

# 대구지역 셰일의 점재하지수 특성 및 일축압축강도와의 상관성

## The Point Load Index of the Daegu Shale and its Relation to the Uniaxial Compressive Strength

이영휘<sup>†</sup> · 윤찬호<sup>1)</sup>

Lee, Younghuy · Youn, Chanho

**ABSTRACT :** The experimental study was carried out to evaluate the characteristics of the point load index and the uniaxial compressive strength of inherently anisotropic shale in the laboratory. In the testing program the effects of size and the shape on the point load index were investigated both in the axial and diametral direction. In general, the point load index of the shale was constant when the length/diameter (L/D) ratio of the specimen is greater than 1.0 in the diametral direction. The point load index in axial direction shows slight decrease as the L/D ratio is increased and the corner breakage was observed when L/D ratio is greater than unity. The minimum point load index was observed in the bedding angle of  $\beta = 15^\circ \sim 30^\circ$  in the axial point load tests and of  $\beta = 30^\circ$  in the uniaxial compression tests. The relationship between the point load index and the uniaxial compressive strength was linear to  $\sigma_c = 25.0 I_{s(50)}$  for the specimen with the bedding plane angle,  $\beta$  at the range of  $0^\circ \sim 90^\circ$ . On the other hand, this relationship was appeared linear to  $\sigma_c = 14.4 I_{s(50)}$  when the bedding angle,  $\beta$  is fixed to  $90^\circ$  and this correlation is much different from  $\sigma_c = 22 I_{s(50)}$ , which is generally applied to the rock specimen with no bedding plane in ISRM (1985). The anisotropic strength with different  $\beta$  angle shows the shoulder type and this can be suitably modelled by the corrected Ramamurthy'(1993)s equation with the index value of 'n' equal to 3.0.

**Keywords :** Point load index, Uniaxial compressive strength, Size and shape effect, Anisotropic strength, Modified Ramamurthy's equation

**요 지 :** 대구지역에 분포하는 고유이방성 셰일(shale)의 점재하지수 및 일축압축강도 특성을 평가하기 위한 일련의 실험실 시험을 수행하였다. 또한 시험시편의 크기효과 및 형태효과를 조사하기 위하여 축방향 및 직경방향으로 점재하지수를 측정하였다. 일반적으로 직경방향의 점재하지수는 길이/직경(L/D)비가 대략 1.0 이상일때 일정한 값을 보이고 축방향 점재하 시험 결과 L/D비의 증가에 따라 평균 점재하지수가 약간 감소하는 경향을 보였으며 L/D비가 1.0 이상이면 corner파괴가 발생하였다. 최소의 점재하지수는 층리면이 연직과 이루는 각 ( $\beta$ )이  $15^\circ \sim 30^\circ$ 에서 나타났고  $\beta = 30^\circ$ 에서 최소의 일축압축강도가 얻어졌다.  $\beta$  값의 범위가  $0^\circ \sim 90^\circ$ 인 시편의 점재하지수와 일축압축강도를 측정하여 이들의 상호관계를 회귀분석하였다. 층리면을  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지 변화시키면서 측정된 점재하지수는 일축압축강도와 선형적인 관계인  $\sigma_c = 25.0 I_{s(50)}$ 로 나타났다. 한편, 층리각( $\beta$ )을  $90^\circ$ 로 고정시킨 상태에서의 이들의 상관성은  $\sigma_c = 14.4 I_{s(50)}$ 로 나타났는데, 이는 ISRM(1985)에서 추천하는 층리가 없는 무결암 시료에 대한 일반적인 상관성,  $\sigma_c = 22 I_{s(50)}$ 과는 많은 차이가 있음을 확인하였다. 일축압축강도의 이방성 모형은 기존의 Ramamurthy(1993)이론에 지수 'n'을 도입하여  $n = 3$ 을 적용 했을때 측정결과와 잘 부합되는 결과를 얻었다.

**주요어 :** 점재하지수, 일축압축강도, 크기 및 형태효과, 이방성강도, 수정 Ramamurthy 이론

## 1. 서 론

암석의 일축압축강도는 구속압이 없는 상태에서 원주나 각주모양으로 성형한 공시체에 압축력을 작용시켜 파괴가 일어났을 때의 하중을 시험편의 단면적으로 나눈 값을 말한다. 또한 이 강도는 암반의 공학적 분류, 각종 암반구조물의 설계 및 보강대책 또는 안정성 평가에 필수적인 기초자료로 사용되는 역학적 특성치이다.

일축압축강도의 측정은 잘 연마된 시험편에 직접 하중을 가하여 파괴시의 강도를 얻는 방법과 시료의 두 점상에 압축응력을 가하여 인장파괴시의 점재하지수(point load index)를 측정하고, 이 지수를 이용하여 암석의 일축압축강도를 간접적으로 추정하는 방법 등이 있다. 이 점재하지수에 많은 영향을 미치는 요소로서 시험편 형상, 시험편의 크기, 하중재하속도, 함수상태 등이 있으며, 최근 들어 암반구조물의 설계에 불연속면을 포함하는 일축압축강도 특성의

† 정희원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수(E-mail : younghuy@yu.ac.kr)

1) 비회원, 경상 공업고등학교

중요성이 대두 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 bedding plane을 포함하고 있는 대구지역 세일에 대하여 현장에서 간단한 시험기구로 따로 성형을 하지 않고도 강도를 추정할 수 있는 점재하지수를 측정하여 그 특성을 분석하고자 한다. 또한 점재하지수의 측정에 사용한 동일시료에 대하여 일축압축강도를 측정하여 대구지역 세일에 적용가능한 점재하지수와 일축압축강도간의 상관관계식을 도출하고자 한다. 또한 층리면의 각도에 따른 점재하지수와 일축압축강도를 측정하여 강도 이방성을 규명하고, 그 시험결과를 기존에 제시된 일축압축강도의 이방성 이론(Ramamurthy, 1993 등)에 적용하여 그 신뢰성을 평가하고자 한다.

