

암석의 미세균열의 발달과 분포의 예측방법에 관한 연구

백환조¹⁾ · 김덕현²⁾ · 최성범²⁾

Study on the Prediction of the Occurrence and Distribution of the Microcracks in Rock

Hwan-Jo Baek, Deok-Hyun Kim and Sung-Bum Choi

ABSTRACT Microcracks in rock materials, whether natural or induced, provide useful information on the engineering performance of in situ rockmasses. A population of preferentially oriented microcracks has observable effects on the physical properties of a rockmass, but their effects may not be evident if the rock material is highly anisotropic due to other causes. An experimental program was undertaken to investigate the effect of rock fabrics on the physical properties of rock materials. In this study, anisotropy in the circumferential wave velocity and the direction of induced fractures under axial point loading were measured. Rock specimens (NX-size) of the leucocratic Pocheon granite were cored from rock blocks, retaining the relative directions of each specimen. Another set of specimens was prepared from the rock cores of the same material, obtained in the field. The master orientation line (MOL) was set to be the representative direction of the microcracks in the specimen. Variation of the circumferential wave velocity of each specimen was then measured along the core, keeping the MOL as reference. The direction of the minimum wave velocity was nearly perpendicular to the direction of the MOL. Coring of smaller-sized (EX-size), concentric specimens from the NX specimens were then followed, and axial point loading was applied. The direction of induced fractures due to axial point loading was closely related to the MOL direction, confirming the prior test result.

Key words : microcracks, circumferential velocity anisotropy, axial point loading

초 록 자연적으로, 혹은 인위적으로 발생된 균열들은 현지암반의 공학적 거동에 대한 중요한 자료를 제공한다. 일정한 방향으로 분포하는 미세균열들은 암반의 물성에 현저한 영향을 미치게 되지만, 다른 요인들에 의한 이방성이 큰 경우에는 이들의 영향은 감소한다. 본 연구에서는 초음파속도의 이방성과 점하중 재하에 의한 인공균열의 진행방향을 기초로, 암석 조직이 암석의 물성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 암석시료는 우백질의 포천화강암 석재에서 코어링한 NX 시험편과 현장 시추코어를 사용하였다. 시료에 분포하는 균열들의 주 방향을 기준으로 설정한 후, 초음파속도의 이방성을 측정할 결과, 균열에 수직인 방향에서 초음파속도의 최소치가 측정되었다. 속도측정에 사용한 NX 코어로부터 EX 크기의 원관형 시험편을 성형한 후 점하중 재하실험을 수행하였으며, 점하중재하에 의한 인공균열의 진행방향은 기존의 미세균열의 방향과 거의 일치하였다.

핵심어 : 미세균열, 초음파속도 이방성, 점하중재하

1. 서 론

현재 국내에서는 터널이나 유류 및 액화가스 비축시설, 양수발전시설 등이 건설되고 있으며, 앞으로 방사성폐기물의 지하처분장, 농축산물의 저장 등을 위한 지하공간의 개발은 더욱 활발해질 것으로 예상된다. 터널이나 지하공간의 굴착을 위한 설계에서 기본적으로 고

려되어야 할 사항은 현지암반의 공학적 특성이다. 여기에는 암석의 역학적인 특성이나 여러 가지 불연속면들의 분포상황 및 현지반 응력에 대한 자료가 포함된다.

암반의 주응력의 크기나 방향을 측정하기 위한 방법은 시추공을 대상으로 하는 시험과 시추코어에 대한 실

- 1) 정회원, 강원대학교 공과대학 자원공학과 교수
- 2) 학생회원, 강원대학교 대학원 자원공학과 석사과정

내실험 및 광역적인 지질자료에 근거하는 방법들로 크게 구분할 수 있다(Hill 등, 1993). 국내에서 일반적으로 적용되는 방법은 응력해방법이나 수압파쇄법 등 시추공을 대상으로 한다. 암반에 존재하는 자연적인 균열들에 의하여 측정자료가 영향을 받게 되므로, 공벽에 대한 화상분석(image logging)이나 물리검층 등을 통하여 자료를 보완한다. 시추코어를 대상으로 한 방법은 코어시료에 포함되어 있는 미세균열의 특성을 파악하여 현지반에 작용하는 주응력의 방향을 추측하는 것이다. 즉, 비탄성변형을 회복율(anelastic strain recovery, ASR)이나 acoustic emission을 측정하여 시험편에 분포하는 미세균열들의 특성으로부터 현지반 응력의 크기나 방향을 파악할 수 있다. 이 경우, 시험편의 방향성이 유지되어야 하므로 integral sampling을 적용하거나 core orientator 등을 사용하여 시추코어의 방향성을 기재하여야 한다(Bell, 1993). 마지막으로, 광역적인 지질 자료를 이용한 방법에서는 지구물리탐사나 지질조사 등을 통하여 얻은 자료로부터 광역적인 지반응력의 분포상을 추정한다(Hancock and Engelder, 1989; Zoback and Zoback, 1989).

