

## 암석의 파괴거동 모형화에 대한 고찰

김 문겸\*<sup>1</sup>, 장 정범\*<sup>2</sup>, 오 금호\*<sup>3</sup>, 이 필규\*<sup>4</sup>

\*1 : 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원

\*2 : 대우연구소 연구원, 정회원

\*3 : 연세대학교 토목공학과 박사과정, 정회원

\*4 : 연세대학교 토목공학과 석사과정

### 1. 서론

암반 구조체를 해석하기 위해서는 파괴전의 응력-변형률 거동 뿐만 아니라 파괴를 구성하는 삼차원 응력상태를 알아야 한다. 암반의 파괴를 지배하는 조건을 결정하기 위해서는 일반적인 삼차원 파괴기준이 필요하다.

암반의 파괴를 이루는 응력상태를 파악하기 위해 많은 실험적 연구가 수행되었으며 특히 장비의 사용에 있어서 하중 메카니즘과 시료의 경계조건의 개선에 많은 연구가 진행되었다. 암반의 파괴조건을 설명하는 데에는 이러한 기본적인 기준들 이외에도 경험적인 기준들이 사용되어 왔다. Hoek 와 Brown 은 비등방성 재료의 강도에 대해 연구 하였고 순수압(intact rock)의 강도에 대한 경험적인 기준을 제안하였다.

실험을 통한 주응력공간의 파괴면은 정팔면체면(octahedral plane)에서 삼각형 형태의 단순곡선 단면을 가지는 총알형태(pointed bullet shape)로 파악되어 왔다. 흙과 콘크리트와 같이 마찰재료(frictional material) 에서도 이와 비슷한 형태의 파괴면을 관찰할 수 있었다. 순수압에 있어서는 정팔면체면위의 삼각형이 원호의 꼭지점을 갖는 것 이외에도 삼차원 파괴면은 (1) 보통 마찰각으로 표현되는 파괴면의 개구각(opening angle) (2) 자오선 같은 응력공간대각선(hydrostatic axis)을 포함하는 파괴면의 곡률, 그리고 (3) 인장강도의 세가지의 독립적인 특성을 갖는다.

콘크리트와 모르타에 대해서도 일반적인 삼차원 파괴기준이 연구되었는데 이 파괴 기준은 응력불변량(stress invariants)의 향으로 표현되고, 위에서 언급된 세가지 특성 중 하나와 연관된 3 개의 재료변수(material parameter)를 포함한다. 이 변수들은 일축압축시험 또는 삼축압축시험등 간단한 형태의 인장시험을 통하여 구할 수 있다. 콘크리트와 모르타에 대한 실험적 연구를 통하여 구해지는 파괴면의 삼차원 형상은 비교적 정확하게 모형화된다.

암반뿐만아니라 흙, 콘크리트와 모르타는 모두 응력-변형률 특성과 강도 특성이 비슷한 마찰재료이다. 본 연구에서는 암반의 삼차원 파괴조건에 대한 재료 변수의 결정에 대해 다루며, 최종적으로 실험자료와의 비교를 통해 적용 파괴기준의 타당성을 검토한다.

## 2. 본 론

### 2.1 파괴기준(failure criterion) 과 그 특징

암반에서의 파괴에 대한 기준(failure criteria)은 흙의 삼차원 파괴 기준의 개념을 확장한 것이다. 흙에 대한 기준을 응력 텐서의 1차, 3차 응력불변량(stress invariants) 을 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(I_1^3/I_3 - 27) \cdot (I_1/p_a)^m = \eta_1 \quad (1)$$

여기서

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2)$$

$$I_3 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 + \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \tau_{yx} \cdot \tau_{zy} \cdot \tau_{xz} - (\sigma_x \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} + \sigma_y \cdot \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} + \sigma_z \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yx}) \quad (3)$$

이며  $p_a$ 은 대기압력으로 응력과 같은 단위를 갖는다.  $I_1^3/I_3$ 의 값은 응력공간대각선(hydrostatic axis)  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  상태에서 27의 값을 갖는다. 식(1)에서의  $\eta_1$  과  $m$ 의 값은 log-log 곡선을 통해 파괴 상태에서의  $(I_1^3/I_3 - 27)$ 와  $(p_n/I_1) = 1$ 에 대한 곡선으로부터 구할 수 있다.  $\eta_1$ 은 이 곡선에서  $(p_n/I_1) = 1$ 의 값이고,  $m$ 의 값은 직선의 기울기이다.

암반을 흙이나 콘크리트와 같이 마찰이 작용하는 재료로 보면, 식 (1)과 유사하게 기준을 구할 수 있다. 콘크리트와 암반에 대한 점착력과 인장력을 고려하기 위해서는 그림 2와 같이 응력공간대각선에 따른 주응력의 해석이 수행되어야 한다. 그러므로 다음과 같이 수직응력에 일정한 응력  $a \cdot p_a$ 를 더한 후 이 값을 식 (1)에 대입한다.

$$\bar{\sigma}_x = \sigma_x + a \cdot p_a \quad 4(a)$$

$$\bar{\sigma}_y = \sigma_y + a \cdot p_a \quad 4(b)$$

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_z + a \cdot p_a \quad 4(c)$$

여기서  $a$ 는 무차원양이고,  $p_a$ 는 대기압력이며  $a \cdot p_a$ 는 인장강도의 영향을 나타낸다. 비록 이 3가지 성분은 서로 다른 성질을 가지나, 암반의 일축압축 강도와 같은 계산에 의해 서로 영향을 미치게 된다. 따라서,  $m, \eta_1$  그리고  $a$ 의 무한 조합은 동일한 일축압축강도의 값을 가지게 된다. 일축 압축응력이 작용하는 주응력이 0인 응력 상태에서는  $I_3 = 0$ , 즉  $I_1^3/I_3$ 이 무한한 값을 갖게된다. 그러나 식4(a)-4(c)에 나타낸 응력장의 해석은 점착성 재료에 대해 쉽게 적용할 수 있다.

### 2.2 암석의 인장강도

암석의 재료변수를 결정하는 데 있어서 일축인장강도를 반영하는 것이 편리하다. 이것은 원점에 가까운 영역에서 파괴기준을 정하는 데 도움이 되고, 인장응력의 범위에서 파괴조건을 보다 잘 설명할 수 있게 한다. 인장시험이 정규시험방법에 포함되지 않은 경우, 일축인장강도의 정확한 값은 식 (5)로부터 얻을 수 있다.