## 2. 관련문헌 연구

### 2.1 점재하지수

점재하지시험은 암석의 역학시험의 일종으로서 시료의 두 점상에 압축응력을 가하여 인장파괴 시키는 시험으로 점재하지수를 구하는 시험이다. 이 지수를 이용하여 암석의 일축압축강도를 간접적으로 추정할 수 있다. 일축압축강도 시험은 시험 기구가 크고 시료를 정밀하게 성형하여야 하며, 실내시험이라는 한계가 있는 반면에, 점재하강도시험은 현장에서도 간단한 시험 기구로 따로 시료를 성형하지

않고도 수행할 수 있는 장점이 있다. 그러나 일축압축강도 시험과 달리 암석의 탄성계수는 구할 수 없고 단지 일축압축강도를 추정할 뿐이다. 점재하강도시험은 코아시료의 직경방향, 축방향 및 임의형상의 시료에 대하여 실시할 수 있다. 파괴 양상은 보통 재하점 사이를 연결하는 직선을 포함한 면에서 파괴된다.

Brook(1985)은 점재하 시험을 시료 형상에 따라 그림 1과 같이 (a) 직경방향시험, (b)축방향시험, (c)블럭시험, (d) 임의형상의 압괴시험으로 구분하였다.

이들 시험 결과로부터 점재하지수  $I_s$ 라고 하는 것을 식 (1)과 같이 정의한다.

$$I_s = \frac{P}{10 \cdot D_e^2} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

$$D_e^2 = D^2 \quad (\text{직경방향시험}) \quad (2)$$

$$D_e^2 = \frac{4 \cdot A}{\pi} = \frac{4 \cdot WD}{\pi} \quad (\text{축방향·블럭·불규칙 압괴시험}) \quad (3)$$

여기서,  $P$  : core 파괴시 실측한 점재하 하중

$D_e$  : 등가 core 직경

$A$  : 양 재하점을 포함하는 시료 단면중에서 면적이 최소로 되는 면의 면적

$W$  : 불규칙한 암석 공시체의 폭

$D$  : 상·하 재하점 간의 거리 또는 core 직경

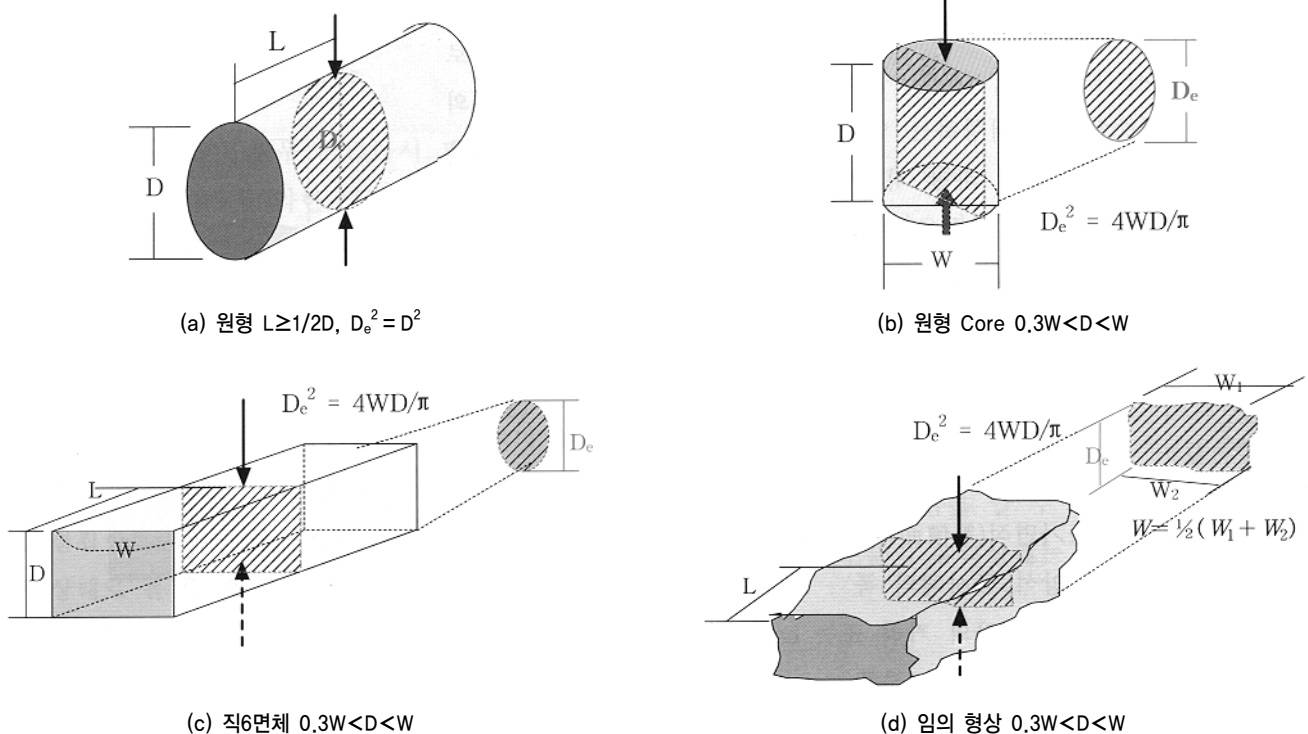


그림 1. 점재하 공시체의 형상별 등가직경(Brook, 1985)

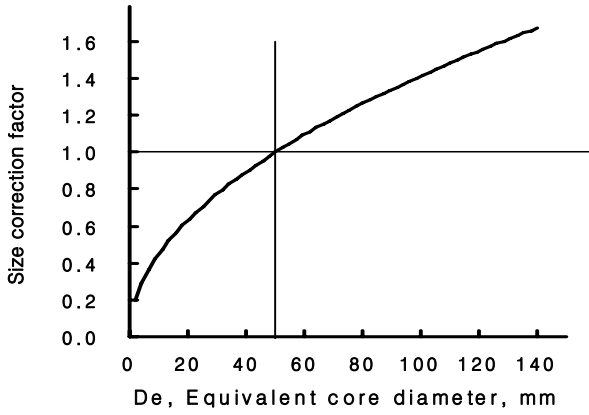


그림 2. 크기보정계수 (F)

그런데, 기존의 문헌연구에 의하면 점재하지수에 영향을 미치는 인자로서 1)크기효과와 2)형태효과를 고려해야 하는 것으로 나타났다.

