쐐기형 플러그의 경우 유지보수공 주변에서 $FS < 1$ 인 영역이 유지보수공 길이 전체에 걸쳐 분포한다. 그러나 $FS < 1$ 인 영역의 두께는 유지보수공의 직경에 비해 매우 얇은 것으로 나타나고 있어 쐐기형 플러그 구조체 전체의 안전성에 심각한 문제를 일으킬 정도는 아니라고 평가되었다.

5. 결론

콘크리트나 암석의 파괴조건식으로 널리 이용되는

Mohr-Coulomb 파괴조건식은 중간주응력 σ_2 가 파괴에 미치는 영향을 무시하며 파괴곡면의 6개 모서리에서 특이성을 갖는 단점이 있다. 이 연구에서는 Mohr-Coulomb 파괴함수의 단점을 극복하기 위하여 기존 Mohr-Coulomb 파괴곡면을 부드럽게 감싸는 새로운 파괴함수 MC-WW를 제안하였고 진삼축압축시험 자료를 이용하여 제안한 파괴함수를 검증하였다. 제안한 파괴함수의 자오면 형상이 Mohr-Coulomb 식의 경우와 동일하지만 팔면체 응력면의 단면형상은 Willam and Warnke(1974)의 함수와 동일하다. 따라서 제안된 파괴함수는 파괴곡면의 특이성을 갖지 않으며 모든 응력조건에서 불특성이 확보된다.

콘크리트 플러그 각 부분의 파괴특성을 분석하기 위하여 MC-WW 파괴함수에 기초한 파괴안전율 공식을 제안하였다. 제안된 안전율 공식은 팔면체응력면 상의 정수압축으로부터 응력상태 점까지 거리에 대한 파괴곡면까지의 거리 비로 정의하였다. 그러므로 개발된 안전율 공식은 중간주응력의 영향을 반영하므로 기존의 Mohr-Coulomb 파괴조건식 기반의 안전율 공식을 활용하는 경우보다 더욱 정밀한 구조물 안전도 평가가 가능할 것으로 판단된다.

개발된 파괴안전율 공식을 활용하여 현재 한국지질자원연구원에서 시험 중인 pilot plant에 설치된 테이퍼형 및 썬기형 플러그의 안전도를 평가하였다. 평가결과 썬기형 플러그에 비해 테이퍼형 플러그의 안전도가 매우 우수한 것으로 나타났다. 또한 MC-WW 파괴함수를 적용한 안전율 공식은 Mohr-Coulomb 파괴함수를 적용한 안전율 공식보다 안전율을 높게 평가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 중간주응력의 영향에 의한 강도증가가 MC-WW 파괴함수를 이용한 안전율 공식에 반영되기 때문이다. 반면에 Mohr-Coulomb 파괴조건식에 기초한 안전율 공식은 중간주응력의 영향을 무시하므로 이를 적용할 경우 구조물의 안전율을 과소평가하게 되고 이에 따라 과도한 보강설계가 이루어질 가능성이 크다. 결론적으로 이 연구에서 제안한 MC-WW 파괴함수를 적용한 안전율 공식을 콘크리트 플러그 설계에 활용할 경우 보다 정밀한 안전도 평가가 가능하므로 플러그 형상 및 보강설계를 보다 정확하게 수행할 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지하 압반내 복공식 에너지저장시스템 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김택곤, 김지연, 이진무, 2008, 압축공기에너지 저장(CAES)의 현황과 전망, 2008 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 123-131.
2. 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경, 2009a, 복공식 압축공기 지하저장을 위한 가변성 분할 라이닝 터널기술, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 19, pp. 77-85.
3. 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경, 2009b, 일본의 압축공기 지하압반저장 기술, 2009 한국암반공학회학술발표회 논문집, pp. 9-19.
4. 이연규, 송원경, 박철환, 최병희, 2010, 압축공기 저장용 파이롯 터널에 설치된 콘크리트 플러그의 안정성 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 20, pp. 446-454.
5. 이연규, 2011, Mohr-Coulomb 파괴곡면에 근사하는 압축의 3차원 파괴조건식 고찰, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 21, pp. 93-102.
6. 한국지질자원연구원(KIGAM), 2010, 압축공기에너지 지하저장 pilot plant 구축 상세 설계 용역 설계보고서.
7. Al-Ajmi, A. M. and Zimmerman, R. W., 2005, Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria, Int J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 42, pp. 431-439.
8. Chang, C. and Haimson, B. C., 2000a, A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite, Int J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 37, pp. 285-296.
9. Chang, C. and Haimson, B. C., 2000b, True triaxial strength and deformability of the German Continental deep drilling program (KTB) deep hole amphibolite, J. Geophys. Res., Vol. 105, pp. 18999-19013.
10. Colmenares, L. B. and Zoback, M. D., 2002, A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks, Int J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 39, pp. 695-729.
11. Drucker, D. and Prager, W., 1952, Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Q. Appl. Math., Vol. 10, pp. 157-165.
12. Drucker, D., 1959, A definition of stable inelastic material, J. Appl. Mech., Vol. 26, pp. 101-106.
13. Ewy, R., 1999, Wellbore-stability predictions by use of a modified Lade criterion. SPE Drill Completion, Vol. 14(2), pp. 85-91.
14. Launay, P. and Gachon H., 1972, Strain and ultimate strength of concrete under triaxial stress, Paper 13, ACI Special Publication 34, American Concrete Institute.
15. Mogi K., 1967, Effect of the intermediate principal stress on rock failure, J. Geophys. Res., Vol. 72, pp. 5117-5131.
16. Mogi, K., 1971, Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. J. Geophys. Res., Vol. 76, pp. 1255-1269.
17. Mogi, K., 2007, Experimental rock mechanics, Taylor & Francis.
18. Nayak, G. C. and Zienkiewicz, O. C., 1972, Convenient forms of stress invariants for plasticity. J. Struct. Div. ASCE, Vol. 98, pp. 949-953.
19. Solidworks Corp., 2007, Solidworks 2007.
20. Takahashi, M. and Koide, H., 1989, Effect of the intermediate

principal stress on strength and deformation behavior of sedimentary rocks at the depth shallower than 2000m, Rock at great depth (V. Maury & D. Fourmaintraux Ed.), Vol 1, 19-26.

21. Willam, K. J. and Warnke, E. P., 1974, Constitutive model for triaxial behavior of concrete, Colloquium on

Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, ISMES Bergamo, IABSE Report, 19.

22. Zhou, S., 1994, A program to model the initial shape and extent of borehole breakout. Comput. Geosci., Vol. 20, pp. 1143-1160.

이 연 구



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-469-1864
 E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr
 현재 군산대학교 해양과학대학 해양건설공학과 교수

송 원 경



1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1966년 프랑스 에콜데민 지질공학과 공학박사

Tel: 042-868-3247
 E-mail: songwk@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

박 철 환



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3244
 E-mail: cwpark@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

최 병 희



1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2002년 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2005년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사

Tel: 042-868-3237
 E-mail: bhchoi@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원