

임계면법을 이용한 횡등방성 암석의 이방성 인장강도 해석

이연규^{1)*}

An Investigation of Anisotropic Tensile Strength of Transversely Isotropic Rock by Critical Plane Approach

Youn-Kyou Lee

Abstract In order to investigate the characteristics in tensile strength of transversely isotropic rock, a new anisotropic tensile failure function was suggested. According to the function, the tensile strength is minimum in the normal direction to a weakness plane and rises exponentially to its maximum on a plane perpendicular to the weakness plane. The anisotropic function is defined in terms of three strength parameters which can be identified from direct tensile tests of transversely isotropic rocks. By incorporating the suggested function into the critical plane approach, a numerical procedure which enables to search the tensile strength and the direction of critical plane at failure was presented. The validity of the suggested numerical procedure was checked through the simulation of direct tensile tests reported in a literature. The numerical results from the simulation were in good agreements with those from the laboratory tests.

Key words Transversely isotropic rock, Critical plane approach, Tensile strength, Numerical analysis

초 록 횡등방성 암석의 인장강도 특성 해석을 위하여 새로운 이방성 인장파괴함수를 제안하였다. 제안된 함수에서 인장강도는 연약면과 수직인 방향에서 최소가 되며 연약면과 평행한 방향으로 지수함수적으로 증가하면서 최대값에 수렴된다. 제안된 이방성 인장파괴함수는 실험적으로 측정이 가능한 3개의 강도정수로 정의된다. 제안된 함수를 임계면법에 적용하여 연약면의 방향성에 따른 횡등방성 암석의 인장강도 및 파괴면의 방향을 탐색할 수 있는 수치해석적 기법을 제시하였다. 문헌에 보고된 횡등방성 암석의 직접인장시험 결과를 모사함으로써 제안된 방법의 적합성을 검토하였다. 수치해석결과와 직접인장시험 결과는 전반적으로 유사한 결과를 보여주었다.

핵심어 횡등방성 암석, 임계면법, 인장강도, 수치해석

1. 서 론

암석은 압축응력이나 전단응력에 비해 인장응력에 매우 취약한 재료이므로 암석의 인장강도 특성을 정확하게 이해하는 것은 암반공학적 설계에서 매우 중요하다. 예를 들어 수압파쇄시험에서 발생하는 공벽의 균열, 암반사면의 상단면에서 사면과 평행하게 발달되는 인장균열, TBM 커터의 암석절삭 메카니즘 등은 인장강도와 밀접한 관련이 있다. 등방성 암석의 경우 인장강도는 직접인장시험이나 간접인장시험을 통하여 측정할

수 있다(ISRM, 1981). 직접인장시험은 이론적으로 간단하지만 시험과정에서 편심하중이 없는 균질한 응력 상태를 유지하는 것이 대단히 어렵다는 단점이 있다. 따라서 시료의 성형이 비교적 쉽고 시험이 간단한 간접인장시험법을 이용하여 인장강도를 측정하는 방법이 선호되고 있다.

암석은 생성과정에서 형성된 방향성 조직 때문에 역학적 성질의 이방성이 나타나는 경우가 많다. 암석의 이방성은 직교등방성(orthotropic) 또는 횡등방성(transversely isotropic) 모델을 이용하여 이론적으로 고려될 수 있다. 규칙적인 층상구조를 갖는 퇴적암(셰일, 사암, 석회암)이나 규칙적인 엽리가 발달된 변성암(점판암, 천매암, 편암, 편마암)은 횡등방체로 가정할 수 있다. 횡등방체는 하나의 역학적 대칭축을 가지며 대칭축에 수직인 면에서 역학적 성질은 등방성을 나타낸다. 암석의

¹⁾ 군산대학교 해양시스템공학전공 부교수

* 교신저자 : kyoulee@kunsan.ac.kr

접수일 : 2008년 5월 8일

심사 완료일 : 2008년 5월 19일

게재 확정일 : 2008년 5월 20일

층리면이나 엽리면은 역학적 연약면으로 간주되므로 횡등방성 암석의 경우 대칭축과 수직인 방향의 강도가 가장 낮으며 축에 평행한 방향의 강도가 가장 크게 나타난다. 암반구조물의 정밀한 설계를 위해서는 이러한 역학적 이방성이 암반역학적 설계과정에서 적절하게 반영될 필요가 있다.

압축응력 하에서 횡등방성 암석의 거동에 대한 많은 연구들(Jaeger, 1960, Donath, 1964, McLamore & Gray, 1967, Nova, 1980, Amadei, 1988)이 수행되었으며, 암석의 강도특성은 연약면의 방향성에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 횡등방성 암석의 인장강도 이방성에 대한 연구는 상대적으로 미진한 실정이다. 이는 횡등방성 암석에 대한 인장시험 절차의 복잡성 및 시험 결과 해석의 어려움 때문으로 판단된다. 예를 들어 시험편의 제작을 위해서는 연약면을 기준으로한 방향성 시추가 필요하다. 또한 간접인장시험의 근거가 되는 등방성 디스크 시험편에 대한 탄성해를 이방성 암석에 적용할 경우 상당한 오차가 발생하는 것으로 나타났다(Exadaktylos & Kaklis, 2001, Claesson & Bohloli, 2002).

횡등방성 암석의 직접인장시험에 대한 대표적 사례는 Nova & Zaninetti(1990)와 Lia et al.(1997)이다. 이들은 일축인장시험을 통하여 연약면의 경사각에 따른 일축인장강도 및 탄성계수의 변화를 고찰하였다. Chen et al.(1998)과 Whittles et al.(2002)은 간접인장시험을 통하여 횡등방성 암석의 인장강도 이방성을 연구하였다. 국내에서는 박철환(2001)에 의해 횡등방성 암석의 탄성정수 결정에 대한 연구가 수행된 바 있지만 인장강도의 이방성에 대한 연구는 아직까지 보고되지 않고 있다.

실험을 통하여 확인된 횡등방성 암석의 인장강도 이방성은 적절한 이방성 인장파괴함수를 개발함으로써 수치해석에 반영시킬 수 있다. 탄소성 해석시 인장파괴함수는 항복함수로 이용될 수 있다. 횡등방성 암석의 강도 특성은 중간주응력에 영향을 받으므로(Amadei, 1988) 인장파괴함수는 3차원 응력조건에서 정의되는 것이 요구된다. 현재까지 3차원 응력조건을 고려한 이방성 인장파괴함수의 연구는 Nova & Zaninetti(1990)의 연구를 제외하면 거의 전무한 상태이다.

본 연구에서는 임계면법(Critical Plane Approach, CPA)을 적용하여 횡등방성 암석의 인장강도 이방성 해석을 시도하였다. 임계면법은 3차원 응력조건에서 재료의 파괴응력과 파괴면의 방향을 탐색할 목적으로 Pietruszczak & Mroz(2001)에 의해 제안되었다. 임계면법에서는 방향에 따른 파괴함수의 최대화 또는 최소화를 통하여 임계평면이 탐색된다. 그러므로 적절한 파괴함

수의 구성과 이 함수의 최대화 기법이 임계면법의 핵심을 이룬다. 임계면법은 특히 벽돌구조물, 층리구조의 퇴적암, 엽리구조의 변성암 등 이방성 매질의 파괴특성을 예측하는데 성공적으로 적용되고 있다(이연규, 2007, Pietruszczak et al., 2002, Ushaksaraci & Pietruszczak, 2002, Lee & Pietruszczak, 2008).

본 연구에서는 횡등방성 암석의 인장강도 이방성 해석을 위해 새로운 이방성 인장파괴함수를 제안하였다. 제안된 함수는 여러 수치해석 기법에 적용이 용이하도록 3차원 응력조건에서 수식화되었다. 인장파괴함수에 임계면법을 적용하여 횡등방성 암석의 인장강도 및 임계면의 방향을 연구하였다. 제안된 이방성 인장파괴함수의 적용성을 검증하기 위해 횡등방성 암석의 직접인장시험을 모사하고 그 결과를 직접인장시험 결과 및 기타의 이론적 예측치와 비교하였다.

