

지하수 유로 조사를 위한 절리계의 응용지질학적 분석 A Study of Joint System for Groundwater Pathway

최 병 렬 (Byoung Ryol Choi)

충북대학교 사범대학 과학교육학부

요약 / ABSTRACT

본 연구는 충청남도 논산군 벌곡면 일대 즉 벌곡면 도산리와 수락리에 발달한 지하수 충전지역을 대상으로 하였다. 조사 지역의 수계는 남북 방향으로 발달되어 있으며, 지질은 가장 고기에 해당하는 옥천계 창리층(Och)이 중앙부에 위치하며, 본 지역의 서쪽의 경상계 유천층군에 대비되는 옹회암(Kslt)은 동쪽의 화강암(Kqb)과 북쪽의 석영반암(Kgf)에 의하여 관입 되었다. 각 지역에서 측정된 약 3000개의 절리면을 경사 방향과 각도를 구면투영하여 통계학적으로 우세한 방향을 찾아본 결과 화강암의 경우는 dipdirection/dip이 228~257/73~88, 010~150/70~85 두방향인, 창리층의 경우는 134~164/40~90, 214~249/55~89, 옹회암은 291~332/75~82, 235~241/73~71의 방향이 우세하였다. 그러나 북부에 소규모로 분포하는 석영반암은 뚜렷한 방향성을 나타내지 않았다. 기반암에서의 P파 전달속도를 측정하여 최대치와 최소치를 비교한 결과 석영반암은 5000(240°)~2380(360°)m/s로, 화강암은 3846(210°)~1408(150°)m/s 옹회암은 5000(360°)~2323(150°)m/s, 창리층 지역에서는 6667(180°)~2000(030°)m/s로 나타났다. 암석의 공학적 성질은 시료를 26면체의 시편으로 제작한후 각 방향별 동탄성계수 즉 뽀아송의 비, 강성률, 영률, 체적탄성률을 산출하여 야외에서 측정된 자료와 비교 분석 하였다.

The study area, Beulgok-myon Nonsan-goon Chungcheongnan-do is consist of Changri slate(Och, okcheon system), lithic tuff(Kslt, kyoungsang system), granite (Kqb, kyoungsang system) and quartz porphyry(Kgf, kyoungsang system). More than 3000 joints were measured and classified by direction. Main dipdirection/dips of Kqb are 228~257/73~88, 010~150/70~85, Och are 134~164/40~90, 214~249/55~89, Kslt are 291~332/75~82, 235~241/73~71. But Kgf are not appeared distinct directions of joint. In field, P-wave velocities(V_p) are measured on the bed rock. V_p of Kgf are 5000(240°)~2380(360°)m/s, Kqb are 3846(210°)~1408(150°)m/s, Kslt are 5000(360°)~2323(150°)m/s and Och are 6667(180°)~2000(030°)m/s. Also P-wave velocities on specimen are measured. It is slightly higher than

it's measured on the bed rock. For engineering properties of rock, we measured Poisson's ratio, rigidity, Young's modulus and bulk modulus by dynamic method.

서 언

한반도 남부에 분포된 각종 암석내에 부존되어 있는 암반지하수자원을 직접조사를 실시했거나 개발하여 취득한 수리지질자료와 암반지하수 자료를 종합 분석하여 이를 암석별, 지역별 및 수리지질학적인 관점에서 암반지하수의 산출상태를 분류, 검토하여 본 결과 심부지하수의 위치는 평균심도가 100m 정도가 되는 것으로 알려져 있다(한정상, 1983).

이들 대수층을 지질구조적으로 분류하여 보면, 파쇄대나 단층과 같은 대규모의 지질구조대 내에 저유된 암반지하수와 절리, 편리 및 층리면과 같은 소규모 구조대 내에 함유된 것으로 나눌 수 있으므로 암반 내에 발달한 불연속면의 존재 여부는 지하수의 부존 상태를 파악하는데 중요한 자료가 된다. 한편 한반도에서 가장 넓은 분포를 갖는 화성암류 내에 저장된 암반지하수는 제3기 이후의 국부적인 지각변동 및 단층작용에 의하여 형성된 2차공극이나, 지각심부에 발달되어있는 화강암류의 저반이 용기작용에 의해 지표로 서서히 노출됨에 따라 상부하중이 감소되므로 역학적 불균형상태에서 생성된 절리와 같은 2차공극내에 저장된 일종의 순환수로 이루어져 있다. 이외에는 지표근처에 노출된 조립 결정질암 또는 중성암질의 암맥은 지하심부의 깊은 곳까지 오랜기간동안 풍화를 받아 결정질 입자간의 결합이 와해되거나, 암맥의 균열및 풍화에 의하여 투수성이 매우 양호한 2차적인 공극을 이루므로 이들 풍화대는 암반내의 매우 좋은 지하수의 함양원의 역할을 한다(Hahn, 1981). 이와 같이 대수층으로서의 구비조건은 반드시 지하수가 부존할 공극이나 틈이 양호하게 발달되어 있어야 하고, 또한 용수로서 사용 가능할 만큼의 지하수가 취수 및 용출될수 있도록 물이 통과할 수 있는 충분한 크기의 공간이나 틈이 발달되어 있어야 한다(Hahn 1981, Bentall 1963, Jenkins et al, 1982). 그러므로 지하심부의 지하수의 개발에 있어서는, 지하에 분

포하는 파쇄대와 같은 불연속면과 암맥, 절리, 편리, 층리 등의 분포를 파악 함으로써, 지하에 존재하는 대수층의 존재를 확인하는 것이 필수적이다. 그러나 현재까지 대부분의 지하수 개발은 전문 지식이 결여된 소규모의 사업자에 의하여 무분별하게 진행되고 있으며, 이에 따른 경제적 손실 뿐만 아니라, 개발하다가 버려진 폐공에 의한 지하수의 오염은 심각한 상황이다. 이러한 피해를 막기 위하여서는 지하수의 개발에 앞서서 실시되어야할 지하수의 집수영역인 함양지역(recharge area)에 대한 기반암의 물리적 및 공학적 성질을 조사하여 기반암내의 파쇄구조의 분포상황을 파악하는 것이 필수적이다.

본 연구는 이러한 지하 불연속면의 조사과정을 체계적으로 수행함으로써 조사과정의 한 사례가 될 것이며, 나아가서는 지하수의 개발방법에 기초 자료가 될 것이다.