전술한 공은 흙과 콘크리트에서의 연구로부터 일축인장강도( $\sigma_t$ )는 일축압축강도와 관련이 있다는 것을 알 수 있다. 기존의 시험 자료를 자세히 관찰하여 보면, 모든 암석의  $\sigma_t$  와  $\sigma_c$  의 단순한 관계의 사용에는 제한이 따른다는 것을 알 수 있다. 그러나 암석을 세 종류, 즉 화성암(igneous), 변성암(metamorphic) 그리고 퇴적암(sedimentary)으로 분류하면  $\sigma_t$  와  $\sigma_c$  의 동일한 관계를 사용할 수 있다. 그러므로 일축인장강도는 다음의 식과 같이 일축압축강도의 함수로 나타낼 수 있다[11][12].

$$\sigma_t = T \cdot p_a \cdot \left( \frac{\sigma_c}{p_a} \right)^t \quad (5)$$

여기서  $T$  와  $t$  는 무차원 상수이고,  $p_a$  는  $\sigma_t$  와  $\sigma_c$  와 같은 단위를 갖는 공기압을 말한다.

$T$  와  $t$  는 전술한 암석의 종류에 따른 값이다. 그림 3 은 3종류 암석에 대한 실험치의 log-log 곡선이다.  $T$  값은  $(\sigma_c/p_a)=1$  을 따라 가장 근사한 직선을 이용하여 그림 3 에 따라 구하였으며  $t$  값은 그 직선의 기울기를 나타낸다. 여러 참고자료들로부터 얻어진 실험 자료들에는 분산이 있지만, 암석의 종류에 따른 식 (5) 에 따라 이상적으로 모형화 할 수 있다. 그림 3(c) 에 나타난 Hobbs[14] 의 식에 대한 인장강도는 같은 연구에 대한 다른 참고자료들로부터 얻어진 값보다 10 배정도 크게 나타난다. Hobbs 는 중앙의 작은 구멍을 가진 판의 diametric 압축을 포함한 탄성해석 자료로부터 인장강도를 구하였다. 그림 3 의 그외에서 모든  $\sigma_t$  의 값들은 일축인장실험(Brazilian 실험, 점하중실험, 원공실린더실험) 으로부터 구한 것이다. 여러 사람으로부터 제시되어진 이러한 실험들로부터 각각의 암석의 종류에서도 거동이 일치 함을 알 수 있다. 그러므로 이러한 실험의 결과를 나타내는 그림 6(c) 에서 아래쪽의 선은 퇴적암(sedimentary) 암석의 대표적인 인장강도값으로 선택할 수 있다. 표 1 는 세 종류의 암석들에 대한  $T$  와  $t$  의 값을 나타낸다. 실험치의 분산은 세 부류의 암석을 나타내고 있기때문에  $T$  와  $t$  값이 서로 독립적인 경우에는 이 값은 타당 하지 않다. 그러나 추정되어지는  $\sigma_t$  의 값이 타당해도, 재료변수의 결정이 있는 후에 제안 된 파괴 기준으로부터 얻어지는 인장강도의 비교 평가는 반드시 수행되어야 한다.

### 2.3 재료변수의 결정

파괴기준이 응력불변량의 함수로 표현되어지기 때문에 3 개의 재료변수의 결정에서는 응력을 측정하는 여러 실험들이 사용되어진다. 그러나 이를 결정하기 위해 일축압축실험·삼축압축실험과 같은 간단하면서도 가능한 실험방법들의 필요성과, 연구하는 특정한 암석의 파괴기준을 결정에 대한 이러한 실험들의 적절성을 판단해야 한다. 이것은 삼축압축실험을 통해 얻어진 유용한 여러가지 자료를 이용하여 판단할 수 있다. 암석의 강도는 하중비와 실험 당시의 온도에 의해 변화하지만 본연구에서 사용되는 여러 참고문헌의 실험치는 일치 되고 하중비와 주어진 실험온도에 따른 것으로 제시되어져 있다.

주어진 실험 자료에서 세 개의 재료변수들은 값을 결정하기 위해서  $a$  값은 추정된 수직 응력에  $a \cdot p_a$  를 더한 후 식(1)에 대입한다. 앞에서와 같은 방법으로  $\eta_1$  과  $m$  을 구하는 과정이 이어진다.  $a$  값을 쉽게 추정하기 위하여  $a \cdot p_a$  는 그림 2 에서 나타낸 바와 같이 암석의 일축인장강도보다는 약간 커야한다. 인장실험이 정규 실험과정에는 포함되지 않더라도  $\sigma_t$  의 값은 (5) 의 식으로부터 알 수 있다. 전반적으로 가장 알맞는 변수들을 얻기 위

해서는, 결정계수의  $r^2$ 값의 결정에 회기분석(regression analysis)이 수행되어야 한다. 그림 4 은 Mogi[7]의 연구 결과도 조면암 (trachyte) 에서  $r^2$ ,  $\eta_1$  과  $m$  의 값에 따른  $a$  값의 변화에 대한 효과를 나타내고 있다. 일축인장강도의 추정과 더불어 일축압축 및 삼축압축시험의 결과만이 3 개의 재료변수를 결정하는 데에 사용된다. 조면암(trachyte) 에서  $(\sigma_1/p_a)$ 의 값은 -67.65 이고, 이에 부합되는  $a=67,71$ 값에 의해서  $\eta_1=1.254 \cdot 10^7$ ,  $m=1.474$  를 얻을 수 있다.

#### 2.4 재료 변수치

삼축재하( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ )조건 하에서, 암석의 파괴에 대한 다양한 시험방법들의 연구가 수행되었는데 그방법은 다음과 같다.

