

중간주응력을 고려한 선형 및 비선형 암석파괴조건식의 비교 고찰 이연규^{1)*}

Comparative Study on the Rock Failure Criteria Taking Account of the Intermediate Principal Stress

Youn-Kyou Lee

Abstract Although the Mohr-Coulomb and Hoek-Brown failure criteria have been adopted widely in rock mechanics, they neglect the σ_2 effect. The result of true triaxial tests on rock samples, however, reveals that the σ_2 effect on strength of rocks is considerable, so that rock failure criteria taking into account the influence of σ_2 are necessary for the precise stability evaluation of rock structures. In this study, a new nonlinear 3-D failure criterion has been suggested by combining the Hoek-Brown criterion with the smooth octahedral shape function taken from Jiang & Pietruszczak (1988). The performance of the new criterion was assessed by comparing the strength predictions from both the suggested criterion and the corresponding linear 3-D criterion. The resulting fit of the new criterion to the true triaxial test data for six rock types taken from the literature shows that the criterion fits the experimental data very well. Furthermore, for the data sets having data taken in the low σ_3 range, the nonlinear failure criterion works better than the linear criterion.

Key words Intermediate principal stress, Rock failure criterion, Hoek-Brown, Mohr-Coulomb, True triaxial test

초 록 암석의 파괴조건식으로 널리 이용되고 있는 Mohr-Coulomb식과 Hoek-Brown식은 중간주응력을 고려하지 못한다. 그러나 암석의 진삼축압축시험 결과에 의하면 암석의 강도는 중간주응력의 크기에 상당한 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. 따라서 암반구조물의 정밀한 안정성 평가를 위해서는 중간주응력의 영향을 고려할 수 있는 파괴조건식이 필요하다. 이 연구에서는 Jiang & Pietruszczak(1988)이 제안한 팔면체면 단면 형상함수를 이용하여 Hoek-Brown 파괴조건식에 근사하는 새로운 3차원 비선형 암석파괴조건식을 제안하였다. 대응되는 선형파괴조건식의 강도예측 결과와 비교검토를 통해 제안한 파괴조건식의 강도예측 성능을 평가하였다. 제안한 파괴조건식을 문헌에 보고된 6개 암종의 진삼축압축시험 결과에 적합시킨 결과 매우 우수한 적합성을 얻었다. 특히, 구속압이 낮은 영역의 진삼축압축강도를 포함한 자료에 대해서는 선형 파괴조건식에 비해 뛰어난 적합성을 보였다.

핵심어 중간주응력, 암석의 파괴조건식, Hoek-Brown, Mohr-Coulomb, 진삼축압축시험

1. 서 론

현재까지 가장 널리 이용되고 있는 암석파괴조건식은 Mohr-Coulomb(M-C)식과 Hoek-Brown(H-B)식(Hoek & Brown, 1980)이다. 정수압이 증가할 때 M-C식은 선형적 강도 증가를 예측하지만 H-B식은 비선형적 강도 증

가를 예측한다. 두 식은 모두 삼축압축조건($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)에서 파괴시 최대주응력(σ_1)과 최소주응력(σ_3)의 관계를 나타내고 있기 때문에 중간주응력의 크기가 파괴에 미치는 영향을 고려할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

Mogi(1967, 1971)의 선구적 연구 이후 지금까지 보고되고 있는 암석의 진삼축압축시험(true triaxial compression test) 결과(Hoskins, 1969, Takahashi & Koide, 1989, Chang & Haimson, 2000a,b)에 의하면 진삼축압축조건($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)의 암석의 강도는 삼축압축조건의 경우에 비하여 증가하는 것으로 나타나고 있다. 그러므로

¹⁾ 군산대학교 해양건설공학과 교수

* 교신저자 : kyoulee@kunsan.ac.kr

접수일 : 2012년 1월 18일

심사 완료일 : 2012년 2월 7일

게재 확정일 : 2012년 2월 14일

암석의 파괴거동을 정밀하게 예측하기 위해서는 중간 주응력(σ_2)을 고려한 해석이 수행될 필요성이 있다. 이에 따라 암반공학적 해석과정에서 σ_2 의 영향을 고려한 연구결과들이 최근 증가 추세를 보이고 있다(Tiwari & Rao, 2006, Yang et al., 2007, Issen & Challa, 2008).

중간주응력의 크기를 고려한 암석의 파괴거동 해석을 위해서는 σ_2 를 고려한 3차원 파괴조건식의 개발이 선행되어야 한다. Drucker-Prager 함수(Drucker & Prager, 1952)는 지반공학 분야에서 가장 오랜 역사를 갖고 있는 3차원 파괴조건식이지만 σ_2 의 증가에 따른 강도증가를 과도하게 예측하는 단점이 있다. 암석을 대상으로 한 대표적인 3차원 파괴조건식으로는 Mogi 함수(Mogi, 1971), 수정 Wiebols-Cook 함수(Zhou, 1994), 수정 Lade 함수(Ewy, 1999), Mogi-Coulomb 함수(AI-Ajmi & Zimmerman, 2005) 등이 있다. 이들 함수는 정수압의 증가에 따라 강도가 선형적으로 증가하는 선형 파괴조건식의 범주에 속한다. Benz & Schwab(2008)은 Matsuoka & Nakai(1982)의 파괴조건식과 H-B파괴조건식을 결합한 비선형 3차원 파괴함수 HBMN을 제안하였다. 한편 언급한 3차원 암석파괴조건식 중 수정 Lade 식과 HBMN 식을 제외한 나머지 조건식들은 파괴함수 곡면이 특이성(singularity)을 갖거나 불록성이 보장되지 않는 단점을 가지고 있다. Colmenares & Zoback(2002)은 지금까지 제안된 주요 3차원 파괴조건식의 강도예측 성능을 비교하였다.