조사지역의 지형 및 지질

본 연구 지역은 충청남도 논산군 벌곡면 일대 즉 벌곡면 도산리와 수락리에 발달한 함양지역을 대상으로 하였다. 조사지역은 주로 남북 방향으로 수계가 발달되어 있으며, 수계의 발원지에서 연구 지역의 북부 끝부분 까지의 거리는 약 4km에 달하며 북류한다. 함양 지역의 크기는 정확히 알수 없으나, 이 지역의 분수령의 분포는 남북 약 4.5km, 동서 약 2.5km로써, 중앙부의 층적층(평균고도 250m)에서 분수령(평균고도 600m)까지의 해발고도는 300m이상의 차이가 난다.

본 지역의 지질은 가장 고기에 해당하는 옥천계 창리층(Och)이 중앙부에 위치하며, 지형적으로 낮은 곳을 형성한다. 구성 암석은 흑색의 슬레이트 내지 천매암의 형태로 높은 변성상을 보인다. 이 암석에서는 원래 퇴적 당시의 층리구조는 확인되지 않았으며, 대신 변성작용에 의한 2차적인 엽리구조가 발달하였다. 본 지역의 서쪽에 발달한 옹회암

지하수 유로 조사를 위한 절리계의 응용지질학적 분석

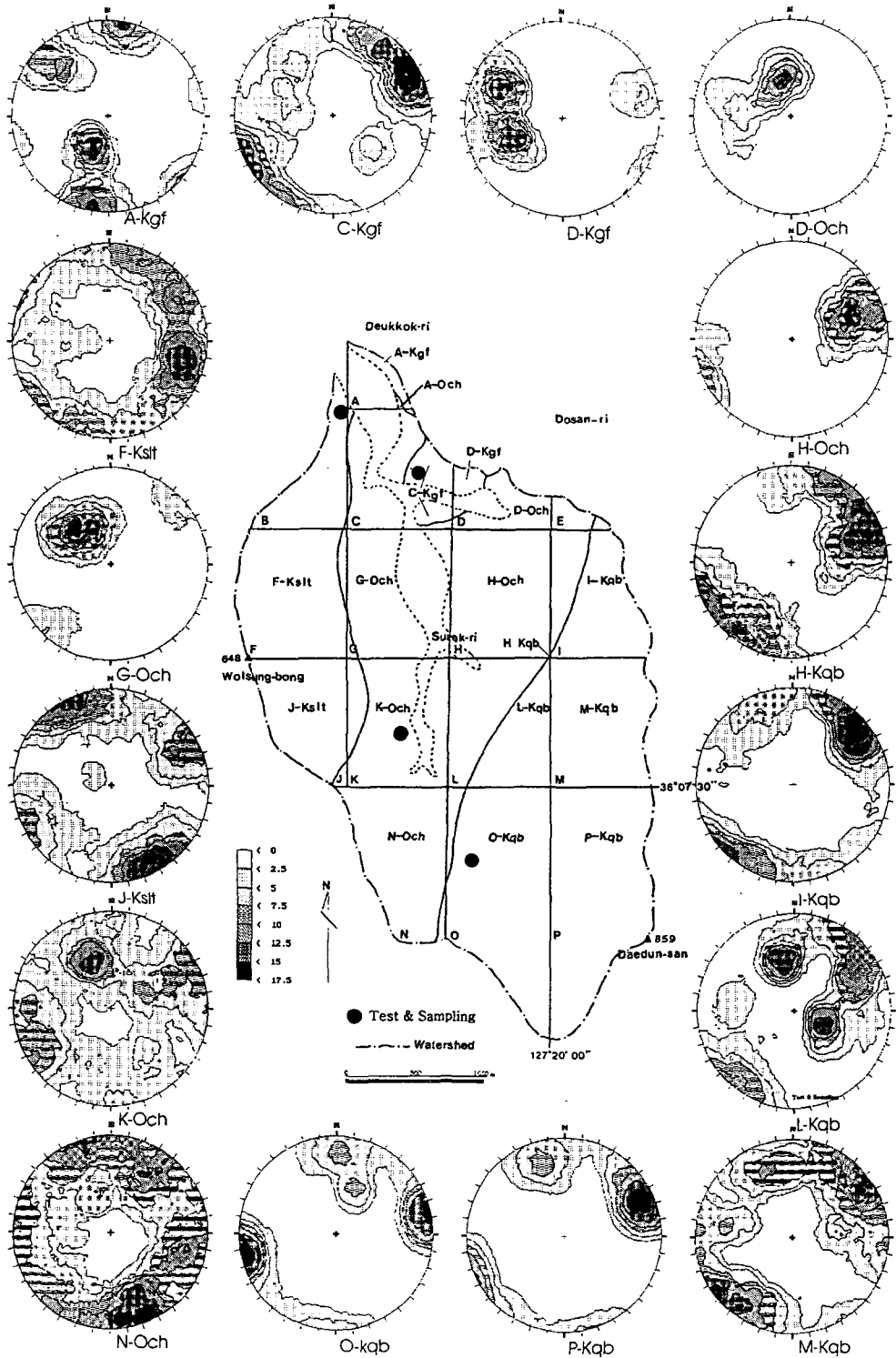


Figure 1. Location map and contour diagram(lower hemisphere) of the fracture orientation in study area.

(Kslt)은 경상계 유천층군에 대비될 것으로 판단되며, 본 지역의 동쪽의 화강암(Kqb)과 북쪽의 좁은 분포를 갖는 석영반암(Kgf)이 이를 관입하였다 (Figure 1).

절리계의 분포 상태

기반암내에 발달한 불연속면은 주로 절리면으로서 이들 절리면의 발달상태를 암석별, 지역별로 특징적인 방향성을 비교하기 위하여 연구지역을 편의상 A에서 P까지 16지역으로 나누었으며, 이들 지역의 암종을 구분하여 지역표시를 먼저 나타내고 암종을 뒤에 붙여 "A-Kgf"와 같이 표시하였다 (Figure 1).