앞에서 언급된 바와 같이, 암석 내의 미세균열은 암반의 응력상태를 나타내는 중요한 지표가 된다. 즉, 방향성이 유지된 시추코어들에 분포하는 미세균열의 방향과 균열의 종류로부터 현지반의 응력방향에 대한 추측이 가능하다. 또한, 암석 내의 미세균열은 광역적인 파쇄대의 분포와 밀접하게 연관되어 있으며, 파쇄대의 발달방향이나 지하수의 유동방향을 예측할 수 있는 자료를 제공한다. 본 연구는 이러한 목적을 위한 기초로서, 암석 실내실험에서 적용되는 방법들을 적용하여 방향성을 갖는 미세균열들이 암석물성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 미세균열

암석 내의 미세균열은 대부분 오랜 지질시대를 거치면서 형성되며, 미세균열이나 자연절리들의 형성원리는 균열형성에 작용하는 외부압력의 형태 및 경계면의 변위의 유무에 따라 크게 4가지로 분류된다. 먼저, joint parallel stretching은 균열면에 수직인 방향의 인장력이 작용하는 경우이며 습곡층에 형성되는 인장절리가 이에 속한다. Thermoelastic contraction은 암반의 냉각과정에서 열팽창율의 차이에 의하거나, 혹은 상부지

압의 감소에 의한 암반수축에 의하여 형성되는 수직방향의 절리들을 의미한다. Fluid-driven fracture는 암석의 공극이나 균열을 따라 흐르는 유체의 압력이나 열수용액의 열응력 등에 의하여 형성되는 균열을 의미하며, 이 때 균열의 진행방향은 외부압력, 즉 암반응력이 최소인 방향에 수직으로 형성된다. 마지막으로 axial splitting이란 기존의 균열방향으로 작용하는 최대주응력의 영향에 의하여 주응력방향으로 진행되는 새로운 균열을 의미한다(Engelder, 1987). 이와 같은 균열들을 일차 균열, 혹은 구조 균열(tectonic microcrack)이라고 하며 이들은 암반 내의 최대 주응력방향과 나란하게 발달된다.

한편, 시추에 의하여 주변의 응력이 제거되면 암석 내에는 새로운 균열들이 형성되는데 이는 응력에 의하여 암석 내에 저장되어 있던 변형률 에너지(strain energy)의 개방에 의하여 형성된다. 따라서 이러한 균열들의 진행방향은 기존의 변형률이 최대인 방향, 즉 최대주응력이 작용하는 방향에 수직으로 형성되며 이들을 이차 균열, 혹은 이완균열(relaxation microcrack)이라고 한다. 따라서, 암석 내에 형성되는 이완균열들의 방향이나 코어시료의 비탄성변형을 회복율로부터 현지에 작용하고 있는 최대 암반응력의 방향이나 크기를 추정할 수 있다.

일반적으로 응력의 개방에 의한 이완균열들은 광물 입자들 사이의 경계를 따라 형성되는 경우가 많고 대부분 일정한 폭을 나타낸다. 반면에 오랜 지질시대를 통하여 암반에 작용하는 응력에 의하여 형성되는 구조균열들의 경우에는 입자들 사이의 경계 뿐만 아니라 입자를 통과하며 발달하기도 한다. 특히 구조균열의 경우에는 오랜 지질시대를 거치면서 지하수의 유동 통로로 작용하였을 가능성이 있으며, 여러 광물질들이 침전되거나 혹은 균열 벽면이 용해되어 균열 폭의 변화가 심하다(Hill 등, 1993).

3. 시험방법

현지 암반의 최대응력의 방향은 이완균열의 방향과 밀접하게 연관된다. 따라서, 이완균열의 방향성에 크게 좌우되는 암석물성들을 측정하여 최대응력의 방향을 추정할 수 있을 것이다. 그러나, 암석내의 균열들은 대부분 불규칙적으로 분포되어 있으며, 오랜 지질시대를 거치는 동안 여러 형태의 균열들이 혼합되어 존재한다.

또한 층리나 엽리, 혹은 구조균열 등과 같은 암석조직에 의한 이방성이 존재하는 경우에는 암석물성에 대한 이완균열의 영향은 감소된다.

본 연구에서는 중립질 내지 조립질의 우백질(leucocratic) 포천화강암을 대상으로, 방향에 따른 초음파속도의 변화 및 점하중재하에 의한 인공균열의 진행방향을 고찰하였다. 초음파속도나 점하중재하는 시험방법이 간단하고 현장에서 적용할 수 있는 장점을 갖는다. 암석시료는 석재상에서 구입한 석재블록과 석산 현장에서 얻은 시추코어를 각각 Group A와 Group B로 구분하여 사용하였다. Group A의 석재시료는 외견상 매우 신선하지만, Fig. 1(a)의 박편사진에 나타난 바와 같이 일정한 방향으로 분포하고 있는 미세균열의 존재를 확인할 수 있다. 균열의 방향은 대략 주결(rift plane)의 방향과 나란하다. 석산평가를 위한 시추코어의 경우에는 채취심도에 따라 풍화의 정도가 다르며, 특히 지표면 근처에서 회수된 코어의 경우에는 풍화에 따른 균열의 발달이 심하다. Group B의 시료들은 채취심도가 포토층 하부로부터 2 m~8 m 정도로서 외견상 풍

화가 많이 진행되었으며, Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 Group A의 시료들에 비하여 균열의 빈도나 폭이 비교적 크다.