국내에서는 이연규(2011)와 이연규 외(2011)가 파괴함수 곡면이 특이성을 갖지 않고 불록성이 보장되는 선형 3차원 파괴조건식들을 제안하였다. 이연규(2011)의 연구에서는 Jiang & Pietruszczak(1988)의 파괴곡면 단면함수를 M-C 파괴조건식과 결합시켰으며, 이연규 외

(2011)의 연구에서는 Willam & Warnke(1974)가 제안한 3차원 콘크리트 파괴조건식의 단면함수를 M-C함수와 결합시킨 파괴조건식 MC-WW가 제안되었다.

구속압의 증가에 따른 암석의 삼축압축강도 증가는 일반적으로 비선형적 특징을 보인다(Hoek & Brown, 1980). 선형 파괴조건식들은 이러한 강도 비선형성을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이 연구에서는 선형 파괴조건식들이 갖는 이러한 단점을 극복하기 위하여 H-B 조건식과 Jiang & Pietruszczak(1988)의 파괴함수 단면함수를 결합시킨 새로운 비선형 3차원 파괴조건식 HB-JP를 제안하였다. 또한 지금까지 여러 문헌에 보고되고 있는 암석의 진삼축압축시험 자료를 활용하여 HB-JP 파괴조건식과 이연규(2011)의 연구에서 제안된 선형 파괴조건식(이 후 MC-JP로 지칭)의 삼축압축강도 예측 성능을 정량적으로 비교 검토하였다.

2. M-C 함수와 H-B 함수의 기하학적 표현

물체 내 임의 지점의 응력상태는 Fig. 1과 같이 주응력 직교좌표계에서 한 점 $q(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 로 표시할 수 있다. 점 q는 다시 Nayak & Zienkiewicz(1972)의 응력불변량 ξ, ρ, θ 를 이용하여 표시할 수 있다. 여기서 ξ 는 팔면체면(octahedral plane)까지의 거리이며 ρ 는 공간 대각선(space diagonal)에서 점 q까지의 거리이고 θ 는 σ_1 축의 팔면체면에 대한 투영인 σ_1^* 축을 기준으로 측정된 Lode각이다. ξ 와 ρ 는 응력텐서 σ_{ij} 와 편차응력텐서 s_{ij} 로부터 각각 $\xi = \sigma_{ii}/\sqrt{3}$, $\rho = \sqrt{s_{ij}s_{ij}}$ 와 같이 계산할 수 있고 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 인 경우 θ 는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

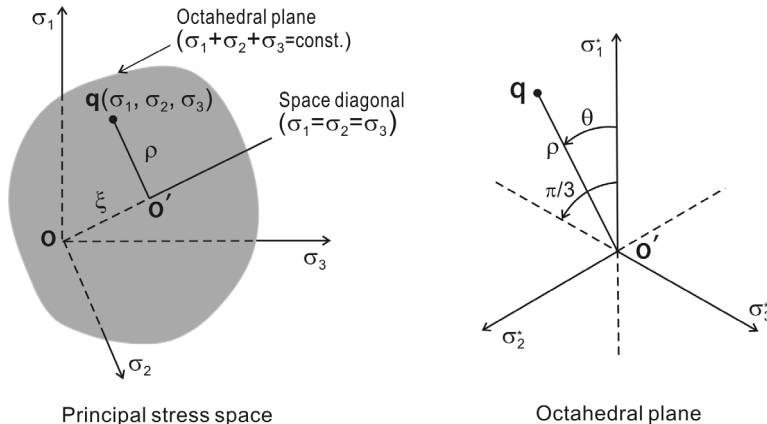


Fig. 1. Definition of Nayak & Zienkiewicz's stress invariants, ξ, ρ, θ .

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{3}(\sigma_2 - \sigma_3)}{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3} \right\} \quad (1)$$

이연규(2011)에 의하면 응력불변량 ξ , ρ , θ 를 이용하여 M-C 파괴조건식은 구간 $0 \leq \theta \leq \pi/3$ 에서 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

$$g_{MC}(\theta) = \frac{3 - \sin\phi}{3 \cos\theta + \sqrt{3} \sin\theta - \cos\theta \sin\phi + \sqrt{3} \sin\theta \sin\phi} \quad (2b)$$

여기서 ϕ 는 암석의 마찰각, σ_c 는 암석의 일축압축강도이다. 함수 $g_{MC}(\theta)$ 는 M-C 함수의 팔면체면 단면형상을 정의하는 함수이다.

한편 H-B 파괴조건식은 구간 $0 \leq \theta \leq \pi/3$ 에서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\rho = \frac{m\sigma_c \cos(\theta + 2\pi/3) + \sqrt{m^2 \sigma_c^2 \cos^2(\theta + 2\pi/3) + 4(\sqrt{3} m \sigma_c \xi + 3s \sigma_c^2) \sin^2(\theta + \pi/3)}}{2\sqrt{6} \sin^2(\theta + \pi/3)} \quad (3)$$

여기서 m 과 s 는 H-B함수의 강도정수이다.