각 지역에서 측정된 절리는 약 3000개로서 절리

면의 경사 방향과 각도를 구면투영(Schmidt-net, lower hemisphere, pole, counter-plot)하여 통계학적으로 우세한 방향을 찾았다(Figure 1). 이의 결과를 지역별로 정리한 것과 암종별로 분류한 것(Table 1)으로 나누어 특징을 찾아본 결과 지역적으로는 뚜렷한 경향성을 나타내지 않으나, 암종별로 분류한 것에서는 뚜렷한 특징이 있었다. 즉 화강암(Kqb)의 경우는 dipdirection/dip이 228~257/73~88, 010~150/70~85의 두방향성, 창리층(Och)의 경우도 134~164/40~90, 214~249/55~89, 응회암(Kslt)은 291~332/75~82, 235~241/73~71의 방향성이 우세하였다. 그러나 북부에 소규모로 분포하는 석영반암(Kgf)은 뚜렷한 방향성을 나타내지 않았다.

상기한 자료와 단열의 길이, 측정면의 방향, 간격 및 열극의 형태를 고려하여 확률밀도함수와 통계학적 방법으로 해석하여 이의 결과를 컴퓨터 프로그

Table 1. Major joint orientation of the study area.

Area	Geology	Major joint orientation (Dipdirection/Dip)			
A	Kgf	024/40	189/88	010/88	137/71
C	Kgf	241/82	061/90		
D	Kgf	119/70	065/53		
F	Kslt	291/75	235/77	019/88	
J	Kslt	332/82	159/87	241/73	068/86
A	Och	233/55	044/58		
D	Och	164/40			
G	Och	134/55			
H	Och	249/64			
K	Och	158/53	056/87	239/89	
N	Och	337/85	161/90	214/74	283/78
H	Kqb	250/80	036/83	070/88	
I	Kqb	228/82	045/89		
L	Kqb	292/39	167/57	239/73	036/87
M	Kqb	055/88	233/84	038/85	
O	Kqb	076/88	257/88		
P	Kqb	245/81	064/89	162/74	

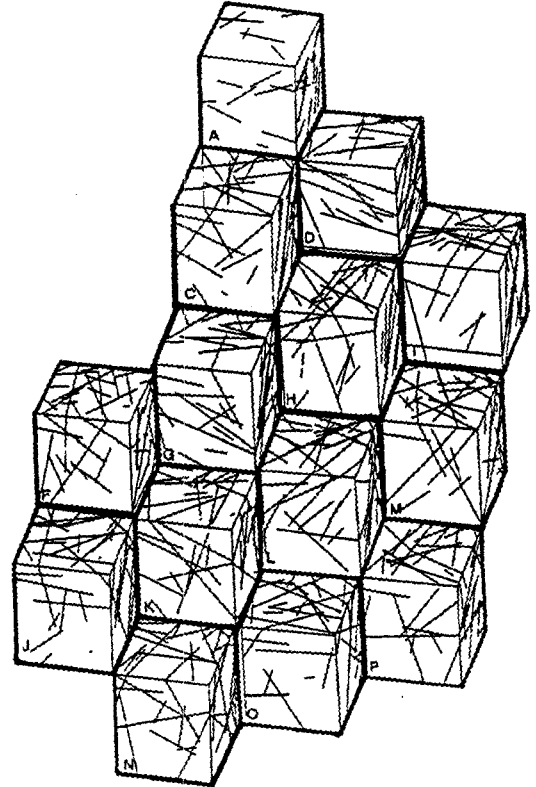


Figure 2. Distribution of three-dimensional discrete fracture models.

램(FracMan,1992)을 이용하여 3차원적으로 도시 하였다. 즉 정육면체의 입체형에 확률적으로 표시되는 절리의 유형을 정육면체의 표면과 교차하는 형상(Figure 2)을 조사 지역별로 각각 나타낸 것이다.

이의 표면적인 분포의 특징은 화강암(I, M, O, P)의 경우는 대부분은 우세한 두방향의 절리계에 속하지만 일부는 수평면에서 방사상의 분포를 갖는데 이는 절리의 측정이 실시된 노두의 박리현상에 기인한 것으로 판단된다. 장리층의 경우는 지형적으로 비교적 낮은 지역(C, D, G, H, K, L)에서는 우세한 절리계(joint system)의 발달을 나타내나 지역적으로 불연속면과 절리의 방향이 급격히 변하며, 높은 능선 지역(N)에서는 화강암과 같이 박리현상의 영향을 받는다. 그러나 높은 지역에 위치한 응회암(F, J)과 저지대에 위치한 석영반암은 뚜렷한 특징을 찾을 수 없다.

기반암의 탄성파 전달속도

기반암의 탄성파 전달속도의 측정은 여러 가지 방법이 가능하다. 본 연구에서는 기반암의 표층부에서 방위에 따른 P파 속도를 측정하므로써 방위에 따른 지진파의 이방성 여부 및 이방성의 원인이 되는 사실을 구명하려고 하였다. 측정지점은 절리 측정지점과 동일한 지역이었으며, 인접한 지역에서 실내 지진파 속도 측정을 위한 시료의 채집도 동시에 실시하였다. 지진파의 속도 측정을 위하여 기반암이 노출된 평활한 지역에서 반지름 1m의 원을 그리고 북(N)을 기준으로 하여 시계방향으로 30° 간격으로 원을 12등분 하였다. 이와 같이 설정된 12지점에 5cm정도의 구멍을 파고 각각의 지오폰의 끝 부분을 고정한 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 속도를 계산하였다.

이렇게 측정된 P파의 속도는 12 방향 즉 unidirection으로 측정이 되었지만 실제로는 6개의 방위쪽(0~180, 30~210, 60~240, 90~270, 120~300, 150~330)으로 즉 bidirection으로도 나타낼 수 있다. 따라서 각 지역의 이방성 지수(Index of

anisotropy, 박형동 1995)를 산출 할 때는 360° 방위의 방법과 180° 방위의 방법으로 각각 계산 하였으며, 180° 의 방위의 방법으로 계산할 때는 마주 보는 방향의 속도를 산출 평균하였다.

$$\text{이방성 지수} = \{(V_{\max} - V_{\min}) / V_{\max}\} \times 100\%$$

일반적으로 기반암의 탄성파 속도는 암반내에 발달하는 단열 또는 단열대의 분포가 주로 좌우하나, 본 측정지역에서 2m이상의 암반이 노출되는 지역은 단열의 발달이 미약하므로 단열의 특성에 대한 조사는 시행하지 않았다. 그러므로 단열의 분포가 탄성파의 속도에 미치는 영향을 비교하려면 더 넓은 범위에서 시행하여야 할것이며, 본 지역에서는 인접지역에서 측정된 단열구조의 방향과 단순 비교하여 보았다.