각 Group에 대하여 6개의 시험편을 제작하였으며, Fig. 2는 각 단계의 실험을 위한 시험편 성형과정을 나타낸다. Group A의 시험편들은 석재블록으로부터 NX 코어를 시추하였으며, Group B의 경우에는 시추코어를 그대로 사용하였다. 먼저, 시험편에 기준선(MOL : master orientation line)을 표시하고, 여기에 인접하여 선을 그려서 시험편의 상하구별이 가능하도록 하였다. MOL은 석재블록의 경우에는 주결의 방향과 일치하도록 하였으며, 시추코어의 경우에는 육안으로 확인할 수 있는 균열들의 주방향을 택하였다. 일반적으로 화강암의 주결은 연직방향으로 작용하는 응력의 개방에 의한 것으로, 주로 수평방향으로 나타나는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 주결의 방향은 석산종사자들이 경험적으로 판단하여 표시한 '깨지기 쉬운' 방향을 택하였으며, 이는 현미경 관찰에 의한 미세균열들의 방향과 대체적으로 일치하는 것으로 확인되었다.

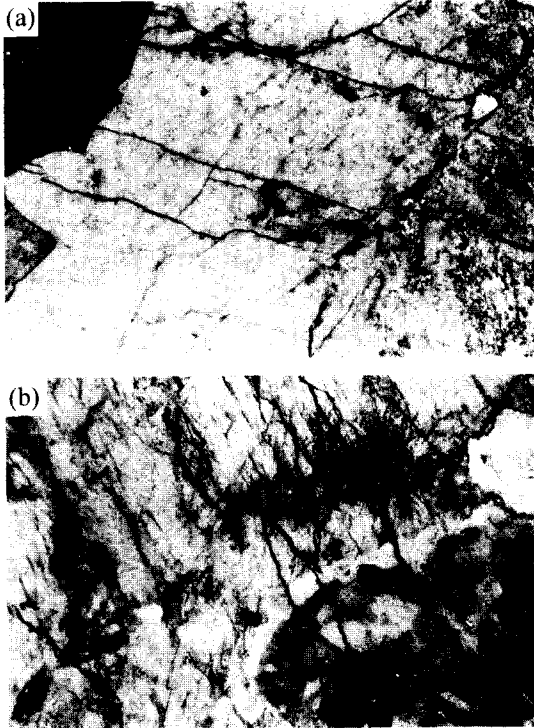


Fig. 1. Photomicrographs of the Pocheon granite specimens : (a) Group A; (b) Group B. Long axis of the photo is about 1.2 mm. Crossed nicols.

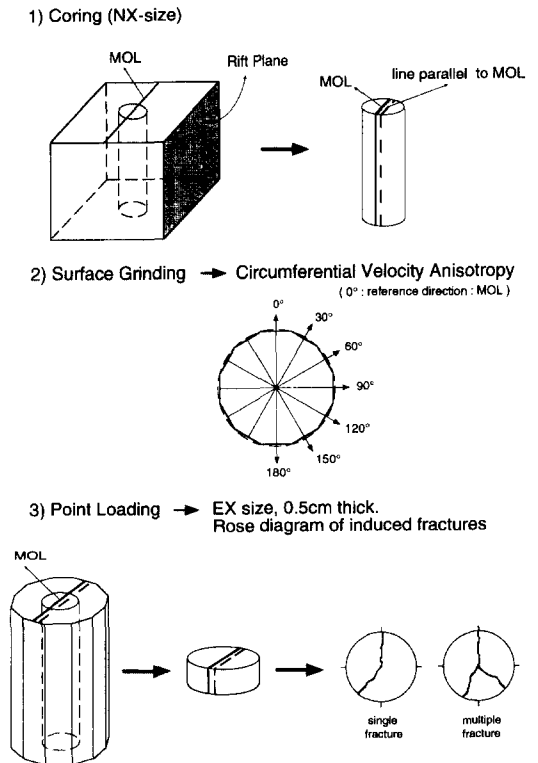


Fig. 2. Master orientation line of the specimens and schematic of the test procedures.

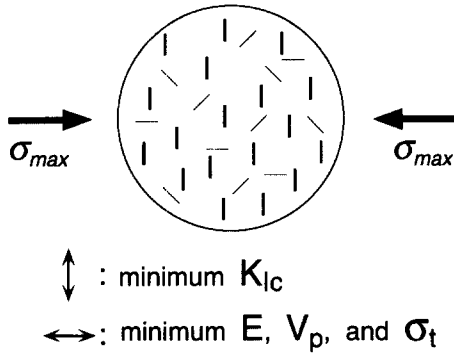


Fig. 3. Effects of the relaxation microcracks on the physical properties of rock.