세 주응력 σ_1 , σ_2 , σ_3 의 순열이 6가지이므로 대칭성을 고려하면 M-C와 H-B 파괴조건식의 팔면체면 단면(octahedral section) 형상은 모두 Fig. 2와 같이 육각형이 됨을 보일 수 있다. 반면에 파괴함수의 종단면을 의미하는 자오단면(meridian section) 형상은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 M-C 함수의 경우 선형이지만 H-B 함수의 경우 비선형으로 나타난다. 그림에서 ρ_c 와 ρ_t 는 각각 삼축압축 조건($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, $\theta = 0$)과 삼축신장조건($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, $\theta = \pi/3$)에서 ρ 값이며 그 비 $k = \rho_c/\rho_t$ 는 각각 다음과 같다.

$$k_{MC} = \frac{3 - \sin\phi}{3 + \sin\phi} \quad (4)$$

$$k_{HB} = \frac{2(-m\sigma_c + \sqrt{m^2 \sigma_c^2 + 3\sqrt{3} m \sigma_c \xi + 9s \sigma_c^2})}{-m\sigma_c + \sqrt{m^2 \sigma_c^2 + 12\sqrt{3} m \sigma_c \xi + 36s \sigma_c^2}} \quad (5)$$

이 때 물리적으로 허용 가능한 k 의 범위는 $0.5 \leq k \leq 1.0$ 이다. $k = 1.0$ 일 때 M-C 및 H-B 함수의 팔면체단면 형상은 정육각형이 되며 $k = 0.5$ 일 경우 정삼각형이 된다. M-C 함수의 경우 k 값이 상수이므로 파괴함수의 팔면체면 단면형상은 정수압의 크기($\xi/\sqrt{3}$)에 무관하게 일

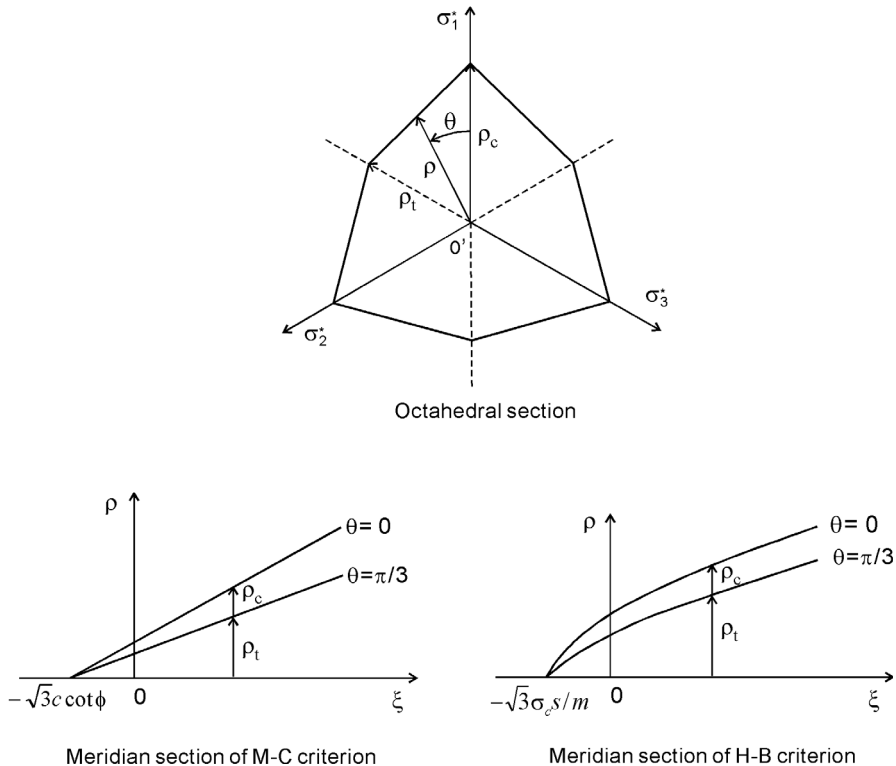


Fig. 2. M-C and H-B failure criteria in the octahedral and meridian sections

정한 형상임을 알 수 있다. 반면에 H-B 함수의 경우 ξ 의 증가에 따라 k 값이 증가한다. 즉 정수압의 크기가 작으면 삼각형에 가까운 단면 형상을 보이며 정수압의 크기가 커지면 정육각형에 가까운 단면 형상을 나타낸다.

3. 중간주응력을 고려하는 3차원 파괴함수

3.1 MC-JP 파괴조건식

M-C 함수의 모서리에 접하는 새로운 형상함수로 식 (2)의 $g_{MC}(\theta)$ 를 대치하면 M-C 함수에 근사하는 3차원 파괴함수를 얻을 수 있다. 이연규(2011)는 Jiang & Pietruszczak (1988)이 제안한 다음의 단면형상 함수 $g_{MC-JP}(\theta)$ 를 이용하여 새로운 3차원 선형 파괴함수 MC-JP를 개발하였다.

$$g_{MC-JP}(\theta) = \frac{k_{MC}(\sqrt{1+h} - \sqrt{1-h})}{k_{MC}\sqrt{1+h} - \sqrt{1-h} + (1-k_{MC})\sqrt{1-h}\cos3\theta} \quad (6)$$

식 (6)은 $g_{MC-JP}(0) = 1$, $g_{MC-JP}(\pi/3) = k_{MC}$ 을 만족한다. h 는 파괴함수 곡면의 특이성 해소를 목적으로 도입된 상수로서 $h \approx 1.0 \wedge h < 1$ 인 경우 특이점이 해소되고 볼록성이 보장되는 파괴조건식을 얻을 수 있다. 이 연구에서는 $h = 0.999$ 을 가정하였다. 이 경우 식 (6)은 $0 \leq \phi \leq 57.8^\circ$ 범위에서 볼록성이 보장된다. MC-JP 함수는 M-C 함수의 모서리에서 접하면서 부드럽게 감싸는 형태가 된다. $\theta = 0, \pi/3$ 일 때 MC-JP함수는 M-C 함수와 정확히 일치한다. 또한 $k_{MC} = 1$ 이면 Drucker-Prager 파괴조건식과 일치한다. Fig. 3은 $\phi = 45^\circ$, $\sigma_c = 100$ MPa를 가정하였을 때 MC-JP 함수를 M-C함수와 비교하여 도시한 것이다.

