

## 영주지역 압쇄암의 공학적 특성 연구

### Engineering Properties of Mylonite in the Youngju Area

김 성 옥<sup>1</sup> Kim, Sung-Wook

최 은 경<sup>2</sup> Choi, Eun-Kyeong

양 태 선<sup>3</sup> Yang, Tae-Sun

이 규 환<sup>4</sup> Lee, Kyu-Hwan

#### Abstract

The area to be studied is the place where the main line rail way will be constructed in accordance with the scheduled construction project of Yeongju dam, and is a fold and mylonite zone over several km that is formed by ductile-shearing effect. The ductile shear zone, which has been transformed by faulting for long geological time, shows a complicated geological structure. Due to the recrystallization of mineral caused by transformation in deep underground (>8km), a mylonite zone with lamellar structure has properties distinguished from other fault zones formed by transformation near earth surface (<2km). To see the properties of mylonite, this study analyzed the transformation rate of sample rocks and the shape of constriction structure accompanied with transformation. While the transformation of fault zone shows a round oblate, the mylonite zone shows a prolate form. Transformation rate in fault zone was measured to be less than 1.2 compared to the state before transformation while the measured rate in mylonite zone was 2.5 at most. Setting the surface of discontinuity as the base, the unconfined compressive strength of slickenside can be categorized in sedimentary rocks, and a change of strength was observed after water soaking over certain time. Taking into account that the weathering resistance of the rock based on mineral and chemical organization is relatively higher, its engineering properties seems to result from the shattered crack structure by crushing effect. When undertaking tunnel construction in mylonite zone, there should be a special care for the expansion of shattered cracks or the fall of strength by influx of ground water.

#### 요 지

본 연구의 대상지역은 영주댐 건설로 인해 이설되는 중앙선 철도 건설 예정지로 수 km에 걸쳐 연성전단작용에 의한 습곡과 압쇄암이 분포한다. 연성전단대는 지질시대 동안 작용한 단층작용으로 변형되어 복잡한 지질구조를 보인다. 연성전단대는 고온고압의 지하심부(>8km)에서 작용한 변형에 의한 광물의 재결정 작용으로 엽편상의 유동조직을 가지는 압쇄암이 발달하며, 이로 인해 지표부근(<2km)의 변형으로 형성된 단층대와 구별되는 공학적 특성을 가진다. 압쇄암의 특성을 파악하기 위해 시편으로 제작된 암석을 대상으로 변형률과 변형에 수반된 압축구조의 모양을 분석하였다. 단층대의 변형된 모양은 엽편상의 편원(oblate)한 모양이 우세한 반면 압쇄대는 광물의 신장에 의한 편장(prolate)한 형태가 우세하다. 변형률은 변형이전 상태를 기준으로 단층대가 1.2배미만의 변형을 보이는 것에 비해 압쇄대는 최대 2.5배의 변형을 나타내는 것으로 분석되었다. 불연속면을 기준으로 적용한 암반분류에서 경암의 일축압축강도는 연암정도의 강도를 보였으며, 일정 시간 수침 후에 강도의 변화가 관찰 되었다. 본 연구결과와 조사된 암석들의 공학적 특성은 광물조성과 화학 조성에 기초한 풍화저항력이 비교적 높은 것을 고려할 때 압쇄작용에 수반된 미세균열구조에 의한 것으로 판단되었다. 따라서 압쇄암이 넓게 분포하는 지역에서 터널굴착을 하는 경우, 미세균열에 의한 팽창과

1 정희원, (주)지아이, 지반정보연구소 대표이사 (Member, CEO, GI Inc., Geo-Information Research Group)

2 정희원, (주)지아이, 지반정보연구소 부장 (Member, General Manager, GI Inc., Geo-Information Research Group)

3 정희원, 김포대학 건설정보과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kimpo Univ.)

4 정희원, 건양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Konyang Univ., khlee@konyang.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

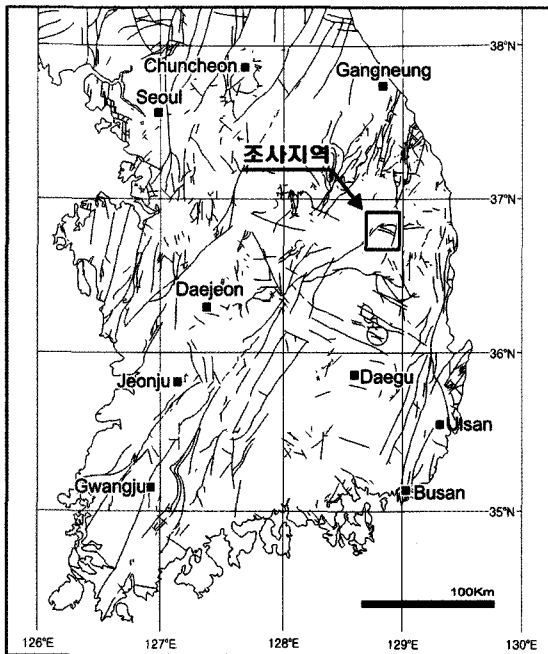
지하수 유입에 의한 강도저하가 발생할 수 있으므로 시공시 각별한 주의가 필요한 것으로 판단되었다.