- (a) 정육면체시편에 서로 직각인 3축방향으로의 하중을 재하하는 방법 [1,3,6-8]
- (b) 속이 빈 실린더형시편의 내부 및 외부에 압력을 가하고 축방향하중을 재하하는 방법 [4,5]
- (c) 속이 빈 실린더형 시편에 축방향력과 함께 비틀하중을 재하하는 방법 [2]

참고문헌에서 얻어진 36 개의 자료들을 본 연구에서 다루었다. 이 자료들은 전술한 바와 같이 삼축시험을 통해 얻은 결과와 일반적인 시험을 통한 결과를 포함하고 있다. 각각의 자료로 대하여 계산되어진 재료변수치들을 얻기 위해 수행되어진 시험방법은 표 2 과 같다. 재료변수를 구하기 위해서는 간단한 시험만이 행하여졌다. 따라서 일축압축시험 및 삼축압축시험이 가장 많이 사용되었다. 일축압축시험을 통하여 측정된 값은 가능한한 모두 변수를 결정하는데 사용되었다. 때때로 인장강도의 추정값이 포함되어 있지만, 그 값들을 제외하여도 만족스러운 결과가 나온 경우에는 그 값들을 제외시켰다. 그러나, 변수  $a$  의 값은 일축인장강도의 측정값과 추정값과의 비교에만 사용되었다. 이것은 인장응력의 범위안에서 파괴조건의 합리적인 모형이 정확한가를 파악위해 사용되었다. 표 2 에 표기되어진 변수  $a$  의 값들은 0.1 이내 까지의 회기분석(regression analysis)으로 결정되어졌다 (그림 4 에서는  $a=0.2$  이다). 일축인장강도를 통한 변수결정에 포함된 이 일련의 자료에 대하여  $a(>0)$  값은  $|\sigma_1/p_a|$  보다 0.1 에서 2.3% 정도 상회하였다. 변수결정에서 일축압축강도를 이용하지 않고도 좋은 자료가 얻어지는 경우에는  $a$ 와  $|\sigma_1/p_a|$  값의 차이는 그림 3 에서 도시되어진 범위내에서 존재하는 것으로 나타났다.

전형적으로  $a$  의 값은 20 ~ 300 의 범위내에 존재하나 6 과 487 의 극한값은 암석에 대한 연구를 통해 구하여졌다. 콘크리트와 모르타에 대한  $a$  값은 20 ~ 35의 상대적으로 적은 범위에서 변화하는 것으로 나타났다[10]. 따라서 변수  $a$  값을 통해 표현되어진 것과 같이 인장강도의 변화는 콘크리트와 모르타의 경우보다 암석의 경우에서 더 심하였다.

암석의 전형적인  $m$  값은 극한값인 0.30 과 2.72 도 있지만 일반적으로 0.7 ~ 1.7 까지 변화한다. 비교에서 콘크리트와 모르타의  $m$  값은 전형적으로 0.9 과 1.2 사이에서 변화 [10]하는 반면 흙의  $m$  값은 0.0 ~ 0.5의 범위내에 존재한다 [9]. 따라서 암석의 파괴포락선의 곡률은 콘크리트, 모르타 및 흙보다 더 클 수 있다.

표 3 에 나타낸  $\eta_1$  값은 큰 범위에서 변화하는데, 이것은 이 값이  $p_a/I_1=1$  에서 결정되기 때문이다. 즉 이 값은 대부분의 암석의 대한 시험에 대한  $p_a/I_1=1$  에 상응하는 값과 비교하여 이동된 좌표계의 원점에 매우 근접하는 값이다. 그림 4 는 log-log 좌표를 이용했기 때문에  $m$  값의 미소한 변화에 따라  $\eta_1$  값이 크게 변화함을 보여준다. 그러나, 대부

분의 시험이 수행되는 상태의 높은  $I_1$  값에서 ( $I_1^3/I_3-27$ ) 값을 구하기 위해서는 식 (1)의  $m$  값과  $\eta_1$  값은 조합되어진다. 따라서 강도의 실제 범위는  $\eta_1$ 의 범위에서 나타난 것과 같이 크지 않다. 암석에 대한 전형적인  $\eta_1$  값은 극한치인  $2 \cdot 10^3$ ,  $8 \cdot 10^{12}$  와 함께  $10^4 \sim 10^8$ 의 범위내에서 변화한다. 콘크리트와 모르타의 전형적인 값은  $10^4 \sim 10^6$ 의 범위이며 [10] 흙의 값은 20 ~ 280의 범위로 나타난다[9]. 따라서  $\eta_1$ 으로 측정되어진 암석의 개구각도는 콘크리트와 모르타, 흙보다 더 클 수 있다.

본 연구와 이전에 수행된 연구들을 통하여 3개의 변수  $a$ ,  $\eta_1$ ,  $m$ 은 동시에 증가함을 알 수 있다. 따라서  $\eta_1$ 이 크다면 일반적으로  $a$ 와  $m$ 의 값도 크며, 반대로 이  $a$ 와  $m$ 의 크면  $\eta_1$  값도 크게 된다. 암석의 파괴특성을 나타내기 위하여 사용되어지는 3개의 변수는 상대적으로 큰 범위이다. 암석은 그 원점, 성분, 그리고 성질에 있어서 매우 큰 변화를 나타낸다. 콘크리트와 모르타는 성분이 주어진 양과 형태로 조절되어진 조건에서 생산된 인공재료이기 때문에 본 연구에서 다루는 암석의 다양한 형태에 대한 것 보다는 콘크리트와 모르타에 대하여서 더 좁은 범위의  $a$ ,  $\eta_1$ ,  $m$  값이 얻어진다.

## 2.5 파괴기준면의 평가

제안되어진 파괴기준면의 타당성을 평가하기 위하여, 실험자료와 식 (1)에서 (4)까지의 방정식으로 산정되어진 파괴면을 비교하였다. 실험자료는 삼축평면과 이축평면에 표시되었고 자료점들은 이론적 파괴면과 비교하기 위해서 일반적인 정팔면체면 위에 투영되었다. 표 2에서 나타내어진  $a$ ,  $m$ ,  $\eta_1$  값은 이론파괴면의 결정을 위하여 사용되었다. 이 비교에 대한 예는 다음과 같다.