3.1 초음파속도의 이방성

암석의 탄성학적 특성, 즉, 탄성계수나 포아송비는 광물학적 조성이나 암석조직과 밀접하게 연관되며, 암종에 따라 초음파의 진행속도가 달라진다. Fig. 3과 같이, 시료의 축방향에 수직인 방향으로 작용하는 응력 중 최대치를 σ_{max} 라고 하면, 시추에 의하여 주변응력이 제거됨에 따라 코어시료에 형성되는 이완균열들은 주로 σ_{max} 방향에 수직인 방향으로 배열된다. 이러한 이완균열들은 Fig. 3에 기재된 바와 같이 초음파의 속도나 기타 물성에 큰 영향을 미친다. 즉, 이완균열들에 수직인 방향으로는 Young's modulus 나 초음파속도가 감소하고, 인장강도는 최소치를 나타낸다. 한편, 이완균열에 나란한 방향으로 측정된 파괴인성계수 K_{Ic} 는 최소치를 나타낸다.

위에서 언급한 바와 같이, 암석 내의 미세균열들이 대부분 이완균열인 경우에는 최대응력의 방향과 균열의 방향은 서로 직각을 이루며, 초음파속도의 최소치가 일어나는 방향은 최대응력의 방향과 나란하게 된다. 따라서, 방향에 따른 초음파속도의 이방성(circumferential velocity anisotropy)으로부터 미세균열의 방향성을 파악할 수 있다. 그러나 균열의 빈도가 낮을수록, 혹은 균열들이 여러 방향으로 불규칙적으로 분포하는 경우에는 이방성이 감소한다. 초음파속도의 이방성은 비탄성변형을 회복율(ASR) 자료를 보완하여 현지반 응력의 방향을 추정하는데 적용할 수 있다(Teufel, 1989).

초음파속도는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 NX 코어를 표면연삭기를 사용하여 30° 간격으로 12각주로 성형한 시험편을 사용하여 측정하였다. 12각주는 마주보는 면이 평행하고 연결선은 각주의 중심을 통과하도록 하였으며, 이 중 MOL이 통과하는 면을 기준으로 설정하였

다. 일반적인 암석물성의 경우에는 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 전기오븐으로 건조시킨 시험편을 사용하여 측정한다(ISRM, 1981). 이러한 온도범위는 열에 의한 미세균열의 진행을 촉진시키거나(Bauer and Johnson, 1979), 또는 암석 내의 잔류변형에너지를 개방시킬 수도 있다(Colback 등, 1965; Engelder, 1987). 따라서 본 연구에서는 시험편을 성형한 후, 실온에서 방치하여 일정한 간격으로 무게를 측정하였다. 관찰에 의하면 시험편의 무게는 대략 2주 정도가 지나면 거의 변화를 나타내지 않으며, 본 연구에서는 이를 '완전히' 건조된 것으로 가정하였다.

초음파속도 측정은 crystal transducer를 장치한 end-cap transducer (Valpey-Fisher Co.)와 high power pulse generator (Velonex model 345)를 사용하였으며, Omega 사의 Board-on-Oscilloscope로 파형을 분석하였다. 암석시험편과 발진자 및 수신자 사이의 밀착효과를 위하여 glycerol을 사용하였다. P 파용 transducer의 주파수 범위는 1 MHz 이고, 측정된 초음파속도는 대략 2,300~4,100 m/sec의 범위를 가지므로 파장(wavelength)의 범위는 0.23~0.41 cm로 계산된다. 박편관찰에 의한 평균 입자크기가 대략 0.1~0.2 cm 임을 고려할 때(Fig. 1 참조), 파장의 범위는 입자크기 이상이며 측정거리는 4.3 ± 0.02 cm로서 평균 입자크기의 10배 이상이다. 따라서 본 연구에서 적용한 초음파속도 실험방법은 국제암반공학회(ISRM)의 제안기준에 합당한 것으로 판단된다.

3.2 점하중 재하실험

점하중 재하실험(axial point load test)은 일반적으로 암석의 일축압축강도를 추정하기 위하여 적용되고 있다. 시험방법이 간단하고 비정형의 시험편에 대해서도 적용할 수 있기 때문에 암석강도의 이방성을 측정하기 위한 방법으로 적용된다(Bieniawski, 1975). 점하중재하에 의한 균열의 진행방향은 미세균열의 분포특성과 밀접한 관계가 있으므로, 본 연구에서는 시험편에 형성되는 인공균열들의 진행방향을 측정하여 미세균열의 주방향과의 관계를 고찰하였다. 여기에서 인공균열(artificial, 또는 induced crack)이란 점하중 재하에 의하여 시험편의 중심으로부터 방사상으로 진행되는 균열을 의미한다.

