

탄성파를 이용한 보은지역 암석의 공학적 성질과 이방성에 관한 연구

A Seismic Study for Anisotropy and Engineering Property of Rocks at Boeun Area.

최 병 렬 (Byoung Ryol Choi)

충북대학교 과학교육학부

요약 / ABSTRACT

충북 보은 일대에 분포하는 옥천계 지층 및 중생대 화강암을 대상으로 기반암의 지진파 속도 및 시편으로부터 3차원적인 지진파의 전달속도를 측정하고, 이의 결과 자료를 비교분석 하였다.

야외에서 측정된 P파의 평균속도는 불국사화강암이 2697m/s로서 최대이고 구룡산층2에서 861m/s로 최소의 속도를 보인다. 각 방위에 따른 P파의 이방성을 암종별로 비교하면 불국사화강암에서 최대치(81%)를 창리층에서 최소치(46%)를 보이고, 8곳의 평균 이방성지수는 68.5%이다.

시료에서 측정된 P파의 평균속도를 비교하여 보면 구룡산층1, 구룡산층2, 창리층 및 문주리층2에서 5000m/s 이상이며, S파의 경우도 동일한 시료에서 3500m/s 이상의 높은 속도가 측정되었는데 이는 야외의 경우보다 3~5배의 빠른 속도를 나타낸다. 또한 P파의 이방성지수는 불국사화강암과 구룡산1에서 60% 이상의 높은 수치를 보이거나 다른 시료에서는 30%이하의 낮은 수치를 보인다. 이 수치는 야외에서 측정된 P파의 평균이방성지수 68.5%보다 현저히 낮은 수치로서 야외에서 측정된 P파의 방향에 따른 속도 차이가 시료의 경우보다 현저히 높았음을 뜻한다.

주요어 : 옥천계지층, 화강암, 지진파의 속도, 이방성지수

The Okchon Formation and the Mesozoic granite of the Boeun, Chungbuk are compared in terms of seismic wave velocities estimated from the field experiment, and seismic wave velocities in 3-D measured from the rock specimen.

P-wave velocity for the field data ranges from 861 m/s (Guryongsan-2 Formation) to 2697m/s (Bulguksa Granite). P-wave anisotropy also ranges from 46% (Changri Formation) to 81% (Bulguksa Granite), with an average value of 68.5%.

P-wave velocities for the rock specimens from Guryongsan-1, Guryongsan-2, Changri, and Munjuri

Formations are greater than 5000m/s. S-wave velocities for those specimens are approximately 3500m/s, which is 3-5 times greater than the ones estimated from the field experimental data. P-wave anisotropy for the specimens from Bulguksa Granite and Guryongsan-1 Formation exceeds 60%, which is compared to 30% for the other specimens. This value is much smaller than average P-wave anisotropy (69.5%) for the field data. It is suggested that velocity difference, associated with the propagation direction, is much greater for the field data than for the specimens.

Key Words : okcheon formation, granite, seismic wave velocity, anisotropic index

서 론

암석의 이방성에 관한 초기의 연구는 1930년대부터 1960년대까지 순수한 이론과 간단한 실험을 병기하여 Green과 Taylor(1939), Green(1942), Hearmon(1961), Savin(1961)에 의하여 수행되었으며, 최근에는 매질 내를 통과하는 탄성파의 속도는 매질의 입자 조직과 구조에 의하여 영향을 받는다는 이론에 근거하여 재료역학분야에 응용되어 비파괴 시험의 한 방법으로 사용되고 있다(Sayer et al., 1986). 암석역학의 한 분야에서도 암석 시료에서 방향에 따른 탄성파의 전달속도 변화를 이용하여 암석 시편내에 존재하는 균열의 분포, 조암 광물의 방향성을 추정하고, 이의 공학적 성질과 관련성을 찾는 데 많이 이용되고 있다(Zang et al., 1989; Xu and King, 1992; King et al., 1995).

국내에서는 중생대 화강암에 발달한 결의 역학적 특성을 조사하기 위하여 박덕원(1995)이 여러 방향의 시추 코어를 이용하여 화강암의 이방성을 측정하였으며, 박형동(1995)은 암석의 공학적 이방성 측정을 위한 실험실내 P파 속도 측정기법에 대한 연구를, 김기영의 2인(1998)은 야외에서 P파와 SH파를 이용한 이방성의 측정을 실시한 바 있다. 또한 최병렬(1998)은 지하 수리시스템의 지질환경적 특성 규명을 위한 연구의 응용지질학적 분야를 수행하는 과정에서 지하수의 분포 및 유동 방향을 추정하는 데는 암반내에 발달한 불연속면의 규명이 필수적이므로 이의 분포를 야외에서는 암반의 이방성의 관점에서, 실내에서는 시료의 이방성을 연구하여 지질환경적 특성을 지하수 탐사에 응용하는 것을 시도하였다.

본 연구에서는 지금까지 수행한 여러 연구자료를 분석하여 충북 보은일대를 대상으로 이 지역을 구성하는 기반암의 종류별로 야외에서 각 방위별로

지진파의 속도를 측정하고 기반암에서 채취한 시료를 정형하여 실내실험을 통하여 각각의 3차원적 방위별로 지진파의 전달속도를 측정하고, 이의 방위별로 나타난 결과를 야외에서 측정한 자료와 비교 분석 하였다. 이와 함께 암석 시료에서 측정한 자료를 이용하여 방위에 따른 암석의 공학적 성질을 동탄성 계수를 이용하여 측정, 분석하였다. 이의 결과는 도로 및 터널과 같은 토목공사의 시공 및 설계에 응용될 것으로 기대된다.

연구방법 및 결과

지형 및 지질

지형 : 본 연구 지역은 충청북도 보은 일대로 위도는 북위 36°27' 00"-36°37' 30", 경도는 동경 127°34' 30"-127°49' 30"사이(동서 약 21.25km, 남북 약 27.6km)에 속하며, 1/5000지형도의 번호는 미원(M) 054-100, 속리(S) 051-093, 보은(B) 004-020 및 관기(K) 001-013에 속하는 1/5000 도폭 70매(약 586km²)의 범위에 해당하며, 지질도폭으로는 미원도폭(이종혁외, 1980)의 남동부, 용유리도폭(이홍규외, 1973)의 남서부, 보은도폭(김옥준외, 1977)의 북동부 및 청산도폭(김동학외, 1986)의 북서부에 해당한다.

본 지역의 지형은 북동에서 남서방향으로 폭 약 4km의 험준한 산맥이 지나는데 이들은 북동부의 미동산(545m), 중앙부의 국사봉(564m), 남서부의 피반령(547m)이 거의 일직선상에 있으며, 그 외에도 금단산(716m), 선두산(526m), 구룡산(530m)등이 있다. 그러나 이들의 주능선에서 분기된 소규모의 부 능선도 발달되어 있는데 이들의 방향은 주능선과 직각의 방향인 북서 및 남동 방향으로 발달되어 있으며 이들의 연장은 평균 약 2.5km이나 표고차는 약 400m로서 험준함은 주능선보다 더 심하다.