**Keywords :** Crushing effect, Ductile shear zone, Mylonite, Recrystallization

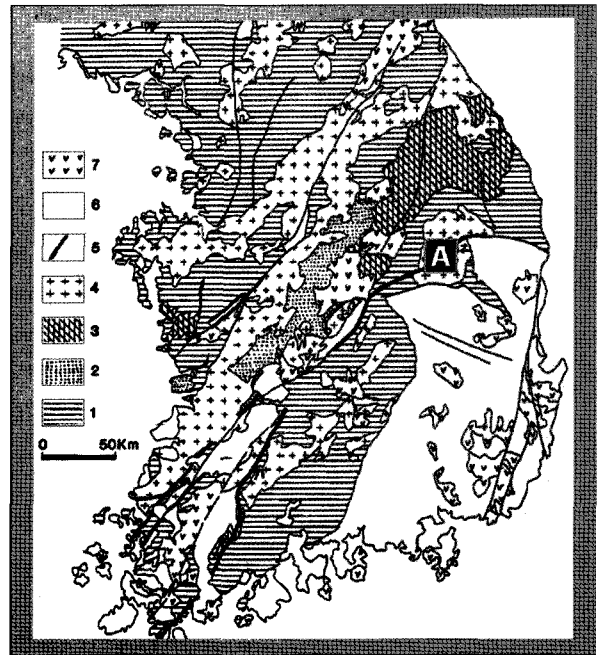
## 1. 서론

본 논문의 연구 대상지역은 영주지역 중앙선 철도 건설 예정지로 옥천조간대의 남동경계를 따라 북동-남서 방향으로 연성전단작용에 의해 형성된 수 km규모의 예천전단대가 발달하며, 전단작용에 의해 습곡과 압쇄암이 발달하고 있다. 또한 연성전단활동 이후 발생한 동서 방향의 용혈리 단층과 북북동-남남서 방향의 내성천 및 오우리 단층이 위치하고 있어 복잡한 지질구조를 형

성하고 있다. 그림 1은 본 연구에서 다루고 있는 예천전단대의 위치이며 그림 2는 기존에 발행된 지질도와 연구자들에 의해 제작된 조사지역의 광역지질도와 본 연구에서 지표지질조사를 통해 작성한 지질도이다(장태우, 1990; 1991). 연구 대상지역의 기반암은 소백산 육괴로 선캄브리아기 변성퇴적암류를 기저로 하여 트라이아스기말-쥐라기 동안 관입한 대보화강암으로 구성 되어 있다.

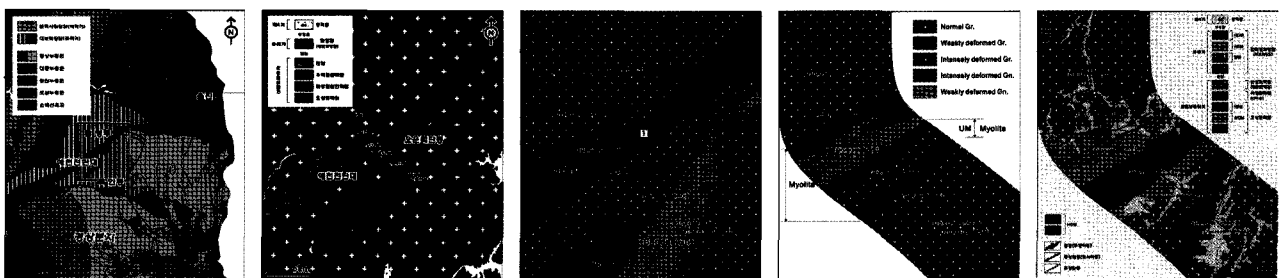


(a) 연구대상 지역



(b) 예천전단대

그림 1. 연구대상지역 및 예천전단대



1/100만

1/25만

1/5만

1/5만

1/5만

(a) 지질도

(b) 장태우(1991)

(c) 본 조사

그림 2. 지질도

## 2. 지질

### 2.1 연성전단대

지표에서 단층이 형성될 때 지하 깊은 곳에서는 온도와 압력이 상승하여 연성적인 유동이 일어나고, 재결정 작용을 동반한 엽편상의 유동조직을 가지는 압쇄암(mylonite)이 생성된다. 압쇄암은 심부 8km 이상에서 고온(>200°C) 고압의 연성전단작용에 의해 형성되는 것으로, 노선에 정지 일원에서 광물의 파쇄와 신장에 의한 선 구조와 압축력에 의한 엽편상구조, 소습곡 및 인장된 부딘구조(boudinage structure)가 관찰되었다. 노선의 시점과 종점부는 엽리구조가 발달하고 있으나 노선의 중앙부에서는 신장선구조와 지층이 역전된 소습곡 및 엽편상구조의 빈도가 증가하여, 노선 중앙부로 갈수록 압쇄정도가 증가하고 있다(그림 3). 이러한 압쇄암(ductile deformation)이 발생하는 지역은 단층(brittle deformation)이 주로 발달하는 지역과는 다른 공학적 특성을 보일 것으로 예상되므로 연성전단작용을 받은 암석의 특성을 파악하고, 터널과 같은 구조물 시공시 미치는 영향 범위를 파악하기 위해 기반암에서의 풍화와 변형 정도에 대한 분석을 수행하였다.

### 2.2 지체구조발달시기 및 특징

연구대상지역 일원의 지체구조발달은 예천전단대가 형성되는 시기를 경계로 하여 이전 시기에 나타나는 변성작용과 이후 시기의 단층작용시기로 크게 구분되며, 이를 4단계로 구분하여 그 시기와 특징을 정리하였다(진명식 외, 1999; 강지훈 외, 2000; 김성원 외, 2008). 1단계