시험편은 Fig. 2와 같이, 초음파속도의 이방성측정에 사용한 12각주로부터 EX 코어를 다시 동심으로 코어링한 후 두께가 약 0.5 cm 인 원판 형태의 시험편들을 성

형하였다. 하나의 12각주로부터 대략 6~8개의 점하중 재하 시험편이 준비되었다. 시험편의 규격은 axial point loading의 경우 길이와 직경의 비를 1.1 ± 0.05 로 하는 것이 일반적이나(Bieniawski, 1975), 본 연구에서는 암석의 압축강도를 추정하기 위한 실험이 아니라 점하중 재하에 의한 균열의 발달 및 진행방향을 측정하기 위한 것이므로 이를 엄격히 따르지 않았다. 또한, 시험편의 두께가 커질수록 인공균열의 진행에 미치는 암석의 미세 균열들의 영향은 오히려 감소할 것으로 판단된다.

EX 코어의 기준방향은 12각주의 MOL과 동일하게 설정하였다. 특히, 점하중강도 자료는 가압속도와 밀접한 관련이 있으므로(Bowden 등, 1998), 가압이 시작된 후 10초 내지 20초 이내에서 파괴가 일어나도록 일정한 가압속도를 유지하였다. 점하중 재하에 의한 인공균열의 진행방향은 MOL을 기준으로 하여 시계방향으로 측정된 균열방향을 0° 에서 360° 사이의 각도로 기록하였다. 균열은 대부분 하나의 직선, 혹은 곡선을 이루는 것이 보통이나, 간혹 여러 방향으로 진행되기도 한다. 이러한 차이는 시험조건 뿐만 아니라 암석의 조직과도 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다. 시험편 중앙의 가압점에서부터 발생하는 인공균열의 형태는 보통 직선을 이루나 완만한 곡선으로 휘어지는 경우도 관찰되었다. 곡선을 나타낼 경우 균열진행의 방향각은 초기 값, 즉, 가압점 부근에서의 방향각을 택하였다. 시험편의 파괴가 하나의 직선(혹은 곡선)을 따라 이루어지는 경우를 single fracture, 3개 이상의 가지를 나타내는 경우를 multiple fracture로 구분하여 각 균열의 방향각을 기재하였다(Fig. 2 참조). 예를 들어, 기준선과 나란하게 진행된 single fracture의 경우에는 방향각 자료가 0° 와 180° 가 된다.

일반적으로, 점하중 재하에 의하여 시험편에는 축대칭의 응력상태가 형성되며, 인공균열의 발달은 하중이 가해진 지점으로부터 방사상으로 발생한다. 시험편 내의 응력에 의하여 미세균열들의 병합(coalescence)이나 균열의 새로운 성장이 이루어지며 궁극적으로 시험편의 파괴가 일어난다. 그러나, 암석의 취성이 낮을수록 미세균열들의 병합이 주로 발생하며, 시험편의 파괴는 비교적 느린 속도로 일어나지만, 취성이 클수록 순간적인 파괴가 발생한다(Cliff 등, 1993). 따라서, 일반적으로 연약한 암석일수록 점하중 재하에 의한 파괴는 가압지점에서 암석의 부분적인 파쇄(crushing)가 일어난 후 비교적 서서히 파괴가 이루어지고, 여러 방향으로 균열의 진행이 일

어나는 multiple fracture가 발생할 가능성이 크다. 그러므로, 가압속도에는 설정에는 이러한 사항들이 고려되어야 하며, 이완균열의 영향을 측정하기 위해서는 암석의 취성이 낮을수록 가압속도가 낮아야 한다(Bowden 등, 1998). 그러나, 암석의 취성에 따른 가압속도의 기준은 현재로서는 제시되어 있지 않으며, 본 연구에서는 모든 시료에 대하여 동일한 가압속도를 적용하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 초음파속도의 이방성

Fig. 4(a)는 Group A, 그리고 (b)는 Group B의 시험편들에 대한 초음파속도 측정결과를 나타낸다. 초음파속도의 이방성은 균열이나 공극의 분포와 밀접하게 연관되며, 특히 일정한 방향으로 배열된 미세균열들이 분포하는 경우 초음파속도의 최소치를 나타내는 방향은 균열의 주방향과 수직이 된다. 이 때, 방향에 따른 속도치의 변화는 아래의 식과 같은 사인함수로 나타낼 수 있다. 여기에서 k_1 은 평균속도, k_2 는 사인함수의 진폭, 즉, 방향에 따른 초음파속도 이방성의 정도를 나타낸다. 또한, α 는 최소속도의 방향을 의미하는 것으로서, 기준방향으로부터 시계방향으로 측정한 각도로 나타낸다(Hill 등, 1993). Fig. 4에서 점선으로 표시된 곡선은 초음파속도의 자료를 회귀분석에 의하여 결정된 사인함수로 도시한 것이며, Table 1은 회귀식에 사용된 상수들을 나타낸다.

$$v = k_1 + k_2 \cdot \sin(2x + \alpha)$$

Group A에서 얻은 초음파속도가 Group B에 비하여 크게 나타난 것은 시험편들의 심도차이에 따른 것으로 판단된다. 즉 Group A의 시료들은 석재로서 채취된 신선한 암석인 반면, Group B의 경우는 심도가 대략 8 m 내외로 비교적 얇은 위치에서 채취된 시추코어이므로 풍화에 의한 초음파속도의 감소로 판단된다. k_2 로 나타나는 이방성의 정도는 두 그룹 모두 비슷한 범위에 속하나, 평균적으로 Group B의 경우가 Group A에 비하여 약간 높음을 알 수 있다. 또한, 초음파속도의 이방성은 보통 다음과 같은 이방성지수(index of anisotropy, A.I.)로 나타낼 수 있다.