그림 5는 Mogi [7]에 의해서 얻어진 조면암(trachyte)에 대하여 시험자료(점)와 파괴면(선)의 비교를 나타낸다. 이 자료들은 그림 4에서 재료변수의 결정을 설명하기 위하여 앞에서 나타낸 바와 같다. 조면암(trachyte)에 대한 재료변수는 일축압축시험 및 삼축압축시험 그리고 일축인장시험으로부터 추정되어진 결과로부터 결정되어졌다. 따라서 시험결과와 그림 5(a)의 삼축평면에서 나타내어진 파괴기준은 일치함을 알 수 있다. 삼축인장시험은 조면암인 경우에 대하여서 수행되지 않았다. 그러나 삼축인장에서 파괴면의 위치는 그림 5(a)에 나타낸 바와 같다. 조면암인 경우에 대한 정육면체 시편 삼축시험 결과는 그림 5(b)의  $I_1/p_a=5000$ 에 상응하는 정팔면체면에 투영되었다. 투영되어진 점들은 그림 4에 포함된 기술을 이용하여 굽은 정점을 따라 일반적인 정팔면체면으로 이동되어진다. 일축압축 및 삼축압축시험으로부터 얻어진 자료들은 그림 5(b)의 최상단에 있다. 정팔면체면의 1/6만을 이 그림에서 나타내었다. 정팔면체면위의 실험치들은 이론치에서의 파괴기준면과 같이 단조롭게 굽은면을 가진 삼각형과 부드럽게 둥근모서리를 가진 형상의 파괴면을 나타낸다. 파괴면과 시험치들은 인장응력상태에 근접한 점에 대하여서 약간 편차가 있지만 대부분에서는 잘 일치하는 결과를 나타낸다.

그림 6에서는 Mogi [6]가 백운암(dolomite)에 대하여 수행한 일련의 시험치를 3축, 1축 그리고 정팔면체면에서의 파괴기준면과 비교한 그림이다. 재료변수들은 일축압축시험과 삼축압축시험으로부터 결정되어졌다. 변수를 결정하기 위하여 일축인장강도는 사용되지 않

왔지만, 가장 잘 맞는 방법으로 얻어진  $a=71.5$  인 값은 식(5)로부터 추정되어진 값  $|\sigma_i/p_a| = 71.0$  과 잘 일치한다. 파괴면은 삼축압축 ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) 에 대한 결과와 잘 일치하지만 삼축인장 ( $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ ) 에서는 파괴기준면과 시험치와 약간의 차이를 보인다. 이 차이는 그림 6(a) 와 6(b)의 화살표를 가진 두점으로 나타낸 바와 같이 정규화된 2축면 ( $\sigma_3 = 0$ ) 에서 더 잘 나타난다. 인장에서의 파괴면은 그림 6(a) 에서 보는 바와 같이 매우 좁은 각도에서  $\sigma_1 = 0$  인 면을 가로지른다. 그러므로, 삼축면에서 이 절단면에서의 실험치와 파괴면사이의 미소 편차는 2축면에서의 크기와 같은 정도로 나타난다. 실험기기에서의 구속은 2축인장에서 더 큰 강도를 나타내며, 이는 2축평면에서 명확하게 나타내어진다. 사실, 콘크리트의 3차원강도에 대한 수 많은 연구에서 실험장비의 다양한 형태로서의 구속이 2축인장에서 얻어진 강도와 상관관계가 있다는 것을 알 수 있다. 단부구속이 필요한 장비에서 수행되어진 이축인장시험에서는 매우 큰  $\sigma_1/\sigma_c$  값 (최대 2.6)이 얻어진다. 단부구속이 무시된 실험장비를 사용하여 같은 콘크리트시편에 대한 시험에서 얻어진 자료를 비교하면 상대적으로 작은  $\sigma_1/\sigma_c$  값 (1.1정도) 이 얻어진다. 따라서, 그림 6에서 나타내어진 2축인장강도와 삼축인장강도는 어느정도 구속에 영향으로 매우 큰 강도를 나타낸다. 2축평면에서 나타내어진 그 외의 자료들은 파괴기준에 의해서 잘 표현되어진다. 그림 6(b) 에서와 같이 이축시험에서 일반적으로 구속이 적어질 수록 일축압축시험과 근접한 결과를 얻는다. 그림 6(c) 에서 보여진것과 같이 이축시험결과는 정팔면체면위에 투영되어진다.

표 2에서 정리된 이 암석에 대한 재료변수들은 일축압축시험, 삼축압축시험, 그리고 이축압축시험의 결과로부터 결정되었다. 일축인장강도는 측정되어지지 않았지만, 표 1의 퇴적암에 대한  $T$  와  $t$  값을 이용하여 식(5)로부터 구한 값은  $|\sigma_i/p_a| = 44.6$  이다. 이 값은 재료변수를 결정하는 데에는 사용되지 않았다.  $a=37.4$  값일 경우는 변수를 결정하는데 추정되어진  $\sigma_i$  값이 사용되지 않았을 경우 잘 일치한다. 만일  $\sigma_i$  가 포함되어진다면,  $a$  값은 44.7 이 되어야 한다. 그러나,  $a \cdot p_a$  에 상응하는 두 값은 쉽게 자료의 편차내에 존재하며  $T$  와  $t$  를 구하기 위하여 사용되어진다.

자료와 파괴기준이 서로 일치함을 나타내는 데 중점을 두었기 때문에 변수결정에서 사용되어진 모든 결과에 같은 가중치를 두었다. 그러므로 제안되어진 파괴기준치는 어떤 특별한 시험의 결과에 대하여서는 완전히 일치하지는 않는다. 예를 들어, 파괴면은 일축압축강도와 정확하게 일치하지 않는다. 만일 파괴기준과 일축압축강도간의 양호한 관계 설정에 중점을 둔다면, 변수결정을 위하여 사용되어진 다른 실험으로부터의 결과치보다 이 강도에 더 큰 가중치를 부여하는 것이 필요하다.