는 선캄브리아기-고생대의 변성작용시기로 기저(basal)를 이루는 편암 및 편마암이 형성되고 습곡구조가 발달하는 시기로 이 기간 동안 횡압력에 의한 광역변성작용으로 편마암복합체(소백산육괴)가 형성되었다. 2단계는 중생대 트라이아스기-초기 쥐라기 동안 대보화강암 관입시기로 이 시기는 한중지괴와 남중국지괴의 충돌이 시작되는 시기에 해당되며 대륙의 충돌에 의해 발생한 인장균열대를 따라 대보화강암이 관입하고, 예천전단대 이전의 변형운동으로 인해 화강암에 엽리구조가 형성되었다. 3단계는 연성변형작용 시기인 중생대 후기 쥐라기(150-160백만년)에 해당되며, 북동-남서 방향으로 우수향 연성전단대(호남전단대)가 형성되고 충돌 후기에 예천전단대가 분기되어 형성되는 시기로 북동-남서 및 동-서 방향의 구조선 발달한다. 이 시기가 연구 대상 지역에 발달하는 고 변형의 신장선구조, 압쇄구조 및 비대칭형 습곡구조가 형성된 시기이다. 4단계는 중생대 백악기의 단층작용시기로 남-북 방향으로 압축력이 작용하여 북북동 방향의 주향이동단층(내성천단층, 오우리단층)이 형성되고 단층대 주변으로 열수가 주입되어 산발적으로 열수변질대를 형성한 시기이다.

### 2.3 구성광물

X-선 회절분석에서 나타난 주요구성 광물은 석영, 사장석, 정장석, 운모 등의 광물이 우세하며, 소량의 점토 광물을 포함하고, 일부에서는 적철석, 각섬석, 자철석, 방해석이 관찰되었다. 화강암은 변형 정도가 큰 암석에서 카올린나이트, 일라이트 등의 점토광물의 함량이 증가하며, 변성퇴적암은 변형과 풍화과정에서 스멕타이트의 함량이 증가하고, 호상편마암의 압쇄암은 재결정작

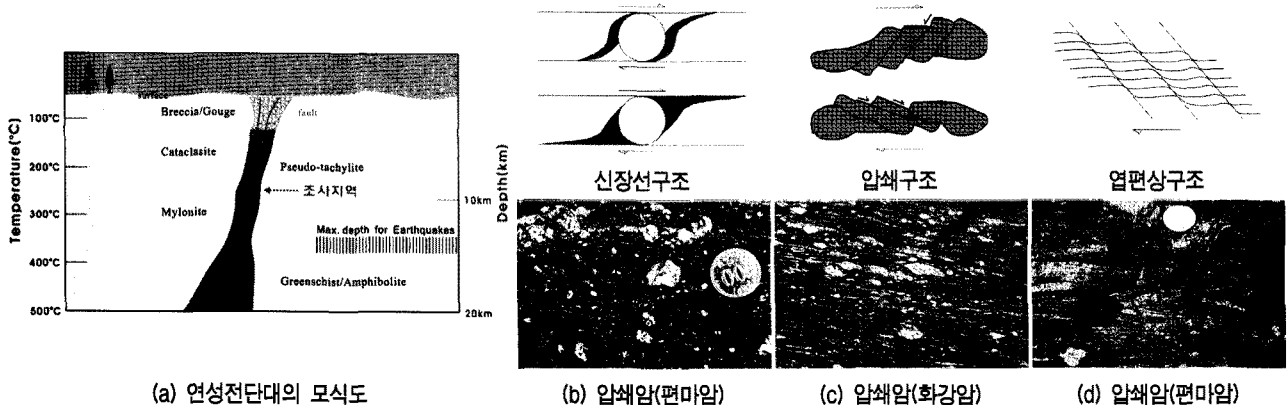


그림 3. 연성전단대의 모식도와 연구지역 암석의 압쇄구조

용으로 인해 점토광물의 함량은 감소하고 운모류의 함량이 증가하는 경향을 보였다.

### 3. 지질공학적 특성

단층물질과 구별되는 압쇄암의 특성을 파악하기 위해 수침에 의한 내구성, 일축압축강도, 변형률을 측정하여 압쇄암의 지질공학적 특성을 판단하는 자료로 활용하였다.

#### 3.1 변형물질의 내구성

암석이 지표환경에 노출되면 내구성이 저하되며, 변질은 대부분의 경우 노출된 표면에서부터 시작된다. 이러한 작용은 수년에서 수십 년에 걸쳐서 발생하게 되므로 단층작용에 수반된 단층점토(gouge), 변질점토, 열수변질대는 팽윤성 광물에 의한 팽창압을 발생시키지 않는 경우라 하더라도, 변형에 의한 전단강도의 저하와 내마모성이 감소하여 지하수에 의한 붕괴를 유발시킨다.

연구대상지역에 분포하는 변형물질(단층점토, 열수변질대, 압쇄암)을 대상으로 건조와 습윤 조건을 반복하여 단순 슬레이크 내구성을 평가하였다. 실험은 코어형태로 획득한 원통형 변형물질을  $100 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 오븐에서 24시간 건조된 시료를 침수시킨 후 변화를 관찰하였다(그림 5).

단순 슬레이크 내구성시험에서 단층에 수반된 열수변질대는 수침과 함께 타수가 발생하며, 30분 내에 완전히 붕괴되었고, 단층점토는 수침초기 붕괴가 발생하며, 24

시간 경과시까지 점이적인 슬레이크 현상이 관찰되었다. 압쇄암은 열수변질에 의한 변질물이나 단층물질과 같은 슬레이크 현상은 관찰되지 않았으나 지속적으로 함수에 의해 시료 표면에 기포가 발생하고 시료의 팽창이 관찰되었다. 단순 슬레이크 내구성 구분기준에서 열수변질물은 “moderate”에 해당하며, 단층점토는 “slow”에 해당한다.

Franklin and Chandra(1972)에 의하여 제안된 슬레이크 내구성은 암석의 변질에 대한 내구성의 상대적 등급을 나타내며 연구대상지역에 발달하는 변형 및 변질물질의 내구성 지수 등급은 열수변질대는 “중-고정도의 내구성”을 보이며 그 외 변형물질은 “고 내구성” 또는 “극히 높은 내구성”을 보였다.