3.2 HB-JP 파괴조건식

이 연구에서는 H-B 파괴조건식인 식 (3)과 Jiang & Pietruszczak의 단면형상 함수 식 (6)을 결합하여 중간주응력을 고려할 수 있는 새로운 3차원 비선형 파괴조건식 HB-JP를 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{\rho}{g_{HB-JP}(\theta)} = \frac{-m\sigma_c + \sqrt{m^2\sigma_c^2 + 12\sqrt{3}m\sigma_c\xi + 36s\sigma_c^2}}{3\sqrt{6}} \quad (7a)$$

$$g_{HB-JP}(\theta) = \frac{k_{HB}(\sqrt{1+h} - \sqrt{1-h})}{k_{HB}\sqrt{1+h} - \sqrt{1-h} + (1-k_{HB})\sqrt{1-h}\cos3\theta} \quad (7b)$$

식 (7)은 H-B 파괴조건식의 모서리를 부드럽게 접하면서 H-B 파괴곡면을 감싸는 형태이다. 그러므로 $\theta = 0, \pi/3$ 일 때 HB-JP함수는 H-B 함수와 정확히 일치한다. 식 (7a)의 우변은 $\theta = 0$ 일 때 식 (3)의 ρ 값 즉, $\rho = \rho_{\theta=0}$ 을 나타낸다. $g_{HB-JP}(\theta)$ 는 파괴조건식의 팔면체면에 나타나는 단면 형상을 정의하는 함수이다. MC-JP 파괴조건식의 경우와 달리 k_{HB} 가 ξ 의 함수이므로 단면형상은 정수압 크기에 따라 변한다. 즉, 정수압의 크기가 매우 커지면 단면형상은 원형에 가까워지지만 정수압의 크기가 매우 작아지면 정삼각형에 근접하는 단면형상을 나타낸다. Fig. 4는 $m = 12$, $s = 1$, $\sigma_c = 100$ MPa를 가정하였을 때 HB-JP 파괴함수를 주응력 좌표계와 팔면체면에 도시한 것으로 이 파괴조건식의 비선형적 특징을 잘 보여준다. $\xi = 50$ MPa인 경우에 비하여 $\xi = 200$ MPa일 때 팔면체 단면형상은 원형에 더 가까워지고 있음을 볼 수 있다. 이는 MC-JP 파괴조건식의 경우 팔면체 단면형상이 ξ 의 크기에 관계없이 일정하다는 사실과 잘 대비된다.

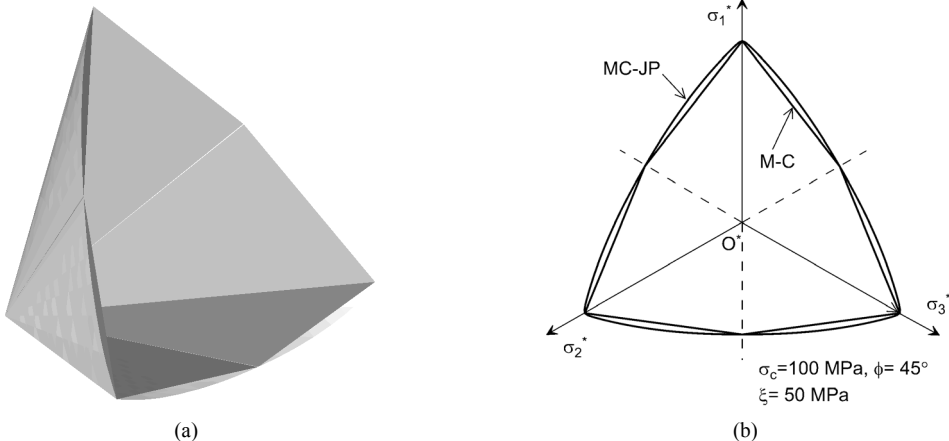


Fig. 3. MC-JP criterion (a) in the principal stress space and (b) on the octahedral plane.

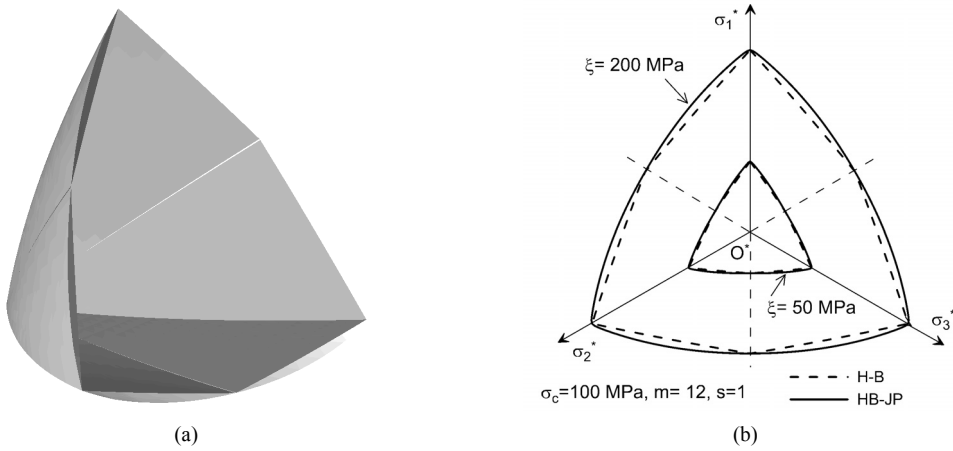


Fig. 4. HB-JP criterion (a) in the principal stress space and (b) on the octahedral plane.

