

## 잔류응력이 암석의 공학적 거동에 끼치는 영향

박형동<sup>1)</sup>

### The influence of residual stress on the engineering behaviour of rock

Hyeong-Dong Park

**ABSTRACT** Critical literature review in this study revealed that there can be a significant influence of the residual stress on the engineering properties of rock. The review also showed that few number of research works on the quantification of the influence was attributed to the limitation of the two classical measurement techniques, viz, X-ray diffraction and mechanical relaxation method. In this study, a new way of approach was sought based on the assumption that residual stress affects the behaviour of rock under the tensile stress up to the failure. A series of hoop tests conducted on the samples from the limb of Carboniferous Limestone in Clevedon, England, revealed that (i) there is no preferential orientations of microcracks and minerals which have been widely believed as the main source of the strength anisotropy of rock; (ii) the anisotropy of the tensile strength of the limestone results from the influence of the residual stress; (iii) since jointing commenced within the fold, residual stored strain energy has been released preferentially in the direction perpendicular to the major joints ( $0^\circ$  and  $90^\circ$ ); (iv) locked-in energy which had been preserved in other directions (e.g.  $45^\circ$  and  $135^\circ$ ) was released during the hoop test making it much easier to create tensile fracture in these directions, viz  $45^\circ$  and  $135^\circ$ ; (v) the direction in which the stored strain energy may be presumed to be the least, required the greatest work to cause failure.

## 1. 서 론

현지 암반 내에는 지각의 작용에 의한 응력이 존재하며, 그 크기와 방향에 따라 지하공간개발 프로젝트에 심각한 영향을 끼치기도 한다. 따라서 현지응력의 크기와 방향을 측정하는 기법에 대한 암석역학적인 연구가 활발하게 진행되어 오고 있고,<sup>1)</sup> 측정된 응력치를 지질구조의 특이성과 관련시켜 해석하는 지질공학적인 연구, 응력의 제공원이 되는 지각작용에 대한 구조지질학적인 연구 등이 역시 활발히 진행되고 있다.<sup>2)</sup> 응력측정에 대한 연구가 활발히 진행되는 이유는 현장에서 측정된 응력 성분에 대한 해석상의 어려운 점이 많기 때문이다. 즉, 지각에 존재하는 응력은 측정스케일의 관점이나 응력발생원인의 종류에 따라 다양한 이름으로 분류되어 측정기술자와 해석자간에 혼선을 야기시키기도 한다. 학술적인 연구에서도 체계적인 분류가 있었으나

(Fig. 1)<sup>3)</sup> 각각의 정확한 관점에 따라 다시금 수정되어 제안되기도 하였다(Fig. 2).<sup>4)</sup>

응력의 종류에 따른 명명법은 학자에 따라 차이를 보이므로 명확히 정의할 필요가 있다. 응력에 대한 그동안의 발전적인 연구결과에도 불구하고 지각에서 고려되는 현지응력과 잔류응력의 관계는 공학적으로 중요하게 인식되지 않아 별로 연구된 바가 없었다.

1960년대 중반 이후 행해진 연구가 암석 내 잔류응력의 존재에 대한 시초가 되었다.<sup>5)</sup> 이 연구는 협탄층 경사암(Coal Measure greywacke)에 압축하중 부가 및 제거 과정을 반복하는 가운데 발견된 것으로 6번째의 하중제거가 이루어진 뒤에(즉, 외부응력=0의 상태) 암석시편의 자연적인 팽창이 관찰되었다(Fig. 3a). 동일한 암석의 다른 시편을 대상으로 한 실험에서도 9번째 하중 제거후 자연적인 팽창이 관찰됨으로써 외부로

1) 정회원, 배재대학교 건설공학부 자원환경공학전공 교수

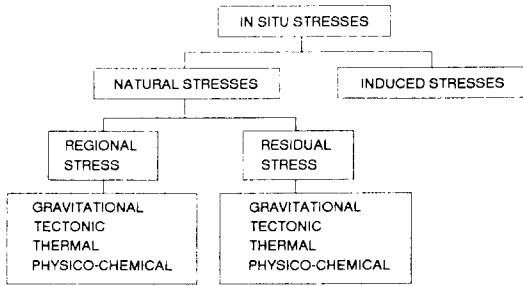


Fig. 1. The terminology for in situ stress proposed by Dyke (1988)<sup>3)</sup>.

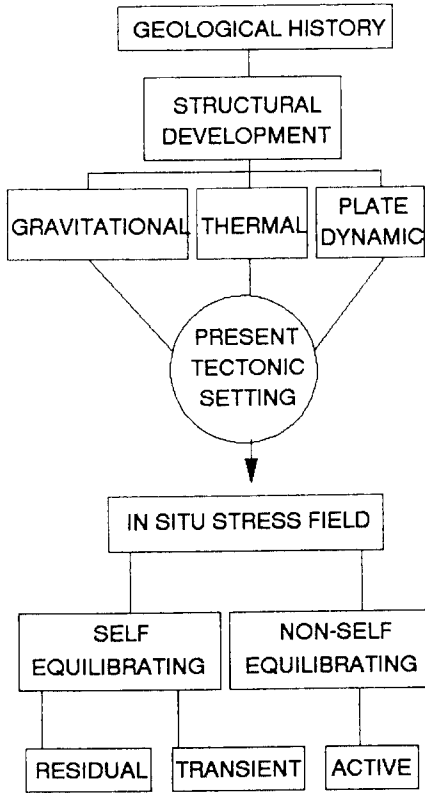
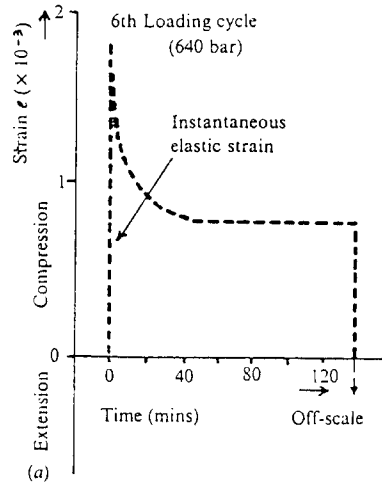
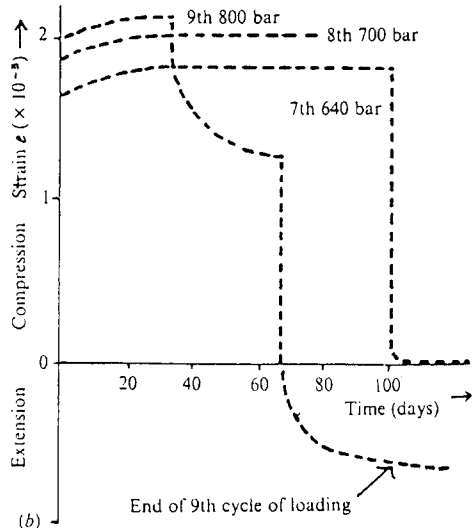


Fig. 2. The terminology for the stress state in a naturally fractured rock mass proposed by Hyett (1990)<sup>4)</sup>. The upper part addresses its existence the lower part its measurement.

부터의 일정한 에너지 자극에 의해 방출되는 것으로 해석될 수 있다 (Fig. 3b). 이후로 잔류응력에 관해서 지속적인 연구가 이루어지지 못하고 간헐적으로 주로 지구물리학 내지 구조지질학적인 관심에서 연구가 이루



(a)



(b)

Fig. 3. Strain-time relationships in Coal Measure greywacke after several repetitive loading and unloading: indicating (a) the relatively rapid and (b) a slower release of residual stresses (from Price and Cosgrove, 1990<sup>10)</sup>).