### 1) 크기효과(size effect)

점재하지수( $I_s$ )는  $D_e$ 의 함수로 되며 같은 특성을 가진 암석이라도  $D_e$ 가 다르면  $I_s$ 가 다르게 된다. 따라서  $D=50mm$ 의 core시료를 사용하여 직경방향 점재하지시험을 했을 때의 점재하지수를 기준으로 선택하여, 다른  $D_e$  시료에 대해서는 이것으로 환산하고 수정점재하지수  $I_{s(50)}$ 로 하여 점재하지시험을 표준화한다.

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (5)$$

여기서,  $I_{s(50)}$ : 수정 점재하지수

$I_s$ : 무수정 점재하지수

$F$ : 보정계수(그림 2 참조)

### 2) 형태효과(shape effect)

Hassani 등(1980)은 사암에 대하여 직경방향 점재하지시험을 수행하여 그림 3과 같은 결과를 얻었다. 시험결과 시험편 직경(D)과 길이(L)의 비(L/D)가 약 1.0이상의 시편에서는 점재하지수( $I_s$ )의 변화가 거의 없다는 것을 발견하였으며, 접촉점과 각 시험편의 끝 사이의 거리는 적어도 0.7D가 되어야 한다고 제안하였다. 여기서 D는 직경방향 점재하지시험에서의 코어의 직경이다. 또한  $L > D$ 의 시편형태를 유지하여 형태효과에 대한 영향을 최소화 하였다.

Broch & Franklin(1972)은 조립현무암(dolerite)과 사암(sandstone)을 대상으로 수행한 시험에서도 이와 유사한 결

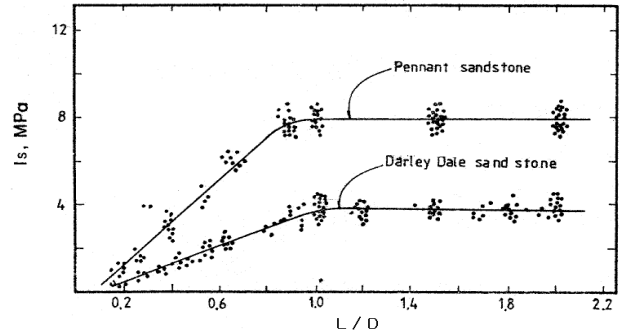


그림 3. 직경방향 점재하지시험의 형태효과(Hassani 등, 1980)

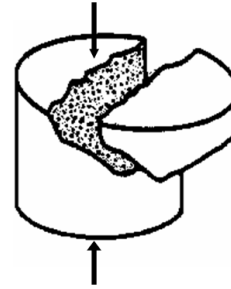


그림 4. 축방향 점재하지시험의 corner파괴 형태

과를 제시한 바 있다.

또한, 이방성 암석에 대해서 Broch & Franklin은 비등방지수( $I_0$ )를 사용하여 이방성의 양을 평가하는 축방향 점재하지시험의 사용을 제안했다. 시험 결과는 축방향 점재하지수가 같은 코어크기에 대해 같은 방향에서 직경방향 점재하지수와 같게 하기 위해 코어 직경(D)에 대한 축두께(L) 비율이  $1.1 \pm 0.05$ 가 되어야 한다는 것이다. 따라서 축방향 점재하지시험에 의한 강도지수를 직경방향 점재하지시험으로 보정할 경우는 동일 직경의 표준 축방향 점재하지수로 전환한 다음, 다시 표준 점재하지수로 보정하여야 한다(Forster, 1983). 한편 Peng(1976)은 코어 시편의 축방향 점재하지시험 시에 시편내에 형성되는 응력분포해석을 위한 축대칭 유한요소분석에서  $L/D \leq 1$  상태에서 안정되는 양상을 보인다고 주장하였다. Peng에 의하면  $L/D > 1$ 인 수평 축리암의 시료들은 축방향 점재하지시험에서 종종 완전하게 파괴되는 않으며, 부분적인 축과 부분적인 직경으로 파괴되는 “corner 파괴”(그림 4 참조)를 일으킨다는 것을 알았다. 이러한 “corner 파괴”는 시료의 중앙에서 발달된 매우 낮은 방사상의 인장강도와 현저한 축리면 때문에 발생한다고 하였다.

## 2.2 점재하지수와 일축압축강도의 상관성

점재하지수와 일축압축강도의 상관관계를 규명하기 전에, 이와같은 관계를 대표할 수 있는 신뢰성을 유지하기

위하여서는 직경방향 점재하지수와 축방향 점재하지수 사이에 강도 이방성 현상이 가능한 한 없어야 한다.

점재하지수와 일축압축강도와의 실험적 관계는 Broch & Franklin(1972), Bieniawski(1975), Brook(1980) 등이 식 (6) 과 같은 상관성을 제시한 바 있다.

$$\sigma_c = 24 \cdot I_{s(50)} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

그 후에 그림 5와 같이 Greminger(1982)는 시험을 통하여 같은 결과의 상관관계를 구하였다.

이러한 관계는 암석의 종류와 풍화정도에 따라 변하며, 또한 이방성의 정도에 따라 영향을 받는다. 현재 대부분의 연구 결과들에 의하면  $UCS/I_{s(50)}=24$ 인 비율은 일반적으로 받아들여지지 않고 있는 실정이다. 그러므로 각 암석의 특성에 맞는 상관관계식을 이용하는 것이 점재하지수로서 추정하는 일축압축강도의 오차를 줄일 수 있다. ISRM(1985)에서는 그림 6과 같이  $UCS/I_{s(50)}$ 의 상관계수를 22로 제시하고 있다.

$$\sigma_c = 22 \cdot I_{s(50)} \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

국내의 연구로는 이수곤 등(1995)이 국내 화강암에 대해서 많은 시험을 통하여 아래와 같은 관계식을 제시하였다.

$$\sigma_c = 41.284 + 15.85 \cdot I_{s(50)} \quad (\text{MPa}) \quad (8)$$

또한 정형식 등(1997)에 의해 실시된 세일에 대한 상관관계식은 아래와 같다.

$$\sigma_c = 13.6 + 23 \cdot I_{s(50)} \quad (\text{MPa}) \quad (9)$$

### 2.3 점재하지수의 이방성

일반적으로 암반은 암반내에 불연속면이 존재하여 강한 이방 특성을 보이나 암석은 미세균열과 광물의 결집상태, 조암광물, 배열상태에 따라 이방성의 특성을 보인다. 광물 중 운모류를 많이 포함하는 암석은 강한 이방 특성을 보일 수 있다. 암중에 따라서는 화성암의 경우 마그마의 고결냉각에 의해 형성되어 균질한 등방성 성질을 보이나 변성암과 퇴적암, 특히 편마암과 셰일은 매우 큰 이방성을 보인다. 편마암은 엽리의 발달로 인해 엽리면에 수직 방향의 강도와 엽리면과 평행한 방향의 강도가 큰 차이를 보인다.