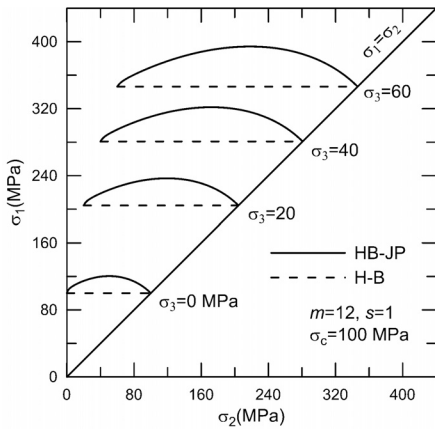


Fig. 5. Influence of σ_2 on the triaxial strength σ_1 in the HB-JP criterion

제한한 파괴조건식 HB-JP에서 중간주응력 σ_2 가 삼축 압축강도 σ_1 에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 4의 경우와 동일한 강도정수를 가정하고 σ_3 가 각각 0, 20, 40, 60 MPa일 때 σ_2 의 변화에 따른 σ_1 의 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 비교를 목적으로 H-B 함수로 예측한 강도도 함께 나타내었다. 그림은 H-B 파괴조건식과 달리 HB-JP 함수가 중간주응력이 강도에 미치는 영향을 반영하고 있음을 분명히 보여준다. 4가지 경우 모두 정점까지 강도가 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보여준다. HB-JP 파괴조건식이 예측하는 최대 σ_1 값은 H-B 함수에 비해 네 경우에서 각각 20.4%, 15.9%, 14.6%, 13.8% 높게 나타났다. 이는 동일한 강도정수를 가정하였을 때 구속압이 증가함에 따라 중간주응력이 H-B 강도에 대

한 HB-JP 강도의 비에 미치는 영향이 약간씩 감소됨을 말해준다. 한편 최대 σ_1 값은 σ_2 변화범위의 중앙을 기준으로 약간 우측에서 형성되고 있음을 볼 수 있다.

4. 진삼축압축시험 자료를 이용한 MC-JP 및 HB-JP 파괴조건식의 성능 비교

4.1 진삼축압축시험 자료

중간주응력을 고려한 선형파괴조건식 MC-JP와 이 연구에서 개발된 비선형 파괴조건식 HB-JP의 신뢰도를 비교 검토하기 위하여 6개 암종에 대한 진삼축압축시험 결과를 두 파괴조건식으로 예측한 결과와 비교하였다. 이 연구에서 선택한 6개 암종 중 Yuubari 세일과 Shirahama 사암에 대한 자료는 Takahashi & Koide(1989)와 Al-Ajmi & Zimmerman(2005)의 연구에서 인용하였고, Westerly 화강암에 대한 자료는 Chang & Haimson(2000a)의 논문에서 인용한 것이다. Dunham 백운암, Mizuho 조면암, Manazuru 안산암에 대한 자료는 Mogi(2007)의 연구를 참조하였다. 원 자료에는 파괴 시 세 주응력 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 이 제시되어 있으나 이 연구에서 제한한 파괴조건식이 Nayak & Zienkiewicz의 응력불변량으로 표시됨을 고려하여 세 주응력으로부터 ξ, ρ, θ 을 계산하였다. 일례로 Table 1은 Yuubari 세일에 대한 환산결과를 보여준다.

4.2 파괴조건식의 신뢰성 판단기준

제한한 파괴조건식의 신뢰도는 실험자료에 대한 적합도를 이용하여 평가할 수 있다. 이 연구에서는 적합도 평가 지표로서 ρ 값에 대한 잔차표준편차(Residual Standard

Table 1. True triaxial test data for Yuubari shale tested by Takahashi & Koide (1989)

σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	ξ (MPa)	θ (MPa)	ρ (MPa)
161	25	25	121.82	0.00	111.04
168	25	25	125.86	0.00	116.76
182	35	25	139.72	0.06	124.31
187	36	25	143.18	0.06	128.02
175	45	25	141.45	0.12	115.18
175	56	25	147.80	0.20	111.99
186	66	25	159.93	0.25	118.32
200	77	25	174.36	0.29	127.09
194	79	25	172.05	0.32	122.07
196	85	25	176.67	0.35	122.69
201	96	25	185.91	0.41	125.22
194	100	25	184.17	0.46	119.75
186	114	25	187.64	0.58	114.06
197	124	25	199.76	0.61	122.08
183	133	25	196.88	0.73	114.20
228	50	50	189.37	0.00	145.34
239	50	50	195.72	0.00	154.32
245	50	50	199.19	0.00	159.22
257	69	50	217.08	0.08	161.82
261	90	50	231.52	0.18	158.50
266	100	50	240.18	0.22	159.91
260	110	50	242.49	0.28	152.97
260	122	50	249.42	0.34	150.92
285	129	50	267.89	0.34	169.12
266	148	50	267.89	0.47	152.95
256	159	50	268.47	0.56	145.75

Deviation, RSD) 지수를 도입하였다. RSD는 다음과 같이 정의된다.

$$RSD = \sqrt{\frac{1}{dof} \sum_{i=1}^n (\rho_i - \rho_i^*)^2} \quad (8)$$

여기서 n은 진삼축압축 실험자료의 수, ρ_i 는 실험값, ρ_i^* 는 최적식으로 계산한 ρ 값이다. dof는 회귀분석의 자유도로서 자료수와 미지 강도정수 수를 뺀 값이다(Davis, 2002). 그러므로 RSD를 계산하기 위해서는 실험자료의 회귀분석을 통해 최적 강도정수의 탐색이 선행되어야 한다. MC-JP 식의 경우 ϕ 와 σ_c 가 대상 강도정수이고, HB-JP의 경우 무결암($s=1$)을 가정하면 m 과 σ_c 가 대상 강도정수가 된다. 이 연구에서 고려한 파괴조건식

MC-JP와 HB-JP에서 ρ 는 ξ 와 θ 에 대한 비선형 양함수이므로 최소자승법에 기초한 비선형 회귀분석을 통하여 최적의 강도정수를 결정하는 것이 가능하다. 식 (8)은 RSD 값이 0에 가까울수록 파괴조건식의 실험자료에 대한 적합도가 뛰어난을 말해준다.