$$A.I. = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} \times 100 [\%]$$

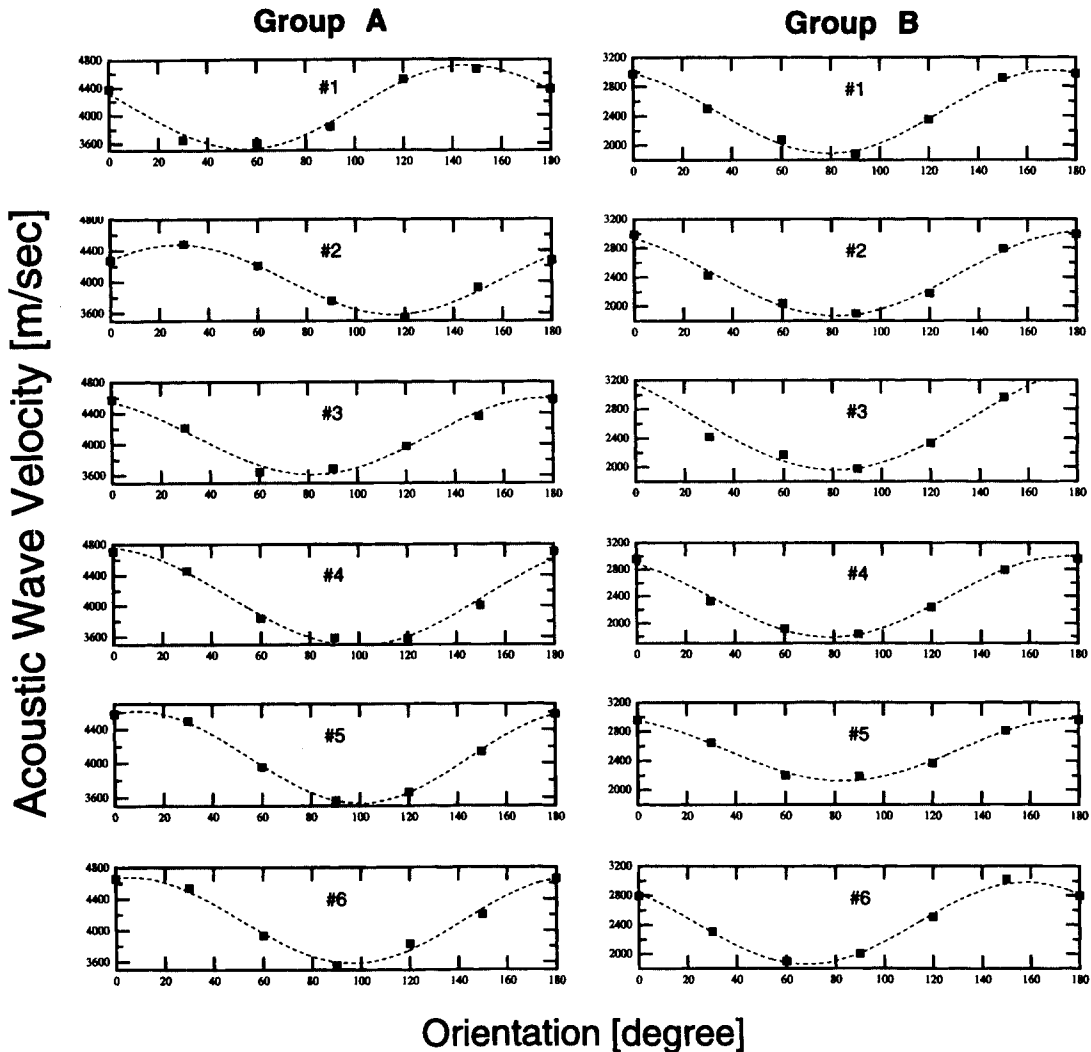


Fig. 4. Circumferential wave velocity of the specimens, keeping the master orientation line as reference.

Table 1. Regression constants for the circumferential velocity anisotropy of the rock specimens.

Sample ID	k_1	k_2	α	A.I	
Group A	1	4116	597	56	31.13
	2	4024	448	116	22.74
	3	4099	490	82	20.27
	4	4125	642	100	26.64
	5	4070	542	100	25.59
	6	4129	546	97	23.43
Group B	1	2454	564	80	38.36
	2	2446	579	82	40.03
	3	2683	725	81	42.50
	4	2391	604	79	43.78
	5	2551	431	83	29.18
	6	2418	560	68	41.76