어져 왔다.<sup>6-9)</sup> 하지만 최근에, 암석 또는 암반 내의 잔류응력은 공학적 성질에 영향을 끼칠 만큼 큰 값을 가질 수 있다는 제안이 있었고,<sup>10,11)</sup> 암석 내 미세균열의 발달과 연관시킨 실험적 연구가 있어,<sup>12)</sup> 잔류응력의 공학적 중요성을 체계적으로 검토할 필요성이 서서히 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 암석 내의 잔류응력의 존재와 그 측정법에 대한 이론적 고찰을 우선적으로 실

시하고 유사재료 분야인 금속 및 세라믹 재료를 대상으로 한 측정법을 비교해 보며 간단한 적용실험 및 결과에 대해 살펴 본다.

## 2. 잔류응력의 정의와 존재여부

암석 내의 잔류응력은 “자중을 제외한 외부의 힘이나 열에 의한 힘으로부터 분리되어 있는 물체 내의 한 점에서 존재하는 응력”으로 정의된다.<sup>7)</sup> 암반의 절리상태에 따라 잔류응력을 정의할 수도 있으며(Fig. 4), 관점에 따라서는 지구전체를 평형상태의 잔류응력을 가진 독립체로 볼 수 있다.<sup>4)</sup> 지질공학 관련교재에서는 ‘잔류응력이 높은 곳에 공동을 건설하지 말것’,<sup>13)</sup> ‘채석장 바닥면이 잔류응력에 의해 아치형으로 변형됨’,<sup>13)</sup> ‘잔류응력은 과거의 지질학적인 역사과정에서 형성된 것’<sup>14)</sup> 등 잔류응력의 정의나 존재여부에 대해 피상적으로 다루고 있어 잔류응력의 원인이나 영향에 대해 공학적으로 정확한 설명을 하지 않고 있다. 1979년에 행해진 체계적인 연구에 따르면,<sup>7)</sup> 잔류응력은 (i) 온도변화에 따른 각 광물들의 열팽창 계수 차이, (ii) 각 광물의 탄성한계

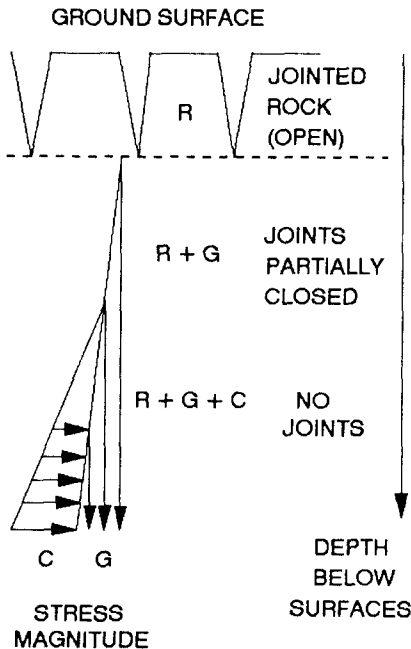


Fig. 4. Stresses from three causes, as seen on a vertical section through upper level of crust: R (Residual stress), G (Gravitational stress) and C (Crustal stress).

의 차이로 인한 부분적 소성변형, (iii) 광물이나 공극수의 상변환 등에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다.

구조지질학적인 관점에서는 암석 내에 보존된 고응력 (paleo stress)의 경우만을 잔류응력으로 간주할 때가 많으나 사실상 모든 암석이나 광물에는 잔류응력이 존재하며 단지 경우에 따라서 측정이 되지 않으므로 그 존재가 간과될 때가 많았다. 재료 및 기계공학 분야에서는 1661년 열처리된 유리의 경도에 대한 관찰과, 이에 대해 1664년 Robert Hooke이 잔류응력의 개념을 동반한 이론적인 설명을 시도한 이후로 많은 연구가 되어 오고 있다.<sup>15)</sup> 특히 열처리된 유리표면에는 압축잔류응력이 존재한다(Fig. 5). 가열된 유리의 겉표면을 냉각시키면 표면은 먼저 굳어진 상태에서 서서히 냉각된다. 이후, 용융된 내부 유리물질이 굳어지면서 부피의 수축이 일어나게 되며 이 수축력은 이미 굳어진 유리의 겉표면을 압축시키는 역할을 하게 된다. 결국 유리의 표면에는 압축잔류응력이 유도되고 유리의 내부는 상대적으로 인장 잔류응력이 발생하게 된다. 이 유리를 파괴시키기 위해서는 유리고유의 인장강도와 압축잔류응력을 합한 크기의 응력이 필요하므로 강도 및 경도의 향상효과가 나타나게 된다.<sup>16)</sup> 일반적으로 취성재료로 이루어진 구조물에 존재하는 인장잔류응력은 구조물의 안정성에 해가 되고, 압축잔류응력은 구조물의 안정에 이익이 된다.

암석 내 잔류응력의 존재를 설명하는 모형으로는 (i) 포유물 모형 (inclusion model), (ii) 입자-교결물 모형 (grain-cement model), (iii) 다층 모형 (multi-layered model) 등이 제안되고 있다.<sup>5-7)</sup> 포유물 모형 (Inclusion model)은 각 광물들간의 열탄성 차이를 설

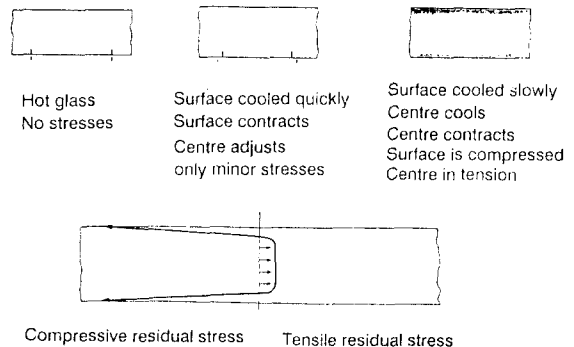


Fig. 5. Dimensional changes and surface compression of tempered glass due to compressive residual stress (from Van Vlack, 1989<sup>16)</sup>).

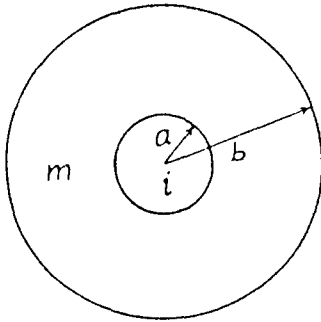


Fig. 6. Inclusion (i) of radius  $a$  in infinite matrix of outer radius  $b$  (from Holzhausen and Johnson, 1979<sup>7)</sup>).

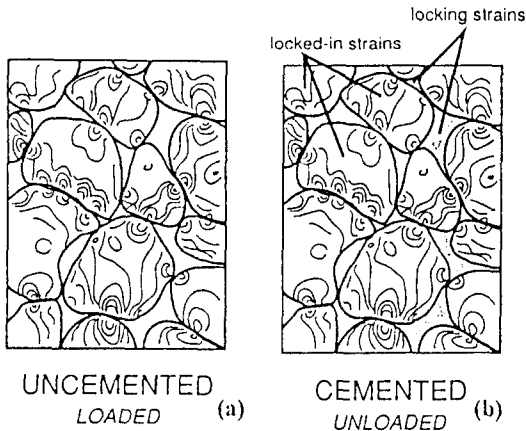


Fig. 7. Grain-cement model (based on Price, 1966<sup>5)</sup>).