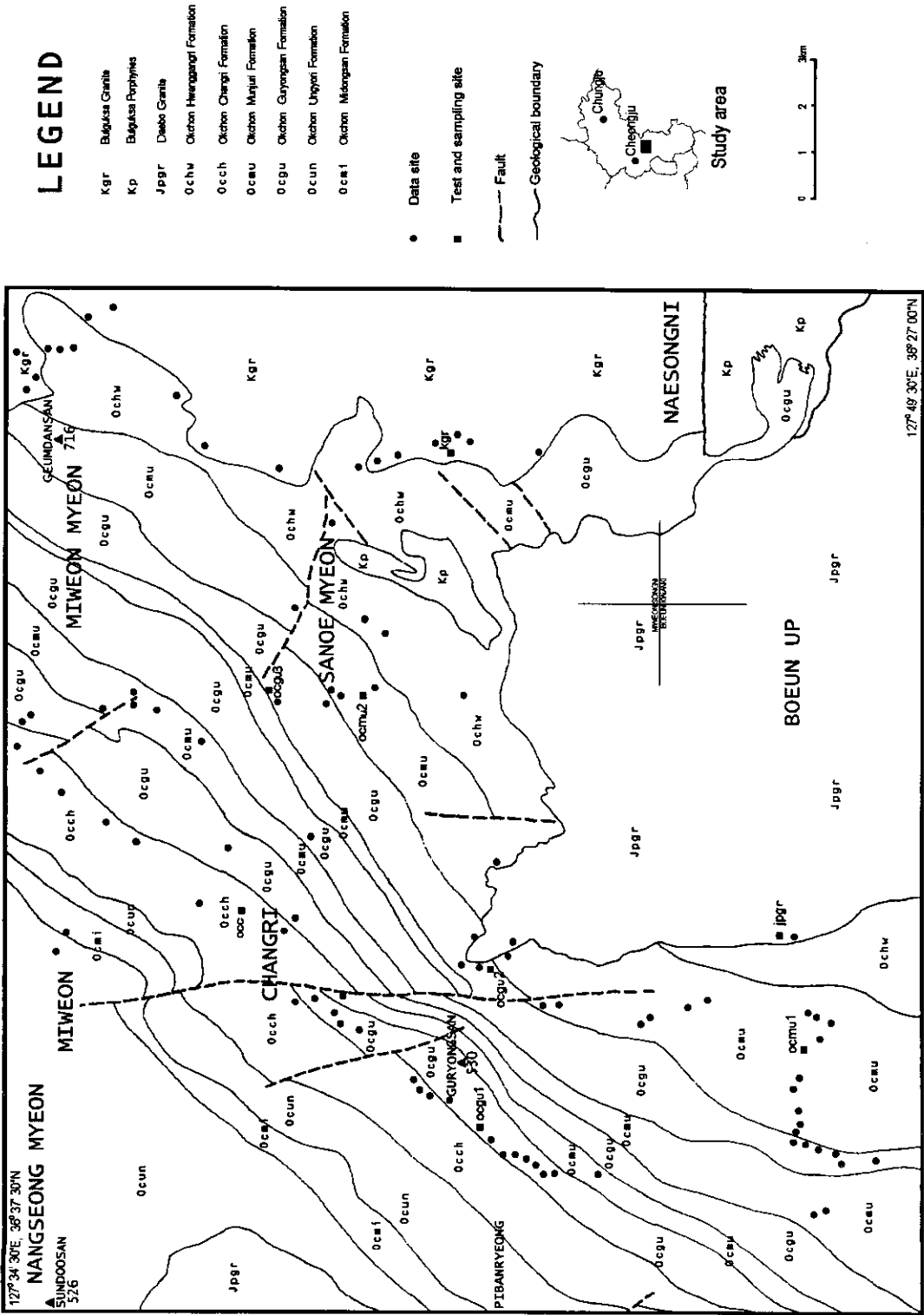


Fig. 1. Geological map and sampling localities in study area.

수계는 주능선에서 발원하여 북류하는 무심천의 상류와 미원을 거쳐 동남류하는 속리천이 있는데, 속리천은 비교적 급류로서 하안 침식보다 하저 마식작용이 활발히 진행되고 있으므로 하상 폭이 비교적 좁고 도처에 하안단구를 만들어 놓고 있다.

지질 : 본 지역의 중앙부를 북동에서 남서방향(45°-225°)으로 소위 옥천 누층군(Oc)이라고 불리는 변성퇴적암류가 분포하고 있는데 층리와 같은 일차구조는 판독하기 힘들고 이차적인 편리구조가 주로 북동방향의 주향과 북서방향의 경사를 보이며 발달하여 있다. 이들 옥천 누층군은 지질경계선의 연장 방향과 지형의 발달방향과 일치하며, 남동쪽에 주로 분포하는 유라기의 대보화강암(Jpgr)과 동쪽의 백악기 불국사화강암(Kgr)등의 산성화성암류가 옥천누층군을 관입하고 있다(Figure 1). 연구지역에 분포하는 지층을 하부로부터 요약하면 아래와 같다.

● **미동산층(Ocmi)** : 본 암층은 주로 규암과 사질천매암과의 호층으로 이루어져 있으며 본 지역에서는 최하부층으로 판단된다. 규암중에는 곳에 따라 석영운모편암이 협재하는 곳이 있으며, 사질천매암도 곳에 따라 천매암이 협재되어 나타나기도 하나 이들의 암상 변화는 심하며 전반적으로는 규암의 분포가 우세하다.

● **운교리층(Ocun)** : 암갈색의 사질암으로 층간에는 이질암이 협재되고 곳에 따라서는 결정질 관상 석회암이 포함하기도 한다. 세립질의 호층이 있는 곳을 제외하고는 층리의 판별이 어렵고, 대부분 혼펠스와 유사한 암상을 보이며 곳에 따라서는 페그마타이트가 가늘게 협재한다.

● **구룡산층(Ocgu)** : 본 지역의 중앙부에 북동-남서 방향으로 3개의 구룡산층이 분포하는데 이는 북서쪽의 2층은 향사구조를 남동쪽의 것은 배사구조를 이루며 반복하기 때문이다. 본 층은 탄질물을 포함하기 때문에 검은 색을 띠며 주된 암석은 천매암, 슬레이트이며 곳에 따라 운모편암, 합탄저변성 셰일이 혼재 한다. 탄질물이 포함된 지역에는 결정이 용해된 후 생성된 것으로 보이는 구멍이 있다.

● **문주리층(Ocmu)** : 주 구성암은 녹회색 천매암이며 지역에 따라 탄질물을 포함하는 흑색 천매암이 협재한다. 층내에서는 구룡산층보다 소규모의 습곡은 미약하나 점판벽개(slaty cleavage)가 잘 발

달되어 있으며 이 벽개면에 따라 운모가 배열되어 있다.