4.3 파괴조건식의 삼축압축강도 예측성능 비교

6개 암종에 대한 비선형 회귀분석 결과를 Table 2에 제시하였다. 표는 각 파괴조건식에 대한 최적 강도정수 값과 RSD 값을 보여준다. 여기서 암종에 따라 강도의 차이가 존재하므로 암종 간에 RSD 값을 직접 비교하는 것은 의미가 없을 수 있음을 주의할 필요가 있다. 3차원 파괴조건식의 회귀분석 결과와 비교를 목적으로 2차원 파괴조건식 즉, 중간주응력을 고려하지 못하는 M-C식

Table 2. Results of the nonlinear regressions for MC-JP and HB-JP criteria.

Rock type	Best fitting strength parameters		RSD (MPa) for MC-JP	RSD (MPa) for HB-JP
	MC-JP $\phi(^{\circ}), \sigma_c(\text{MPa})$	HB-JP $m, \sigma_c(\text{MPa})$		
Yuubari shale	28.58, 97 (30.67, 104) ^a	8.78, 71 (10.52, 72) ^b	3.20 (5.86) ^a	3.25 (5.87) ^b
Shirahama sandstone	36.86, 78 (39.43, 85) ^a	16.27, 55 (19.10, 58) ^b	3.24 (4.44) ^a	2.38 (4.14) ^b
Dunham dolomite	32.00, 381 (36.55, 387) ^a	7.88, 340 (11.58, 321) ^b	12.22 (22.10) ^a	12.82 (22.05) ^b
Westerly granite	50.27, 295 (52.00, 328) ^a	39.80, 210 (36.77, 260) ^b	11.33 (14.51) ^a	6.85 (12.09) ^b
Mizuho trachyte	25.79, 196 (30.36, 188) ^a	5.92, 163 (11.11, 124) ^b	5.24 (11.33) ^a	5.42 (11.30) ^b
Manazuru andesite	44.80, 297 (49.40, 284) ^a	24.10, 216 (46.49, 150) ^b	9.23 (15.46) ^a	8.27 (14.68) ^b

^aResults for M-C criterion, ^bResults for H-B criterion

및 H-B식을 이용한 회귀분석 결과도 괄호 안에 함께 제시하였다. 6개 암종 모두 중간주응력을 고려하는 3차원 파괴조건식이 M-C 및 H-B 파괴조건식에 비해 적합도가 뛰어남을 잘 보여준다. 특히 HB-JP식의 경우 H-B식에 비해 42%~52% 정도 RSD 값이 감소하고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 암반구조물의 정밀한 안전성 평가를 위해 3차원 파괴조건식의 도입이 필요함을 잘 말해준다.

Yuubari 셰일, Dunham 백운암, Mizuho 조면암의 경우 MC-JP 파괴조건식의 RSD가 각각 3.20 MPa, 12.22 MPa, 5.24 MPa으로 HB-JP 파괴조건식의 경우에 비해 적합도가 약간 우수한 것으로 나타났으나 그 차이는 크지 않다. 반면에 Shirahama 사암, Westerly 화강암, Manazuru 안산암의 경우 HB-JP 파괴조건식의 RSD가 2.38 MPa, 6.85 MPa, 8.27 MPa으로 MC-JP에 비하여 상대적으로 적합성이 우수한 것으로 나타났다. 특히 Westerly 화강암의 경우 MC-JP 파괴조건식의 RSD가 HB-JP 파괴조건식의 약 1.7배이므로 HB-JP식의 적합도가 MC-JP식에 비해 매우 뛰어난 것으로 나타났다. 결론적으로 이러한 회귀분석 결과는 HB-JP 파괴조건식의 적합도가 전반적으로 MC-JP 파괴조건식에 비해 다소 우수하다는 것을 말해준다.

6개 암종의 진삼축압축시험 결과에 대한 HB-JP 및 MC-JP 파괴조건식의 최적 적합곡선을 Fig. 6과 같이 $\sigma_2 - \sigma_1$ 평면에 도시하였다. Yuubari 셰일과 Shirahama 사암의 경우는 비교를 위해 H-B 파괴조건식의 최적 적합곡선을 함께 나타내었다. 실제 실험자료는 암석의 강

도가 중간주응력의 크기에 영향을 받고 있음을 잘 보여주고 있으며 HB-JP 및 MC-JP 파괴조건식은 이러한 경향성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 반면에 Yuubari 셰일과 Shirahama 사암의 경우에서 분명히 볼 수 있듯이 중간주응력의 크기를 고려하지 않는 H-B 파괴조건식의 적합곡선은 실험결과와 일치성이 매우 떨어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 Yuubari 셰일의 경우 $\sigma_3 = 25$ MPa일 때 H-B식에 대한 최적 강도는 약 180 MPa이지만 HB-JP식의 최적 강도 범위는 169 MPa~193 MPa으로 최대값은 최소값보다 약 14.3% 크다. 또한 $\sigma_3 = 50$ MPa일 때 H-B식에 대한 최적 강도는 258 MPa이지만 HB-JP식의 최적 강도는 240 MPa~272 MPa의 범위에 있으므로 최대값이 최소값에 비해 약 13.0% 크다. 따라서 3.2절에서 논의한 바와 같이 중간주응력을 고려한 파괴조건식이 예측하는 (최대강도/최소강도)비는 σ_3 의 증가에 따라 조금씩 감소하는 경향을 있다는 것을 알 수 있다. 또한 삼축압축조건($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)과 삼축신장조건($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)에 근접하는 영역에서는 H-B식이 암석의 강도를 과대평가할 가능성이 있음을 보여준다.