명하는 것으로 (Fig.6) 열응력에 의한 파괴메카니즘의 하나로도 설명된다. 이 모델을 설명하는 수식에 따르면 잔류응력은 각 광물의 탄성계수, 열팽창계수, 상대적 크기 등에 의해 지배된다.<sup>7)</sup>

이와 유사한 입자-고결물 모형(grain-cement model)은 광탄성원리를 이용하여 사암 내의 잔류응력을 설명하는데 적합한 것으로 제안되었다.<sup>5)</sup> Perspex로 이루어진 입자가 하중을 받는 상태에서(Fig. 7a) 입자 사이의 빈 공간에 액상의 에폭시 레진(epoxy resin)이 채워져 굳어진다. 이후 하중이 제거되면 입자와 시멘트 사이에서 스트레인 잠금작용이 생겨 잔류응력이 유도된다(Fig. 7b).

다층 모형 (multi-layered model)은 탄성계수가 서로 다른 두개의 층이 교대되어 있는 형태로 단축방향의 하중을 받는 젤라틴과 고무층에 대해 광탄성원리를 이용

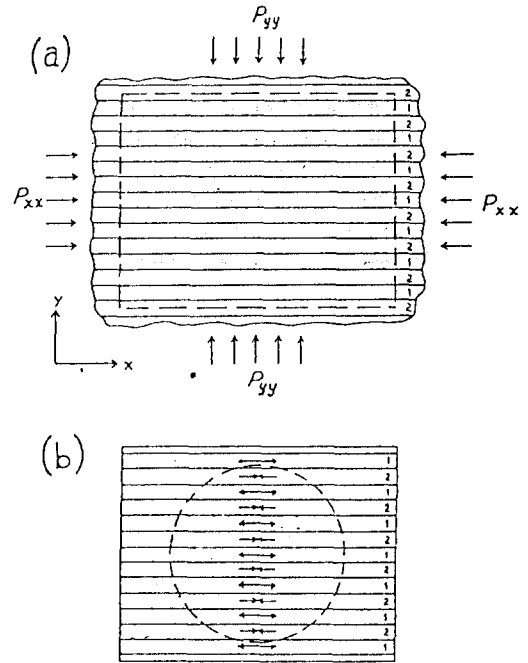


Fig. 8. Multi-layered model (from Holzhausen and Johnson, 1979<sup>7)</sup>).

한 유사모형이 제시되었다.<sup>7)</sup> 이를 통해 잔류응력의 분포는 젤라틴층과 고무층에서 다르게 나타나는 것으로 밝혀졌다. 좀 더 정교한 모형을 통해 이축방향의 하중을 받은(Fig. 8a) 퇴적층으로부터 분리된 암석블록 내부에 유도된 잔류응력을 수식을 이용하여 설명한 경우도 있었다.<sup>7)</sup> 한 예로는 층방향의 압축하중 ( $P_{xx}$ )이 수직방향의 하중 ( $P_{yy}$ )보다 큰 경우 상대적으로 강성도가 큰 층(Fig. 8b의 1번층)에는 인장잔류응력이 유도되고, 상대적으로 강성도가 작은 층 (Fig. 8b의 2번층)에는 압축잔류응력이 유도된다. 이는 자연상태의 교대층에서 강성도가 큰 사암층과 강성도가 작은 세일의 교대층에 비교될 수 있으며, 사암층 내에서 파쇄면이 더 흔히 관찰되는 것은 내부에 유도된 인장잔류응력 때문인 것으로 설명될 수 있다. 즉, 이러한 모형을 통해서 보면, 잔류응력이 암석의 파괴에 끼치는 영향은 때로 심각할 수 있음을 알 수 있으며 현지응력 측정시 영향을 줄 것으로 추정된다.

### 3. 잔류응력이 암석의 공학적 거동에 미치는 영향과 측정법

재료 및 기계공학 분야에서는 잔류응력이 공학적으로

로 끼치는 영향에 대한 구체적인 연구가 많이 추진되어 왔다. 예를 들면, 유리의 광학적 특성변화, 용접된 구조물의 뒤틀림현상, 장기간 사용후 방치된 기차선로와 바퀴의 자연파괴현상 및 대포의 균열현상 등이다<sup>17-20</sup>. 이에 비해 암반 내 잔류응력의 존재는 기초공사에 문제가 되거나, rock burst 현상을 일으키는 원인이 되는 것으로 추정된 경우도 있으며<sup>21-22</sup>, 이탈리아산 Carrara 대리석으로 조각된 미켈란젤로의 다윗상에서 발견되는 균열현상이 잔류응력의 개방과 관련된 것으로 제안되기도 하였다<sup>23</sup>. 정량적인 연구에 의해, 13.5 MPa 정도 크기의 인장잔류응력에 의해 암석 내 균열이 유도된 것으로 제시되기도 하였고<sup>22</sup>, 잔류응력으로 인해 발생한 미세균열로 말미암아 암석의 인장강도가 2MPa 정도 감소한 현상을 보고한 경우도 있다<sup>12</sup>.

잔류응력이 암석의 공학적 거동에 끼치는 영향을 정량적으로 평가한 연구가 적은 이유는 현재의 고전적 측정 방법인 X선 회절분석(XRD: X-Ray Diffraction)기법과 응력개방식 측정법에 문제가 있기 때문이다. X선 회절분석기법은 X선의 회절원리를 이용한 것으로 잔류응력에 의해 변형된 결정의 격자간격을 X선 회절분석 특성곡선의 이동치를 통해 계산한다. 계산된 격자간격은 응력을 받지 않은 결정의 격자간격에 대한 비로써 표현되어 잔류스트레인 값을 나타낸다. Hooke's Law에 기초하여 잔류스트레인 값에 광물결정의 탄성계수를 곱하여 잔류응력값이 계산된다. 이러한 X선 회절분석기법에 암석 내의 석영입자가 주로 이용되어 왔으며, 이는 변형된 석영입자의 회절분석곡선이 예리한 모양을 나타내며, 이동치가 크게 나타나기 때문이다. X선 회절분석기법은 측정의 간편함 때문에 초기의 잔류응력에 관한 연구에 많이 사용된 것으로 석영의 잔류응력 분포와 암석의 파괴양상이 잘 일치되는 성공적인 연구 결과가 보고되었다<sup>24</sup>. 하지만 X선 회절분석기법은 석영과 같은 특정광물 입자만을 주대상으로 한 것이며, 미세균열이 포함된 암석이나 광물입자에는 적용될 수 없는 단점이 있다<sup>7,23</sup>.

응력개방식 측정법은 현지응력장으로부터 분리된 암석의 표면에 스트레인 게이지를 부착한 뒤 암석의 일부를 절단시키면서 응력을 개방시킨다. 응력개방에 따른 암석의 변형정도는 스트레인 게이지를 통해 측정된다. 가장 간단한 측정법은 절단홈을 통해 응력을 개방시키면서 이루어진다 (Fig. 9).

하지만 이 방법은 스트레인 게이지와 절단홈이 이루

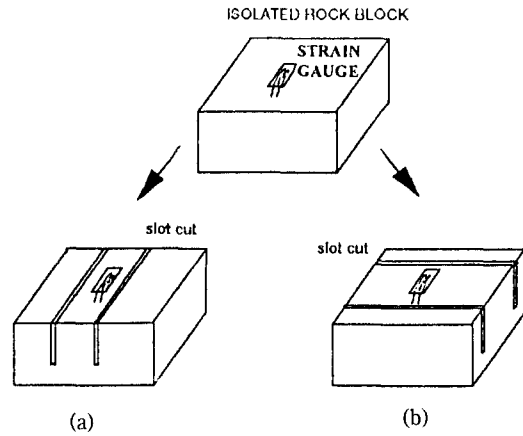


Fig. 9. Slot cutting method and its problem: orientation effect.