#### 3.2 강도특성

GCTS사의 PLT-100 일축압축 시험장치를 이용하여 암종별 일축압축강도를 측정하고 변형에 따른 변화를 관찰하였다. 변형정도가 큰 화강암과 호상편마암은 압쇄암(HDM; highly deformation)으로 함께 묶어서 분류하였으며, 화강암-편암에서 나타나는 변형이 심한 경우는 WDM(weakly deformation)으로 표기하였으며, 단순 풍화에 의한 경우는 WR(weathered rock)이라는 약어로 표기하였다. 연구대상 지역에 분포하는 암종에서 측정된 일축압축강도는 13.9-108.6MPa 범위를 보였으며, 이중 연성전단대의 압쇄암은 상대적으로 작은 범위의 압축강도를 보였다. 암종별 일축압축강도의 평균값은 호

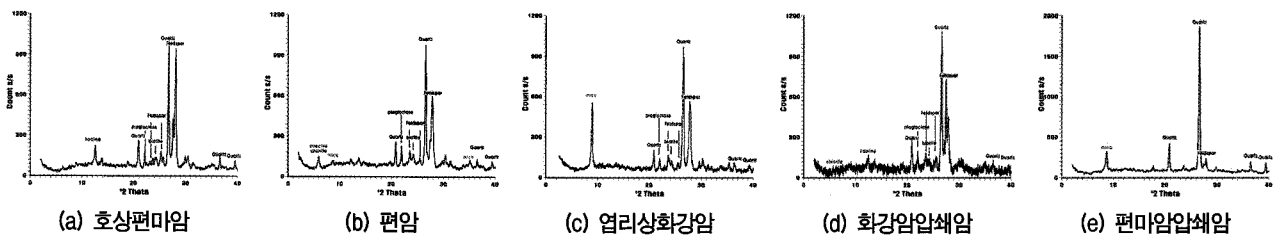


그림 4. 암종별 X-선 회절분석

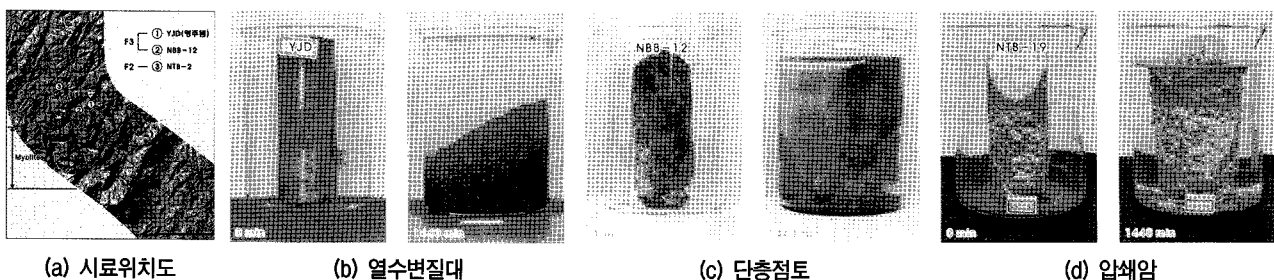


그림 5. 단순 수침 실험

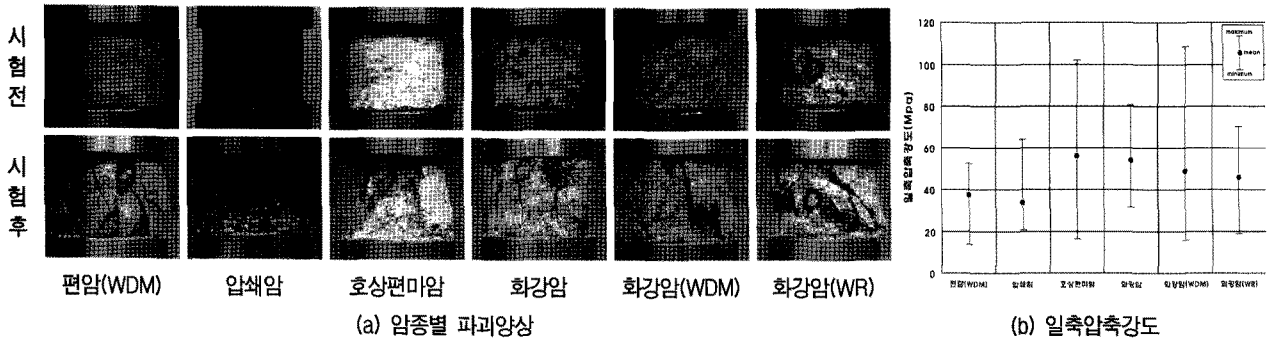


그림 6. 암종별 파괴양상과 압축강도

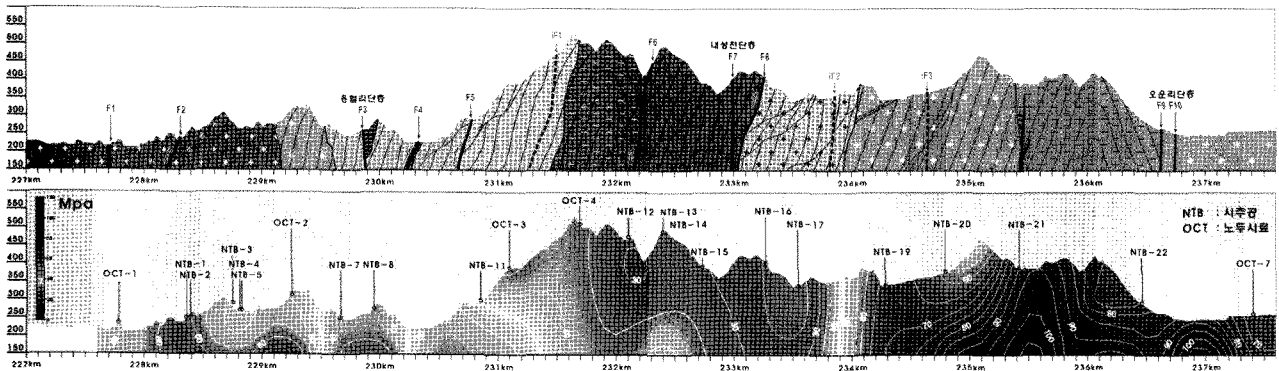


그림 7. 지질단면 및 일축압축강도분포

상편마암 > 화강암 > 화강암(WDM) > 화강암(WR) > 편암(WDM) > 압쇄암(HDM) 순으로 측정되었다. 압쇄 작용의 영향이 크기 않은 암석은 절리면 또는 엽리면을 따라 파괴가 발생하였으며, 압쇄암은 압축력의 작용방향으로 체적 변화가 발생하고 파괴시 광물 입자가 응집되는 현상이 관찰되었다. 호상편마암이나 화강암(WDM)의 경우에는 다른 암종에 비하여 편차가 크게 나타나지만 압쇄암과 화강암은 강도의 편차가 작게 관찰되었다(그림 6).

그림 7은 노선에정지 시편에서 측정된 일축압축강도 분포를 나타낸 것으로 압축강도는 20-1,100MPa의 범위를 보이며, 압쇄암 분포지역에서 가장 작게 측정되고, 연성 전단대에서 멀어질수록 큰 값을 보였다. 노선 중앙부를 통과하는 연성전단대를 기준으로 전단대에서 멀어질수록 강도가 점진적으로 증가하는 경향을 보이며, 화강암은 시점부에 비해 종점부 암석의 압축강도가 크게 나타났다.