그림 7과 같은 셰일의 경우는 퇴적되면서 형성된 층리면에 따라 강도에 커다란 차이를 보인다. 즉, 층리면에 수직으로 하중이 작용하는 경우와 층리면에 평행하게 하중이 작용하는 경우 커다란 강도의 차이를 보인다.

그림 8은 암석 시편을 층리면의 각도 변화를 주어 하중을 가한 강도변화 특성을 나타내고 있다. 일반적으로 코아 시편의 축과 층리면의 이루는 각이  $30^\circ \sim 60^\circ$ 범위에서 가장 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 모든 암석내에는 어느 정도의 이방성이 존재하며, 이러한 이방성의 역학적 성질은 취약면의 방향과 재하 방향에 따라 얻어지는 강도가 달라지므로 암석의 강도 분류에 차이를 가져온다(Greminger, 1982 ; Broch, 1983).

점재하 이방성지수는  $I_a = \frac{I_{sa}}{I_{sd}}$ 와 같은 식으로 나타내며,

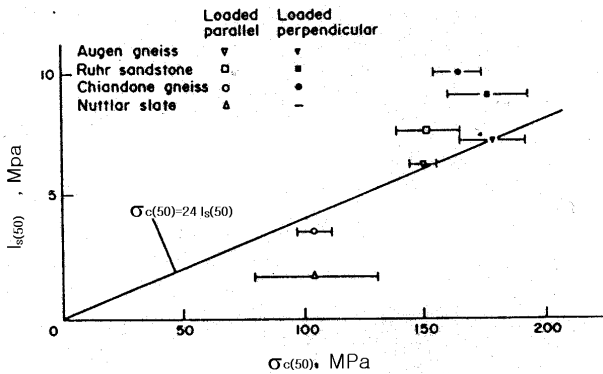


그림 5. 일축압축강도와 점재하지수와의 상관관계(Greminger, 1982)

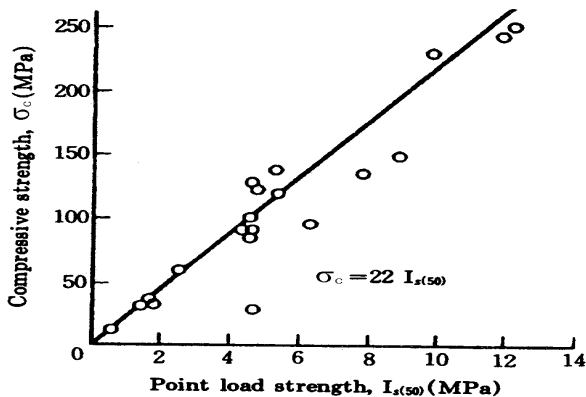


그림 6. 일축압축강도와 점재하지수와의 상관관계(ISRM, 1985)

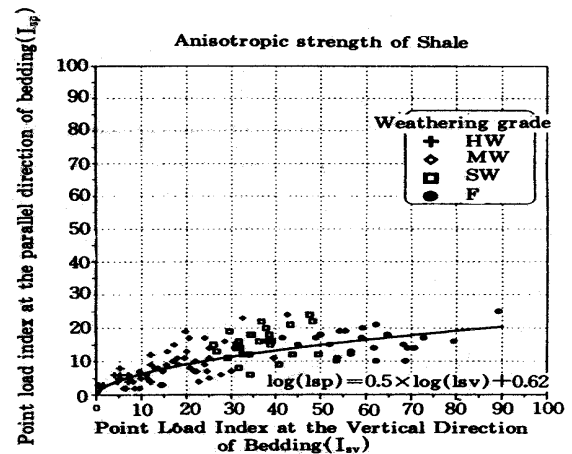


그림 7. 점재하지수 변화에 따른 셰일의 이방성 특성(정형식 등, 1997)

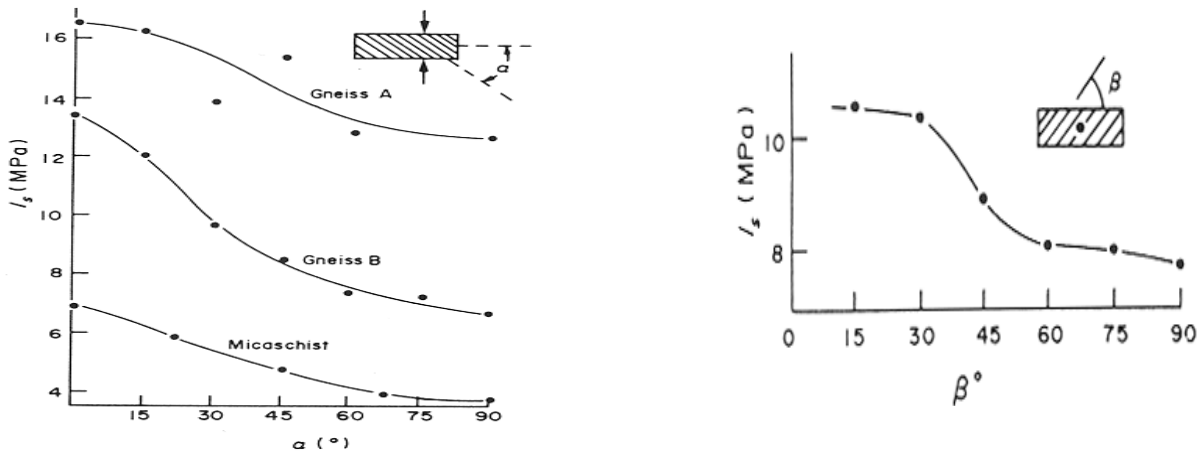


그림 8. 층리면의 각에 따른 직경방향 점재하지수(Aagaard, 1976)

일반적인 암석의 이방성지수는 1.05~5.7의 범위를 보인다 (Greminger, 1982).