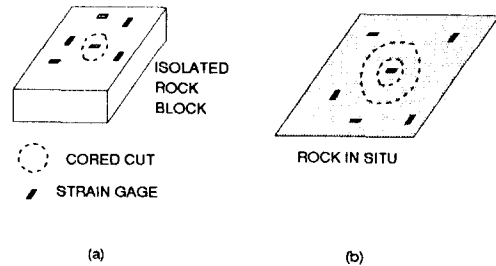


Fig. 10. Relaxation of residual stress by (a) overcoring on isolated rock block and (b) double overcoring.

는 방향과 홈의 간격 및 크기에 따라 응력개방의 크기와 방향이 달라지는 방향성 효과의 문제점이 있다. 이에 비해 overcoring이나 undercoring의 경우에는 원형의 경계면을 통해 등방성의 개방이 유도되는 장점이 있다 (Fig. 10).

이러한 응력개방식 측정법은 개방되는 암석의 부피에 따라 잔류응력의 크기와 방향이 달라지는 문제점이 지적된바 있다 (Fig. 11)<sup>25</sup>. 결국 현재까지의 방법으로는 잔류응력의 방향과 크기의 절대량을 측정하는 것은 가능하지 않다.

암석에 비해 잔류응력측정기법이 훨씬 더 발달해 있는 재료 및 기계공학분야에서는 상기 두가지 방법 이외에도 (i) 음파기법 (acoustic method), (ii) 자화기법 (magnetic method), (iii) 중성자 회절분석기법 (neutron diffraction method) 등의 측정 방법이 이용되고 있다 (Table 1). 암석을 대상으로 적용되는 X선

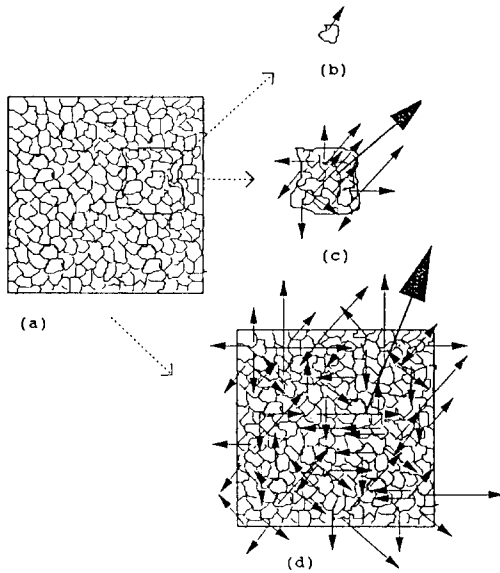


Fig. 11. Potential problems of interpreting residual strains as a function of scale. A large sample (a) contains grains (b) whose individual component of residual strain is shown. Clusters of grains (c) will have a different total vector, which itself may vary with size of sample from which it is measured (d).

Table 1. Various measurement techniques for residual stress in metal (adapted from Smith *et al.*, 1988<sup>26)</sup>).

(a) Mechanical method (measurement with relaxation)	
Fully destructive	Sachs boring method Complete sectioning Slot cutting
Semi-destructive	Surface measurement, using hole drilling Trepanning of columns
(b) Physical method (measurement without relaxation)	
Non-destructive	Acoustic method, Magnetic method, X-ray diffraction, Neutron diffraction

회절분석기법이나 응력계방식 측정법의 경우 상대적으로 균질한 재료인 세라믹이나 금속재료에서는 더 신뢰성 높은 결과치를 얻을 수 있다. 음파기법(acoustic method)은 잔류응력의 영향을 받은 매질에서의 음파 속도가 변화하는 원리를 이용한 것이며,<sup>27)</sup> 자화기법

(magnetic method)은 금속재료의 자화곡선에서 나타나는 특성을 이용한다.<sup>28)</sup> 중성자 회절분석기법(neutron diffraction)은 X선 회절분석기법에 비해 침투심도가 깊고 더 미세한 부피에 대해 측정할 수 있어 최근에 많이 이용되고 있다.<sup>26)</sup> 일반적인 암석재료는 금속에 비해 취성도가 더 크며 자성을 거의 가지지 않으므로 암석을 대상으로 이러한 방법을 적용하는 데에는 한계가 있다. 예를 들면, 최근의 한 연구는 자철석의 자장영역과 잔류응력의 관계를 이론적으로 다루었다.<sup>29)</sup>

#### 4. 보다 나은 측정을 위한 실험의 적용 사례

문헌을 통한 이론적 고찰을 통해 잔류응력이 암석의 공학적 거동에 끼치는 영향은 평소의 암석에서보다는 암석의 파괴시 균열의 전파를 통해 더 쉽게 나타날 수 있을 것으로 기대되었다. 특히 압축강도보다는 인장강도에 의해 더 명확하게 드러날 것으로 제안한 문헌이 있어,<sup>10)</sup> 이에 대한 가능성을 검토하는 실험을 실시하였다. 실험에는, 암석의 인장실험법으로 이방성을 잘 조사할 수 있는 것으로 알려진 hoop test가 이용되었다.<sup>30)</sup>

##### 4.1 시편채취지역의 지질구조

대상시료는 영국 서남부 지역(U.K. Grid Reference 3990 7140)의 Clevedon해변에서 발견되는 석회암으로 (Fig. 12) 생성연대는 365-350 Ma ( $10^6$  years ago)에 해당하는 것으로 알려져 있다.<sup>31)</sup> 시료채취대상으로 석회암이 고려된 이유는 입자의 크기가 작아 입자크기 효과(grain size effect)로 인한 오차를 줄일 수 있고, 시료가공이 상대적으로 용이하다는 점 때문이다. 또한 습곡지역이 선정된 이유는, 습곡지체의 형성은 당시의 지질구조적인 이방적 응력분포의 결과로 이루어진 것이며, 습곡면에서 관찰되는 자연절리면의 방향성에 의해 당시의 주응력 방향을 추정할 수 있기 때문이다.<sup>5,10,32)</sup> 본 습곡지역에서 관찰되는 절리는 주로 주향절리(strike joint)와 직각절리(crossfold joint)로 최대주응력( $\sigma_1$ )의 방향은 습곡경사방향에 평행한 것으로, 최소주응력( $\sigma_3$ )의 방향은 습곡층 방향에 평행한 것으로 추정된다 (Fig. 13a). 대부분의 절리방향은 추정된  $\sigma_1$ 과  $\sigma_3$ 의 방향에 평행하지만 SE 방향의 주향을 가지는 절리도 간혹 국부적으로 관찰되었다 (Fig. 13b).

대상 습곡면의 경사(dip)와 경사방향(dip direction)은 각각  $10^\circ$  - $40^\circ$ , N $160^\circ$  - $190^\circ$ 의 값을 보였다. 이는 영

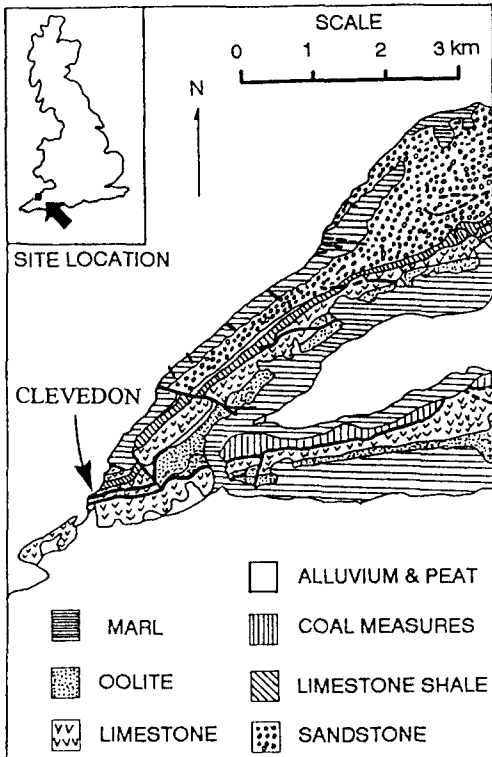


Fig. 12. Location and geology map of sampling site for Carboniferous Limestone at Clevedon, UK (Grid Reference: 3990 7140).