● **창리층(Occh)** : 본 층은 미원 도폭에서는 구룡산층으로, 황강리 도폭에서는 서창리층, 다른학자들에게 의하여서는 창리층으로 불리는데 이를 특히 구룡산층과 분리한 것은 구성 암석내에 많은 미구조 즉 파랑벽개(crenulation cleavage), 선구조(lineation), 킹크대(kink band)가 발달하여 있기 때문이다.

● **황강리층(Ochw)** : 본 층은 옥천누층군의 최상부에 속하는 것으로 함력이질암과 함력석회질천매암으로 주로 구성되어 있다. 본 조사지역에서는 석회질-이질 기질물이 주변의 판입암에 의하여 규화 또는 혼펠스화로 열변질되어 있다.

● **대보화강암(Jpgr)** : 한반도 중부지방에 분포하는 대저반의 일부로서 본 지역에서는 청주화강암(북서부), 보은화강암(남동부)으로 불리기도 한다. 중립 내지 세립의 화강암으로 약간의 흑운모와 각섬석의 유색광물을 포함하고 곳에 따라 정장석을 반정으로 반상화강암의 형상을 보인다. 풍화대가 깊고 지형적으로 저지 내지 구릉을 형성한다.

● **불국사반암(Kp)** : 본암은 석영반암, 규장암 및 화강반암으로 구성되어 있으며 지역에 따라 암상의 변화가 심하다.

● **불국사화강암(Kgr)** : 불국사화강암은 옥천누층군과 접하는 부분에서는 흑운모화강암, 각섬석화강암의 양상을 보이나, 동쪽의 속리산 일대에서는 조립질이며 분홍색을 띠는 알카리화강암으로 점이적 변화를 한다

조사지역의 구조적 이방성

야외에서 측정한 탄성과 속도, 시료에서 측정된 탄성과 속도의 이방성 등을 서로 비교하기 위하여 대표적인 8지역(Figure 1)을 선택하여 시료를 채집하여 정형하였다. 8곳의 위치와 이곳의 특징은 다음과 같다.

● **불국사화강암(Kgr)** : 내속리 북암리 세강교하부 노두

● **대보화강암(Jpgr)** : 수한면 병원리 도로옆 강변노두

● **문주리층1(Ocmu1)** : 수한면 동정리 고개, 염리의 방향은 N5°E/50°NW

● **문주리층2(Ocmu2)** : 보원군 산외면 구치리, 흑

색 셰일-점판암으로 천매암(phyllite)의 특성을 갖는다. 파랑벽개가 잘 발달하며 엽리의 방향은 $N50^{\circ}E/52^{\circ}NW$, 절리의 방향은 $N28^{\circ}W/75^{\circ}SW$, $N58^{\circ}E/32^{\circ}SE$ 이다.

● 구룡산층1(Ocgu1) : 회북면 고석리 쌍암 저수지, 엽리의 방향은 $N20^{\circ}E/65^{\circ}NW$

● 구룡산층2(Ocgu2) : 보은군 내북면 아곡리 아곡 초등학교, 세립질 사질점판암-셰일, 미세한 습곡이 발달하며 엽리의 방향은 $N25^{\circ}E/72^{\circ}NW$ 이고 절리의 방향은 $N70^{\circ}E/72^{\circ}NW$, $N38^{\circ}W/68^{\circ}NE$ 이고 단층은 $N70^{\circ}E$ 의 절리와 평행하게 발달하며, 단층면에 거정질화강암-석회규산암이 관입하였다.

● 구룡산층3(Ocgu3) : 산외면 산대리, 점판암으로 변한 흑색층으로 층후가 5mm 이하이고 곳에 따라 녹색의 처어트(chert)질 협재, 엽리의 방향은 $N84^{\circ}E/48^{\circ}NW$, 절리의 방향은 $N8^{\circ}E/48^{\circ}NW$, $N2^{\circ}E/66SE$ 이다.

● 창리층(Occh) : 산외면 중치리, 엽리의 방향은 $N55^{\circ}E/73^{\circ}NW$, 절리의 방향은 $N85^{\circ}W/73^{\circ}SW$, $N62^{\circ}E/67^{\circ}NW$ 이고, 단층은 절리의 방향과 평행하다.

또한 이상의 8지역에서 절리의 발달상태인 절리 밀도를 측정하였다. 측정방법은 노두에서 약 1~2m²의 면적을 설정한 후, 이 면적내에 분포하는 30cm이상의 모든 절리의 연장을 측정하고 이들의 합을 측정면적으로 나누어 구하였다. 절리의 발달상태는 절리가 노출되는 노두면의 방향에 따라 현저한 차이를 가지므로 본 측정은 모든 지역에서 동서와 남북 방향으로 발달한 수직 노두면에서 나누어 측정되었다.

절리 밀도는 화강암류가 평균 5.5m/m²이나 옥천계 지층은 9~10m/m²로 높게 나타났다. 절리밀도의 동서와 남북 방향간의 이방성지수는 불국사화강암이 1%로 등방성을 보이거나 대보화강암이나 옥천계지층은 20~60%로 높게 나타난다.

현장 탄성파 시험

기반암의 탄성파 전달속도의 측정은 여러 가지 방법이 가능하다. 본 연구에서는 기반암의 표층부에서 방위에 따른 P파 속도를 측정함으로써 방위에 따른 지진파의 이방성 여부 및 이방성의 원인이 되는 사실을 규명하려고 하였다. 측정지점은 절리 측

정치점과 동일한 지역이었으며, 인접한 지역에서 실내 지진파 속도 측정을 위한 시료의 채집도 동시에 실시하였다. 지진파의 속도 측정을 위하여 기반암이 노출된 평활한 지역에서 반지름 1m 이상의 원을 그리고 북(N)을 기준으로 하여 시계방향으로 30°간격으로 원을 12등분하였다. 이와 같이 설정된 12지점에 5cm정도의 구멍을 파고 각각의 지오폰의 끝 부분을 고정된 후, 원의 중심에서 대형 망치로 타격하여 파동의 전달시간을 탄성파 탐사기(Oyo, MecSeis, model-1113)를 이용하여 측정하였고, 이와 같이 측정된 탄성파의 전달시간과 단위거리와의 비를 구하여 P파의 속도(Figure 2)를 계산하였다.

이렇게 측정된 P파의 속도는 12 방향 즉 단방향(unidirection)으로 측정이 되었지만, 실제로는 6개의 방위각(0~180, 30~210, 60~240, 90~270, 120~300, 150~330)으로 즉 쌍방향(bidirection)으로도 나타낼 수 있다. 따라서 각 지역의 이방성 지수(Index of anisotropy, 박형동 1995)를 산출 할 때는 360° 방위의 방법으로 최대치와 최소치의 차이를 최대치로 나누어 백분율로 계산하였다.

야외에서 측정된 P파의 평균속도는 불국사화강암이 2697m/s로서 최대이고 구룡산층2(Ocgu2)에서 861m/s로 최소의 속도를 보인다. 각 방위에 따른 최대속도는 불국사화강암에서 0°방향으로 5000m/s의 최대치와 옥천계 문주리층1의 60°방향에서 439m/s의 최소치를 보이는데, 최대와 최소사이에 10배 이상의 차이가 있다. 각 방위에 따른 P파의 이방성은 불국사화강암에서 최대치(81%)를 창리층에서 최소치(46%)를 보이고 8곳의 평균 이방성지수는 68.5%이다. Figure 3은 본 연구지역의 야외에서 측정된 절리의 분포와 P파의 상대속도를 구면투영 방법으로 보여주는 그림이다.