2. 인장강도의 이방성에 대한 이론적 고찰

2.1 인장파괴조건

암석을 균질 등방성체로 가정하면 암석의 인장파괴조건식을 다음과 같이 표시할 수 있다

$$\sigma_{nn} = n \cdot \sigma n = S \quad \vee \quad \sigma_{nn} = \sigma_{ij} n_i n_j = S \quad (1)$$

여기서 σ_{nn} 은 수직 단위벡터가 n 인 면에 작용하는 수직응력이고 S 는 암석의 인장강도이다. 또한 σ 는 응력 텐서이다. 등방성 매질의 경우 인장강도 S 는 n 에 영향을 받지 않는 상수이다. 이방성 암석의 경우 인장강도 S 는 더 이상 상수가 아니며 면의 방향성에 영향을 받는다. 이 때 수직 단위벡터가 n 인 면에서 인장파괴가 발생한다는 조건은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\sigma_{nn} = S(n) \quad (2)$$

그러므로 이방성 암석의 인장강도식은 $S(n)$ 을 표현하는 문제로 귀착된다.

식(1)에 따르면 일축인장조건에서 등방성 매질의 인장 파괴면은 항상 재하방향과 수직하게 형성되어야 한다. 왜냐하면 이 면에서 수직응력이 최대가 되기 때문이다. 하지만 이방성 암석에 대한 일축인장시험에서는 인장파괴면이 재하방향과 반드시 수직하게 형성되는 것이 아니므로 등방성 암석과 달리 축방향 한계응력(limit axial stress)과 인장강도는 일반적으로 일치하지 않는다는 것을 주의할 필요가 있다. 등방성 암석의 경우 이 두 값은 일치한다.

2.2 단일 연약면 이론

평행한 단일 연약면(SPW, Single Plane of Weakness) 들이 규칙적으로 발달한 이상적인 횡등방성 암석의 인장 파괴가 연약면에서만 발생할 수 있다고 가정하면 이 암석의 인장파괴조건은 식(1)에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_{nn} = \sigma_{ij}n_i n_j = S_t \tag{3}$$

여기서 n_i 는 연약면에 수직인 단위벡터의 성분이며, S_t 는 연약면의 인장강도이다.

Fig. 1(a)과 같이 축방향 인장응력 σ_β 가 작용할 때 연약면의 인장파괴가 발생한다고 가정하면 파괴조건은 다음 식과 같이 된다.

$$\sigma_{nn} = \sigma_\beta \cos^2 \beta = S_t \tag{4}$$

σ_β 는 $\beta=0^\circ$ 일 때 최소값 S_t 이 되며, β 가 클수록 증가한다. 이 각이 일정 이상으로 커지게 되면 파괴는 연약면 인장강도의 영향을 거의 받지 않게 된다. 이 각이 최대인 $\beta=90^\circ$ 에서는 무결암질의 인장강도로 이해될 수 있는 최대값 S_T 를 갖는다. 따라서 횡등방성 암석의 일축인장강도는 $S_t \leq \sigma_\beta \leq S_T$ 의 범위를 갖는다.

식(4)에서 σ_β 는 연약면 경사각 β 의 증가에 따라 단조증가하지만 σ_β 의 상한값이 S_T 이므로 이상적인 횡등방성 암석의 일축인장강도는 다음 식으로 표시되어야 한다.

$$\sigma_\beta = \min \left\{ \frac{S_t}{\cos^2 \beta}, S_T \right\} \tag{5}$$

식(5)를 도시하면 Fig. 2와 같은 형태의 강도곡선을 얻을 수 있는데, S_T/S_t 가 1, 2, 3, 4 인 4가지 경우를 동시에 나타내었다. 그림에서 $0^\circ \leq \beta \leq \beta^*$ 인 경우 연약면의 인장강도에 의해 파괴가 발생되며, $\beta^* < \beta \leq 90^\circ$ 인 경우 연약면이 아닌 무결암질의 인장강도에 의하여 파괴가 발생된다. 파괴모드 전이 경사각(transition angle) β^* 는 S_t 와 S_T 에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\beta^* = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{S_t}{S_T}} \right) \tag{6}$$

식(6)에 의하면 S_T/S_t 가 클수록 전이 경사각 β^* 는 증가한다.

2.3 Nova & Zaninetti의 이론

Nova & Zaninetti(1990)는 인장강도 이방성을 다음과 같은 2차 텐서를 도입하여 기술하였다.

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ & S_{22} & S_{23} \\ sym & & S_{33} \end{bmatrix} \tag{7}$$

여기서 S_{ij} 는 대칭 2차 텐서로서 3개의 수직성분 즉 대각성분은 서로 직교하는 3개의 면에 수직인 방향의 인장강도를 나타낸다. n 방향의 인장강도는 식(7)의 n 방향 수직성분으로 다음과 같이 주어진다.

$$S(n) = S_{nn} = S_{ij}n_i n_j \tag{8}$$

직교등방성 암석에서 인장강도에 대한 주축(principal axes, $x_p - x_q - x_r$)를 설정하면 S_{ij} 는 다음과 같이 3개의 독립적인 성분으로 표시된다.