석영반암(Kgf)

석영반암지역에서 탄성파의 속도를 측정된 결과 평균속도는 3452m/s이며, 180° 방위의 방법에서는 60~240°방향에서 최대치의 평균속도인 4673m/s가, 최소치의 평균속도는 120~300° 방향에서 2601m/s로서 평균 이방지수는 44.34%를 보였다. 그러나 360° 방위의 방법에서 관찰하면 최대치는 240°에서 5000m/s, 최소치는 360° 방향에서 2380m/s로서 이방지수는 52.38%로 나타났다(Table 2). 이와 같이 높은 이방지수를 나타내는 것은 암반내에 발달한 불연속면의 분포와 이들의 응력상태에 따라서 달리 할 수 있지만 그의 뚜렷한 원인은 불명확 하다. 탄성파의 방위에 따른 속도 분포를 장미그림으로 표시하여 Figure 1의 절리면의 분포상태를 나타낸 구면투영(C-Kgf)에 겹쳐서(Figure 3의 Kgf) 비교하여 보면 절리면의 주향 방향에서는 P파의 속도가 느리게 나타나며, 절리면의 경사 방향(240°와 60°)에서는 P파의 속도가 더 빠르게 전달됨이 나타나는데, 이는 일반적인 관념 즉 불연속면의 주향 방향으로의 지진파의 전달 속도가 빠르고, 이와 수직인 경사 방향으로는 더 느릴 것이라는 생각과 반대의 경우를 보인다.

Table 2. P-wave velocity of each rock as a function of the direction of wave propagation to the north.

Orientation(°)	Velocity(m/sec)			
	Kgf	Kqb	Kslt	Och
30	3846	2500	2777	2000
60	4347	2631	4166	3030
90	3030	2631	5263	3225
120	3571	3125	3571	3333
150	2702	1408	2325	4166
180	3846	2941	3846	6666
210	3846	3846	2941	3030
240	5000	3225	3846	5555
270	3030	3125	3333	3030
300	3333	3030	3846	4166
330	2500	3030	2631	3030
360	2380	2500	5000	3846
average	3452	2832	3628	3756

화강암(Kqb)

화강암지역에서 탄성파의 속도를 측정한 결과 평균속도는 2832m/s이며, 180°방위의 방법에서는 30~210°방향에서 최대치의 평균속도인 3173m/s가, 최소치의 평균속도는 150~330°방향에서 2219m/s로서 평균 이방지수는 30.05%를 보였다. 이는 본 지역에서 최소치의 이방지수를 나타낸 것으로 탄성파의 속도 관찰에서는 가장 높은 균질성을 갖는다. 그러나 360°방위의 방법에서 관찰하면 최대치는 210°에서 3846m/s, 최소치는 150°방향에서 1408m/s로서 이방지수는 63.38%로 나타났다(Table 2). 이와 같이 높은 이방지수의 차이를 나타내는 것은 암반내에 발달한 불연속면의 분포에 기인된 것으로 추정되며 그 원인은 불명확 하다, 탄성파의 방위에 따른 속도 분포를 장미그림으로 표시하여 구면투영에 겹쳐서(Figure 3의 Kqb) 비교하여 보면 150°의 방위를 제외하고는 등근 원형의 속도 장미를 갖는 것으로 본 조사 대상중에 가장 등방체의 형상을 갖는다. P파의 속도변화와 이 지역에 발달한 절리면

의 방향과 비교하여 보면 전술한 석영반암의 경우와 같이 절리면의 주향 방향에서는 P파의 속도가 느리게 나타나고, 절리면의 경사 방향(240°)에서는 P파의 속도가 더 빠르게 전달됨이 확인되나 그 차이는 미세하게 나타난다.

응회암(Kslt)

응회암질 지역에서 탄성파의 속도를 측정한 결과 평균속도는 3628m/s이며, 180°방위의 방법에서는 0~360°방향에서 최대치의 평균속도인 4423m/s가 최소치의 평균속도는 150~330°방향에서 2478m/s로서 평균 이방지수는 43.96%를 보였다. 그러나 360°방위의 방법에서 관찰하면 최대치는 360°에서 5000m/s, 최소치는 150°방향에서 2323m/s로서 이방지수는 53.49%로 나타났다(Table 2). 이와 같이 높은 이방지수를 나타내는 것은 화강암 지역과 마찬가지로 암반내에 발달한 불연속면의 분포와 응회암의 유동상태 및 광물성분의 배열과 포함된 압편의 불균질성등에 기인된 것으로서 판단된다. 탄성파의 방위에 따른 속도 분포를 장미그림으로 표시하여 구면투영에 겹쳐서(Figure 3의 Kslt) 비교하여 보면 전술한 석영반암과 응회암의 경우와 반대로 절리면의 주향 방향에서는 P파의 속도가 빠르게 나타나며, 절리면의 경사 방향(330°와 150°)에서는 P파의 속도가 더 느리게 전달됨이 확인되었다. 이는 일반적인 관념 즉 불연속면의 주향 방향으로의 지진파의 전달 속도가 빠르고, 이와 수직인 경사 방향으로는 더 느릴 것이라는 생각과 일치한다. 그러므로 응회암 지역과 같이 절리면의 수직 방향으로 지진파의 속도가 느린 곳에서는 지진파의 속도 분포를 측정하여 불연속면의 발달 상태를 확인할 수 있고 따라서 지하수의 유동의 통로가 되는 유로의 존재와 방향을 추정할 수 있을 것이다.

창리층(Och)

창리층 지역에서 탄성파의 속도를 측정한 결과 평균속도는 3756m/s이며, 180°방위의 방법에서는 0~180°방향에서 최대치의 평균속도인 5256m/s가, 최소치의 평균속도는 30~210°방향에서 2515m/s로서 평균 이방지수는 52.15%를 보였다. 그러나 360°방위의 방법에서 관찰하면 최대치는 180°에서 6666m/s, 최소치는 30°방향에서 2000m/s로서 이방