#### 4. 응력장 및 변형률

##### 4.1 개요

암석은 형성 초기에 등방성을 가지며, 외부에서 작용

하는 압력의 방향과 크기에 의해 이방성이 형성된다. 선 구조 및 엽리구조 등의 이방성 변형구조는 연직하는 세 축의 길이에 의한 이방성 텐서로 표현되며,  $3 \times 3$  대칭구조의 변형력 텐서로 정의되는데 이방성 텐서로부터 고유벡터와 고유값을 계산하면 각 시편에 대한 주축의 방향과 크기가 결정되며 세 주축은 크기에 따라  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )로 나타낸다(그림 8).

방위별로 측정된 조암광물의 대자율을 이용하여 자기적 이방성을 판별하고, 이를 토대로 변형 구조를 파악할 수 있다. 즉 대자율 이방성텐서의 대칭구조와 계산식은 변형력텐서와 일치하며, 주축의 크기에 따라  $k_1, k_2, k_3$  ( $k_1 > k_2 > k_3$ )로 표현되며, 각 주축은 변형력의  $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$ 에 해당된다. 본 연구에서는 암석시편의 대자율축의 방향과 크기를 측정하고  $k_1, k_2, k_3$  주축의 상대적 크기로부터 이방성타원체의 모양을 결정하고 변형정도와 변형력의 방향성을 분석하였다.

암석에 기록된 응력은 수평응력( $M_h$ )과 수직응력( $M_v$ )의 합력(합벡터,  $M_t$ )로 나타나며, 변형력타원체 주축의 편각(방위각)과 복각(경사)로부터 합력을 수직성분과 수평성분으로 구분하고 크기의 정도를 표현할 수 있다. 대자율 이방성의 크기 정도를 판별하는 기준인  $P_s$ 는 식

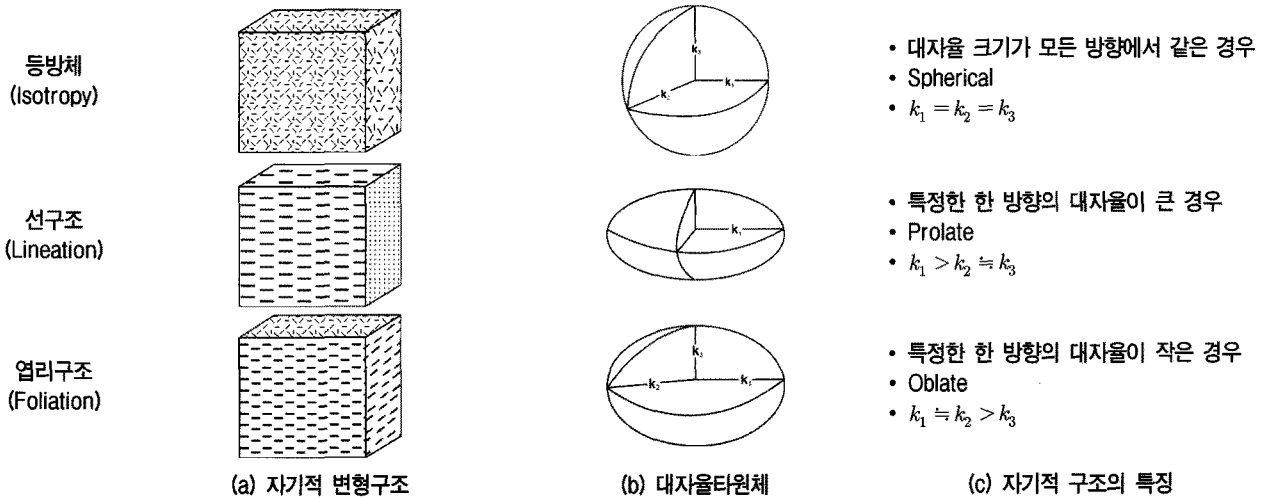
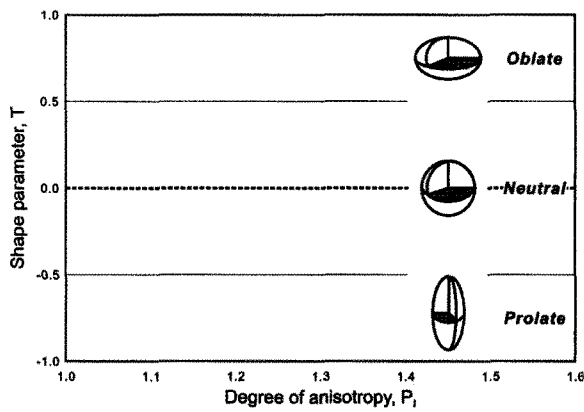
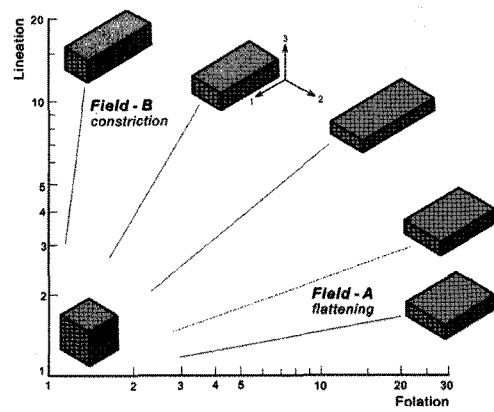