점재하지수의 이방성 정도는 연약면의 법선 방향과 코아 시편의 축과 이루는 각 즉, 층리면 경사각( $\beta$ )의 크기에 영향을 받는다(Greminger, 1982 ; Broch, 1983).

점재하시험은 암석의 이방성 구조에 따른 강도의 변화 특성을 간단하고 신속하게 파악할 수 있는 장점이 있다. 터널이나 지반의 하중을 고려하여서 암석의 압축강도를 시험할 때는 편마암이나 퇴적암에서는 암석내에 발달하고 있는 이방성 구조(편마암내에는 편리, 퇴적암내에는 층리)와 하중방향과의 관계를 꼭 고려하여서 시험하여야 하고, 이방성 구조가 있는 암석의 압축강도나 인장강도는 강도 수치와 아울러 하중방향이 반드시 언급되어야 한다.

### 3. 점재하시험 및 일축압축강도 시험

#### 3.1 시료의 제작

본 연구에 사용된 세일 공시체는 현장에서 채취한 암블럭을 실험실로 운반하여 코어링 기계로 코어를 직접 제작하였다. 점재하시험용 코어는 직경 42mm, 54mm로 제작하여 사용하였으며, 이방성 시험에 사용된 코어는 층리면에 각도( $\beta$ )의 변화를 주어 다양한 형태의 시료를 제작하여 시험에 이용하였다.

특히, 점재하 강도이방성 시험에서는 크기 및 형태효과를 최소화하기 위하여 코어의 직경과 길이의 비를 가능한 일정하게 유지하였으며, 또한 일축압축 시험용 시료는 ASTM D-2938에 따른 규정 범위 내에서 성형하였는데, 응력집중 및 편심을 방지하기 위하여 상·하 가압면을 연마하여 허용오차를 0.1mm 이하로 유지하였다.

#### 3.2 시험방법

##### 3.2.1 점재하 시험

이 시험은 암석의 core 또는 lump sample을 이용하여 간단하게 암석의 강도를 측정하는 시험으로, 장치는 가볍고 이동이 가능하며 현장, 실내 모두에서 사용이 가능하며, 암석강도를 간편하면서도 신속하게 측정할 수 있는 시험 방법이다.

본 시험에서는 ISRM의 규정에 의하여 점재하지수를 산출하였다. 시험에 사용된 점재하 시험 기구는 하중범위 0~5.5kN까지는 0.1kN눈금으로 새겨져 있고, 0~55kN까지는 1kN 간격으로 눈금이 새겨진 저압용과 고압용의 2개의 하중 게이지로 측정할 수 있다. 하중 프레임은 2개의 기둥으로 고정되어 있고, 첨단장치의 압입에 의한 파괴를 막기 위해 첨단장치는  $\theta = 60^\circ$ ,  $r = 5\text{mm}$ 로 되어있으며 재하방법은 lever bar를 이용하여 유압피스톤을 아래에서 위로 밀어 올린다. 사용할 수 있는 시편은 최대직경 101mm, 허용되는 최소직경 25mm 사이에서 시험할 수 있다.

시험 방법은 시추한 코어를 자른 후 직경방향 및 축방향으로 점재하시험을 실시하였다. 축방향인 경우에 대해서는 시료의 D, L을 측정한다. 이때 시료높이(D)는  $0.3W < D < W$ 의 조건을 만족해야 한다. 그리고 파괴하중 P를 구하고 등가직경( $D_e$ )을 구하여 무수정 점재하지수( $I_s$ )를 구한다.

##### 3.2.2 일축압축강도시험

일축압축강도를 측정하기 위해 사용한 압축기는 UTM (Universal Testing Machine)으로, 최대용량은 250kN이다. 시험방법은 공시체를 cutter disk를 이용하여 자른 후 연마기에 공시체를 넣고 편평도를 0.02mm 까지 가공을 하였다. 이때 얻어진 공시체는 직경과 길이의 비는 대략 1 : 2 정도이다. 재하방법은 하중제어로 하였으며, 공시체 파괴

는 5~15분 사이에 발생하도록 하였다. 이때 실험 결과를 역 추적하면 0.15~0.25mm/sec의 변위 속도로 재하 하였다. 일축압축강도는 아래 식 (10)과 같이 계산한다.

$$\sigma_c = \frac{0.4 \cdot P}{\pi \cdot d^2} \quad (\text{원주형 공시체}) \quad (10)$$

여기서,  $\sigma_c$  : 일축압축강도(MPa)  
 $P$  : 측정된 최대하중(kgf)  
 $d$  : 원주형 공시체의 직경(cm)

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 암석의 물리적 성질

암석을 이루고 있는 조암광물은 암석의 형성과정 즉, 성인(成因)에 의거하고 있다. 암석의 물리적 성질은 암석조각이나 구성광물 종류에 따라 크게 영향을 받기 때문에 암석의 물리적 성질을 생각할 경우에는 항상 그 종류와 특징에 주의해야 한다.

본 연구에 사용된 셰일의 주요 물리적 성질은 다음 표 1과 같다.