회귀분석 결과의 논의에서 살펴보았듯이 Yuubari 셰일, Dunham 백운암, Mizuho 조면암의 경우 두 파괴조건식의 적합도 차이가 크지 않음을 Fig. 6은 분명히 보여준다. 반면에 Shirahama 사암, Westerly 화강암, Manazuru 안산암의 경우는 두 파괴조건식의 적합도에 비교적 큰 차이가 있음을 잘 보여준다.

최소주응력 σ_3 의 크기에 따른 적합도 분석에 따르면

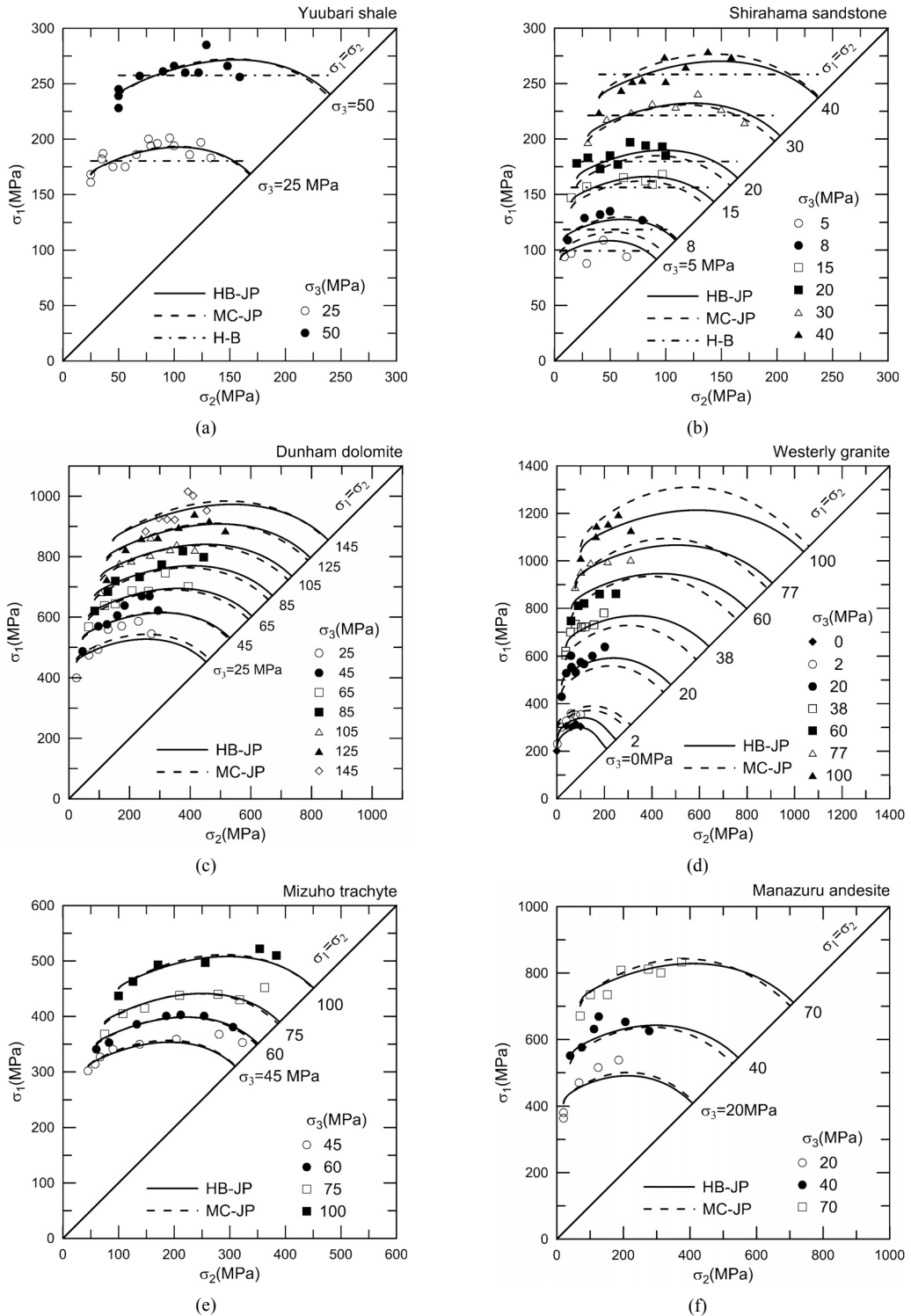


Fig. 6. Best fitting curves for true triaxial test data: (a) Yuubari shale, (b) Shirahama sandstone, (c) Dunham dolomite, (d) Westerly granite, (e) Mizuho trachyte, (f) Manazuru andesite

Shirahama 사암과 Westerly 화강암의 경우에서 볼 수 있듯이 σ_3 의 값이 매우 작은 진삼축압축시험 결과를 포함하는 자료에 대한 적합도는 HB-JP식이 MC-JP식에 비해 우수한 것으로 나타났다. 이는 암석강도의 비선형성이 구속압이 낮은 범위에서 일반적으로 크게 나타나기 때문이며 비선형 파괴조건식인 HB-JP가 이러한 강도비선형을 반영할 수 있기 때문이다.