실내 탄성파 시험

이상적인 암석은 균질하고, 연속적이며 등방성(isotropy)을 지녀야 하지만 실제 암석은 불균질하며, 경우에 따라서는 불연속면이 내부에 존재하거나 또는 독자적인 방향에 따라서 물리적, 공학적 성질을 달리하는 이방성을 가지기도 한다. 이와 같이 암석의 성질이 방향에 따라서 다르게 나타나는 이방성(anisotropy)을 보이는 것은 주로 입자의 배열이나 미세균열의 방향성 등에 의하여 나타나게

최병렬

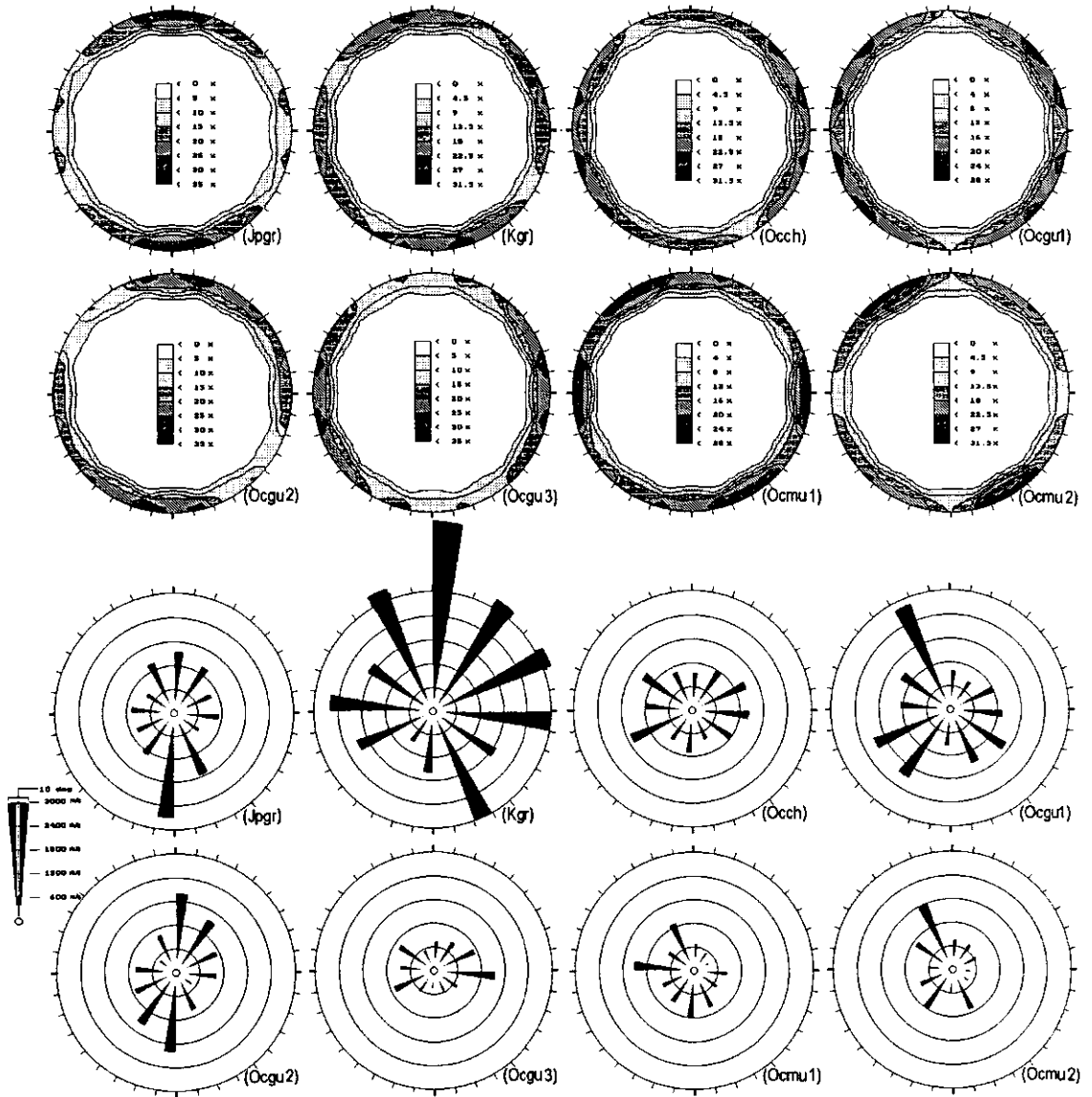


Fig. 2. P-wave velocity of each geological formation.

된다. 입자의 배열에 의한 이방성은 변성암의 경우는 열리와 편리구조, 퇴적암은 층리, 화성암은 유동구조 등에 의하여 나타난다.

이와 같이 암석의 이방성을 정량적으로 평가하기 위해서는 암석시료를 현장에서 방향성을 기록한 상태로 채취 하여 실내에서 방향에 따른 시험편을 준비하여 실험적으로 측정하게 된다. 또한 암석물

리학 분야에도 시험편의 방향에 따른 탄성파의 속도변화를 이용하여 암석 시험편 내에 존재하는 균열의 분포 및 조암광물의 방향성을 추정하고 암석시료의 다른 공학적 성질과의 연관성을 비교 연구하는데 널리 사용되고 있다(박형동, 1995; Xu and King, 1992; King et al., 1995).

시험편의 제작방법은 먼저 동일한 시료에서 3차

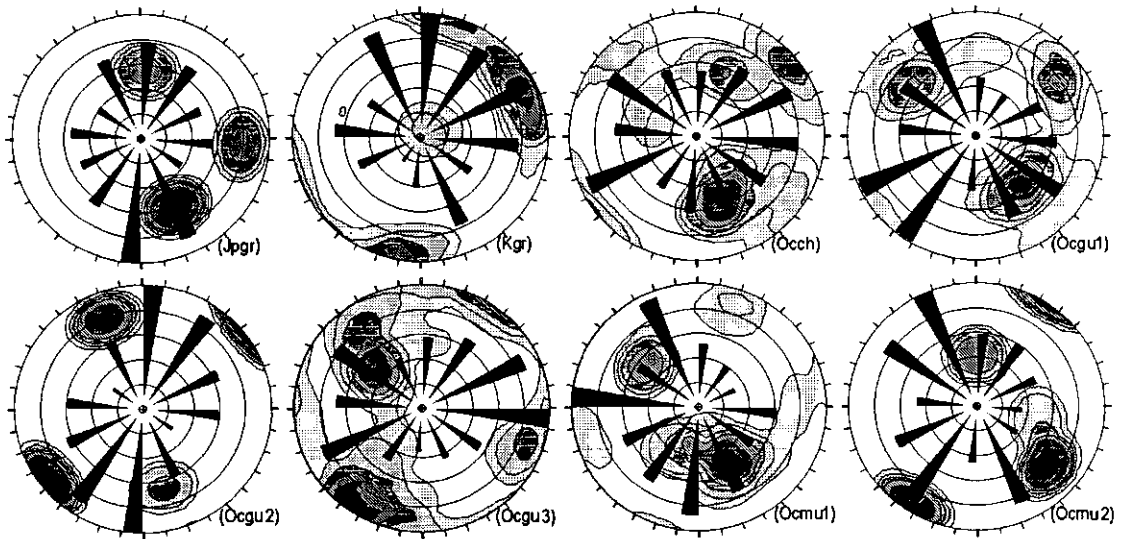


Fig. 3. Stereonet diagram of joint distribution and relative velocity of p-wave in each geological formation.