### 3. 결 론

암석과 콘크리트, 모르타와 흙에 대한 파괴면은 일반적으로 여러가지 특성들을 내포하고 있다. 그리고 이것들은 응력텐서의 1 차, 3 차의 응력불변량을 사용하여 일반적인 3차원 파괴기준으로 공식화 될 수 있다. 이 파괴기준은 단지 3개의 독립적인 재료변수만을 포함하고 있다. 비록 이 변수들이 서로 상호작용을 하지만 각각의 변수는 암석거동에 대한 세개의 파괴특성들의 하나로 상응되어진다. 재료특성들은 일축압축시험과 삼축압축시험과 같은 단순시험으로 부터 결정되어진다. 파괴기준에서의 인장강도의 합리적인 수치를 고려하기 위해서는 재료변수를 결정하는데 일축인장강도를 사용하여야 한다. 서로 다른 암석에 대한 36조의 실험자료가 본 연구에서 고려되어졌다. 삼축, 이축, 그리고 정팔면체면에 대하여 파괴기준과 실험자료가 비교되었다. 다양한 암석에 따른 세종류 재료변수들의 전형적인 값이 결정되었으며 그들의 크기는 이전의 콘크리트, 모르타 그리고 흙에 대하여 얻어진 변수치와 비교되었다. 암석 파괴의 특성을 나타내는 일반적인 3차원 파괴기준은 실험치의 분포범위 내에서 일반적으로 잘 일치함을 나타낸다.

## 참고문헌

1. Akai K. and Mori H., 1970, Ein Versuch uber Bruchmechanismus von Sandstein unter mehrachsigen Spannungszustand. *Proc. 2nd Congr. ISRM* Belgrade, Yugoslavia, Vol. II, Paper No 3-30
2. Handin J., Heard H. C. and Magourk J. N., 1967, Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite, and glass at different temperature and strain rates. *J. geophys. Res.* 72, 611-640
3. Hojem J. P. M. and Cook N. G. L., 1968, The design and construction of a triaxial and polyaxial cell for testing rock specimens. *S. Afr. Mech. Engr.* 18, 57-61
4. Hoskins E. R., 1969, The failure of thick-walled hollow cylinders of isotropic rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 6, 99-125
5. Khair A. W. and Hardy H. R., 1977, Failure of Indiana limestone under a tension-tension-compression stress state. *Proc. 18th Symp. on Rock Mechanics*. Keystone Colorado, Paper No. 3B1
6. Mogi I., 1967, Effect of intermediate principal stress on rock failure. *J. geophys. Res.* 72, 5117-5131
7. Mogi K., 1971 Failure and flow of rocks under high triaxial compression. *J. geophys. Res.* 76, 1255-1269
8. Sakurai S. and Serata S., 1967, Mechanical properties of rock salt under three dimensional loading conditions. *10th Japan Congr. on Testing Materials*, pp. 139-142
9. Lade P. V., 1978, Prediction of undrained behavior of sand. *J. Geotech. Engng Div. Am. Soc. civ. Engrs* 104 721-735
10. Lade P. V., 1982, Three-parameter failure criterion for concrete. *J. Engng Mech. Div. Am. Soc. civ. Engrs* 108, 850-R63
11. Mitchell J. K., 1976, The properties of cement-stabilized soils. *Proc. Workshop on Materials and Methods for Low Cost Road, Rail and Reclamation Works*, Leura, Australia, pp. 365-404
12. Wastiels J., 1979, Behaviour of concrete under multiaxial stresses-a review. *Cem. Concr. Res.* 9, 35-44
13. Schwartz A. E., 1964, Failure of rock in the Triaxial test. *Proc. 6th Symp. on Rock Mechanics*, Rolla, Missouri, pp. 109-151
14. Hobbs D. W., 1964, The tensile strength of rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1, 385-394
15. Brace W. F., 1964, Brittle fracture of rocks. *State of Stress in the Earth's Crust*, pp. 111-178. Elsevier, New York
16. Raleigh C. B. and Paterson M. S., 1965, Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications. *J. geophys. Res.* 70, 3965-3985
17. Ramez M. R. H., 1967, Fractures and the strength of sandstone under triaxial compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 4, 257-268
18. Franklin J. A. and Hoek E., 1970, Developments in triaxial testing technique. *Rock Mech.* 2, 223-228
19. Brown E. T., 1974, Fracture of rock under uniform biaxial compression. *Proc. 3rd Congr. ISRM*, Denver, Colorado, pp. 111-117
20. Michelis P. N., 1981, Work-softening and hardening behavior of granular rocks. *Rock Mech.* 14, 187-200
21. Kovari K. and Tisa A., 1975, Multiple failure and strain controlled triaxial tests. *Rock Mech.* 7, 17-33
22. Ladanyi B. and Don N., 1970, Study of strains in rock associated with brittle failure. *Proc.*



- 6th Canadian Rock Mechanics Symp.* pp. 49-64
23. Maso J. and Lerou J., 1980, Mechanical behavior of Darney sandstone in biaxial compression.  
*Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* 17, 109-115

표 1. 세 암석의 종류에 따른  $T$ 와  $t$  값

암석의 종류	$T$	$t$
화성암	- 0.53	0.70
변성암	- 0.00082	1.6
퇴적암	- 0.22	0.75

표 2. 여러암석의 종류에 따른 재료변수

암석종류	실험방법	$\sigma_c/p_a$	$ \sigma_t/p_a $	회기분석에 사용한 방법	재료변수(material parameter)				참고문헌
					$r_{max}^2$	$a$	$m$	$\eta_1$	
Quartzite	UC,TC, TE,UT	4701	286.0	UC,TC,UT	0.986	287.1	0.667	1.398e5	Brace[14]
Granite	UC,TC, TE,UT	2335	214.0	UC,TC,UT	1.000	219.0	0.296	2.036e3	
Diabase	UC,TC, TE,UT	4996	408.0	UC,TC,UT	0.996	409.9	0.987	1.275e6	
Blair dolomite	UC,TC, TE	5170	134.1*	UC,TC	0.997	180.6	2.627	7.565e12	
Webatuck dolomite	UC,TC, TE	1514	53.4*	UC,TC,UT*	0.861	53.5	1.139	1.321e6	
Limestone	UC,TC, UT	422	25.4*	UC,TC,UT	0.946	25.5	1.370	7.595e5	Schwartz [13]
Marble	UC,TC, UT	281	45.7*	UC,TC,UT	0.942	46.2	0.939	4.309e4	
Sandstone	UC,TC, UT	633	30.9*	UC,TC,UT	0.963	31.0	0.843	1.055e5	
Granite	UC,TC,	844	57.2*	UC,TC,UT*	0.939	57.3	0.628	2.867e4	
Cabrmurra serpentinite	UC,TC	3161	326.2*	UC,TC,UT*	0.996	327.9	1.201	3.624e6	Raleigh& Paterson [16]
TumutPond serpentinite	UC,TC	4181	485.0*	UC,TC,UT	0.983	486.8	0.815	8.438e4	
Sandstone	UC,TC	739	31.2*	UC,TC	0.994	34.3	1.549	2.085e7	Ramez [17]
Dolomite	UC,TC, TE,BC	2213	71.0*	UC,TC	0.992	71.5	2.243	4.633e10	Mogi[6]
Limestone	UC,TC, TE	2988	88.9*	UC,TC,UT*	0.761	89.0	1.548	6.297e7	
Granite	UC,TC, TE	2610	80.3*	UC,TC,UT*	0.932	80.4	0.860	6.071e5	
Rock salt	UC,TC, CT	181	15.1*	UC,TC	1.000	6.4	2.724	1.272e10	Sakurai& Serata [8]
Limestone	UC,TC, TE,AT	4097	112.7*	UC,TC,UT*	0.780	112.3	1.276	1.271e7	Handin et al.[2]
Dolomite	UC,TC, TE,AT	5323	137.1*	UC,TC,UT*	0.869	137.2	1.320	2.876e7	