그림 8. 암석의 자기적 변형구조



(a) Flinn 다이어그램



(b) T-Pj 다이어그램

그림 9. 변형정도 판별그래프

(1)과 같으며, 선구조와 엽리구조를 구분하는 대자율 타원체의 모양지수  $T$ 는 식 (2)와 같다.

$$P_j = \exp \sqrt{2[(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]} \quad (1)$$

여기서,  $\eta_1 = \ln k_1$ ,  $\eta_2 = \ln k_2$ ,  $\eta_3 = \ln k_3$ ,  $\eta_m = \sqrt[3]{\eta_1 \eta_2 \eta_3}$

$$T = [2(\eta_2 - \eta_3) / (\eta_1 - \eta_3)] - 1 \quad (-1 \leq T \leq 1) \quad (2)$$

$T-P_j$  다이어그램은 변형력의 정도와 암석에 기록된 응력이 자기적 구조는 선구조(flow lineation)가 우세하게 나타나는지(편장영역), 상위 지층의 하중이나 지구구조적 응력에 의해서 형성된 엽리구조(foliation)가 우세하게 나타나는지(평원영역)를 동시에 나타낼 수 있으며, 편장영역에서 신장 또는 흐름은  $k_1$  방향에 해당되며, 평원영역에서 작용된 외력은 엽리구조에 수직인  $k_3$  축 방향에 해당된다. 이때  $k_3$  축 방향이 층리면에 수직인 경우

는 엽리구조가 지층의 하중에 의한 것(load foliation)으로 해석되며 그렇지 않은 경우는 지구구조적 응력작용에 의한 것(tectonic foliation)으로 구분된다.

Flinn 다이어그램의 경우도  $T-P_j$  다이어그램과 같이 변형력과 함께 선구조와 엽리구조를 표현할 수 있으며, 선구조는  $k_1/k_2$ 의 비로 표현되며, 광물의 신장 또는 흐름에 의한 배열정도를 나타내고, 엽리구조는  $k_2/k_3$ 의 비율로 나타내며 압축력에 의한 엽리의 발달 정도를 나타낸다(그림 9).

#### 4.2 변형률

대자율 이방성의 주축( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ )의 크기를 이용하여 변형률 타원체의 모양과 이방성 정도로 산정하였다. 노두시료의 변형률 타원체 모양은 압축력에 의해 형성된 편원(Oblate) 영역이 우세하며, 최대 변형률( $P_j$ )은 1.58