국 내의 다른 습곡지역에서도 흔히 관찰되는 경향성으로 과거 북부유럽 전역에 광범위하게 작용된 압축응력에 의한 것으로 판단된다. 시편채취를 위해  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  방향과 평행한 방향의 절리가 발달된 지역을 대상으로 수평면에 가까운(경사  $10^\circ$  이하) 습곡면에서 두개의 석회암 블록을 채취하였다. 각 블록은 대략  $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 의 크기를 나타내었다. 습곡면의 경사방향과 반대방향을 기준선으로 정해 이를  $0^\circ$ 로 하고 반시계 방향으로 각도를 표시하였다(Fig. 13). 따라서 직각절리면과 주향절리면은 각각  $90^\circ$ (또는  $270^\circ$ ),  $0^\circ$ (또는  $180^\circ$ )의 방향성으로 표시될 수 있다.

4.2 시편의 가공 및 관찰

두개의 블록은 서로 2 m 정도의 심도차이를 두고 채취되었다. 지표면에 가까운 블록이 약간 더 풍화된 듯이 보였으나 두개의 블록 모두 ISRM의 6단계 풍화분류상<sup>33)</sup> SW등급에 속하는 것으로 관찰되었다. 자연절리로 경계된 각 석회암 블록 내부는 균질한 응력의 영

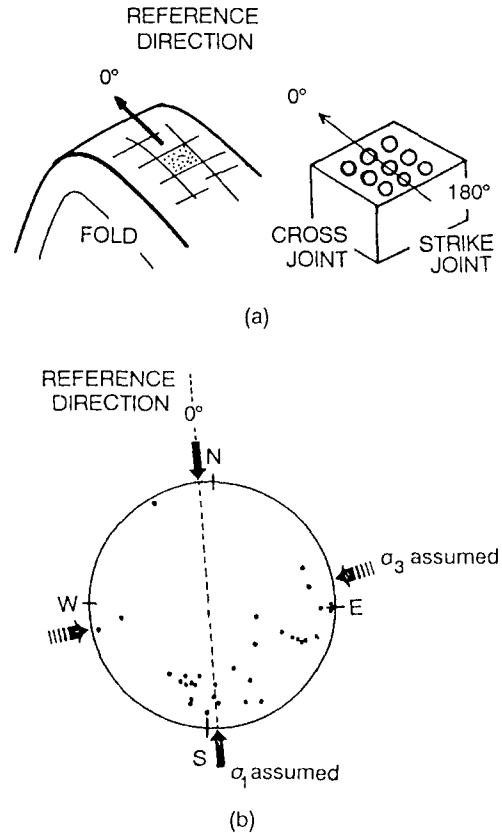


Fig. 13. Relationship between orientation of sample and natural joint sets in the fold.

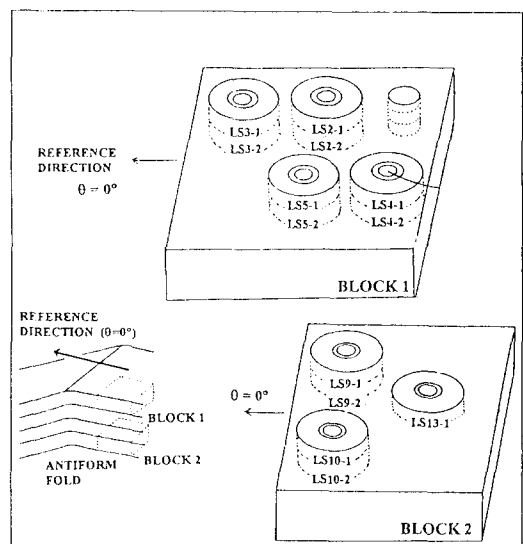


Fig. 14. Arrangement of corings.

향을 받았을 것으로 예상되지만 시편들 사이에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위해 가능한 한 최대한 인접한 상태로 준비하였다 (Fig. 14). 또한 시료의 규격도 가능한 한 동일한 범위로 제작하였으며 (Table 2참조), 내부코어링을 먼저 행하고 외부코어링을 하여 코어링으로 인한 오차를 줄이고자 하였다. 또한 각 시료의 방향에 따른 인장파괴의 이방성을 관찰하기 위해

0°, 45°, 90°, 135° 등 4가지의 파괴예정 방향이 선정되어 각 시편에 표시되었다.

국부적으로 나타나는 0.5-8 mm 폭의 방해석 맥은 특정한 방향성을 보이지는 않았으며 가끔적 hoop 시편에 포함되지 않도록 코어링 작업시 주의를 기울였다. 시편으로 사용된 석탄기 석회암(Carboniferous Limestone)은 연회색 세립질의 방해석과 돌로마이트로 구성

Table 2. Details of the dimension of Clevedon limestone hoop sample.

Sample No.	Condition	Inner diameter (mm)	Outer diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Block No.
LS 2-1	DRY	43.13	94.14	46.77	2385.74	257.2	1
LS 3-1	DRY	43.61	94.62	46.86	2390.33	259.5	1
LS 4-1	DRY	44.19	94.40	46.49	2334.26	254.1	1
LS 5-1	DRY	43.63	94.50	47.70	2426.50	263.2	1
LS 9-1	DRY	43.13	94.66	46.65	2403.87	260.1	2
LS10-1	DRY	44.45	94.64	46.23	2320.28	253.5	2
LS13-1	DRY	43.89	94.30	46.45	2341.54	254.1	2
LS 2-2	SAT	43.15	94.26	47.74	2439.99	263.3	1
LS 3-2	SAT	43.63	94.62	47.31	2412.34	261.9	1
LS 4-2	SAT	43.51	94.34	47.39	2408.83	260.8	1
LS 5-2	SAT	43.41	94.86	46.83	2409.40	261.7	1
LS 9-2	SAT	43.07	94.76	46.49	2403.07	260.1	2
LS10-2	SAT	43.97	94.66	46.77	2370.77	258.1	2

(i) DRY : hoop samples dried over P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

(ii) SAT : hoop samples saturated with distilled water under vacuum.