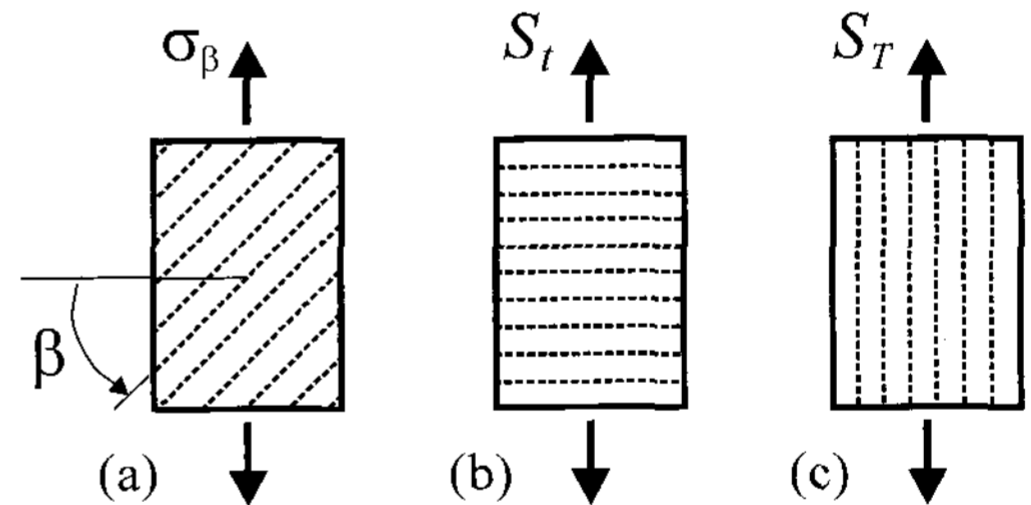


Fig. 1. Axial stresses of transversely isotropic rock at failure

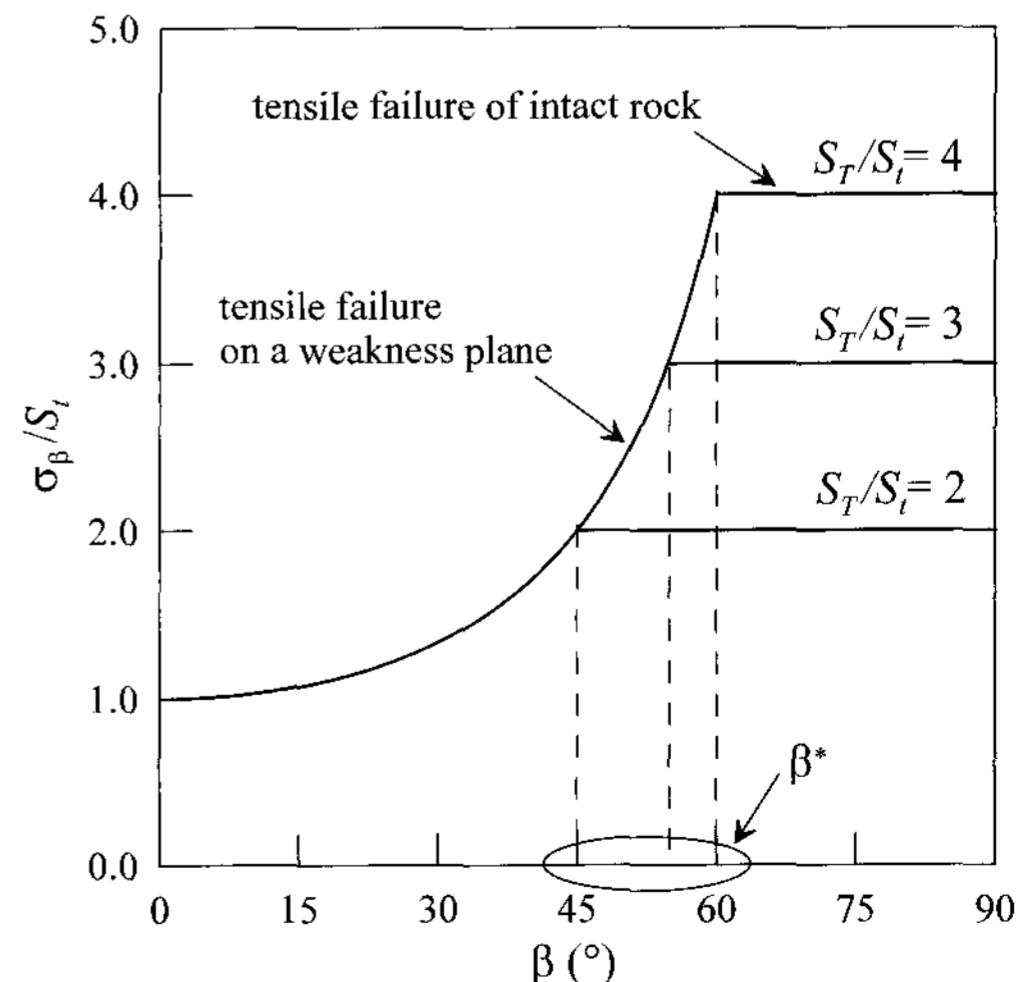


Fig. 2. Directional variation of uniaxial tensile strength in an ideal transversely isotropic rock

$$S_{pq} = \begin{bmatrix} S_{pp} & 0 & 0 \\ 0 & S_{qq} & 0 \\ 0 & 0 & S_{rr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

x_p 가 대칭축인 횡등방성 암석을 가정하면 $S_{pp} = S_t$ 이고 $S_{qq} = S_{rr} = S_T$ 이므로 2개의 독립적인 성분으로 인장강도 이방성을 표현할 수 있다. 등방성 암석인 경우 $S_{pp} = S_{qq} = S_{rr}$ 이다.

Fig. 3과 같이 x_q 축과 x_2 이 일치하는 주응력좌표계 $x_1-x_2-x_3$ 를 설정하면 x_1 방향의 한계 축응력 σ_β 및 파괴면의 경사각 α 는 S_t, S_T, β , 및 σ_3 로 표현할 수 있다. 예를 들어 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 인 일축인장조건에서는 한계 축응력과 인장파괴면의 경사각은 다음과 같이 나타난다 (Nova & Zaninetti, 1990).

$$\sigma_\beta = \frac{2S_T S_t}{(S_T + S_t) + (S_T - S_t)\cos 2\beta} \quad (10)$$

$$\tan \alpha = \frac{(S_T - S_t)\sin 2\beta}{(S_T + S_t) + (S_T - S_t)\cos 2\beta} \quad (11)$$

식(10)과 식(11)을 도시하면 각각 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 식(10)에 의하면 $0 \leq \beta \leq 90^\circ$ 의 범위에서 일축인장강도의 변화는 S_t, S_T 에 의해 완전히 결정된다. 그러나 동일한 S_t 와 S_T 를 갖는 암석일지라도 $0 < \beta < 90^\circ$ 에서 일축인장강도의 변화 양상은 암석의 상태에 따라 달라질 수 있으므로 식(10)은 β 에 따른 일축인장강도의 변화를 너무 단순화시킨 이론으로 판단된다.

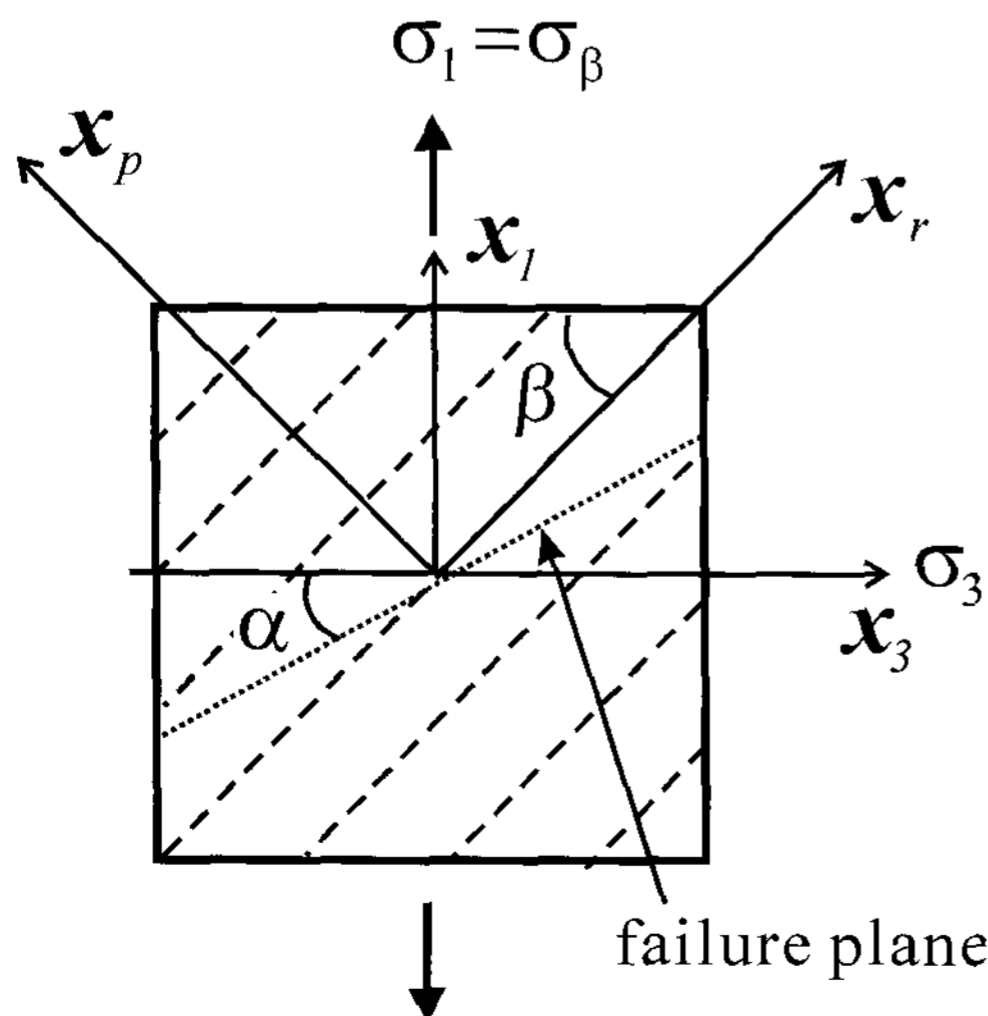


Fig. 3. Multiaxial extension of transversely isotropic rock

Fig. 5는 일축인장조건에 예상되는 파괴면 경사각의 변화를 보여준다. $\beta = 0^\circ$ 와 $\beta = 90^\circ$ 를 제외하면 파괴면과 축응력방향은 직교하지 않는다. $S_T/S_t = 1$ 은 등방성 암석인 경우이므로 파괴면의 경사각 α 가 β 와 상관없이 항상 0° 이다. S_T/S_t 의 크기가 증가할수록 즉, 인장강도의 이방성이 클수록 연약면과 유사한 방향으로 인장파괴가 발생하는 β 의 범위가 확대되는 경향을 보여준다. β 가 90° 에 가까워지면 파괴면은 축응력방향과 거의 수직으로 발생된다.