### 4.2 점재하지수 특성

#### 4.2.1 크기효과(size effect)

시험편 직경의 크기가 점재하지수에 끼치는 영향을 조

표 1. 셰일의 물리적 성질

구분	측정치
비중(자연상태)	2.55 - 2.87
함수비(%)	0.26 - 0.74
간극률(%)	1.10 - 2.33
흡수율(%)	0.41 - 0.86

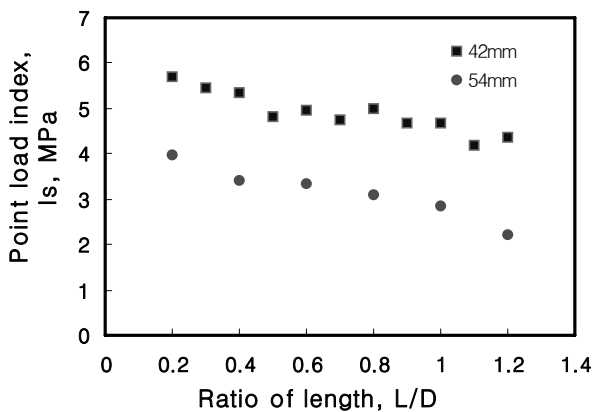


그림 9. 축방향 점재하지시험의 크기효과 비교(D=54mm, 42mm)

사하기 위하여 42mm와 54mm의 직경을 갖는 시료에 대하여 축방향 점재하지시험을 한 결과를 그림 9에 보이고 있다. 길이/직경(L/D)비를 0.2-1.2까지 변화시키면서 측정한 축방향 점재하지수는 42mm 시료에서(5.71~4.42) MPa, 54mm 시료에서(4.00~2.50) MPa로서 시료의 직경이 클수록 점재하지수가 작아지는 것으로 나타났다. 여기에서 측정한 점재하지수는 각 L/D에 해당하는 6개의 시료에 대하여 측정한 평균치이다. 이 결과는 암석의 일축압축강도가 직경이 작을수록 크게 나타난다는 기존의 연구 결과(Hoek & Brown, 1980)와 유사함을 알 수 있다.

#### 4.2.2 형태효과(shape effect)

##### i) 직경방향 점재하지시험

셰일의 직경방향 점재하지시험에서 시험편의 길이와 직경(L/D)비를 변화시켜 가면서 점재하지수의 변화를 알아본 결과 L/D비가 1.0이상인 경우에 대체적으로 점재하지수가 일정하게 나타났으며,  $I_{s(50)}$ 의 평균치는 직경 42mm에서 1.6MPa, 직경 54mm에서 1.3MPa(그림 10 참조)로 측정되었다. 이 결과는 Broch & Franklin(1972)이 조립현무암(dolerite)과 사암(sandstone)에서 시험편의 길이와 직경비(L/D)가 약 1.0 이상인 시험편이 점재하지수의 변화가 거의 없다는 시험결과와 유사한 것으로 나타났다.

또한, Broch & Franklin(1972)은 점판암 시료들을 층리에 평행하게 시험을 했을 경우에 점재하지수의 분산이 크게 나타나며, 층리면에 수직으로 시험을 한 경우에는 아주 작은 분산을 나타내며, 직경방향 점재하지시험은 이방성을 갖는 비교적 약한 암에서는 신뢰성이 낮다고 하였다.

##### ii) 축방향 점재하지시험

그림 9에서 보이는 바와 같이 셰일을 직경 54mm로 코어링하여 길이/직경(L/D)비를 (0.2~1.2)로 다양하게 변화

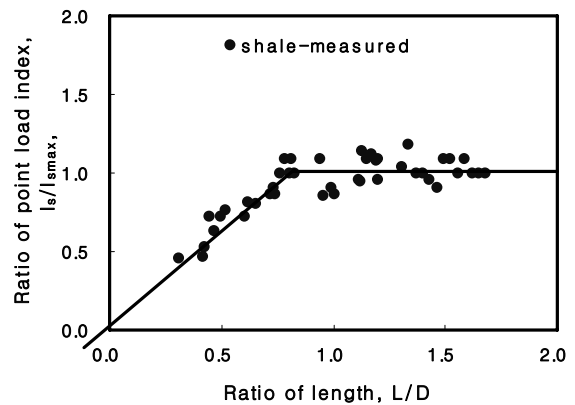


그림 10. 직경방향 점재하지시험의 형태효과

시킴으로써 축방향 점재하시험을 하여 점재하지수의 변화를 알아본 결과 L/D비의 증가에 따라 평균 점재하지수가 2.5~4.0MPa의 범위에서 감소하는 경향을 보였다. 또한 L/D비가 1.0이상인 시료에서는 시험결과 대부분의 시료들이 “corner 파괴”를 일으켜 믿을만한 점재하지수를 얻을 수 없었다. 이는 ISRM에서 제안한 L/D=1.1±0.05의 시편형태와는 다소 차이가 있었으며, 본 연구에 사용된 점재하시험기 및 시험조건상 L/D비를 0.7~0.9정도의 범위를 유지하는 것이 가장 좋은 결과를 기대할 수 있으리라 사료된다. 즉, 축방향 점재하시험에서의 시료로서 믿을만한 L/D비는 0.7~0.9정도의 시편형태를 이용했을 때 “corner 파괴”를 일으키지 않고 점재하지수의 분산이 가장 적으며 합리적인 결과를 얻을 수 있었다.

또한, 세일을 직경 42mm로 코어링하여 길이/직경(L/D)비를 다양하게 변화시켜 가면서 축방향 점재하시험을 하여 축방향 점재하지수의 변화를 알아본 결과 L/D비의 증가에 따라 평균 점재하지수가 4.4~5.7MPa의 범위에서 변화하였다.

### 4.3 이방성을 고려한 점재하강도 및 일축압축강도의 상관성

충리면의 각( $\beta$ )에 변화를 준 점재하시편의 형태를 그림

11과 같이 제작한 시편에 대하여 축방향 점재하시험 및 일축압축강도 시험을 수행하여 그림 12와 같은 결과를 얻었다.

일축압축강도 시험의 시편 형태도 충리면의 각( $\beta$ )의 변화를 동일하게 제작하여 사용하였다. 또한, 그림 12에서 수정점재하지수  $I_{s(50)}$ 은 ISRM에서 제안한 식 (4)를 이용하여 구한 평균 점재하지수이며, 일축압축강도( $\sigma_c$ )와 함께 표 2에 나타냈다.

여기서, 이방성을 고려한 축방향 점재하지수 - 일축압축강도의 상관관계는 그림 12에서와 같이  $\sigma_c = 25.0 \cdot I_{s(50)}$ 의 선형관계로 나타났고 결정계수는  $r^2 = 0.72$ 로 비교적 분산도가 높게 나타났다.