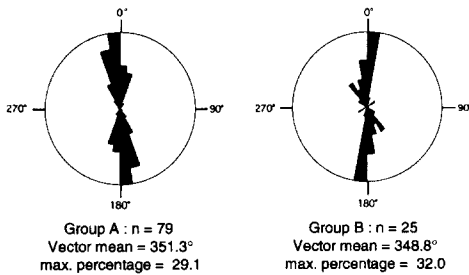
위의 식에서 V_{max} 및 V_{min} 은 각각 초음파속도의 최대값 및 최소값을 의미한다. Table 1에서 알 수 있듯이 Group B의 시험편들이 이방성지수가 크게 나타나며, 이는 풍화에 따른 균열의 발달에 기인된 것으로 보인다. 일반적으로, 풍화도가 증가할수록 새로운 균열이나 공극의 불규칙적인 분포에 의하여 암석의 이방성은 오히려 감소하는 경향을 보일 수 있다. 그러나, 본 연구에서 사용된 암석시료의 경우에는 풍화에 의하여 기존의 균열의 확장이 주로 진행된 것으로 판단된다. 결과적으로, 초음파속도의 최소치를 나타내는 방향은 두 Group에서 거의 동일하지만 풍화도가 높은, 즉, 기존의 미세 균열의 방향성이 현저한 Group B의 시험편들이 높은

이방성 지수를 나타낼 수 있다.

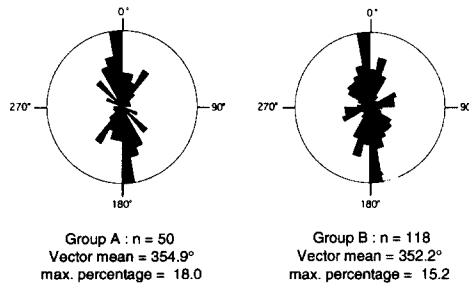
4.2 점하중 재하 실험

Fig. 5는 시험편들에서 발생한 인공균열의 진행방향을 rose diagram으로 나타낸 것이다. Rose diagram에 의한 자료의 처리는 양방향 표기법(bidirectional plot)을 택하였다. 예를 들면, MOL을 기준으로 한 균열의 방향각이 15° 인 경우, rose diagram에는 15° 와 195° 로 표시된다. 균열의 평균적인 진행방향은 vector mean으로 주어진다. 즉, vector mean의 값은 양방향으로 표기된 방향각들의 평균치를 의미하는 것으로서, 본 연구에서 측정된 자료들의 경우에는 평균적인 방향

(a) Single Fracture



(b) Multiple Fracture



(c) Combined Data

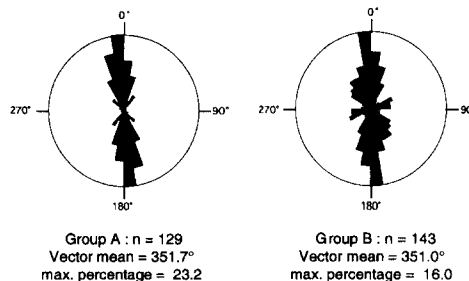


Fig. 5. Rose diagram of the induced fractures due to axial point loading

각이 350° (혹은 170°) 내외임을 나타낸다. 여기에서, MOL의 방향은 0° (또는 180°)이다. 따라서, 인공균열의 진행방향은 대체적으로 MOL의 방향에 나란함을 나타낸다.

Fig. 5에서 (a)는 single fracture, (b)는 multiple fracture, 그리고 (c)는 이들 자료를 모두 합한 것이다. multiple fracture의 경우에는 자료의 분산이 single fracture의 경우에 비하여 다소 많이 일어나지만 평균 방향각은 single fracture와 거의 동일함을 알 수 있다. 즉, MOL 방향으로 일어나는 균열이 주를 이루며, 여기에 다른 방향으로 발달하는 균열이 혼합되어 발생하였음을 의미한다. 결과적으로, Fig. 5(c)에서 볼 수 있듯이 모든 자료를 합하여 표시할 경우, 인공균열의 주방향은 MOL과 거의 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, Group A의 시험편들은 single fracture의 빈도(n)가 multiple fracture 보다 높다. 그러나, Group B의 시험편들은 이와는 대조적인 양상을 나타낸다. 이것은 Group B의 경우, 풍화에 의하여 암석 시험편 내에 불규칙적으로 분포하는 미세균열의 수가 많음을 의미한다. 즉, Group A의 경우에는 석재로 채취되었으며, 대부분의 미세균열들은 화강암의 주결에 나란한 이완균열들로 해석된다. 그러나 Group B의 경우는 풍화에 의하여 기존의 미세균열들의 분포특성이 변화하였을 것이며, 이에 따라 multiple fracture의 빈도가 높게 나타난 것으로 보인다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이, 풍화에 의하여 Group B의 시료는 취성이 상당히 저하되었을 것이며, 기존의 미세균열들의 병합에 의한 multiple fracture가 많이 발생한 것으로 판단된다.

점하중 재하 실험의 결과를 정확하게 해석하는 것은 어려운 일이다. 그러나 광물입자들의 배열방향성이 뚜렷한 경우를 제외하면 대부분의 경우 미세균열의 방향성이 암석의 이방성을 좌우하는 주된 요소가 된다. 코어시험편에 대하여 측정된 초음파속도의 이방성은 시험편 내의 이완균열 뿐만 아니라 암석조직의 여러 가지 불균질성에 의하여 자료의 분산이 예상된다. 그러나, 점하중 재하에 의한 인공균열의 발생방향은 작은 크기의 시험편을 사용하므로 이완균열들의 방향을 비교적 정확하게 파악할 수 있는 장점이 있다.