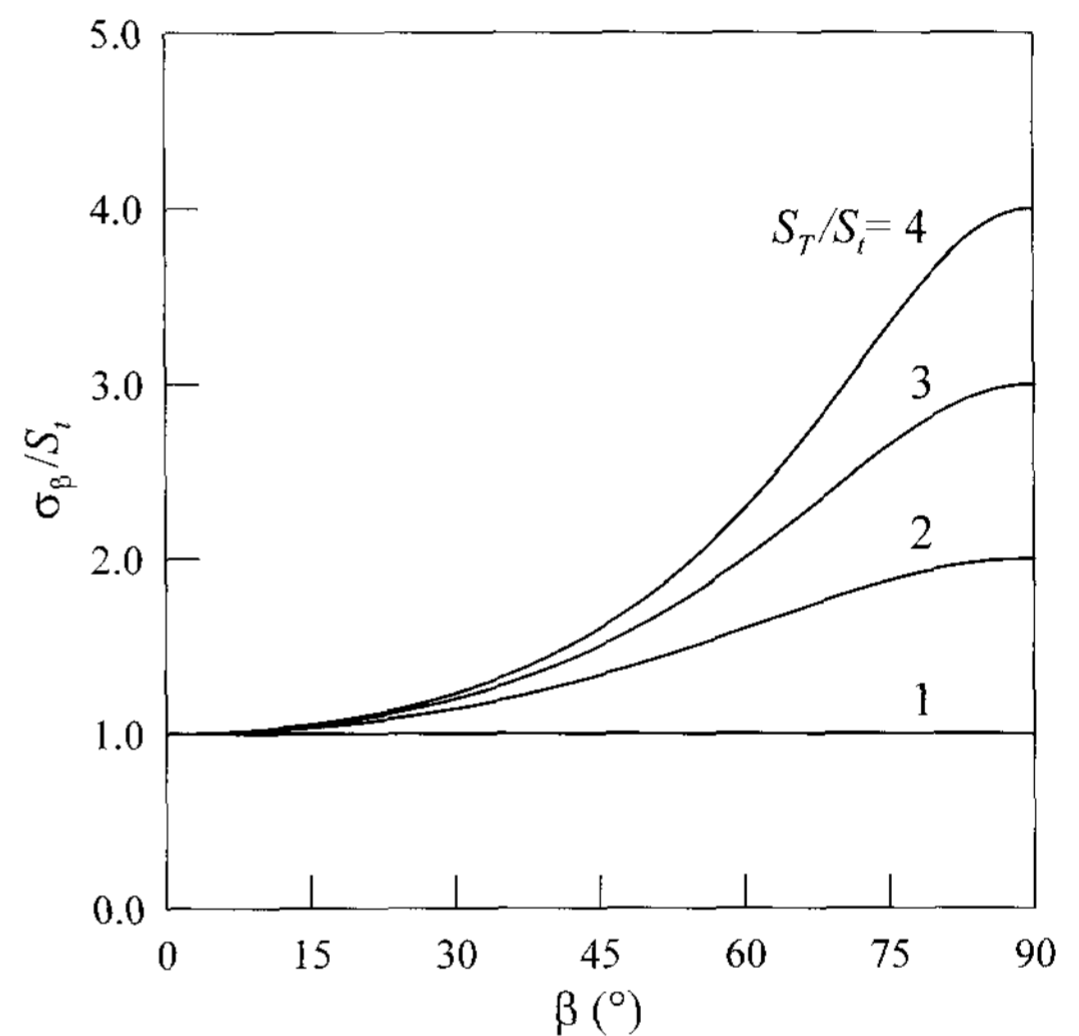


Fig. 4. Variation of uniaxial tensile strength with inclination of lamination predicted by Nova and Zaninetti (1990)

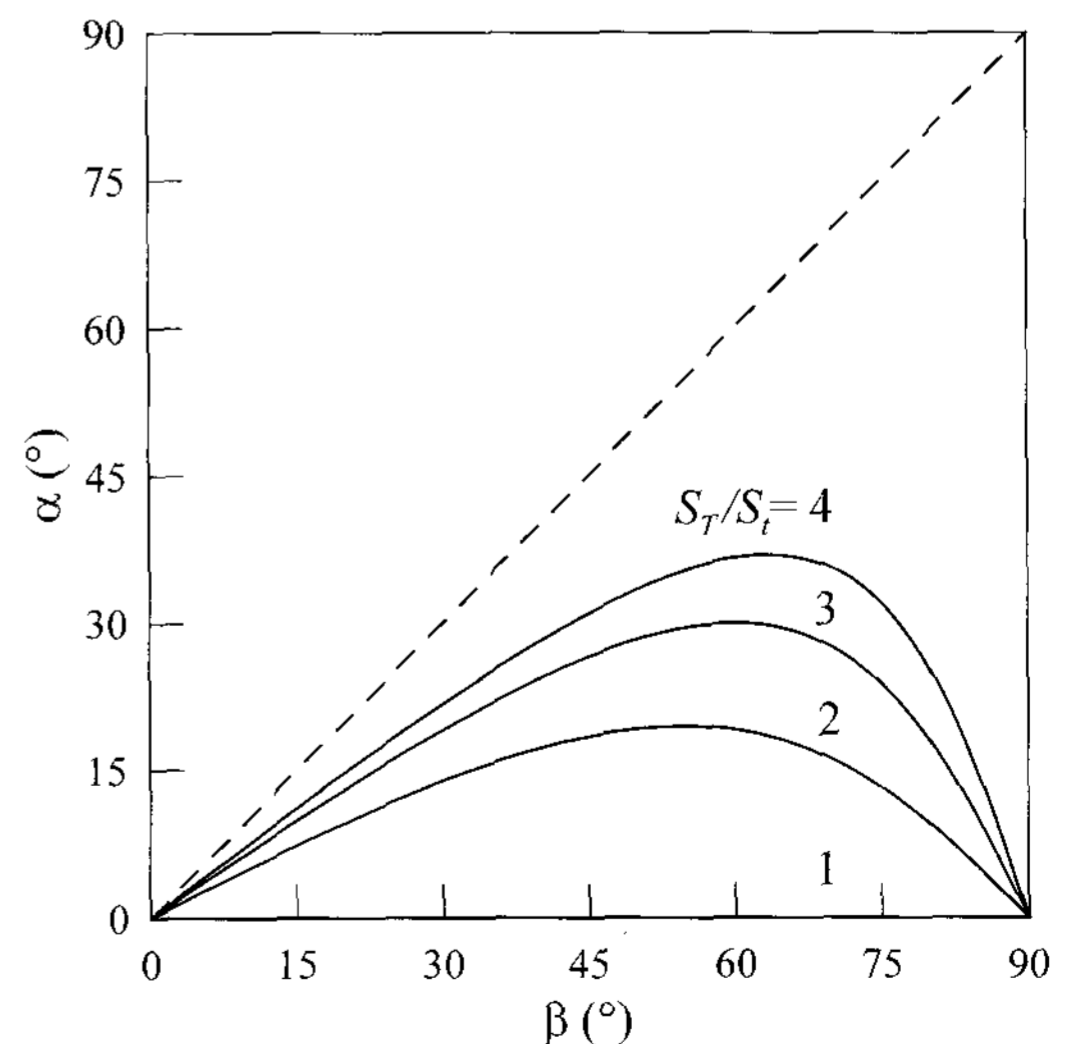


Fig. 5. Orientation of failure plane with inclination of lamination predicted by Nova and Zaninetti (1990). $\alpha = 0^\circ$ for all β , if $S_T/S_t = 1$.