그림 13은 충리각을 고정( $\beta = 90^\circ$ )한 상태와 충리각을 변화( $\beta = 0^\circ \sim 90^\circ$ )시켜 가면서 시험한 축방향 점재하지수와 일축압축강도의 상관관계를 나타낸 그림이다.

충리각을 고정한 상태의 상관관계인  $\sigma_c = 14.4 \cdot I_{s(50)}$ 과 충리각을 변화시킨 상태의 상관관계인  $\sigma_c = 25.0 \cdot I_{s(50)}$ 과 비교해 보면 상당한 차이가 있었다. 현재까지 연구된 점재하

표 2. 충리면 각( $\beta$ )의 변화에 따른 평균점재하강도지수-일축압축강도

구 분	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$\sigma_c$ (MPa)	68.4	34.6	26.1	40.8	70.3	71.2	98.7
$I_{s(50)}$ (MPa)	1.9	1.6	1.7	2.3	2.6	2.8	3.8

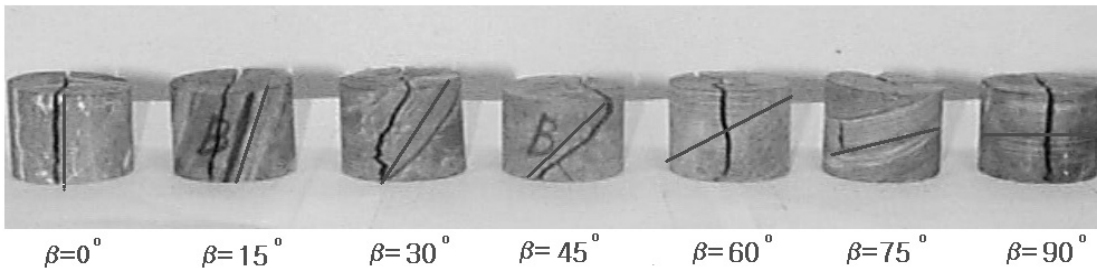


그림 11. 충리면 각( $\beta$ )의 변화에 따른 점재하 시편의 파괴 형태

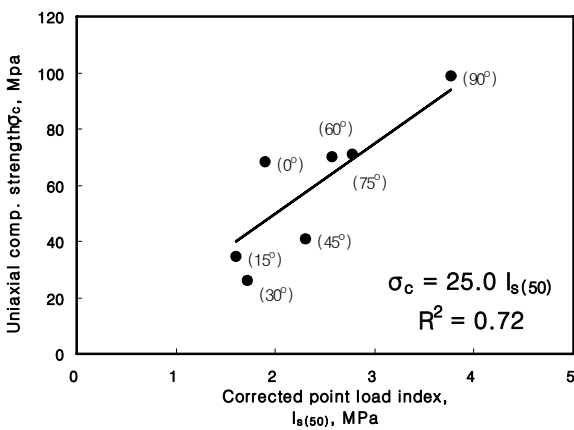


그림 12. 충리면의 각( $\beta$ )을 고려한 점재하지수-일축압축강도의 상관성

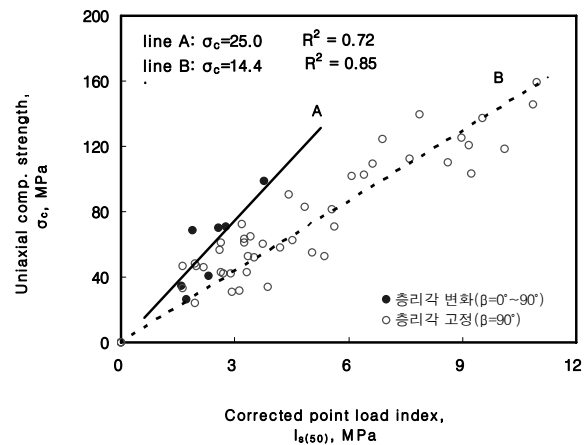


그림 13. 충리각의 변화 및 고정에 따른 점재하지수-일축압축강도 상관성

지수-일축압축강도의 상관관계는 대부분이 층리각을 고정 ( $\beta = 90^\circ$ )한 상태의 결과들이다. Franklin & Chandra(1972)도 이방성 이암에 대한 일축압축강도는 점재하지수의 16배 정도의 결과를 얻었다.

따라서 세일의 층리각을 고정시킨 상태에서의 상관관계는 현재까지 문헌에 보고된  $\sigma_c = (22 \sim 24) \cdot I_{s(50)}$ 의 관계가 아닌  $\sigma_c = (14 \sim 16) \cdot I_{s(50)}$ 의 값을 적용해야 할 것으로 판단된다.

#### 4.4 일축압축강도의 이방성

대구지역 세일을 대상으로 층리면의 각( $\beta$ )에 변화를 주어 세일의 강도 이방성을 일축압축강도 시험을 통해 알아본 결과 그림 14와 유사한 형태의 강도이방성을 보였으며, 이방성 암석의 대표강도 값으로서  $\beta = 90^\circ$ 일 때의 압축강도를 고려하면 이방율( $R_c = \frac{\sigma_{c(90)}}{\sigma_{c(\min)}}$ )은 3.79로 중간정도의 이방성을 보이고 있다. 또한 최대 파괴강도가 보통  $\beta = 90^\circ$ 일 때 발생하고  $\beta = 30^\circ$ 근처에서는 강도가 가장 작게 나타났다. 이는 일반적인 암석 강도이방성에서의 결과와 유사한 경향을 보였다.