원적으로 방향을 잡아 여러 각도로 코어링하여 코아의 장축 방향을 방위화 시키는 방법과, 다른 방법으로는 동일한 시료에서 여러 방향의 평행면을 성형하여 사용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 후자와 같은 다면체의 시험편을 제작하여 암석의 공학적 성질을 측정하였다.

시료의 채취 및 시험편의 제작 : 시료의 채취는 기반암의 탄성파 속도를 측정할 지역(Figure 1)에서 균열이 없는 치밀한 암석을 대상으로 하였다. 시료는 먼저 현장에서 노두의 상태로 있는 암반의 표면에 각각의 방위와 수평 및 수직방향을 표시한 후 한 변이 약 30~40cm의 크기를 갖는 암괴로 채취하였다. 채취된 시료는 먼저 동-서, 남-북, 수평, 수직의 방향을 유지하는 한변의 길이가 10-15cm 정도의 정육면체로 절단한 후 다음 단계로 정육면체의 각 면과 45도의 각도를 유지하는 면을 절단, 연마하여 26면체로 성형한다. 시험편은 제작 과정에서 대칭면이 서로 평행을 유지하도록 정밀하게 제작되었으며 각각의 성형면은 구면투영에서 표시하는 방법(dip direction/dip)에 따라서 나타내었다.

실험방법 및 과정 : 암석 물성의 측정을 위한 시

료는 충분히 건조되어야 하므로 일반적으로 전기 오븐에 24시간 이상 105℃로 가열하는 방법을 사용한다. 그러나 이 과정에서 시료내의 열극이 발달하거나, 균열의 팽창에 의하여 파괴되는 경우가 발생할 수 있으므로 본 실험에서는 실험실에서 중량의 변화가 없을 때까지 약 1개월 동안 자연 상태에서 건조시켰다. 각 시료의 밀도는 불국사 화강암이 $2.56 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$, 대보화강암은 $2.68 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$, 창리층은 $2.83 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$, 구룡산층1은 $2.71 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$, 구룡산층2는 $2.80 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$, 구룡산층3은 $2.78 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$, 문주리층1은 $2.64 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$, 그리고 문주리층2는 $2.74 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$ 로 측정되었다.

측정장치 및 방법 : P파와 S파의 발생은 고압파 발생장치(high voltage pulse generator, Oyo model 5234)를 사용하였으며, 이를 P파와 S파의 변환기(transducer)에 각각 연결하여 사용하였다. 또한 각각의 변환기는 진동기록기(sonic viewer oscilloscope, Oyo model 170)에 연결하여 측정하였다. 측정방법은 먼저 변환기 사이에 시료를 넣지 않은 상태에서 영점을 조정하고, 시료를 넣은 상태에서 파동의 도달시간의 차이를 측정 후, 시료의 길이를 측정시간으로 나누어 시료 내에서의 파동의 전달 속도를 계산하였다. 측정시 시료와 변환기 사이의

접착을 원활하게 하기 위하여 점성이 큰 꿀을 사용하였으며, 꿀은 S파의 전달에 이상을 줄 수 있으므로 S파의 측정 시에는 사용하지 않았고 나중에 P파의 측정 시에만 사용하였다.

P파의 속도(V_p)와 S파의 속도(V_s)가 측정되면 이를 이용하여 암석의 동탄성계수(dynamic elastic constant)를 구할 수 있다. 즉 포아송의 비(Poisson's ratio, ν)는

$$\nu = ((V_p/V_s)^2 - 2) / (2 \cdot ((V_p/V_s)^2 - 1)) \quad (1)$$

의 식으로 계산되며, 포아송의 비가 측정되면 각 암석의 밀도(density, ρ)를 이용하여 강성률(rigidity, G), 영률(Young's modulus, E), 체적탄성률(bulk modulus, K)을 다음 식으로 구할 수 있다.

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (2)$$

$$E = 2(1 + \nu) \cdot G \quad (3)$$

$$K = (2(1 + \nu) \cdot G) / 3(1 - 2\nu) \quad (4)$$

이와 같은 방법으로 구해진 동탄성계수들을 구면투영하여 나타낸 것은 Figure 4와 같다.

시험결과 및 토의

불국사화강암(Kgr); 시료에서 측정된 P파의 속도는 최저 1974m/s에서 최고 3052m/s이며 평균치는 2557m/s이고 각 방향에 따른 차이는 평균치의 23% 이내이다. 그러나 S파에서는 최소 1487m/s, 최대 2211m/s로서 평균치 1846m/s의 20% 이내의 차이를 나타낸다. 이는 P파의 이방성지수 62.92%가 S파의 이방성지수 32.75%보다 2배정도 높게 나타나는 것으로도 알 수 있다. 포아송의 비는 0.13~0.46의 범위에 속하며 평균치 0.29는 일반적인 암석의 경우 0.25 보다 약간 높게 나타나며, 강성률은 0.57~1.25×10 GPa의 범위이며 평균치는 0.89×10 GPa이다.

대보화강암(Jpgr); 시료에서 측정된 P파의 속도는 최저 4368m/s에서 최고 4811m/s이며 평균치는 4613m/s이고 각 방향에 따른 차이는 평균치의 5% 이내로 균질성을 유지한다. 그러나 S파에서는 최소

2125m/s, 최대 3411m/s로서 평균치 2766m/s의 25% 이내의 차이를 나타낸다. 이는 P파의 이방성지수 9.21%가 S파의 이방성지수 37.70%보다 낮게 나타나는데 이러한 사실은 P파에서 높은 균질성을 보이고 있음을 나타낸다. 포아송의 비는 0.30~0.48의 범위에 속하며 평균치 0.39는 일반적인 암석의 경우 0.25 보다 높게 나타나며, 강성률은 1.21~3.12×10 GPa의 범위이며 평균치는 2.12×10 GPa이다.

창리층(Occh); 시료에서 측정된 P파의 속도는 최저 4668m/s에서 최고 5652m/s이며 평균치는 5189m/s이고 각 방향에 따른 차이는 평균치의 10% 이내이다. 그러나 S파에서는 최소 2282m/s, 최대 4394m/s로서 평균치 3469m/s의 35% 이내의 차이를 나타낸다. 이는 P파의 이방성지수 17.41%가 S파의 이방성지수 48.07%보다 낮게 나타나는데 P파에서 높은 균질성을 보임을 알 수 있다. 포아송의 비는 0.11~0.47의 범위에 속하며 평균치 0.35는 일반적인 암석의 경우 0.25 보다 높게 나타나며, 강성률은 1.47~5.47×10 GPa의 범위이며 평균치는 3.51×10 GPa이다.