2.4 임계면법을 적용한 인장강도 이방성 이론

2.4.1 이방성 강도함수의 정의와 임계면의 탐색

Hoek-Brown 암반의 이방성 강도 특성을 해석하기 위해 Lee & Pietruszczak(2008)이 정의한 방향성 강도 정수 m 과 s 의 개념을 인장강도의 이방성해석에 적용하였다. 이에 따라 임의 지점에서 \mathbf{n} 방향의 인장강도 $S(\mathbf{n})$ 는 조직텐서 Ω 을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다고 가정하였다.

$$S(\mathbf{n}) = S_1 + S_2 \exp(\Omega_{ij} n_i n_j) \tag{12}$$

여기서 Ω 는 대칭 2차 텐서로서 인장강도의 방향에 따른 변화특성을 표현한다. Ω 는 $tr(\Omega) = \Omega_{ii} = 0$ 의 성질을 갖는다. S_1 과 S_2 는 실험적으로 결정되어야 할 재료특성이다.

직교등방성 암석에 대해 인장강도 주축 $x_p - x_q - x_r$ 을 설정하면

$$\Omega_{pq} = \begin{bmatrix} \Omega_{pp} & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_{qq} & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_{rr} \end{bmatrix} \tag{13}$$

이다. $\Omega_{pp} + \Omega_{qq} + \Omega_{rr} = 0$ 이므로 직교등방성 암석의 인장강도에 대한 조직텐서는 2개의 성분으로 기술될 수 있다. 주축계에서 표현된 Ω 는 2차텐서의 좌표변환 규칙에 따라 일반좌표계의 조직텐서로 변환시킬 수 있다.

반면에 횡등방성 암석의 경우 주축계에서 조직텐서는 다음과 같이 1개의 성분 Ω_0 을 이용하여 구성할 수 있다.

$$\Omega_{pq} = \begin{bmatrix} -2\Omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_0 & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

여기서 연약면은 x_p 방향과 수직하다고 가정하였다. 그러므로 횡등방성 암석의 이방성 인장강도 특성은 3개의 강도정수 S_1, S_2, Ω_0 에 의해 기술된다.

횡등방성 암석의 경우 $\beta = 0^\circ$ 와 $\beta = 90^\circ$ 인 연약면을 갖는 시료의 일축인장시험 결과가 존재한다면 Lee & Pietruszczak (2008)가 제안한 방법을 적용하여 특정 Ω_0 에 대해 식(12)의 S_1 과 S_2 를 결정할 수 있다. Ω_0 는 β 를 달리한 3회 이상의 직접인장시험 결과들을 식(12)에 적합시켜 구할 수 있다.

식(12)으로 표현된 인장강도의 방향에 따른 변화 예를 직교등방성과 횡등방성의 경우로 나누어 Fig. 6에

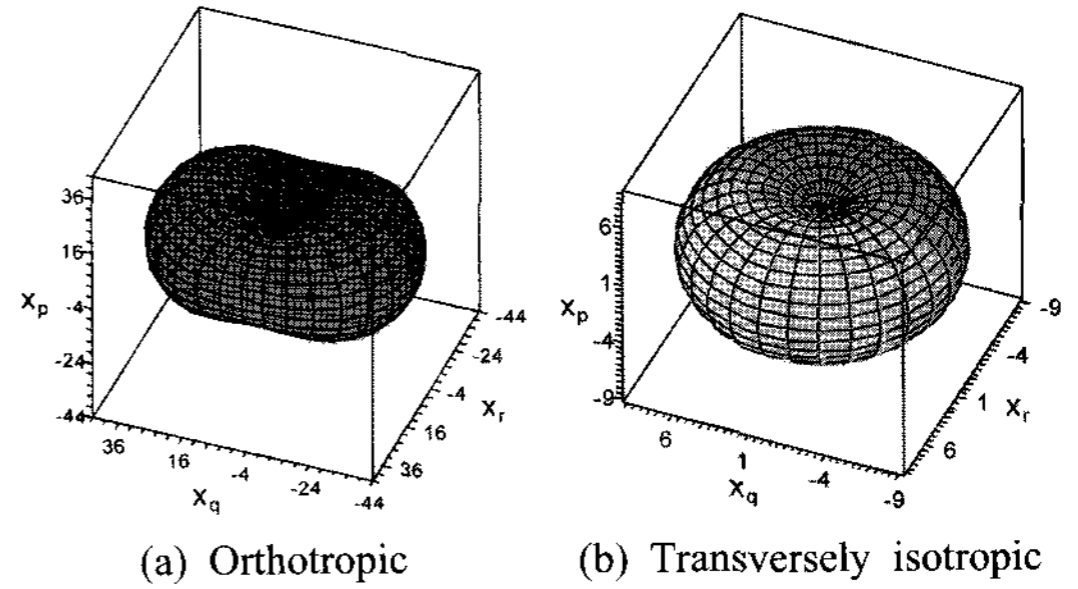


Fig. 6. Directional variations of tensile strength

도시하였다. 좌표계 중심으로부터 곡면까지 거리가 그 방향의 인장강도 크기를 의미한다. (a)에서 x_p 방향의 인장강도가 가장 작으며, (b)의 경우에도 x_p 방향이 연약면에 수직하다고 가정하였으므로 이 방향의 인장강도가 가장 작게 나타난다.

이제 식(1)과 식(12)를 고려하면 이방성 인장파괴함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F(\mathbf{n}) = \sigma_{ij} n_i n_j - S_1 - S_2 \exp(\Omega_{ij} n_i n_j) \tag{15}$$

모든 방향에 대해 $F < 0$ 이면 현재 응력조건에서는 인장 파괴에 도달되지 않았음을 의미한다. 그러므로 함수 F 가 최대가 되는 \mathbf{n} 을 찾고 해당 면에서 $F = 0$ 이면 이 면이 임계면이 된다.

F 를 최대로 하는 \mathbf{n} 는 다양한 최적화기법을 적용하여 찾을 수 있다. 이 연구에서는 직접 탐색법의 일종인 공액구배법(conjugate gradient method)(Press et al., 1992)을 이용하였다. 직접 탐색법을 적용할 경우에는 대상 함수의 그래디언트가 미리 구해져야한다. 식(15)의 \mathbf{n} 에 대한 그래디언트는 다음 식으로 표현됨을 보일 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial n_i} = 2\sigma_{ij} n_j - 2S_2 \Omega_{ip} n_p \exp(\Omega_{qr} n_q n_r) \tag{16}$$

2.4.2 이방성 인장파괴함수의 적합성 분석

앞 절에서 정의한 이방성 인장파괴함수는 횡등방성 암석의 경우 3개의 정수 S_1, S_2, Ω_0 를 이용하여 정의된다. 연약면의 경사각 β 를 달리한 2개 이상의 직접인장 시험으로부터 파괴면의 방향이 측정되면 주어진 Ω_0 에 대해 S_1, S_2 를 결정할 수 있다(Lee & Pietruszczak, 2008). 식(15)로 주어진 이방성 인장파괴함수의 적합성을 검토하기 위하여 이 절에서는 일축인장조건에서 Ω_0 의 변화에 따른 β 와 σ_β 의 관계 그리고 β 와 파괴면의 경사각 α 의 관계를 검토하였다.

$\beta=0^\circ$ 인 시료의 직접인장강도 S_t 가 2.0 MPa이며 $\beta=90^\circ$ 인 시료의 직접인장강도 S_T 가 8.0 MPa이라고 가정하고 Ω_0 가 -0.1, -0.5, -1.0, -3.0 인 4가지 경우에 대해 각각 S_1, S_2 를 계산하였다. 이 때 두 시료의 파괴면은 모두 하중 축과 수직하게 형성된 것으로 가정하였다.

각 Ω_0 에 대해 임계면법으로 예측된 β 와 σ_β 의 관계 곡선을 Fig. 7에 도시하였다. 비교를 위해 단일 연약면 이론과 Nova & Zaninetti의 이론으로 예측된 결과를 함께 도시하였다. 이 연구에서 제안된 이방성 인장파괴 함수를 이용하여 임계면법으로 예측된 횡등방성 암석의 일축인장강도는 단일 연약면 이론으로 예측된 값과 Nova & Zaninetti의 이론에 의해 예측된 결과의 사이에 놓여 있음을 볼 수 있다. $\Omega_0 \rightarrow 0$ 이면 임계면법으로 계산된 일축인장강도 곡선은 Nova & Zaninetti의 이론으로 계산된 결과에 가까워짐을 보여준다. 반면에 $\Omega_0 \rightarrow -\infty$ 이면 임계면법으로 계산된 강도곡선은 단일 연약면 이론의 결과에 접근함을 알 수 있다.