지하수 유로 조사를 위한 절리계의 응용지질학적 분석

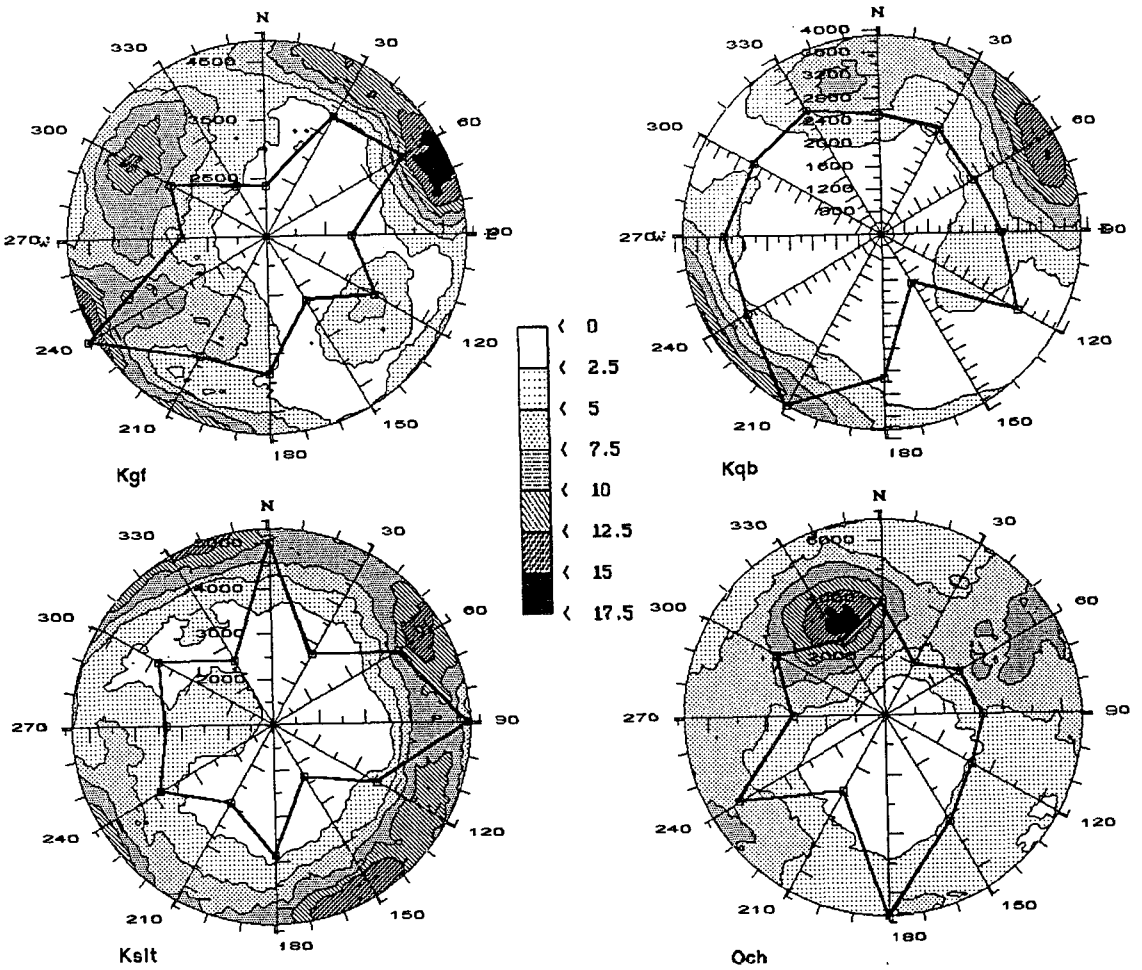


Figure 3. P-wave velocity of each rock as a function of the direction of wave propagation to the north.

지수는 70.00%로 나타났다(Table 2). 이와 같이 창리층에서 가장 높은 이방지수를 나타내는 것은 창리층 내에 발달한 벽개면과 이와 평행한 방향으로 발달한 불연속면의 방향이 뚜렷한 원인이 된 것으로 판단된다. 탄성파의 방위에 따른 속도 분포를 장미그림으로 표시하여 구면투영에 겹쳐서(Figure 3의 Och) 비교하여 보면 이는 응회암 지역과 같이 뚜렷하지는 않지만 절리면의 주향 방향부근에서는 P파의 속도가 빠르게 나타나며, 절리면의 경사 방향(30°와 210°)에서는 P파의 속도가 더 느리게 전달됨이 확인되었다. 이러한 현상은 본 지층이 지역에

따라서 불연속면과 절리의 방향이 급격히 변하는데 원인이 있는 것으로 판단된다. 그러므로 본 지역과 같이 절리면과 불연속면의 변화가 심한 곳에서는 국지적인 조사가 효과적일 것으로 생각되며, 또한 동일한 지층에서 구조의 변화가 심하지 않은 곳을 택하여 조사 비교할 필요가 있다.

시료에서의 탄성파 전달속도

이상적인 암석은 균질하고, 연속적이며 등방성

(isotropy)을 지녀야 하지만 실제 암석은 불균질하며, 경우에 따라서는 불연속면이 내부에 존재하거나 또한 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 된다. 입자의 배열에 의한 이방성은 변성암의 경우는 엽리와 편리구조에서, 퇴적암의 층리, 화성암의 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 암석물리 분야에도 시험편의 방향에 따른 탄성과의 속도변화를 이용하여 암석시험편내에 존재하는 균열의 분포 및 조암광물의 방향성을 추정하고 암석시료의 다른 공학적 성질과의 연관성을 비교 연구하는데 널리 사용되고 있다(박형동 1995, Siegesmund et al., 1991, Xu and King 1992, King et al., 1995).

시험편의 제작방법은 먼저 동일한 시료에서 3차원적으로 방향을 잡아 여러 각도로 코아링을하여 코아의 장축의 방향이 방위화 시키는 방법과, 다른 방법으로는 동일한 시료에서 여러 방향의 평행면을 성형하여 사용하는 방법(Figure 4)이 있다. 본 연구에서는 후자와 같은 다면체의 시험편을 제작하여 암석의 공학적 성질을 측정하였다.

시료의 채취 및 시험편의 제작

시료의 채취는 기반암의 탄성과 속도를 측정할 지역(Figure 1)에서 균열이 없는 치밀한 암괴를 대상으로 하였는데, 석영반암은 저지대에서 풍화가 심히 진행되어 시험편을 만들지 못하였다. 시료는 먼저 현장에서 노두의 상태로 있는 암반의 표면에 각각의 방위와 수평 및 수직방향을 표시한 후 한 번이 약 30~40cm의 크기를 갖는 암괴로 채취하였다. 채취된 시료는 먼저 동-서, 남-북, 수평, 수직의 방향을 유지하는 정육면체로 절단한 후 다음 단계로 정육면체의 각면과 45°의 각도를 유지하는 면을 절단, 연마하여 Figure 4와 같은 26면체로 성형한다. 시험편은 제작 과정에서 대칭면이 서로 평행을 유지하도록 정밀하게 제작되었으며 각각의 성형면은

구면투영에서 표시하는 방법(dipdirection/dip)에 따라서 나타내는데 이는 Figure 4와 같다.