구룡산층1(Ocgu1); 시료에서 측정된 P파의 속도는 최저 3137m/s에서 최고 7850m/s이며 평균치는 4787m/s이고 각 방향에 따른 차이는 평균치의 65% 이내로 방향에 따른 속도변화가 크다. 그리고 S파에서도 최소 2030m/s, 최대 4651m/s로서 평균치 3297m/s의 41% 이내의 높은 차이를 나타낸다. 이는 P파의 이방성지수 60.04%와 S파의 이방성지수 56.36%가 서로 비슷한 수치를 보이며 이들의 최대, 최소치의 방향도 동일한 방위에서 나타난다. 포아송의 비는 0.07~0.44의 범위에 속하며 평균치 0.29는 일반적인 암석의 경우 0.25와 근접한 수치를 나타내며, 강성률은 1.12~5.86×10¹⁰ GPa의 범위이며 평균치는 3.14×10 GPa이다.

구룡산층2(Ocgu2); 시료에서 측정된 P파의 속도는 최저 5085m/s에서 최고 6118m/s이며 평균치는 5565m/s이고 각 방향에 따른 차이는 평균치의 10% 이내로 높은 균질성을 유지한다. 그리고 S파의 경우도 최소 2992m/s, 최대 3859m/s로서 평균치 3526m/s의 15% 이내의 차이로 높은 균질성을 나타낸다. 또한 P파의 이방성지수 16.88%가 S파의 이방성지수 22.47%보다 낮게 나타나기는 하지만 P파와 S파에서 둘 다같이 높은 균질성을 보임을 알 수

탄성파를 이용한 보은지역 암석의 공학적 성질과 이방성에 관한 연구

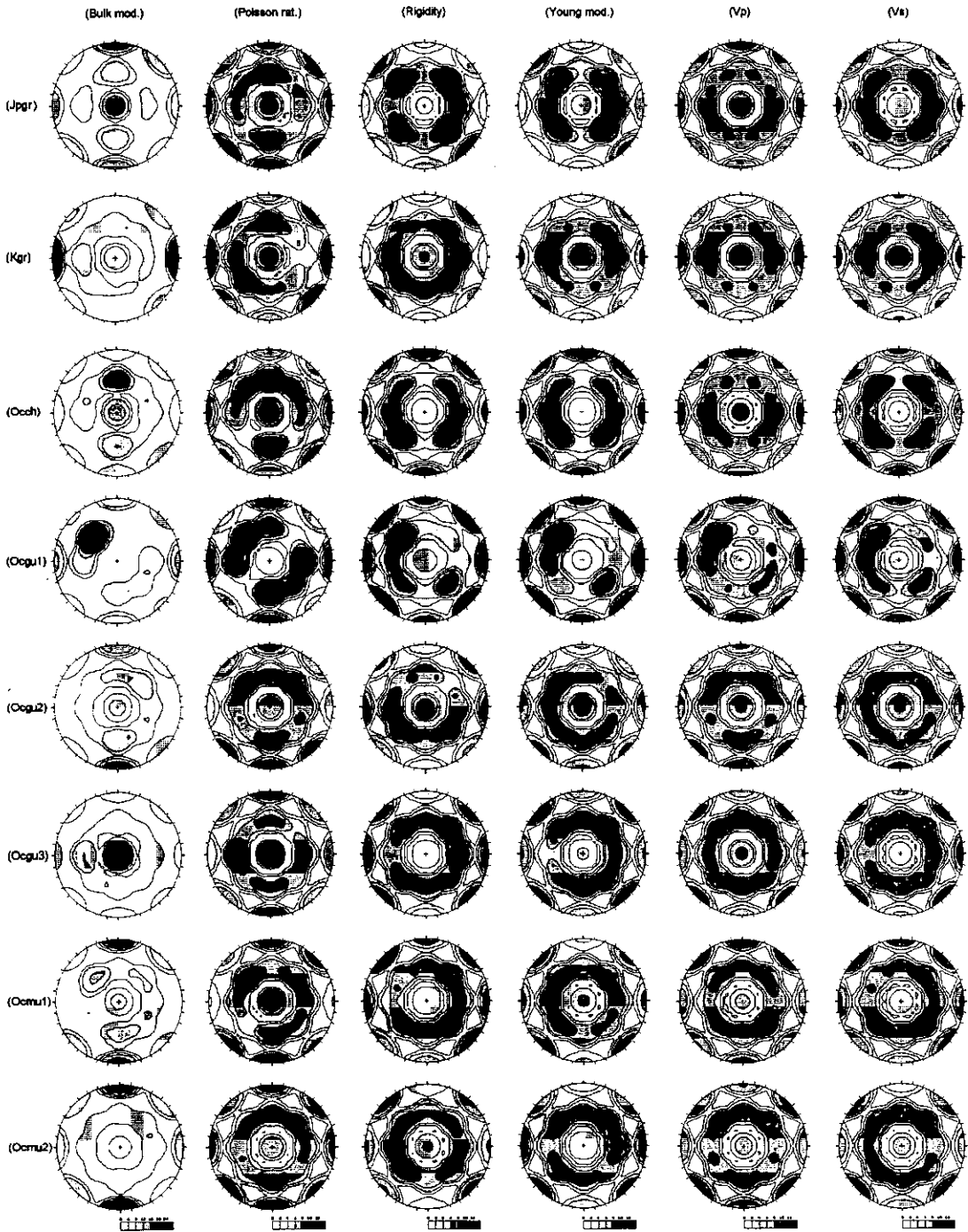


Fig. 4. Engineering properties of each rock specimen as pole of plane for dip direction/dip on stereonet.

있다. 포아송의 비는 0.26~0.46의 범위에 속하며 평균치 0.39는 일반적인 암석의 경우 0.25 보다 높게 나타나며, 강성률은 2.51~4.17×10 GPa의 범위이며 평균치는 3.50×10 GPa이다.

구룡산층3(Ocgu3); 시료에서 측정된 P파의 속도는 최저 5007m/s에서 최고 6297m/s이며 평균치는 5680m/s이고 각 방향에 따른 차이는 평균치의 12% 이내로 균질성을 유지한다. 그러나 S파에서는 최소 2625m/s, 최대 4513m/s로서 평균치 3783m/s의 30% 이내의 차이를 나타낸다. 이는 P파의 이방성지수 20.49%가 S파의 이방성지수 41.83%보다 낮게 나타나는데 S파에서 낮은 균질성을 보임을 알 수 있다. 포아송의 비는 0.27~0.48의 범위에 속하며 평균치 0.36은 일반적인 암석의 경우 0.25 보다 약간 높게 나타나며, 강성률은 1.92~5.66×10 GPa의 범위이며 평균치는 4.05×10 GPa이다.