Table 3. Characterization of Clevedon limestone samples

Sample No.	Mass dry (sample)	Mass sub. (sample+ container)	Mass sub. (container)	Mass sub. (sample)	Mass sat. (sample)	Bulk vol. (cm <sup>3</sup> )	Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. of voids (cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
	A (g)	B (g)	C (g)	M <sub>sub</sub> (g)	M <sub>sat</sub> (g)				
LS 2-1	676.1	1775.0	1352.3	422.7	684.7	262.6	2.575	8.619	3.282
LS 3-1	678.4	1780.8	1352.3	428.5	686.7	258.8	2.621	8.318	3.214
LS 4-1	666.8	1774.0	1352.3	421.7	674.8	253.7	2.628	8.018	3.160
LS 5-1	690.7	1788.6	1352.3	436.3	698.7	263.0	2.626	8.018	3.049
LS 9-1	687.3	1786.6	1352.3	434.3	692.8	259.1	2.653	5.512	2.127
LS10-1	669.1	1774.6	1352.3	422.3	674.6	252.9	2.646	5.512	2.180
LS11-2	680.5	1781.9	1352.3	429.6	686.8	257.8	2.640	6.314	2.449
LS13-1	671.3	1777.4	1352.3	425.1	679.1	254.6	2.637	7.817	3.070
LS 2-2	684.6	1784.7	1352.3	432.4	694.2	262.4	2.609	9.621	3.667
LS 3-2	680.7	1781.2	1352.3	428.9	698.4	261.1	2.607	8.719	3.339
LS 4-2	675.1	1783.8	1352.3	431.5	688.7	257.8	2.619	13.630	5.287
LS 5-2	674.4	1777.4	1352.3	425.1	682.4	257.9	2.615	8.018	3.109
LS 9-2	687.3	1785.7	1352.3	433.4	691.8	259.0	2.654	4.510	1.741
LS10-2	679.6	1782.5	1352.3	430.2	685.4	2555.8	2.657	5.813	2.272

(i) vol.=volume, sub.=submerged, sat=saturated.

(ii) The water temperature at the time of the experiment was 22°C : the water density at this temperature=0.9978003 (Tilton and Taylor, 1937<sup>34</sup>).



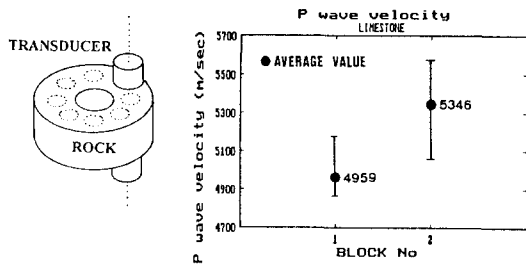


Fig. 15. P-wave velocity measurement on hoop samples.

되어 있으며 neomorphic 조직을 보였다. 돌로마이트는, 2 mm 이하 크기의 pseudospar matrix 내에 자형(euhedral)의 능면체(rhomb) 형태로 발달되어 있었다. 방해석과 돌로마이트의 구성을 관찰하기 위해 현미경 박편의 커버글라스를 제거하고 석회암 박편 표면을 "Alizarine Red-S 0.2% in 0.2% HCl"로 처리하였다. 방해석은 붉은 색으로 변화되었고 돌로마이트는 색의 변화가 없으므로 각 광물의 방향성을 구분지어 관찰하였으나 특정한 방향성은 나타나지 않았으며, 미세균열의 특별한 방향성도 나타나지 않았다.<sup>25)</sup> 따라서 대상시편들에서 입자조직이나 미세균열에 의한 이방성은 없을 것으로 예상되었다.

각 시편의 물성은 ISRM<sup>33)</sup>의 제안에 따라 실시되었다. 건조밀도는 2.58-2.66 (g/cm<sup>3</sup>)의 범위를 보였다 (Table 3). 유효공극률은 1.74-5.29(%)의 범위를 나타내었다. 각 블록별로 비교하면, 1번 블록에서는 평균치 3.51(%, 표준편차 0.69(%)의 값을 나타내었고, 2번 블록에서는 평균치 2.31(%, 표준편차 0.40(%)의 값을 나타냄으로써 표면에 가까운 1번 블록이 약간 더 풍화되었음을 나타내고 있다. 이와 관련되어 각 시편에서 측정된 (Fig. 15) P파의 속도에서도 심도가 깊은 2번 블록의 시편의 입자조직이 약간 더 치밀한 것으로 관찰됨에 따라 1번 블록에 비해 상대적으로 큰 인장강도 값을 보일 것으로 예상되었다.

### 4.3 시편의 건습처리과정

두개의 블록으로부터 총 13개의 hoop 시편이 준비되었다. 건조상태의 실험을 위해 7개의 시료는 오산화인(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)으로 채워진 데시케이터에 보관되었다. 왜냐하면 일반적인 암석의 건조에 사용되는 105°C로 유지되는 오븐건조 방식은 암석 내부에 균열을 유도하거나 내부에 저장되어 있는 잔류변형에너지를 방출시킬 수 있기

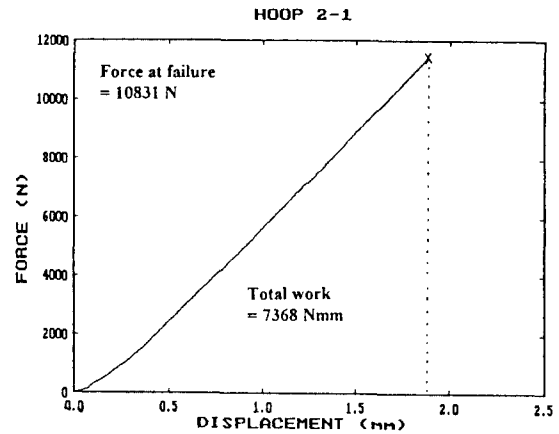


Fig. 16. An example of force vs displacement (calculated from piston movement) curve from a hoop test.

때문이다.<sup>35,36)</sup> 암석역학 실험에서 강력한 건조제로 사용된 적이 있는 오산화인(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)은 분말상태로써 수분 흡수에 따라 액체로 변화되므로 필요시 신선한 분말상태의 오산화인(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)으로 수시로 교체되었다. 시간변화에 따른 시편의 질량변화를 관찰하면서 약 2주후 더 이상의 질량변화가 없고 오산화인(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)도 신선한 분말상태로 유지되었을 때까지 건조시킨 뒤 인장파괴에 사용되었다. 나머지 6개의 시료는 증류수를 담은 데시케이터에 넣어 증류수에 잠기게 하고 펌프를 사용하여 데시케이터 내부의 압력을 낮추어 기포 발생이 더 이상 관찰되지 않을 때까지 시료가 충분히 포화되도록 하였다. 포화과정 중 시편의 표면이나 구석에 포획되어 있는 기포를 제거하기 위해 시편을 흔들어 주었다. 포화가 끝난 시료는 외부 공기와 차단되고 증류수에 잠긴 상태로 인장파괴 되었다.

### 4.4 Hoop test를 이용한 인장파괴실험

새로운 인장실험법인 hoop test는 특별한 불연속면을 포함하지 않는 시편의 경우 원하는 방향으로 암석을 인장파괴시킬 수 있는 장점이 있다.<sup>25,30)</sup> Hoop test는 시료의 내부공에 삽입된 반원형의 loading ram이 바깥 방향으로 팽창하면서 암석을 인장파괴시키는 원리를 가지고 있다. 가해진 하중과 변위는 영국 GDS사의 하중장치와 컴퓨터를 통해 파괴시까지 기록되며, 파괴에 사용된 일의 총량을 계산할 수 있다 (Fig. 16).

1번 블록에서는 건조시료와 포화시료를 각각 4가지

Table 4. Result of hoop tests on the Clevedon limestone: ( $\theta$ : the clockwise angle from the reference direction defined in Fig. 13; DRY: dried over  $P_2O_5$ ; SAT: saturated with distilled water under vacuum).