Fig. 8은 Ω_0 가 인장파괴면의 경사각 α 의 변화에 미치는 영향을 보여준다. 비교를 위해 Nova & Zaninetti의 이론에 의해 예측된 결과를 함께 도시하였다. 단일 연약면 이론에 따르면 $0^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ 의 범위에서는 연약면의 인장 파괴가 발생하고 $60^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 범위에서는 무결암질의 인장파괴가 발생한다. 무결암질이 파괴될 때 파괴면의 경사각은 0° 즉, 파괴면은 하중축에 수직이다. α 의 변화 특성도 $\Omega_0 \rightarrow 0$ 이면 임계면법의 결과는 Nova & Zaninetti의 이론에 의한 결과에 가까워지고, $\Omega_0 \rightarrow -\infty$ 이면 단일 연약면 이론의 결과에 가까워진다는 것을 알 수 있다.

단일 연약면 이론과 Nova & Zaninetti의 이론에서는 $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 범위의 α 와 σ_β 변화가 전적으로 S_t 와 S_T 에 의해 결정된다. 그러나 임계면법의 경우에는 α 와 σ_β 변화 형태가 Ω_0 의 영향도 받으므로 일축인장시험 결과를 더욱 근사하게 모사할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 $\beta=80^\circ \sim 90^\circ$ 부근에서 파괴면의 경사각은 Nova & Zaninetti의 이론보다 낮게 나타난다. 연약면이 인장하중 축과 대체로 평행할 경우 인장 파괴면의 경사각은 0° 에 가깝게 형성된다는 실험적 사실은 임계면법이 Nova & Zaninetti의 이론보다 파괴면의 경사각 예측에 적합하다는 것을 말해준다.