암석종류	실험방법	$\sigma_c/p_a$	$ \sigma_t/p_a $	회기분석에 사용한 방법	재료변수(material parameter)				참고문헌
					$\nu_{max}^2$	$a$	$m$	$\eta_1$	
Dolerite	TC,CT	-	-	TC	1.000	138.9	1.351	2.997e7	Hojem& Cook[3]
Trachyte	UC,UT, TC,BC,AP	1680	133.0	UC,TC,UT	0.991	133.5	1.024	6.325e5	Hoskins [4]
Sandstone	UC,TC,TE, UT,BC,CT	1190	44.6*	UC,TC,BC	0.953	37.4	1.810	3.853e8	Akai& Mori[1]
Marble	UC,TC	942	47.0*	UC,TC,UT*	0.912	47.1	1.306	2.289e6	Franklin & Hoek[18]
Limestone	UC,TC	604	26.8*	UC,TC,UT*	0.732	26.9	1.142	6.491e5	
Granite	UC,TC	1831	101.9*	UC,TC,UT*	0.802	102.0	1.231	7.504e6	
Sandstone (sample202)	UC,TC	537	24.5*	UC,TC,UT*	0.821	24.6	1.069	4.387e5	
Sandstone (sample207)	UC,TC	816	33.06*	UC,TC,UT*	0.923	33.7	1.255	2.365e6	
Sandstone (sample209)	UC,TC	2008	66.0*	UC,TC,UT*	0.752	66.1	1.183	4.336e6	
Trachyte	UC,TC,CT	1020	67.65*	UC,TC,UT*	0.999	67.71	1.474	1.255e7	Mogi[7]
Dolomite	UC,TC,CT	2650	81.3*	UC,TC,UT*	0.880	81.4	1.182	4.075e6	
Marble	UC,BC	668	27.1*	UC,BC,UT*	0.840	27.2	0.750	4.940e4	Brown [19]
Limestone	UC,UT,AP	402	31.0	UC,UT	1.000	31.1	1.802	2.615e5	Khair& Hardy [5]
Marble	UC,TC	535	19.0	UC,TC,UT*	0.825	19.1	1.131	1.094e5	Michelis [20]
Sandstone	UC,TC	717	30.4*	UC,TC,UT*	0.825	30.5	1.092	5.138e5	Kovari& Tisa[21]
Marble	UC,TC	1175	44.2*	UC,TC,UT	0.748	44.3	1.367	5.197e6	
Limestone	UC,TC	823	33.8*	UC,TC,UT*	0.806	33.9	1.048	3.191e5	Ladanyi& Don[22]
Sandstone	UC,BC	309	16.2*	UC,BC,UT*	0.884	16.3	0.647	1.442e4	Maso& Lerau[23]

UC-일축압축시험; UT-일축인장(tensile)시험;

UT\*-식(5)로부터 계산되어진 일축인장(tensile)장도;

TC-삼축압축시험; TE-삼축인장(extention)시험

CT-정육면체 삼축시험; BC-이축압축시험;