실험방법 및 과정

암석의 물성의 측정을 위한 시료는 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.

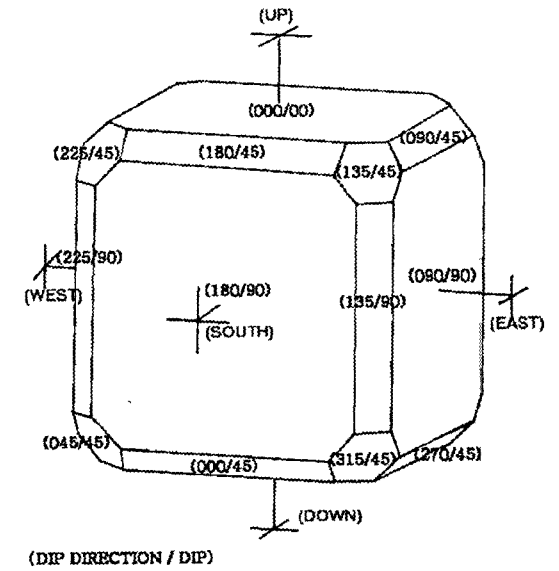


Figure 4. Specimen with multiple cut faces

측정장치 및 방법

P파와 S파의 발생장치는 high voltage pulse generator(Oyo model 5234)를 P파와 S파의 transducer에 각각 연결하여 사용하였다. 또한 각각의 transducer는 sonic viewer(Oyo model 170)에 연결하여 측정하였다. 측정방법은 먼저 transducer 사이에 시료를 넣지 않은 상태에서 영점을 조정하고, 시료를 넣은 상태에서 파동의 도달시간의 차이를 측정 한 후, 시료의 길이를 측정시간으로 나누어 시료 내에서의 파동의 전달 속도를 계산하였다. 측정시 시료와 transducer 사이의 접촉을 원활하게 하기 위하여 silicon wax를 사용하였으며, silicon wax는 S파의 전달에 이상을 줄 수 있으므로 S파의 측정시에는 사용하지 않았고 나중에 P파의 측정시에만 사용하였다.

P파의 속도(Vp)와 S파의 속도(Vs)가 측정되면 이를 이용하여 암석의 동탄성계수(dynamic elastic constant)를 구할 수 있다. 즉 뽀아송의 비(Poisson's ratio, σ)는

$$\text{Poisson's ratio } (\sigma) = (1 - 2(Vs/Vp)^2) / (2 - 2(Vs/Vp)^2)$$

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

$$\text{Rigidity (G)} = \rho \cdot Vs^2$$

$$\text{Young's modulus (E)} = 2(1 + \sigma) \cdot G$$

$$\text{Bulk modulus (K)} = (2(1 + \sigma) \cdot G) / 3(1 - 2\sigma)$$

화강암(Kqb)

화강암의 P파의 속도는 시료에서 최저 4590m/s에서 최고 5070m/s로서 방향에 따라서 평균치 4870m/s의 6%이내의 차이를 나타낸다. 그러나 S파에서는 최소 2160m/s, 최대 3530m/s로서 평균 2910m/s 보다 25%이상의 차이를 나타낸다. 뽀아송의 비는 0.15~1.84의 범위에 속하며 평균치(0.2)는 일반적 암석의 경우(0.25)보다 약간 낮은 것은 22

5~315/45 방위에서 현저히 낮은 값에 기인한 것으로 판단된다. 강성률의 평균치는 $2.255 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 방향에 따른 변량은 50%에 달하며, 영률과 체적탄성률의 변화 폭은 각각 약 30%에 달한다. 이들의 자료는 Table 3에 나타내었으며, 방위에 따른 변형량의 변화는 Figure 5에 표시하였다.

응회암(Kslt)

응회암질암의 P파의 속도는 시료에서 최저 4750m/s, 최고 5210m/s로서 방향에 따라서 평균치 5020m/s의 5%이내의 차이를 나타낸다 이 값은 야외에서 측정 한 평균치 3630m/s 보다는 높은 수치를 나타낸다. 그러나, S파에서는 최소 2250m/s, 최대 3670m/s로서 평균 3200m/s 보다 방향에 따라서 최대 30%이상의 차이를 나타낸다.

뽀아송의 비는 0.01~0.38의 범위에 속하며 평균치 0.14는 일반적 암석의 평균값(0.25) 보다 50%가 낮은 것은 열변성에 따른 치밀한 구조가 S파의 속도를 높인 것에 기인한 것으로 판단된다. 강성률의 평균치는 $2.744 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 로서 방향에 따른 변량은 30%에 달하며, 영률과 체적탄성률의 변화 폭도 각각 약 30%에 달한다.

창리층(Och)

창리층의 흑색 슬레이트 시료에서 측정된 P파의 속도는 최저 4370m/s에서 최고 5760m/s로서 평균치 4840m/s 보다 방향에 따라 최대 약 20%의 차이를 나타낸다. 그러나 S파에서는 최소 2080m/s, 최대 3520m/s로서 평균 2750m/s 보다 약 25%의 차이를 나타내는데 이는 화강암 및 응회암과 유사한 속도의 범위에 속한다. 뽀아송의 비는 0.07~0.40의 범위에 속하며 평균치 0.24는 일반적 암석의 평균값(0.25)과 같은 값을 나타내지만 방위에 따라서 현저한 값의 차이를 갖는다. 강성률의 평균치는 $2.098 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 로서 방향에 따른 변량은 40%에 달하며, 영률과 체적탄성률의 평균치는 각각 $5.112 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, $3.608 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 이며 이들의 변화 폭은 약 35%에 달한다.

최병렬

Table 3. Engineering and physical properties of each rock specimen as pole of plane for dipdirection/dip.