3. 횡등방성 암석의 일축인장시험 모사

Nova & Zaninetti(1990)가 규암질 편마암(quartzitic gneiss) 시료에 대해 실시한 일축 직접인장시험을 제안

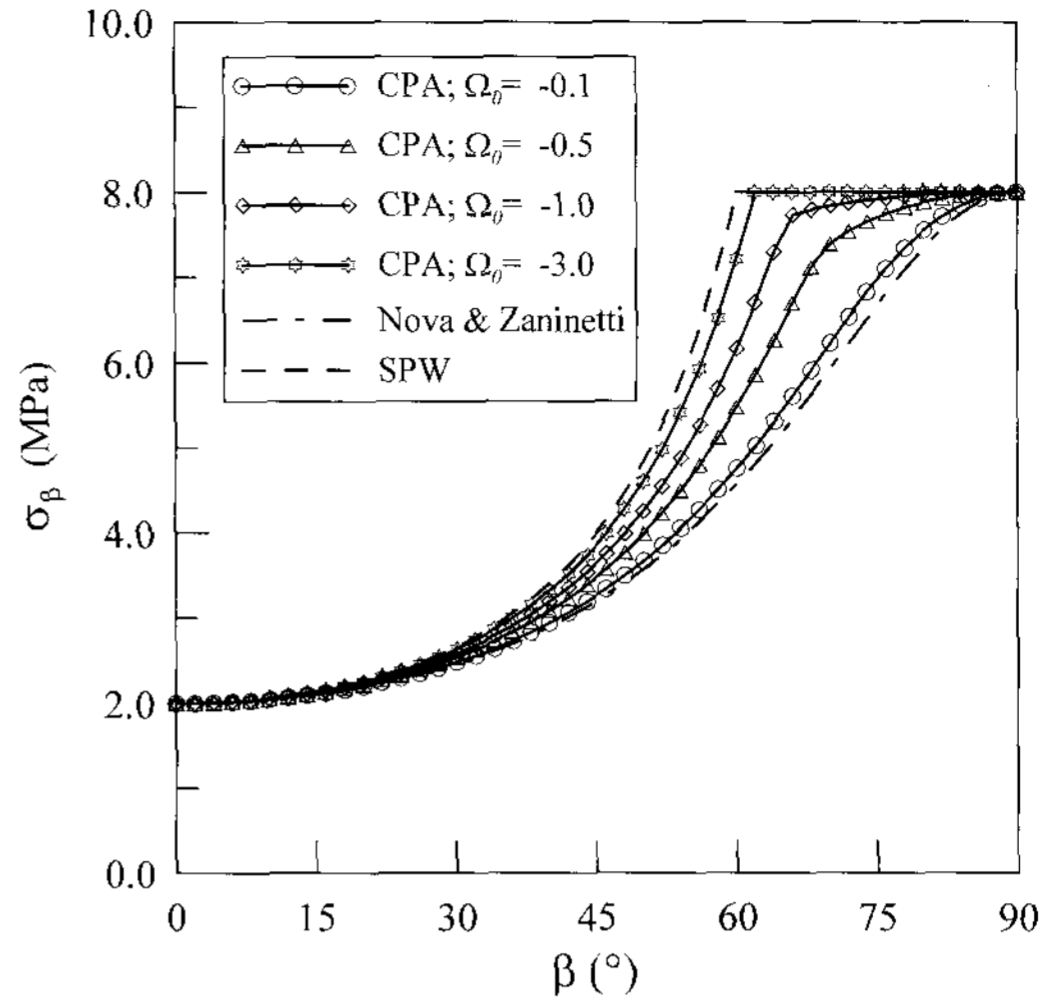


Fig. 7. Influence of Ω_0 on the variation of uniaxial tensile strength

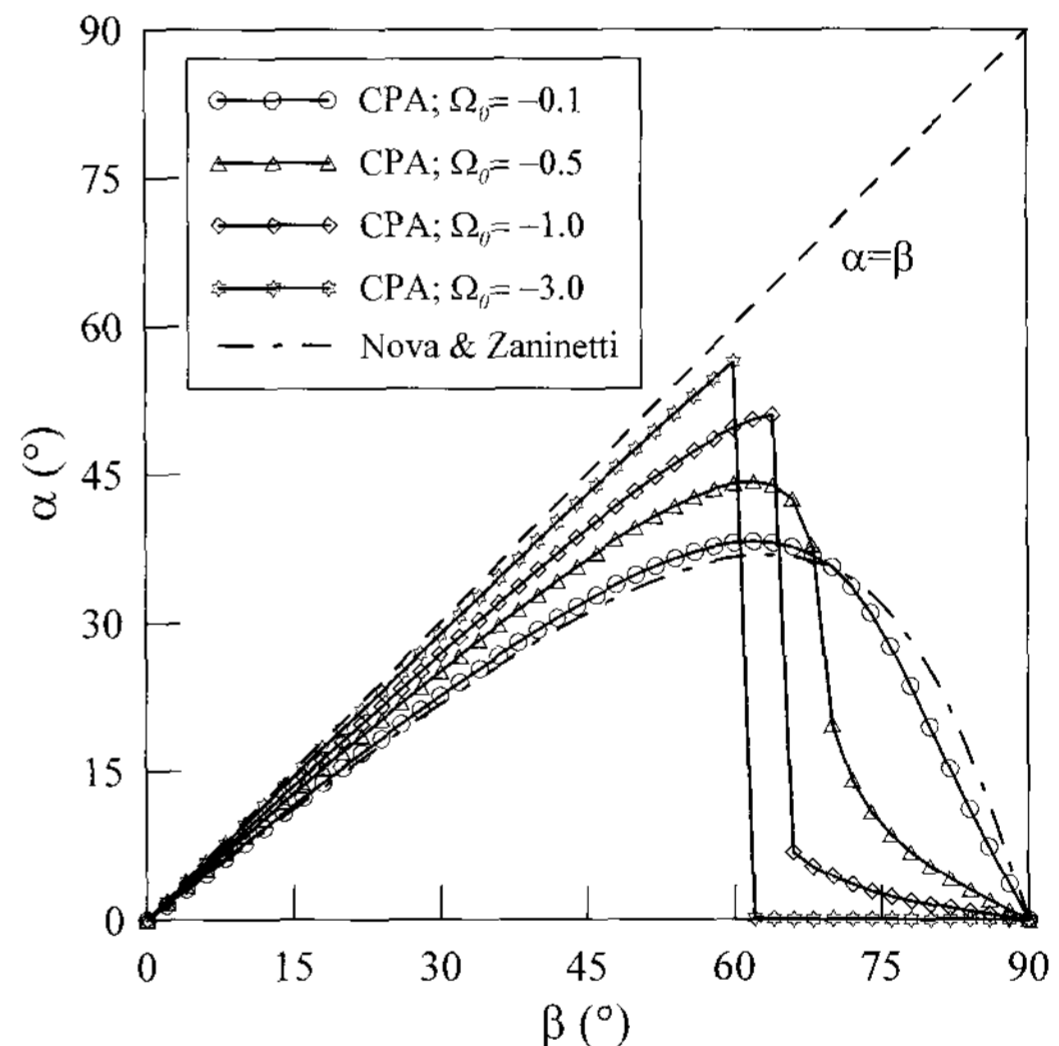


Fig. 8. Influence of Ω_0 on the inclination of tensile failure plane

된 임계면 모델로 모사함으로써 제안된 이방성 인장강도 모델의 적용성을 검토하였다. 이들은 연약면의 경사각 β 를 달리한 총 152개의 시료를 대상으로 직접인장시험을 실시하여 일축인장강도와 인장 파괴면의 경사각을 관찰하였으며 실험에서 $S_t = 2.49$ MPa, $S_T = 8.96$ MPa의 결과가 얻어졌다.

$\Omega_0 = -0.3$ 으로 가정한 후 임계면법을 적용하여 계산한 일축인장강도 σ_β 를 실제 실험결과, Nova & Zaninetti의 이론적 결과, 단일 연약면 이론으로 예측한 결과와 함께 Fig. 9에 도시하였다. 그림에서 실험결과는 (평균±

표준편차) 형태로 나타내었으며 임계면법을 적용한 경우가 실험결과에 가장 근접함을 볼 수 있다. 단일 연약면 이론은 일축인장강도를 과대평가함을 알 수 있다. 대체로 $0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ 범위에서는 3가지 이론의 예측치가 유사하지만 $45^\circ \leq \beta \leq 75^\circ$ 범위에서는 상당한 차이를 보여준다. Fig. 9는 임계면법을 이용한 이방성 인장강도 모델의 일축인장강도 예측치가 실제 실험결과를 잘 일치하고 있음을 보여준다.

β 의 변화에 따른 일축인장 파괴면의 경사각 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 10에 실험치와 이론치를 함께 도

시하였다. $0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ 범위에서 임계면법에 의한 예측치는 실험치와 매우 유사한 결과를 보여준다. 또한 $\beta = 75^\circ$ 와 $\beta = 90^\circ$ 인 경우에도 임계면법의 예측치와 실험치는 대체로 유사한 결과를 보여준다. 그러나 $\beta = 60^\circ$ 일때 예측치는 실험치와 다소 큰 차이를 보인다. 이러한 경향은 Nova & Zaninetti의 이론을 이용한 예측의 경우에도 나타난다. 그 원인을 규명하기 위해서는 향후 더 많은 실험적 연구가 필요할 것으로 판단된다. 전반적으로 임계면법에 의해 계산된 결과가 Nova & Zaninetti의 이론에 의해 예측된 경사각보다 실험치를 더 잘 모사하고 있음을 보여준다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 Lee & Pietruszczak (2008)이 압축응력조건에서 횡등방성 Hoek-Brown 암석의 이방성 강도 특성을 평가하기 위해 제안한 임계면법을 횡등방성 암석의 인장강도 이방성 해석에 확장 적용하였다. 임계면법과 더불어 단일 연약면 이론과 Nova & Zaninetti (1990)의 이론도 함께 고려하여 각 이론의 특성을 비교 분석하였다. 규암질 편마암에 대해 Nova & Zaninetti가 실시한 일축인장시험 결과를 이론적으로 모사해 봄으로써 각 이론의 적합성이 평가되었다.

제안된 임계면법은 이방성 파괴함수의 정의와 이 함수의 최적화를 통한 최대값 탐색으로 구성되어 있다. 이방성 파괴함수를 구성하는 인장강도 함수는 연약면에 수직한 방향에서 최소 인장강도 값을 나타내며 연약면에 평행한 방향 쪽으로 지수적으로 증가하는 특징을 갖는다. 정의된 이방성 인장파괴함수가 최대가 되는 방향은 직접탐색법의 일종인 공액구배법을 적용하여 탐색하였다. 제안된 임계면법은 일반적으로 직교등방성 암석에 적용할 수 있지만 이 연구에서는 그 적용을 횡등방성 암석으로 제한하였다.

매개변수 분석결과 단일 연약면 이론과 Nova & Zaninetti의 이론은 이 연구에서 제안된 임계면법의 두 극한 조건의 결과로 나타남을 알 수 있었다. 그러므로 제안된 임계면법은 단일 연약면 이론과 Nova & Zaninetti의 이론을 동시에 표현하고 있으므로 보다 일반화된 이방성 인장강도 예측모델이라고 할 수 있다.

제안된 임계면법의 적용성을 확인하기 위하여 Nova & Zaninetti의 직접인장시험 결과를 수치적으로 예측하였다. 제안된 이론에 의해 계산된 횡등방성 암석의 일축인장강도는 실험에서 얻어진 값들과 매우 근사한 결과를 나타냈다. 또한 연약면의 경사각이 낮은 시료에 대한 파괴면의 경사각도 예측치와 실험치는 매우 유사

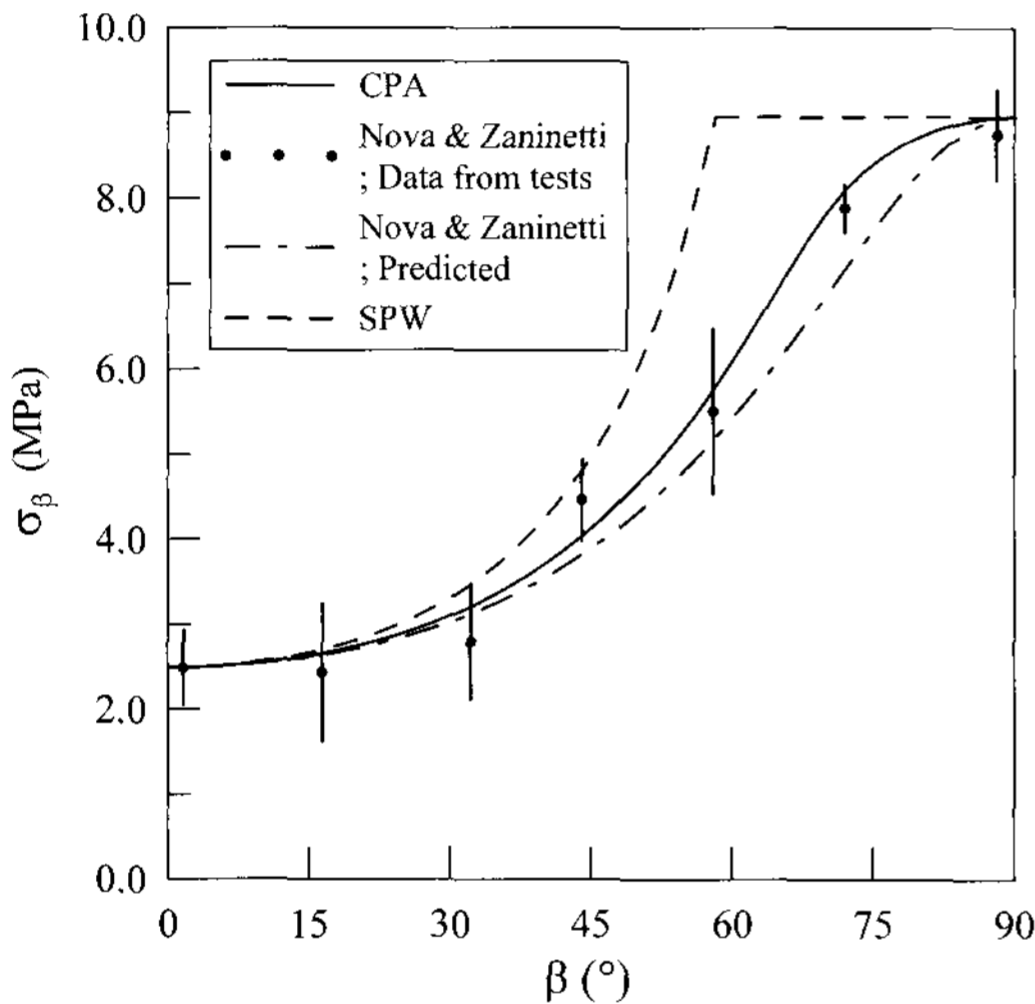


Fig. 9. Predicted and observed direct tensile strength; $\Omega_0 = -0.3$.