CT-축하중을받을 때의 비틀림시험; AP-내외부압력에 의한 원공실린더의 축하중시험

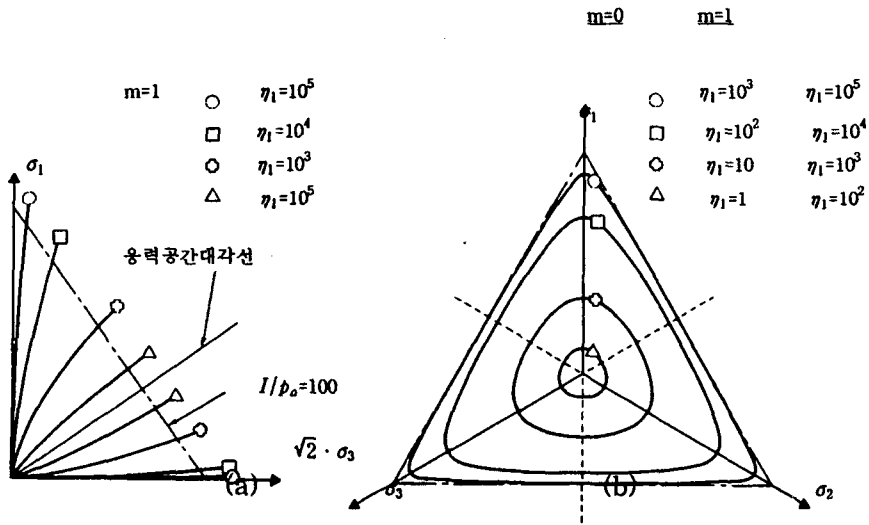


그림 1. 주응력장에서의 파괴면 (a) 삼축평면 (b) 정팔면체평면

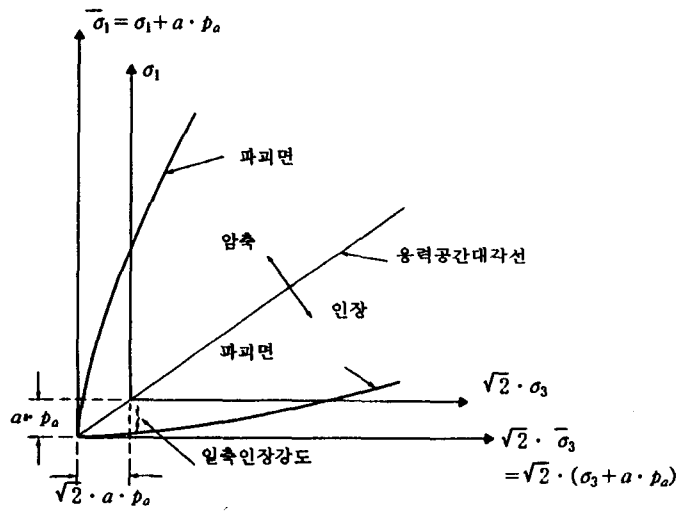


그림 2. 파괴기준에서 인장강도를 포함한 주응력장

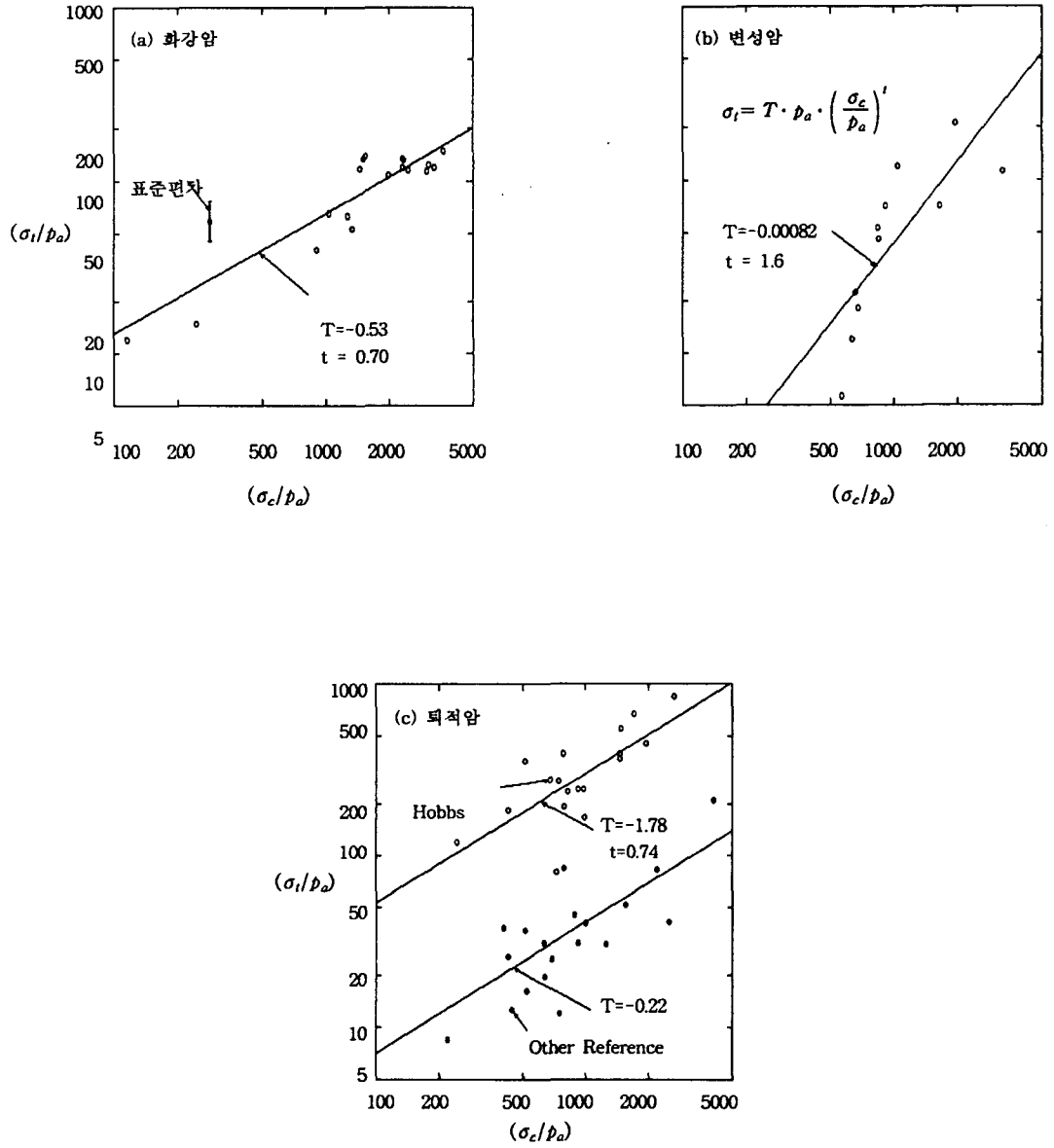


그림 3. 일축압축강도와 일축인장강도의 비교