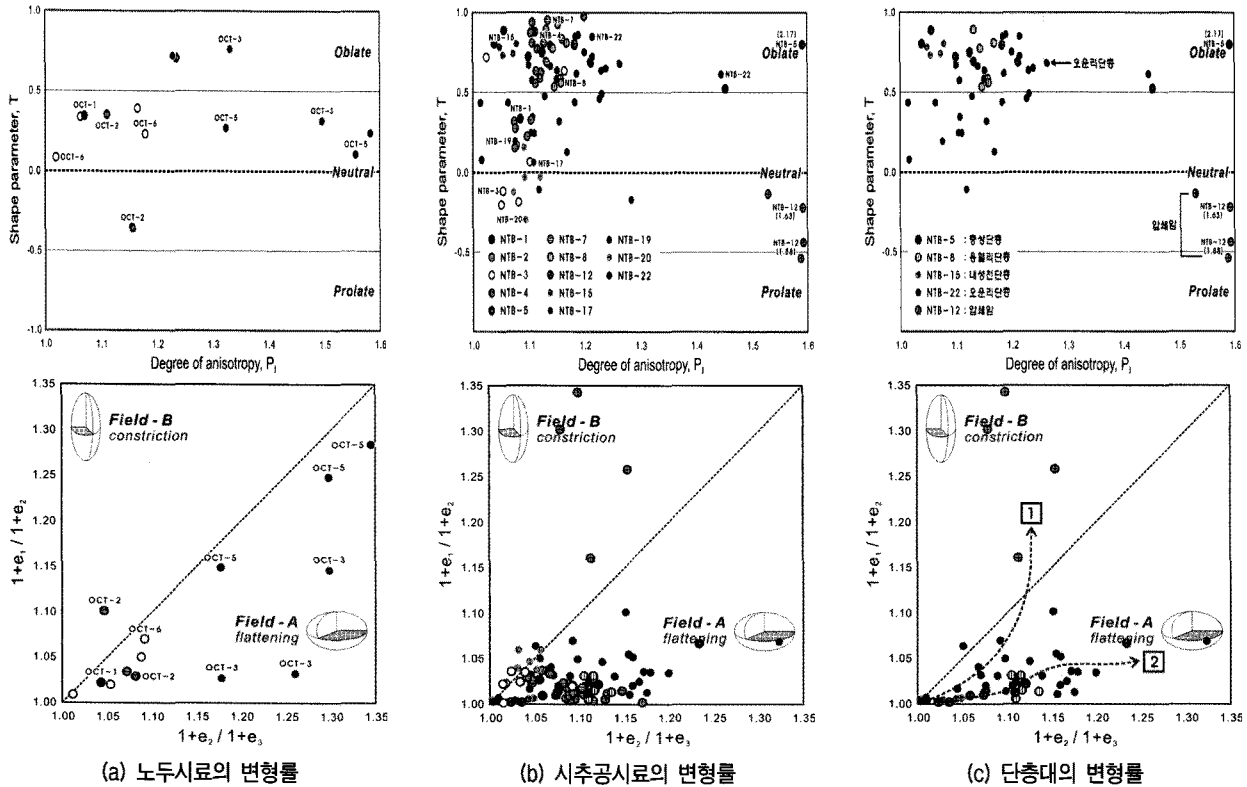


그림 10. 변형률

로 연성전단대의 압쇄암(OCT-5)에서 관찰되며, 변형률 증가에 비례하여 체적 감소의 변형이 나타나고, 변형정도( $P_1$ ) 1.3이상에서 등방체 모양으로 변화되었다.

시추된 코어시료의 변형률 타원체 모양은 압축력에 의해 형성된 편원(Oblate) 영역이 우세하며, 압쇄암은 광물의 신장에 의한 편장(Prolate)한 선구조(NTB-12)가 우세하고, 전단대 시료인 연성전단대 압쇄암의 변형률( $P_1$ )은 최대 1.88에 달하며, 체적의 감소와 광물의 신장으로 선구조 영역(Field-B)의 변형경로를 보였다.

단층의 변형정도는 연성전단대의 압쇄암에 비해 매우 작은 변형정도를 나타내며, 압축력에 의해 편원(Oblate, Field-A)한 변형 경로가 나타났다. 용혈리 단층과 내성천단층대의 변형정도는 1.2미만이며, 심도에 따른 변형의 정도가 거의 일정한 반면 오운리단층은 변형률의 범위가 넓게 분산되어 단층 영향대 주변에 변형이 집중되는 것으로 판단되었다. 압쇄대에 발달하는 층상단층 파쇄대의 변형은 2.0이상으로 매우 심한 변형이 보이며, 일종의 역단층인 층상단층(thrust fault)에서 멀어질수록 변형정도가 급격하게 감소하게 되는데 이를 통해 변형이 단층대 일원에 집중되는 것을 추측 할 수가 있었다.

### 4.3 응력장

등적면투영도에 대자율 이방성 주축의 방향을 표시하고, 주축의 분포로부터 응력장의 작용 방향을 산정하였다. 노선 예정지의 구간별 압축력( $k_3$ ,  $\sigma_1$ )과  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ 의 분산 및 균집 정도에 따라 8개의 응력장 영역으로 구분하고, 예정노선의 변형률분포 단면도를 작성하였다.

최대 변형은 연성전단대의 층상단층이 발달하는 지점에서 관찰되며, 시점 및 종점으로 갈수록 변형 정도가 감소하였다. 응력장의 작용 방향은 서북서-동남동 방향이 우세하며, Domain-2는 상부지층의 하중(Load foliation)이 가장 우세하게 작용한다. 연성전단대에 해당하는 Domain-4, Domain-5는 신장방향을 나타내는  $k_1(\sigma_3)$ 의 방향이 북동-남서 방향으로 균집되어 엽리와 압쇄에 의한 신장구조가 동시에 발달하며, Domain-3과 Domain-6은  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  방향이 분산되어 엽리구조가 우세하게 나타났다. 용혈리 단층대의 압축력 작용방향은 동-서에 가깝고, 오운리 단층대(Domain-8)는 북동-남서 방향으로 압축력의 방향이 변화되며, 노선의 방향이 시점부의 북북서-남남동 방향에서 종점부로 갈수록 북동-남서방향으로 변함에 따라 응력작용 방향과의 교차각의 변화가 발생하였다. 노선과 응력장의 교차각은 종점부(Domain-8)에서 71.85도가