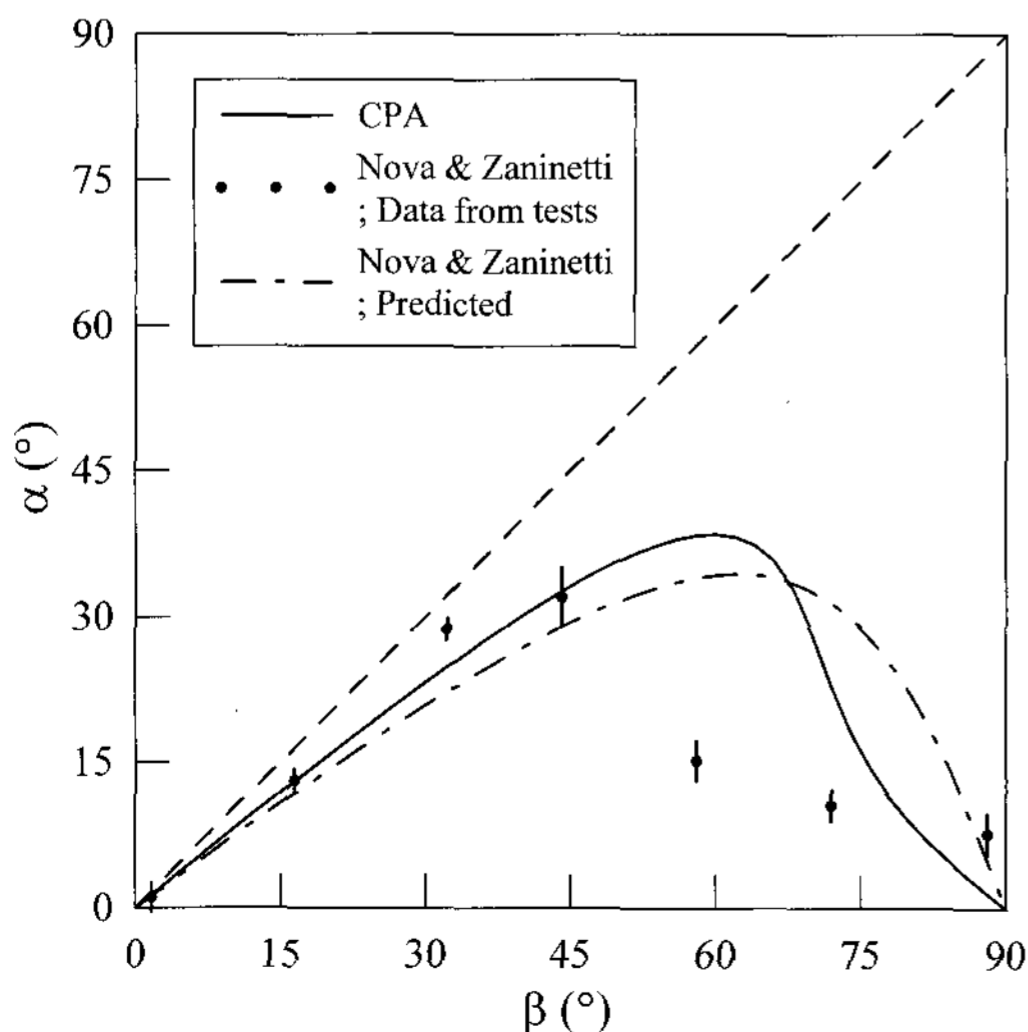


Fig. 10. Predicted and observed inclination of failure plane; $\Omega_0 = -0.3$.

하게 나타났다. 그러나 $\beta=60^\circ$ 일 때 예측치는 실험치와 다소 큰 차이를 보였다. 이러한 차이는 Nova & Zaninetti의 이론을 이용한 예측의 경우에도 나타났으며 그 원인은 차후 더 체계적인 실험적 연구를 통하여 규명될 연구과제로 판단된다.

횡등방성 암석의 인장강도 이방성을 해석하기 위해 이 연구에서 제안된 임계면법은 직교등방성 매질 및 3차원 응력조건에서도 적용이 가능하다. 앞으로 관련 실험적 자료가 확보된다면 이 연구의 결과를 직교등방성 암석의 인장강도 이방성 해석에도 적용할 예정이다.

사 사

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-521-D00587). 또한 논문의 심사과정에서 꼼꼼한 지적과 귀중한 조언을 주신 익명의 두 분 심사자에게 감사드린다.

참고문헌

1. 박철환, 2001, 이방성 암석의 탄성상수 분석연구, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지) 11(1), 59-63.
2. 이연규, 2007, 임계면법을 이용한 횡등방성 암석의 강도 예측, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지) 17(2), 119-127.
3. Amadei, B., 1988, Strength of a regularly jointed rock mass under biaxial and axisymmetric loading conditions. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 25(1), 3-13.
4. Chen, C.-S., Pan, E. and Amadei, B., 1998, Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian tests. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 35(1), 43-61.
5. Claesson, J. and Bohlooli, B., 2002, Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 39, 991-1004.
6. Donath, F.A., 1964, Strength variation and deformation behavior in anisotropic rock. In 'State of stress in the Earth's crust', W.R. Judd (Ed.), 281-298.
7. Exadaktylos, G.E. and Kaklis, K.N., 2001, Application of an explicit solution for the transversely isotropic circular disc compressed diametrically. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 38, 227-243.
8. ISRM, 1981, Rock characterization, testing and monitoring, ISRM suggested methods, E.T. Brown (Ed.), Pergamon Press Ltd.
9. Jaeger, J.C., 1960, Shear failure of anisotropic rocks. Geologic Magazine, 97, 65-72.
10. Lee, Y.-K., and Pietruszczak, S., 2008, Application of critical plane approach to the prediction of strength anisotropy in transversely isotropic rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 45, 513-523.
11. Liao, J.J., Yang, M.-T. and Hsieh, H.-Y., 1997, Direct tensile behavior of a transversely isotropic rock. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 34(5), 837-849.
12. McLamore, R. and Gray, K.E., 1967, The mechanical behaviour of anisotropic sedimentary rocks. Trans. Am. Soc. Mech. Engrs Series B, 62-76.
13. Nova, R., 1980, The failure of transversely isotropic rocks in triaxial compression. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 17, 325-332.
14. Nova, R. and Zaninetti, A., 1990, An investigation into the tensile behavior of a schistose rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 27(4), 231-242.
15. Pietruszczak, S. and Z. Mroz, 2001, On failure criteria for anisotropic cohesive-frictional materials. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 25, 509-524.
16. Pietruszczak, S., D. Lydzba, and J.F. Shao, 2002, Modelling of inherent anisotropy in sedimentary rocks. Int. J. Solids Struct. 39, 637-648.
17. Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery, 1992, Numerical recipes in Fortran. Cambridge University Press.
18. Ushaksaraei, R. and S. Pietruszczak, 2002, Failure criterion for structural masonry based on critical plane approach. J. Eng. Mech. 128(7), 769-778.
19. Whittles, D.N., Yasar, E., Reddish, D.J. and Lloyd, P.W., 2002, Anisotropic strength and stiffness properties of some UK coal measure siltstones. Quart. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 35, 155-166.

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 해양시스템 공학전공 부교수