Sample No.	Condition	Orientation $\theta(^{\circ})$	Max F. (N)	F/A ( $N/mm^2$ )	Total W (Nmm)	W/Unit vol. (N/mm)
LS 2-1	DRY	0	10831.32	4.540029	7368.16	0.028647
LS 3-1	DRY	135	7445.33	3.114771	4315.42	0.016629
LS 4-1	DRY	45	7380.28	3.161717	4104.57	0.016153
LS 5-1	DRY	90	7379.01	3.041011	4414.18	0.016771
LS 9-1	DRY	0	12049.15	5.012837	10665.9	0.041007
LS10-1	DRY	90	10667.91	4.597674	8844.94	0.034891
LS13-1	DRY	135	9702.98	4.143837	7510.80	0.029558
LS 2-2	SAT	0	6679.98	2.737706	3293.43	0.012508
LS 3-2	SAT	135	6028.55	2.499048	2934.04	0.011202
LS 4-2	SAT	45	3709.34	1.539889	2276.65	0.008729
LS 5-2	SAT	90	5620.17	2.332597	2437.93	0.009315
LS 9-2	SAT	0	8802.46	3.663007	5846.38	0.022477
LS10-2	SAT	90	8637.77	3.643444	5618.03	0.021766

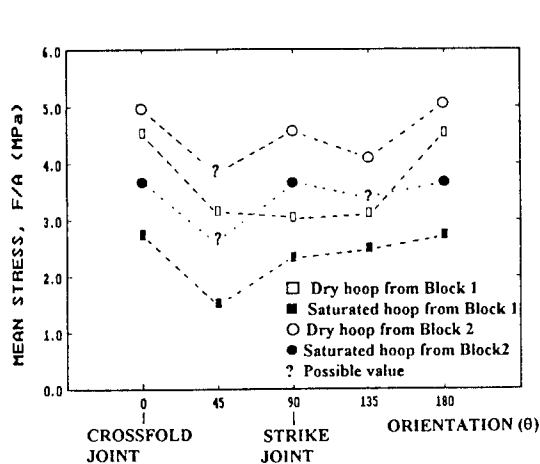


Fig. 17. Plot of the mean tensile stress in hoop vs orientation: ( $\theta$ : the clockwise angle from the reference direction defined in Fig. 13).

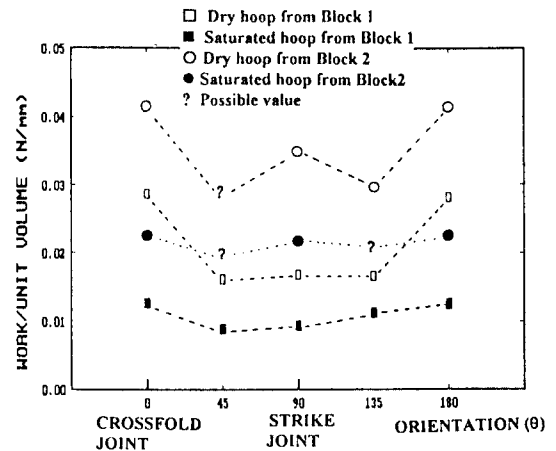


Fig. 18. Plot of the work/unit volume of hoop vs orientation: ( $\theta$ : the clockwise angle from the reference direction defined in Fig. 13).

방향으로 파괴하도록 배열하였으나 2번 블록에서는 시료개수로 인한 제약 때문에 4가지 방향 모두에 대해 파괴시킬 수는 없었다. 각 시료에 대한 파괴방향 ( $\theta$ )과 최대하중(Max F), 파괴인장응력(F/A, 최대하중/파괴단면적), 파괴에 사용된 총 일량(Total W), 단위부피당 총 일량(W/Unit V) 등을 계산하여(Table 4), 도표로 나타내었다(Fig. 17 & Fig. 18).

#### 4.5 실험결과의 해석 및 토론

파괴시의 최대인장응력을 각 블록별로 비교해보면(Fig. 17), 지표면에 더 가까운 1번 블록에서 채취된 시편의 최대인장응력이 더 낮게 나와 유효공극률과 P파

속도에서 보여준 결과와 일치되었다. 또한 증류수로 포화된 시료의 경우 건조된 시료에 비해 파괴에 사용된 일의 양이 적게 나타나 일반적으로 수분함량과 암석강도의 반비례관계로써 설명될 수 있다.

시료의 갯수에 따른 제한 때문에 체계적으로 이방성을 관찰하기는 어렵지만 전반적으로 이방성을 가지는 것으로 나타났다. 특이한 것은 자연절리면과 평행한 방향인 0°, 90°방향의 파괴면이 형성되도록 파괴시킬 때 더 많은 일이 소모된 점이다(Fig. 18). 만약 절리생성과 관련되어 절리와 평행한 방향의 미세절리가 석회암 블록 내부에 형성되었다면 최대인장응력은 0°와 90°방향에서 오히려 낮은 값을 보였을 것으로 예상된다. 이

와는 반대로 관찰된 이번 경향은 다른 연구에서 관찰된 바와 같이,<sup>8,21,37)</sup> 잔류응력이 절리에 수직인 방향(0°, 90°)으로 선택적으로 개방되었으며, 다른 방향(45°, 135°)으로는 계속 저장되어온 잔류응력이 인장파괴와 더불어 개방되면서 암석파괴를 도와주는 역할을 한 것으로 판단된다.

그동안 행해진 암석파괴의 이방성에 관한 연구는 주로 암석 내의 미세균열이나 암석입자조직에 관련시켜 해석되어 왔으나<sup>38,39)</sup> 미세균열이나 암석조직의 이방성이 발견되지 않는 본 석회암의 경우에는 잔류응력이 암석의 파괴에 끼치는 영향에 대한 기초연구대상으로 적당한 것으로 판단된다.<sup>40)</sup>

## 5. 결론 및 제안

본 연구를 통해 다음과 같은 결론과 제안을 요약할 수 있다.

(1) 암석 내의 잔류응력은 때때로 암석의 인장강도보다 큰 값을 보이며 따라서 자연인장파괴를 유도할 수 있는 충분한 크기를 가진다. 유사재료분야인 금속 및 세라믹에서는 잔류응력이 재료의 공학적 성질에 심각한 영향을 끼치는 것으로 이미 알려져 있으므로 암반 내의 잔류응력이 암석구조물의 공학적 거동에 끼치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 또한 현지응력 측정시에도 영향을 끼칠 것으로 판단되므로 이에 대한 연구가 필요하다.

(2) 잔류응력에 대한 고전적 측정방법인 X선 회절분석이나 응력개방법을 이용한 측정시 방향성효과, 크기 효과가 있으므로 절대치를 구할 수는 없다.

(3) 잔류응력을 유발시킨 암반 내의 잔류저장 변형률 에너지(Residual stored strain energy)는 절리면에 수직인 방향에 대해 선택적으로 개방되며 다른 방향에 대해서는 잔류적으로 저장되어 있다. 특정 방향으로 저장되어 있는 잔류에너지는 이후의 경계면의 형상 변화나 열충 등에 의해 개방될 수 있으며, 또한 암석의 파괴시 영향을 끼치며 특히 암석의 인장강도의 변화에 더 심각한 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 석회암시료는 미세균열이나 광물입자의 특정 방향성을 보이지 않았으며, 관찰된 인장강도의 이방성은 습곡작용 당시에 작용된 이후로 잔류된 에너지의 방출에 기인한 것으로 설명될 수 있다.