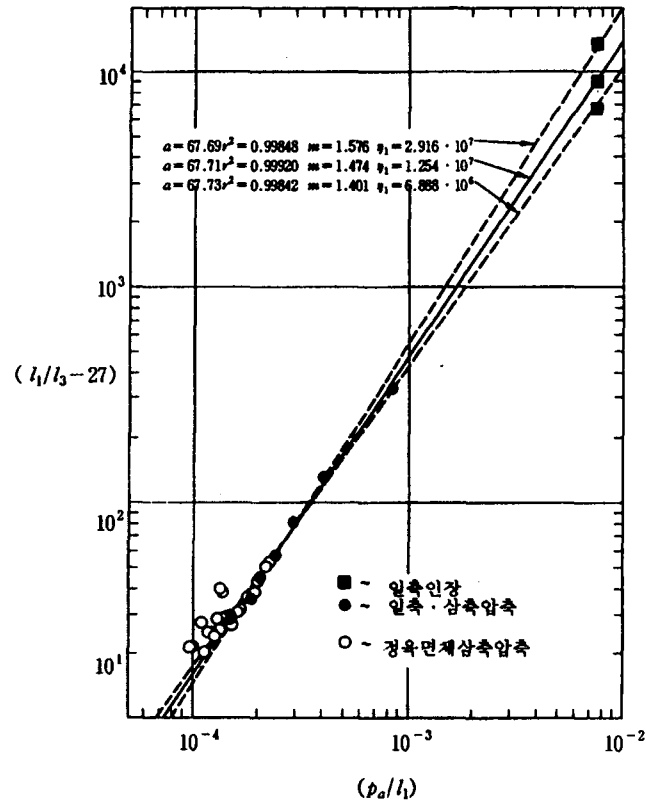


그림 4. 조면암에서 파괴기준을 포함한 재료변수의 결정

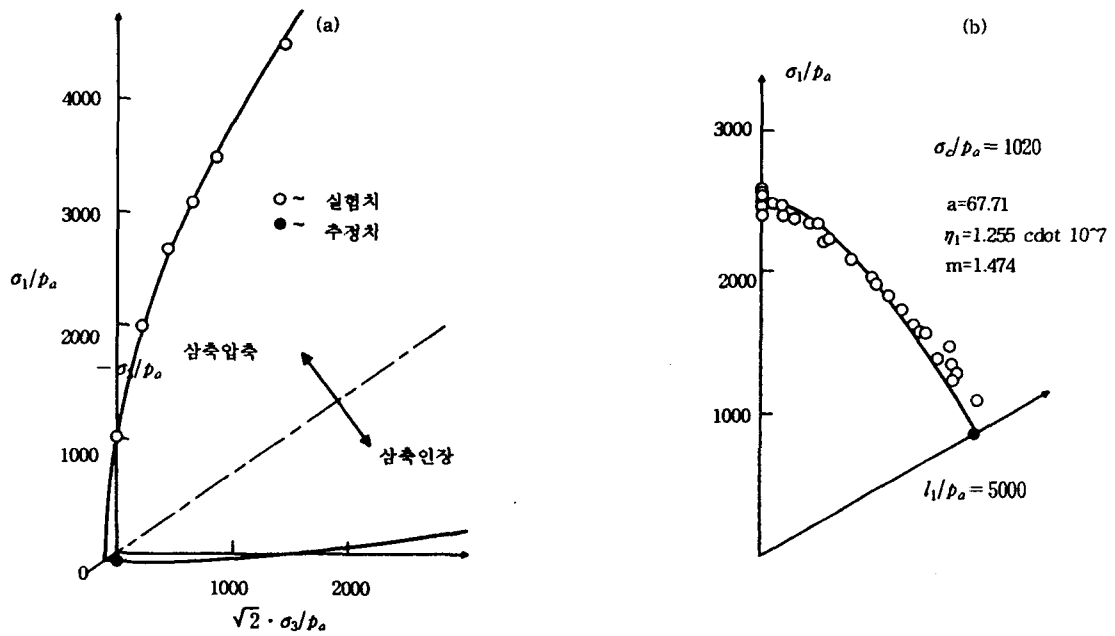


그림 5. Mogi에 의한 파괴기준의 실험결과(조면암) (a) 삼축면 (b)정팔면체면

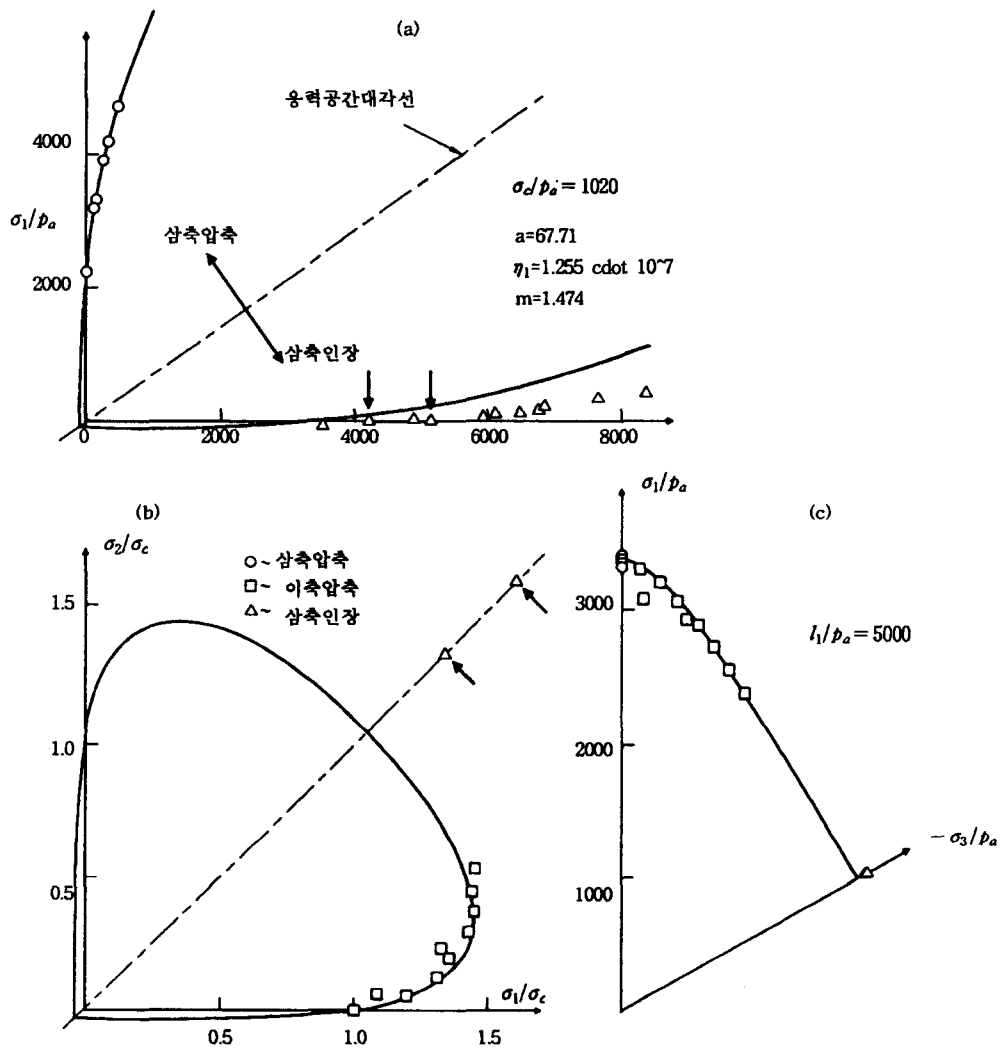


그림 6. Mogi에 의한 dolomite의 파괴면 (a) 삼축평면 (b) 이축평면 (c) 정팔면체평면