일정한 방향으로 배열된 이완균열들은 초음파속도의 이방성이나 인공균열의 진행 뿐만 아니라, 다른 암석물성에도 영향을 준다. 즉, 암석의 인장강도는 미세균열의

방향에 수직한 방향에서 최소치를 나타내며, 균열의 진행에 대한 암석의 저항을 나타내는 파괴인성계수(fracture toughness)는 미세균열의 방향으로 균열이 진행될 때 최소치를 나타낼 것이다(Baek, 1994). 따라서, 본 연구에 사용된 포천화강암의 경우, 방향에 따른 인장강도나 파괴인성계수의 이방성도 이러한 양상을 보일 것으로 예상된다.

5. 결 론

암석 내에 분포하고 있는 자연적인, 혹은 인위적인 미세균열들은 암반의 공학적 특성에 대한 중요한 자료를 제공한다. 본 연구에서는 중생대의 포천화강암을 대상으로 암석의 물성과 암석조직, 특히 미세균열의 발달 방향이 갖는 연관성을 조사하였다. 암석시료로는 화강암 석재의 주결에 수직한 방향으로 시추한 NX 코어와, 석산에서 채취한 다소 풍화된 시추코어들을 사용하였다. 시료들에 분포하는 미세균열들의 방향을 기준선으로 설정한 후, 초음파속도의 이방성과 접하중 재하에 의한 인공균열의 방향을 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 초음파속도는 미세균열에 수직인 방향에서 최소치를 나타내며 이방성의 크기는 풍화의 정도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 접하중 재하에 의한 인공균열의 진행방향은 암석내의 미세균열의 방향과 대체적으로 일치한다. 풍화의 정도가 증가할수록 single fracture 보다는 multiple fracture의 빈도가 높게 나타난다.

2) 광역적인 파쇄대의 방향이나, 혹은 암반응력의 방향을 추정하기 위하여 초음파속도의 이방성이나 접하중 재하실험을 적용하는 것은 다른 현장시험에 비하여 비용이나 소요시간에 있어서 훨씬 경제적이다. 다만, 시추코어가 포함하는 국지적인 자료들로서 현 지반의 특성을 파악하는 데는 여러 가지 불확실한 점이 있으나, 다른 실험자료나 기타 지질자료들과의 비교 및 보완을 통하여 적용성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 신진교수 과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 후원해 주신 한국학술진흥재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Baek, H., 1994, Evaluation of fracture mechanics properties and microstructural observations of rock fractures, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, 200p.
2. Bauer, S. J. and Johnson, B., 1979, "Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granite," Proceedings, 20th U.S. Symp. on Rock Mech., Austin, TX, pp. 7-18.
3. Bell, F. G., 1993, Engineering Geology, Blackwell Scientific Publication, Ltd., 359p.
4. Bieniawski, Z. T., 1975, "The point-load test in geotechnical practice," Engineering Geology, 9, pp. 1-11.
5. Bowden, A. J., Lamont-Black, J., and Ulyott, S., 1998, "Point load testing of weak rocks with particular reference to chalk," The Quarterly Journal of Engineering Geology, 31, pp. 95-103.
6. Clift, S. J., Laubach, S. E., and Holder, J., 1993, "Strength anisotropy in low-permeability sandstone gas reservoir rocks: Application of the axial point-load test," Transactions of the 42nd Annual Convention, Gulf Coast Association of Geological Societies, pp. 61-72.
7. Colback, P. S. B. and Wild, B. L., 1965, "The influence of moisture contents on the compressive strength of rocks," Proceedings, 3rd. Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, pp. 65-83.
8. Engelder, T., 1987, "Joints and shear fractures in rock," Fracture Mechanics of Rock (Atkinson, B. K., ed.), Academic Press, pp. 27-69.
9. Hancock, P. L. and Engelder, T., 1989, "Neotectonic joints," Bulletin, Geological Society of America, 101, pp. 1197-1208.
10. Hill, R. E., Peterson, R. E., Warpinski, N. R., Lorenz, J., and Tuefel, L. W., 1993, Techniques for determining subsurface stress direction and assessing hydraulic fracture azimuth, Topical Report for Gas Research Institute, The University of Texas at Austin, 133p.
11. ISRM, 1981, Rock characterization testing and monitoring, (Brown, E. T., ed.), Pergamon Press, 211p.
12. Tuefel, L. W., 1989, "Acoustic emissions during anelastic strain recovery of cores from deep boreholes," Proceedings, 30th U.S. Symp. on Rock Mech., Morgantown, WV, pp. 269-276.
13. Zoback, M. L. and Zoback, M. D., 1989, "Tectonic stress field in the continental United States: in Geophysical Framework of the Continental United States," Geological Society of America Memoir 172 (Pakiser, L. C. and Mooney, W. D., eds.), pp. 523-539.