(4) 잔류응력의 영향에 대한 일반화된 결과를 밝히기

위해서는 앞으로 더 많은 실험이 체계적으로 이루어져야 할 것이며, 특히 열충으로 인한 잔류에너지 개방에 대한 연구는 심부지열발전 시설설계나 핵폐기물 지하처리장 건설설계와 관련되어 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 6. 감사의 글

본 연구논문은 영국 런던 Imperial College의 Engineering Geology Group에서 행해진 박사학위논문을 위한 연구를 토대로 "1995년도 배재대학교 교내 학술연구비"의 재정지원에 따라 이루어졌음을 밝힌다. 또한 본 연구에 도움을 준 논문지도교수 Dr. M.H. de Freitas, 부지도교수 Dr. J.W. Cosgrove 및 Mr. P.S. B. Colback, 암석의 인장강도에 대한 토론을 해주었던 Prof. J.A. Hudson, 기계공학 분야의 잔류응력에 대한 유익한 문헌들을 제공해 준 Prof. G.A. Webster (Dept. of Mechanical Engineering, Imperial College), 암석 내 잔류응력에 대한 좋은 토론을 해주었던 Prof. T. Engelder 등에게 진심으로 감사 드린다.

## 참 고 문 헌

- Haimson, B.C. and Kim, K. (coordinators), 1993, Modern in-situ stress measurement methods: short course handbook, 34th U.S. Symp. Rock Mech., University of Wisconsin - Madison.
- The Royal Society of London, 1991, Tectonic stress in the lithosphere (eds. Fairhead, J.D. and Kusznir, N.J.), Phil. Trans. R. Soc. London. Series A., Vol.337, No.1645, pp.1-194.
- Dyke, C.G., 1988, In situ stress indicators for rock at great depth, PhD thesis, Imperial College, University of London.
- Hyett, A.J., 1990, Numerical and experimental modelling of the potential state of stress in a naturally fractured rock mass, PhD thesis, Imperial College, University of London, pp.365.
- Price, N.J., 1966, Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock, Pergamon Press, Oxford.
- Friedman, M., 1972, Residual elastic strain in rocks, Tectonophysics, Vol.15, pp.297-300.

7. Holzhausen, G.R. and Johnson, A.M., 1979, The concept of residual stress in rock, *Tectonophysics*, Vol.58, pp.237-267.
8. Engelder, T. and Geiser, P.A., 1980, On the use of regional joint sets as trajectories of paleostress fields during the development of the Appalachian Plateau, New York, *Jour. Geophys. Res.*, Vol.85, pp.6319-6341.
9. Hoskins, E.R. and Russell, J.E., 1981, The origin of the measured residual strains in crystalline rocks in "The mechanical behaviour of crustal rocks (eds. Carter, N.L., Friedman, M., Logan, J.M. and Stearns, D.W.)", *Geophysical Monograph*, Vol.24, pp.187-98.
10. Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1990, *Analysis of geological structures*, CUP, pp.502.
11. Cosgrove, J. (Reader, Dept. of Geology, Imperial College), 1991, personal communication.
12. Logan, J.M., Hastedt, M., Lehnert, D. and Denton, M., 1993, A case study of the properties of marble as building veneer, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.30, pp. 1531-1537.
13. Zaruba, Q. and Mencl, V., 1976, *Engineering geology*, Elsevier Scientific Publishing Company.
14. Bowen, R., 1984, *Geology in engineering*, Elsevier Applied Science Publishers. pp.411.
15. Cooper, A.R., 1982, Residual stress development in ceramics in "Residual stress and stress relaxation (eds. Kula, E. and Weiss, V.)", *Proc. 28th Conf. S.A.M.R.*, Lake Placid, Vol.28, pp.437-465.
16. Van Vlack, L.H., 1989, *Elements of materials science and engineering* (6th ed.).
17. McClintock, F.A. and Argon, A.S., 1966, Residual stress in "Mechanical behaviour of materials", Addison-Wesley Publication, pp.420-439.
18. Masubuchi, K., 1982, Residual stress and distortion in weldments in "Residual stress and stress relaxation (eds. Kula, E. and Weiss, V.)", *Proc. 28th Conf. S.A.M.R.*, Lake Placid, Vol. 28, pp.49-59.
19. Webster, P.J., Low, K.S., Mills, G. and Webster, G.A., 1990, Neutron measurement of residual stresses in a used rail, *Materials Research Symp.* (eds. Shapiro, S.M. and others), Vol.166, pp.311-316.
20. Gazzara, C.P., 1982, X-Ray residual stress measurement systems for army material problems in "Residual stress and stress relaxation (eds. Kula, E. and Weiss, V.)", *Proc. 28th Conf. S.A.M.R.*, Lake Placid, Vol.28, pp.369-387.
21. Swolfs, H.S., Handin, J. and Pratt, H.R., 1974, Field measurements of residual strain in granitic rock masses, *Proc. 3rd Congress ISRM*, Vol. 2, pp.563-568.
22. Varnes, D.J. and Lee, F.T., 1972, Hypothesis of mobilisation of residual stress in rock, *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol.83, pp.2863-2866.
23. Engelder, T., 1993, *Stress regimes in the lithosphere*, Princeton Univ. Press. pp.457.
24. Friedman, M. and Logan, J.M., 1970, Influence of residual elastic strain on the orientation of experimental fractures on three quartzose sandstones, *Jour. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.387-405.
25. Park, H.D., 1995, Tensile rock strength and related behaviour revealed by hoop tests, PhD thesis, Imperial College, University of London. pp.498.
26. Smith, D.J., Leggatt, R.H., Webster, G.A., MacGillivray, H.J., Webster, P.J. and Mills, G., 1988, Neutron diffraction measurements of residual stress and plastic deformation in an aluminium alloy weld, *Jour. Strain Analysis*, Vol. 23, pp.201-211.
27. James, M.R. and Buck, O., 1981, Quantitative non-destructive measurements of residual stresses, *CRC Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, Vol.9, No.61, pp.61-105.
28. Langman, R., 1981, Measurement of the mechanical stress in mild steel by means of rotation of magnetic field strength, *NDT International*, Vol.14, pp.255-262.
29. Ye, J. and Merrill, R.T., 1995, Residual stress and domain structure, *Jour. Geophys. Res.*, Vol. 100, No.B6, pp.9995-10002.
30. Butenuth, C., de Freitas, M.H., Park, H.D., Schetelig, K., Van Lent, P. and Grill, P., 1994, Observations on the use of the hoop test for measuring the tensile strength of anisotropic rock, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.31, No.6, pp.733-741.
31. Green, G.W., 1992, *British regional geology*:

- Bristol and Gloucester region (3rd ed.), HMSO, U.K.
32. Einstein, H.H. and Dershowitz, W.S., 1990, Tensile and shear fracturing in predominantly compressive stress fields - A review, *Eng. Geol.*, Vol.29, pp.149-172.
  33. ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981, Rock characterization testing and monitoring: ISRM Suggested Methods (ed. Brown, E.T.), Pergamon Press.
  34. Tilton, L.W. and Taylor, J.K., 1937, *J. Research Natl. Bur. Standards*, Vol.18, pp.205.
  35. Engelder, T. (Professor, Dept. of Geosciences, Pennsylvania State University), 1994, personal communication.
  36. Colback, P.S.B. (Honorary Research Associate, Dept. of Geology, Imperial College), 1994, personal communication.
  37. Engelder, T., 1987, Joints and shear fractures in rock in "Fracture mechanics of rock (ed. Atkinson, B.K.)", pp.27-69.
  38. Douglass, P.M. and Voight, B., 1969, Anisotropy of granites: A reflection of microscopic fabric, *Geotechnique*, Vol.19, pp.376-398.
  39. Kranz, R.L., 1983, Microcracks in rocks: A review, *Tectonophysics*, Vol. 100, pp.449-480.
  40. Park, H.D. and de Freitas, M.H., 1994, The application of the hoop tension test to a study of the residual stored strain energy within a jointed rock mass, *Proc. 7th Congress. Int. Assoc. Eng. Geol.*, Lisbon, Portugal, Vol.2, pp.645-650.