5. 결론

암석의 진삼축압축시험 결과에 의하면 암석의 강도는 중간주응력의 크기에 상당한 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 그러나 현재 암석의 파괴조건식으로 널리 이용되고 있는 M-C식과 H-B식은 중간주응력의 크기를 고려할 수 없으므로 암반구조물의 정밀한 안정성 분석에 적합하지 않다. 이에 따라 최근 중간주응력을 고려할 수 있는 다양한 3차원 파괴조건식들이 국내외에서 제안되고 있다. 이 연구에서는 H-B 파괴조건식과 Jiang & Pietruszczak(1988)의 팔면체면 단면함수를 결합하여 중간주응력을 고려할 수 있는 새로운 비선형 암석파괴조건식 HB-JP를 제안하였다. 제안한 함수의 강도에 예측 성능을 이연규(2011)가 제안한 선형 3차원 파괴함수 MC-JP의 경우와 비교 검토하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. HB-JP 파괴조건식은 주응력 좌표계에서 H-B 파괴조건식의 모서리에 부드럽게 접하는 곡면이므로 H-B 파괴조건식의 비선형성을 그대로 유지하는 동시에 중간주응력의 크기를 고려할 수 있는 파괴조건식이다. 따라서 삼축압축조건($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)과 삼축신장조건($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)의 강도는 H-B 파괴조건식의 강도와 정확히 일치하게 된다.
2. 6개 암종에 대한 진삼축압축시험 결과를 MC-JP와 HB-JP 파괴함수로 적합시킨 결과 두 함수의 적합도는 2차원 파괴함수인 M-C 및 H-B 함수의 적합도에 비해 매우 우수한 것으로 나타났다. 따라서 암반구조물의 정밀한 안정성 평가를 위해서는 중간주응력을 고려하는 파괴조건식의 도입이 필요할 것으로 판단되었다. MC-JP와 HB-JP 파괴조건식의 강도예측 성능 비교에서는 전반적으로 HB-JP 파괴함수의 적합도가 우수한 것으로 나타났다.
3. σ_3 값의 크기에 따른 적합도 분석결과 σ_3 값이 매우 작은 범위에서 실시한 진삼축압축시험 결과들을 포함하는 자료에 대한 HB-JP식의 적합도는 MC-JP식에 비해 매우 우수한 것으로 나타났다. 이는 구속압

- 이 낮은 범위에서 일반적으로 크게 나타나는 암석강도의 비선형성이 HB-JP식에서 고려될 수 있기 때문이다. 반면에 σ_3 의 값이 비교적 큰 진삼축압축시험 자료에 대한 HB-JP식과 MC-JP식의 적합도는 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 상대적으로 수식이 간편한 MC-JP 파괴조건식은 대심도 암반구조물의 안정성 해석에 이용될 수 있고, 강도 비선형을 고려할 수 있는 HB-JP 파괴조건식은 천심도 암반구조물의 정밀한 안정성 해석에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.
4. 추후 다양한 암종에 대한 더 많은 진삼축압축시험 자료가 축적된다면 후속연구를 통하여 HB-JP식과 MC-JP식의 암종별 적합성과 σ_3 의 변화에 따른 적합성을 더욱 체계적으로 분석될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0014012)

참고문헌

1. 이연규, 2011, Mohr-Coulomb 파괴곡면에 근사하는 암석의 3차원 파괴조건식 고찰, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 21, pp. 93-102.
2. 이연규, 송원경, 박철환, 최병희, 2011, 3차원 파괴조건식을 이용한 콘크리트 플러그의 안전도 평가, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 21, pp. 526-535.
3. 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.
4. Benz, T., Schwab, R., Kauther, R. A. and Vermeer, P. A., 2008, A Hoek-Brown criterion with intrinsic material strength factorization, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 45, pp. 210-222.
5. 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.
6. Chang, C. and Haimson, B. C., 2000b, True triaxial strength and deformability of the German Continental deep drilling program (KTDB) deep hole amphibolite, J. Geophys. Res., Vol. 105, pp. 18999-19013.
7. 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.
8. Davis J.C. Statistics and data analysis in geology. 3rd Ed.

- John Wiley & Sons; 2002.
9. Drucker, D. and Prager, W., 1952, Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Q. Appl. Math., Vol. 10, pp. 157-165.
 10. Ewy, R., 1999, Wellbore-stability predictions by use of a modified Lade criterion. SPE Drill Completion, Vol. 14(2), pp. 85-91.
 11. Hoek, E. and Brown E. T., 1980, Underground excavations in rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
 12. Hoskins, E. R., 1969, The failure of thick-walled hollow cylinders of isotropic rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 6, pp. 99-125.
 13. Issen, K. A. and Challa, V., 2008, Influence of the intermediate principal stress on the strain localization mode in porous sandstone, J. Geophys. Res., Vol. 113, B02103, doi:10.1029/2005JB004008.
 14. Matsuoka, H. and Nakai, T., 1982, A new failure criterion for soils in three-dimensional stresses, IUTAM Conf. on Deform. and Failure of Granular Mater., Delft, pp. 253-263.
 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. Jiang, J. and Pietruszczak, S., 1988, Convexity of yield loci for pressure sensitive materials, Comput. Geotech., 5, 51-63
 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. Tiwari, R. P. and Rao, K. S., 2006, Post failure behaviour of a rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement, Engineering Geology, Vol. 84, pp. 112-129.
 22. 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.
 23. Yang, X.-L., Zou, J.-F. and Sui, Z.-R., 2007, Effect of Intermediate Principal Stress on Rock Cavity Stability, J. Cent. South Univ. Technol., Vol. 14(s1), pp. 165-169.
 24. Yu, M.-H., Zan, Y.-W., Zhao, J. and Yoshimine, M., 2002, A unified strength criterion for rock material, Int J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 39, pp. 975-989.
 25. Zhou, S., 1994, A program to model the initial shape and extent of borehole breakout. Comput. Geosci., Vol. 20, pp. 1143-1160.

이 연 규



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