문주리층1(Ocmu1); 시료에서 측정된 P파의 속도는 최저 2934m/s에서 최고 4219m/s이며 평균치는 3631m/s이고 각 방향에 따른 차이는 평균치의 20% 이내로 균질성을 유지한다. 그러나 S파에서는 최소 1768m/s, 최대 2856m/s로서 평균치 2474m/s의 29% 이내의 차이를 나타낸다. 이는 P파의 이방성지수 30.46%가 S파의 이방성지수 38.10%보다 약간 낮게 나타나는데 P파와 S파에서 동일한 균질성을 보인다. 포아송의 비는 0.18~0.45의 범위에 속하며 평균치 0.34는 일반적인 암석의 경우 0.25 보다 약간 높게 나타나며, 강성률은 0.83~2.15×10 GPa의 범위이며 평균치는 1.64×10 GPa이다.

문주리층2(Ocmu 2); 시료에서 측정된 P파의 속도는 최저 4849m/s에서 최고 6171m/s이며 평균치는 5434m/s이고 각 방향에 따른 차이는 평균치의 13% 이내로 균질성을 유지한다. 그러나 S파에서는 최소 2532m/s, 최대 3975m/s로서 평균치 3544m/s의 29% 이내의 차이를 나타낸다. 이는 P파의 이방성지수 21.42%가 S파의 이방성지수 36.30% 보다 낮게 나타나는데 P파에서 더 높은 균질성을 보임을 알 수 있다. 포아송의 비는 0.31~0.48의 범위에 속하며 평균치 0.37은 일반적인 암석의 경우 0.25 보다 높게 나타나며, 강성률은 1.76~4.33×10 GPa의 범위이며 평균치는 3.48×10 GPa이다.

시료에서 측정된 P파의 평균속도를 비교하여 보면 구룡산층1, 구룡산층2, 창리층 및 문주리층2에서

5000m/s 이상이며, S파의 경우도 동일한 시료에서 3500m/s 이상의 높은 속도가 측정되었다. 이와 같이 P파와 S파의 속도가 높은 시료에서는 동탄성계수도 높게 나타났다. 그러나 이들의 시료를 채집한 장소에서 측정된 야외의 P파의 평균속도는 시료의 경우보다 20~30%의 현저히 낮은 속도를 보인다. 이는 시료에서 포함되지 않은 불연속면이 야외의 경우는 다수가 포함되기 때문이라고 판단된다. 또한 P파의 이방성지수는 불국사화강암과 구룡산1에서 60% 이상의 높은 수치를 보이거나 다른 시료에서는 30%이하의 낮은 수치를 보인다. 이 수치는 야외에서 측정된 P파의 평균이방성지수 68.5%보다 현저히 낮은 수치로서 야외에서 측정된 P파의 방향에 따른 속도 차이가 시료의 경우보다 현저히 높음을 뜻한다.

측정자료의 비교: 일반적으로 기반암의 탄성파 속도는 암반 내에 발달하는 단열 또는 단열대의 분포가 주로 좌우하므로 본 지역에서는 시료의 채취와 야외에서 P파의 속도를 측정 한 8지역에서 이곳에서 발달한 단열구조 즉 절리의 방향과 지형의 연장방향, 야외에서 측정된 P파의 속도 및 시료에서 측정된 P파의 속도를 단순 비교하여 보았다(Figure 5).

먼저 지형의 연장 방향과 절리의 발달 방향을 서로 비교하여 보면 창리층과 구룡산층2는 서로의 방향이 부합되나, 불국사화강암과 구룡산층1은 서로 반대의 방향으로 발달되어 있으며 나머지도 연관성을 찾을 수 없었다. 절리의 발달 방향과 P파의 속도가 빠른 방향을 서로 비교하여 보면 구룡산층1의 경우는 서로 잘 일치한다. 그러나 나머지 7곳에서는 방향의 연관관계를 확인하기 어렵다.

야외에서 측정된 P파의 속도와 시료에서 측정된 P파의 속도를 서로 비교하여 보면 야외에서는 암반 내에 발달되어있는 균열의 영향으로 P파의 속도가 현저히 느려지고, 시료에서는 야외에서의 P파의 속도보다 3~4배정도 빠르게 측정된다. 특히 야외에서 측정된 P파의 속도는 절리밀도가 10m/m² 이상인 경우, 즉 절리가 비교적 많이 발달한 지역인 구룡산층2, 구룡산층3, 문주리층1과 문주리층2에서는 1000m/s 이하의 느린 속도가 측정되었고 절리밀도가 10m/m² 이하의 화강암지역, 창리층, 구룡산층1