Dipdirection /Dip	Vp	Vs	Density	Poisson's ratio	Rigidity	Young's modulus	Bulk modulus
	(m/s)	(m/s)	($10^{-3}\rho$) kg/m ³	σ	G (10^{10})N/m ²	E (10^{10})N/m ²	K (10^{10})N/m ²
(Kqb) 0/ 0	4800	2550	2.62	0.30	1.704	4.441	3.765
360/90	4990	2650	2.62	0.30	1.840	4.797	4.071
270/90	4930	3060	2.62	0.19	2.453	5.822	3.097
360/45	4590	2800	2.62	0.20	2.054	4.945	2.781
180/45	4810	3170	2.62	0.12	2.633	5.877	2.551
45/90	5020	2950	2.62	0.24	2.280	5.637	3.562
315/90	4760	3180	2.62	0.10	2.649	5.813	2.404
270/45	4810	2160	2.62	0.37	1.222	3.358	4.432
90/45	4920	2810	2.62	0.26	2.069	5.205	3.584
45/45	5000	2810	2.62	0.27	2.069	5.251	3.792
315/45	4810	3340	2.62	0.03	2.923	6.047	2.165
225/45	5070	3530	2.62	0.03	3.265	6.723	2.382
135/45	4860	2870	2.62	0.23	2.158	5.319	3.311
(Och) 0/ 0	5340	3000	2.71	0.27	2.439	6.192	4.476
360/90	4750	2100	2.71	0.38	1.195	3.295	4.521
270/90	5000	2080	2.71	0.40	1.172	3.272	5.212
360/45	5280	3520	2.71	0.10	3.358	7.387	3.078
180/45	4370	2800	2.71	0.15	2.125	4.894	2.342
45/90	4440	3020	2.71	0.07	2.472	5.287	2.047
315/90	4420	2280	2.71	0.32	1.409	3.716	3.416
270/45	5150	2620	2.71	0.33	1.860	4.931	4.707
90/45	4420	2800	2.71	0.16	2.125	4.950	2.462
45/45	5020	3170	2.71	0.17	2.723	6.364	3.198
315/45	5760	3170	2.71	0.28	2.723	6.987	5.360
225/45	4540	2650	2.71	0.24	1.903	4.726	3.048
135/45	4470	2560	2.71	0.26	1.776	4.461	3.047
(Kslt) 0/ 0	4870	3330	2.64	0.06	2.927	6.212	2.358
360/90	5040	3270	2.64	0.14	2.823	6.417	2.942
270/90	5060	3140	2.64	0.19	2.603	6.179	3.289
360/45	4980	2980	2.64	0.22	2.344	5.726	3.421
180/45	5090	3470	2.64	0.07	3.179	6.776	2.601
45/90	5150	3180	2.64	0.19	2.670	6.364	3.442
315/90	5000	3410	2.64	0.07	3.070	6.540	2.507
270/45	4750	3130	2.64	0.12	2.586	5.774	2.508
90/45	5130	2250	2.64	0.38	1.337	3.691	5.166
45/45	5210	3670	2.64	0.01	3.556	7.165	2.425
315/45	4960	3370	2.64	0.07	2.998	6.424	2.497
225/45	4990	2920	2.64	0.24	2.251	5.581	3.572
135/45	5140	3550	2.64	0.04	3.327	6.947	2.539

지하수 유로 조사를 위한 절리계의 응용지질학적 분석

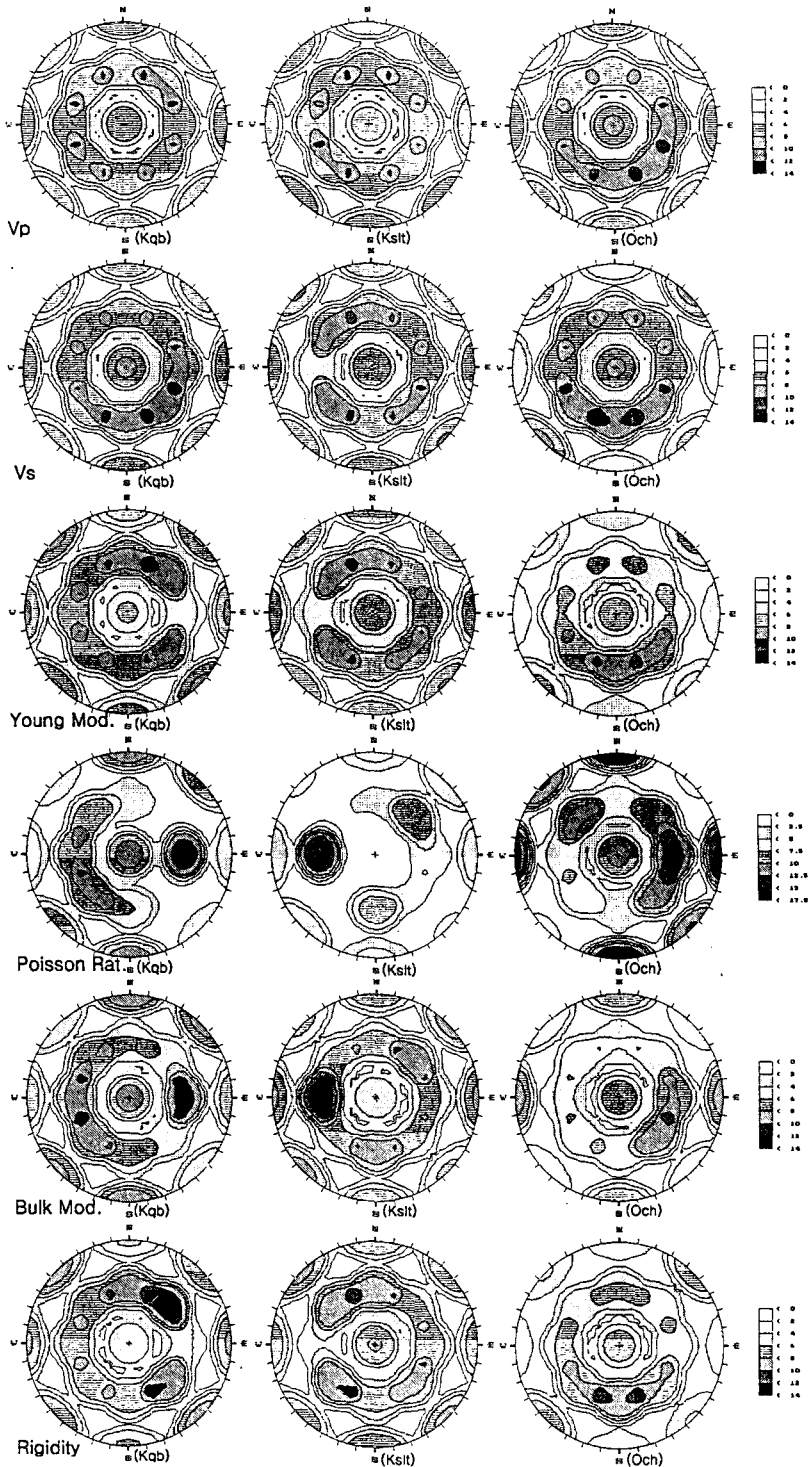


Figure 5. Engineering properties of each rock specimen as pole of plane for dipdirection/dip on stereonet.