또한 Ramamurthy(1993)가 제안한 식에 의해 일축압축강도의 이방성을 유추한 결과 그림 14와 같이 어깨(Shoulder) 형태와 유사한 이방성을 나타냈다.

$$\sigma_c = A - D[\cos 2(\beta_m - \beta)] \quad (\text{MPa}) \quad (11)$$

여기서,  $\sigma_c$  : 층리각( $\beta$ )에 대한 일축압축강도

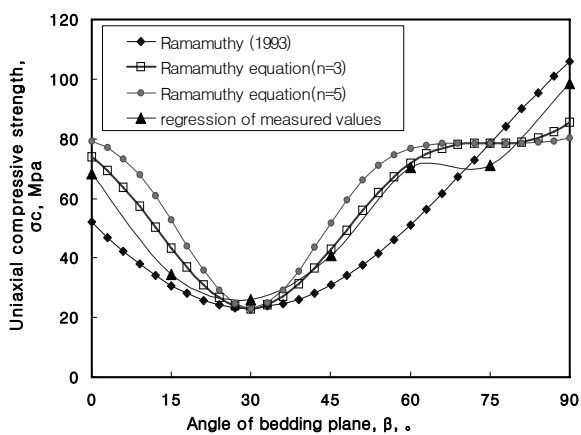


그림 14. 층리면 각( $\beta$ )의 변화에 따른 일축압축강도 변화

표 3. 층리면 각( $\beta$ )의 변화에 따른 상수

층리각( $\beta$ )	A	D
$\beta = 0^\circ \sim 30^\circ$	81.0	58.0
$\beta = 30^\circ \sim 90^\circ$	78.5	55.0

$\beta_m$  : 강도가 최소가 될 때의 층리각의 값(보통  $30^\circ$ )

A, D : 상수

또한, 층리면 각( $\beta$ )의 변화에 따른 상수 A, D의 값은 표 3과 같다.

여기에서 Ramamurthy(1993)가 제안한 일축압축강도의 이방성 이론과 측정결과와는 다소 차이가 있음을 고려하여 기존의 Ramamurthy(1993) 이론에 지수 'n'을 도입한 수정이론식(식 (12))을 적용하여 예측치와 실측치를 비교한 결과를 그림 14에 함께 나타내었으며 모두 어깨형의 파괴 유형을 나타내었다. 이 그림에서 기존이론,  $n=1$ 인 경우보다는 수정이론,  $n=3$ 을 적용한 경우가 실측치에 가장 근접하는 예측결과를 보여주었다.

$$\sigma_c = A - D[\cos 2(\beta_m - \beta)]^n \quad (\text{MPa}) \quad (12)$$

## 5. 결 론

대구지역에서 채취한 이방성 세일에 대하여 층리각을 변화시키면서 일련의 점재하지시험과 일축압축강도시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 세일에 대한 점재하지수는 시료의 크기에 많은 영향을 받음을 확인하였으며, 일반적인 공학적 분석에 사용되는 NX core 시료의 점재하지수( $I_{s(50)}$ )가 모든 L/D비에 걸쳐 BX core 시료의 점재하지수보다 작게 나타났다.
- (2) 시료의 축방향 점재하 시험에서 corner 파괴가 발생하지 않는 강도지수는 L/D비가 0.7~0.9 정도의 범위에서 안정적으로 값을 얻을 수 있었다. 이는 corner 파괴 방지를 위한 ISRM 제안치  $L/D = 1.1 + 0.05$ 의 시편형태와는 다소 차이가 있었다.
- (3) 층리각을 고정시킨 경우 기존문헌 및 ISRM에서 추천하고 있는 일반 암석의 점재하지수와 일축압축강도의 상관관계는  $\sigma_c = (22 \sim 24)I_{s(50)}$ 인 반면, 대구지역 세일에 대하여는  $\sigma_c = 14.4 I_{s(50)}$ 의 관계식으로 나타났다. 이 결과는 ISRM(1985)에서 층리각을 고려치 않은 무결암에 대하여 추천한 관계식이 층리가 발달된 대구지역 세일에 대한 상관성과는 많은 차이가 있음을 보여주고 있다.
- (4) 일축압축강도의 이방성 모형 중 Ramamurthy(1993) 이론에 의하여 계산된 값과 실측된 값과는 다소 차이가 있었으며, Ramamurthy(1993)이론에 지수 'n'을 도입한 수정이론식에서  $n=3$ 을 적용할 경우 측정결과에 잘 부합되는 결과를 얻었다.



## 감사의 글

이 연구는 2008학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것임.

## 참고 문헌

1. 이수곤, 이송 (1995), 점하중 강도를 이용한 한국 화강암의 일축압축강도 추정방법, *대한토목학회 논문집*, 제15권 4호, pp. 1015~1027
2. 정형식, 유병옥 (1997), 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구, *한국지반공학회지*, 제13권, 제6호, pp. 71~91.
3. Aagaard B. (1976), Strength anisotropy of rocks (in Norwegian), M. Sc. dissertation, 104pp. NTH, Trondheim.
4. Broch E., Franklin J. F. (1972), The point load strength test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 9, No. 6, pp. 669~697.
5. Broch E. (1983), Estimation of strength anisotropy using the point load test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 4, pp. 181~187.
6. Brook N. (1980), Size correction for point load testing, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 17, No. 4, pp. 231~235.
7. Brook N. (1985), The equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22, No. 2, pp. 61~70.
8. Bieniawski Z. T. (1975), Point load test in geotechnical practice, *Eng. Geol.*, Vol. 9, No. 1, pp. 1~11.
9. Forster I. R. (1983), Influence of core sample geometry on the axial point load test, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 6, pp. 291~295.
10. Franklin, J. A. and Chandra, A. (1972), The Slake-Durability Test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 9, No. 3, pp. 325~341.
11. Greminger M. (1982), Experimental studies of the influence of rock anisotropy on size and shape effects in point load testing, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 19, No. 5, pp. 241~246.
12. Hassani F. P., Scobie M. J., Whittaker B. N. (1980), Application of the point load index test to strength determination of rock and proposals for a new size correction chart, *Proc. 21st U.S. Symp. on Rock Mechanics*, Rolla, Missouri, pp. 543~553.
13. Hoek E., Brown E. T. (1980), *Underground excavations in rock*, the Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 131~182.
14. ISRM (1985), Commission on Testing Methods. Suggested method for determining Point Load Strength (revised version), *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22, No. 2, pp. 51~60.
15. Peng S. S. (1976), Stress analysis of cylindrical rock discs subjected to axial double point load, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 13, No. 3, pp. 97~101.
16. Ramamurthy T. (1993), Strength and Modulus Responses of Anisotropic Rocks, *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. 1-I, Pergamon Press, Oxford, pp. 313~329.

(접수일: 2009. 1. 9 심사일: 2009. 1. 29 심사완료일: 2009. 2. 26)