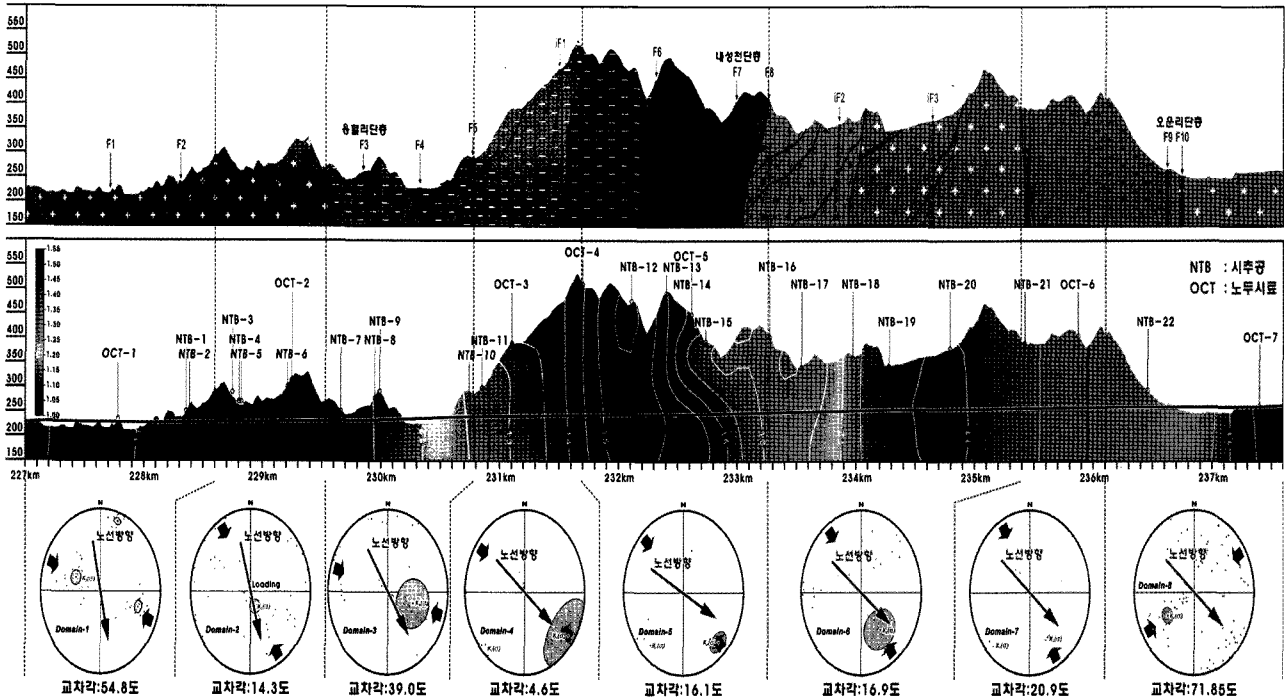


그림 11. 노선구간의 변형률 및 응력장의 방향

표 1. 응력의 작용방향과 특징

응력 작용 방향	영역	작용순서	특징		최대변형률
중력(수직) 방향	Domain-2	①	지층 하층 엽리구조	-	1.18
	Domain-1, 6, 7	②	엽리구조	-	1.30
WNW-ESE	Domain-4, 5		신장구조/엽리구조	압쇄암	1.55
E-W	Domain-3	③	엽리구조	용혈리단층	1.25
NE-SW	Domain-8	④	Sta.8+820-종점	오운리단층	1.15

가장 크게 나타나며, 중앙부(Domain-6)에서 4.6도로 가장 작게 나타났다(그림 11, 표 1).

## 5. 결론

본 연구의 대상지역은 영주댐 건설로 인해 이설되는 중앙선 철도 건설 예정지로 수 km에 걸쳐 연성전단작용에 의한 습곡과 압쇄암이 분포한다. 연성전단대는 이후 지질 시대 동안 작용한 단층작용으로 변형되어 복잡한 지질구조를 보인다. 연성전단대는 고온고압의 지하심부(>8km)에서 작용한 변형으로 인한 광물의 재결정 작용으로 엽편상의 유동조직을 가지는 압쇄암이 발달하며, 이로 인해 지표부근(<2km)의 변형으로 형성된 단층대와 구별되는 공학적 특성을 가진다. 압쇄암의 특성을 파악하기 위해 시편으로 제작된 암석을 대상으로 변형률과 변형에 수반된 압축구조의 모양을 분석하였다. 단층대의 변형된 모양은 엽리상의 편원(oblate)한 모양이 우세한 반면 압쇄대는

광물의 신장에 의한 편장(prolate)한 형태가 우세하며, 변형률은 변형이전 상태를 기준으로 단층대가 1.2배미만의 변형을 보이는 것에 비해 압쇄대는 최대 2.5배의 변형을 나타내는 것으로 분석되었다. 불연속면을 기준으로 적용한 암반분류에서 경암의 일축압축강도가 연암정도에 해당하며, 일정 시간 수침 후 강도의 변화가 관찰되었다. 본 연구 대상지역에 분포하는 암석의 공학적 특성은 광물조성과 화학 조성에 기초한 풍화저항력이 비교적 높은 것을 고려할 때 압쇄작용에 수반된 미세균열구조에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 압쇄암이 넓게 분포하는 지역에서 터널굴착 공사를 하는 경우에는 미세균열의 팽창과 지하수 유입에 의한 강도저하가 발생할 수 있으므로 시공시 각별한 주의가 필요하다고 판단되었다.

## 참고 문헌

1. 강지훈, 김형식 (2000), "봉화군 상운면지역에서 북부 소백산육



- 피의 지질구조 해석”, 암석학회지, 제9권 제4호, pp.254-270.
2. 김성원, 이창윤, 유인창 (2008), “예천전단대 북동부 명호지역 열리상 화강암류와 압쇄 편마암류에 대한 지구화학 및 Nd-Sr 동위원소 연구”, 자원환경지질, 제41권 제3호, pp.299-314.
  3. 장태우 (1990), “Relative Timing of Shear Zone Formation and Granite Emplacement in the Yechon Shear Zone, Korea”, 광산지질, 제23권 제4호, pp.299-314.
  4. 장태우 (1991), “On the Microstructures of Mylonitic Rocks-with Special Reference to Yechon Shear Zone, Korea”, 지질학회지, 제27권 제2호, pp.177-190.
  5. 진명식, 장보안 (1999), “소백산육괴 동북부 영주-춘양지역의 트라이아스기말-쥐라기초 화강암체의 열사 및 그 지구조적 의의”, 지질학회지, 제35권 제3호, pp.189-200.
  6. Franklin, J., A. and Chandra, R. (1972). “The slake durability test”, Int. J. Rock Mech. Min. Sc. Vol.9, pp.325-341.
- (접수일자 2011. 5. 20, 심사완료일 2011. 10. 17)