탄성파를 이용한 보은지역 암석의 공학적 성질과 이방성에 관한 연구

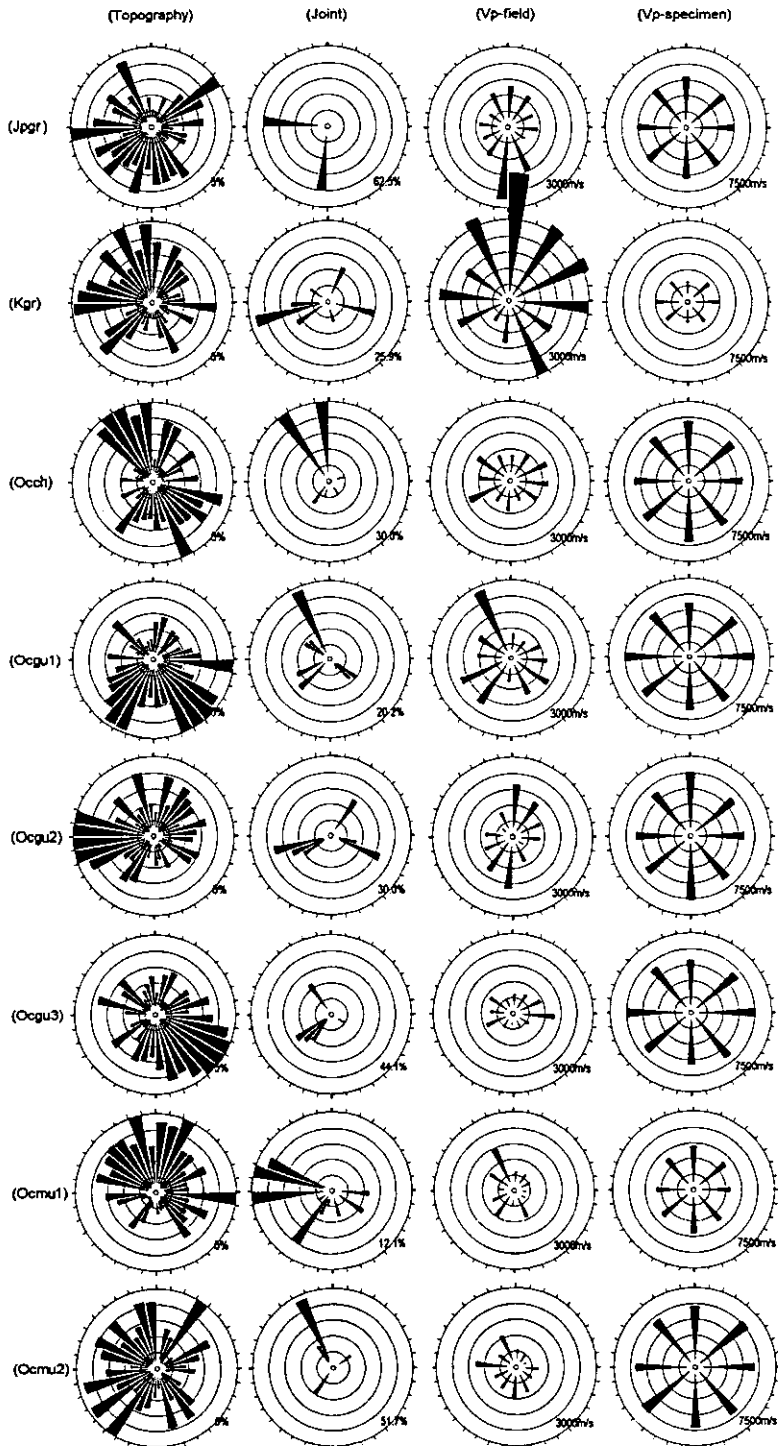


Fig. 5. Comparison with orientation of ridge, direction of joint and p-wave velocity.

지역에서는 1200m/s 이상의 비교적 빠른 P파의 속도가 측정되었다.

결 론

충북 보은일대에 분포하는 옥천계지층 및 중생대 화강암을 대상으로 대표적인 각 지층의 8곳에서 기반암의 지진파 속도를 각 방위별로 측정하였으며, 동일한 장소에서 채취한 시료를 26면체로 정형한 시편을 이용하여 실내에서 각각의 3차원적 방위별로 지진파의 전달속도 및 동적 공학적 성질을 측정하고, 이의 결과를 야외에서 측정한 자료와 비교 분석 하였다.

야외에서 측정된 P파의 평균속도는 불국사화강암이 2697m/s로서 최대이고 구룡산층2에서 861m/s로 최소의 속도를 보인다. 각 방위에 따른 최대속도는 불국사화강암에서 0°방향에서 5000m/s의 최대치를 옥천계 문주리층1의 60°방향에서 439m/s의 최소치를 보이는데, 최대와 최소사이에는 10배 이상의 차이가 있다. 각 방위에 따른 P파의 이방성을 암종별로 비교하면 불국사화강암에서 최대치(81%)를 창리층에서 최소치(46%)를 보이고, 8곳의 평균 이방성수는 68.5%이다. 또한 야외에서 측정된 P파의 속도는 절리밀도가 10m/m² 이상의 경우, 즉 절리가 비교적 많이 발달한 지역인 구룡산층2, 구룡산층3, 문주리층1과 문주리층2에서는 1000m/s 이하의 느린 속도로 측정되었고 절리밀도가 10m/m² 이하의 화강암지역, 창리층, 구룡산층1 지역에서는 1200m/s 이상의 비교적 빠른 P파의 속도가 측정되었다.

시료에서 측정된 P파의 평균속도를 비교하여 보면 구룡산층1, 구룡산층2, 창리층 및 문주리층2에서 5000m/s 이상이며, S파의 경우도 동일한 시료에서 3500m/s 이상의 높은 속도가 측정되었는데 이는 야외의 경우보다 3~5배의 빠른 속도를 나타낸다. 이는 시료에서 포함되지 않은 불연속면이 야외의 경우는 다수가 포함되기 때문이라고 판단된다. 또한 P파의 이방성지수는 불국사화강암과 구룡산1에서 60% 이상의 높은 수치를 보이나 다른 시료에서는 30%이하의 낮은 수치를 보인다. 이 수치는 야외에서 측정된 P파의 평균이방성지수 68.5%보다 현저

히 낮은 수치로서 야외에서 측정된 P파의 방향에 따른 속도 차이가 시료의 경우보다 현저히 높았음을 뜻한다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 연구사업(과제번호: KOSEF 981-0403-012-2)에 의해 수행되었으며, 당시 학부 학생으로서 야외조사 및 실내 작업 중 시료를 제작하는데 많이 도와준 현재 충북대학교 교육대학원에 재학중인 김명흠 선생과 강수인 선생에게 감사 드린다.

참 고 문 헌

- 김기영, 홍종국, 김교홍, 1998, 양산단층 지역에서의 수직균열에 의한 탄성과 이방성 측정, 지질학회지, 34, 73-80.
- 김동학, 이병주, 1986, 한국지질도(1:50,000), 청산도폭 및 설명서, 한국동력자원연구소, 1-20.
- 김옥준, 이대성, 이하영, 1977, 한국지질도(1:50,000), 보은도폭 및 설명서, 자원개발연구소, 1-35.
- 박덕원, 1995, 중생대 화강암에 발달된 결의 역학적 특성, 박사학위 논문, 경북대학교, 101.
- 박형동, 1995, 암석의 공학적 이방성 측정을 위한 실험실내 P파 속도 측정기법에 대한 연구. 지질공학, 5, 237-247.
- 이종혁, 이민성, 박봉순, 1980, 한국지질도(1:50,000), 미원도폭 및 설명서, 자원개발연구소, 1-29.
- 이흥규, 유의규, 홍승호, 1973, 한국지질도(1:50,000), 용유리도폭 및 설명서, 국립지질광물연구소, 1-21.
- 최병렬, 1998, 지하수 유로 조사를 위한 절리계의 응용지질학적 분석, 지질공학, 8, 131-143.
- Green, A. E., and Taylor, G. I., 1939, Stress system in aeolotropic plates, I, Proc. Roy. Soc., A 173, 162-172.
- Green, A. E., 1942, Stress system in aeolotropic plates, IV, Proc. Roy. Soc. London, A 180, 173-208.
- Hearmon, R. F. S., 1961, An Introduction to

Applied Anisotropic Elasticity, Oxford, University Press.

King, M. S., Chaudhry, N. A., and Shakeel, A., 1995, Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstone with aligned cracks, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 32, 155-163.

Savin G. N., 1961, Stress concentration around holes, translated by E. Gros, Oxford, Pergamon.

Sayers, C. M., Allen, D. R., Haines, G. E., and Proudfoot, G. G., 1986, Texture and stress determination in metals by ultrasonic Rayleigh waves and neutro diffraction, *Phil. Trans. R. Soc. London, A* 320, 182-200.

Xu, S., and King, M. S., 1992, Modeling of the elastic and hydraulic properties of fractured rocks, *Marine and Petroleum Geology*, 9, 155-166.

Zang, A., Wolter, K., and Berckhemer, H., 1989, Strain recovery, microcracks and elastic anisotropy of drill cores from KTB deep well, *Scientific Drilling*, 1, 115-126.

최병렬

충북대학교 사범대학 과학교육학부

361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 산4

Tel : 043-261-2735

Fax : 043-271-0526

e-mail : choibr@hotmail.com, choibr@cbu.ac.kr