결 론

충남 논산군 벌곡면 일대에 발달한 창리층(Och), 동부의 화강암(Kqb), 북부의 소규모 석영반암(Kgf)과 서부의 옹회암(Kslt)에서 지하수 유로 조사를 위한 절리계의 발달 상태를 조사 분석하였다. 조사 방법은 야외에서 3000여개 이상의 절리를 측정하였으며, 각 암층의 기반암위에서 지진파(P파)의 전달 속도를 12방위로 나누어 측정한 후, 이 지역에서 시료를 채취하여 26면체의 시편을 제작하여 3차원적으로 지진파의 속도를 측정한 후 이를 이용하여 동탄성계수를 산출하였다. 이의 결과를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

본 지역에 발달한 절리면의 주 방향은, 화강암은 228~257/73~88, 010~150/70~85, 창리층은 134~164/40~90, 214~249/55~89, 옹회암은 291~332/75~82, 235~241/73~71의 방향이 우세하였다. 그러나 북부에 소규모로 분포하는 석영반암은 뚜렷한 방향성을 나타내지 않았다.

기반암의 P파 전달속도는 석영반암지역에서 평균속도는 3452m/s이며, 최대치는 240°에서 5000m/s, 최소치는 360° 방향에서 2380m/s로서 이 방지수는 52%로 나타났다. 화강암의 평균속도는 2832m/s이며 최대치는 210°에서 3846m/s, 최소치는 150° 방향에서 1408m/s로서 이방지수는 63%로 나타났다. 옹회암 지역에서는 평균속도는 3629m/s이며, 최대치는 360°에서 5000m/s, 최소치는 150° 방향에서 2323m/s로서 이방지수는 53%로 나타났다. 창리층 지역에서는 최대치는 180°에서 6667m/s, 최소치는 30° 방향에서 2000m/s로서 이방지수는 70%로 나타났다.

암석시료에서의 역학적 이방성을 측정된 결과 화강암 시료의 P파의 속도는 4590~5070m/s 로서 방향에 따라 6%이내의 차이를, 그러나 S파에서는 25%이상의 차이를 나타낸다. 뽀아송의 비는 0.15~1.84의 범위에 속하며 강성률의 평균치는 $2.255 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 로서 방향에 따른 변량은 50%에 달하며, 영률과 체적탄성률의 변화 폭은 각각 약 30%에 달한다. 창리층 시료에서 측정된 P파의 속도는 4370~5760m/s 로서 20%의 차이를, S파에서는 25%의 차이를 나타낸다. 뽀아송의 비는 0.07-0.40의 범위

에 속하며, 강성률의 평균치는 $2.098 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, 영률과 체적탄성률의 평균치는 각각 $5.112 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, $3.608 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 이며 이들의 변화 폭은 약 35%에 달한다. 옹회암 시료의 P파 속도는 4750m/s에서 5210m/s 로서 5%이내의 차이를 나타낸다 이 값은 야외에서 측정된 평균치 3630m/s 보다는 높은 수치를 나타낸다. 그러나 S파에서는 30%이상의 차이를 나타낸다. 뽀아송의 비는 0.01~0.38의 범위에 속하며, 강성률의 평균치는 $2.744 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, 영률과 체적탄성률의 변화 폭도 각각 약 30%에 달한다.

위의 결과들을 비교분석한 결과 일반적인 관념 즉 불연속면의 주향 방향으로의 지진파의 전달 속도가 빠르고, 이와 수직인 경사 방향으로는 더 느릴 것이라는 기대치와 일치하는 경우(옹회암), 반대의 경우(석영반암), 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않은 경우(화강암, 창리층)가 있으므로 불연속면의 발달과 이의 지하수 유로의 확인 방법은 더 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 1994년 과학재단 특정기초연구(과제번호: 94-0703-01-01-3)의 연구비 지원에 의하여 수행되었다. 연구 수행중 야외에서 절리의 측정, 시료 채취 및 탄성과 탐사에 적극 협력하여준 현재는 부천 원종고등학교에 재직중인 최식 교사, 안양고등학교 문상연 교사와 실내시험에서 수고를 아끼지 않은 하상현군 등에게 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 박형동, 1995, 암석의 공학적 이방성 측정을 위한 실내시험 P파 속도 측정기법에 대한 연구, 대한지질공학회지, 5-3, 237-247.
- 한정상, 1983, 지하수학 개론, 박영사, 32.
- Bentall, R., 1963, Method of Determining Permeability, Transmissibility and Drawdown, Groundwater Hydraulic, USGS Water Supply paper 1536-I, 243-340.
- FracMan, 1992, Golder Associates Inc., 4104 148th

Ave. NE Redmond WA.98052.

- Hahn, J. S., 1981, Groundwater of Bed-Rocks in South Korean Peninsula, Jour. of Association of Korean Hydrological Society, v.13, no.3, 73-81.
- Jenkins, D.N. and J.K. Prentise, 1982, Theory for Aquifer Test Analysis in Fractured Rock under Linear Flow Conditions, Groundwater, Journal of the Technical Division, National Waterwell Association, 12-21.
- King, M.S., Chaudhry, N.A., Shakeel, A., 1995, Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstones with aligned cracks, Int. Jour. Rock Mech. Min Sci. & Geomech. Abstr., 32-2, 155-163.
- Siegesmund, S., Kern, H., and Vollbrecht, A., 1991, The effect of oriented microcks on seismic velocities in an ultramylonite, Tectonophysic, 186, 241-251.
- Xu, S., and King, M.S., 1992, Modeling of the elastic and hydraulic properties of fractured rocks, Marine and Petroleum Geology, 9, 155-166.

최 병 렬

충북대학교 사범대학 과학교육학부
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48
Tel : 0431-261-2735
Fax : 0431-271-0526
E-mail : choibr@cbucc.chungbuk.ac.kr