

## 충남지역 초염기성 암체의 지구물리학적 연구: 탄성과 속도 특성

서 만 철<sup>1</sup> · 우 영 균<sup>1</sup> · 송 석 환<sup>2</sup> · Hao, Tianyao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 지질환경과, 314-701 충남 공주시 신관동 182

<sup>2</sup>중부대학교 환경공학과, 312-940 충남 금산군 추부면 마전리 산 2-25

<sup>3</sup>중국과학원 지구물리연구소 중국 북경 1001

### Geophysical Study on the Ultramafic Rocks of Chungnam Province, Korea: Characteristics of Seismic Velocity

Man-Cheol Suh<sup>1</sup> · Young-Kyun Woo<sup>1</sup> · Suck-Hwan Song<sup>2</sup> · Tianyao Hao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Geoenvironmental Science, Kongju National University, Kongju, Chungnam 314-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Joongbu University, Keumsan, Chungnam 312-940, Korea

<sup>3</sup>Institute of Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing, 1001, China

**Abstract:** Compressional and shear wave velocities ( $V_p$  and  $V_s$ ) and densities have been measured for serpentinite, amphibolite, amphibole and biotite schist, and gneiss from western part of Chungnam Province at room temperature. Ranges of the density are  $2.6\sim 2.86\text{g/cm}^3$  for serpentinite,  $2.25\sim 2.81\text{g/cm}^3$  for talc, and  $2.74\sim 3.07\text{g/cm}^3$  for metamorphic rocks. Of these rocks, talc shows wider ranges than serpentinite and amphibolites due to its metamorphic process from serpentinite.

Values of  $V_p$  and  $V_s$  are  $5719\sim 6062\text{m/s}$  and  $2898\sim 3351\text{m/s}$  for serpentinites,  $4019\sim 5478\text{m/s}$  and  $2241\sim 2976\text{m/s}$  for talc,  $5375\sim 6372\text{m/s}$  and  $3042\sim 3625\text{m/s}$  for amphibolite,  $5290\sim 5499\text{m/s}$  and  $2968\sim 3137\text{m/s}$  for schist, and  $4788\text{m/s}$  and  $2804\text{m/s}$  for gneiss, respectively. Velocity of P wave increases 1.47 times faster than S wave with increase of density. The results of seismic velocity measurement show anisotropy, higher velocity across than along the schistosity of rocks, especially in metamorphic rocks. This fact indicates that there were regional metamorphism related with tectonic forces. Values of seismic velocity increase with increasing pressure from 20 MPa to 70 MPa, especially in metamorphic rocks.

Overall recalculated  $V_p$  and  $V_s$  values suggest that the serpentinite indicates for upper mantle in the respects of seismic characteristics, in spite of high degree of serpentinitization. In addition, those of the amphibolite do for low crust, and gneiss and schist for upper crust.

Key Words: P-wave velocity, S-wave velocity, ultramafic rock, serpentinite, upper mantle

**요약:** 충남 일원에 분포하는 초염기성 암석과 이에 수반되는 각섬암, 편암, 편마암에 대해 탄성과 밀도가 실험실에서 측정되었다. 밀도측정 결과 사문암은  $2.6\sim 2.86\text{g/cm}^3$ , 활석은  $2.25\sim 2.81\text{g/cm}^3$ , 변성암류는  $2.74\sim 3.07\text{g/cm}^3$ 의 범위를 갖는다. 이 결과 활석은 사문암으로부터의 변성과정으로서 사문암 및 각섬암보다 넓은 범위를 보였다.

P파와 S파의 속도는 사문암에서 각각  $5719\sim 6062\text{m/s}$ ,  $2898\sim 3351\text{m/s}$  이고, 활석에서  $4019\sim 5478\text{m/s}$ ,  $2241\sim 2976\text{m/s}$ , 각섬암에서  $5375\sim 6372\text{m/s}$ ,  $3042\sim 3625\text{m/s}$ , 편암에서  $5290\sim 5499\text{m/s}$ ,  $2968\sim 3137\text{m/s}$ , 편마암에서  $4788\text{m/s}$ ,  $2804\text{m/s}$ 를 보였다. P파의 속도는 밀도가 증가함에 따라 S파의 속도보다 1.47배 빠르게 증가하였다.

탄성과 속도와 밀도 사이에 비례관계가 성립하며, 특히 밀도에 따른 P파 속도 증가율이 S파 속도증가율보다 약 1.47배 크게 나타났다. 탄성과속도의 이방성분석결과 편리와 직각 방향의 속도값이 평행방향의 값보다 높았는데, 특히 변성암이 더 큰 차이를 보이는데, 이는 변성암의 형성이 지체구조성 압력의 영향으로 인한 광역변성작용에 의한 것임을 시사한다. 압력의 변화에 따른 탄성과속도 변화분석 결과 대체로 압력이 20 MPa에서 70 MPa로 증가함에 따라 변성암의 탄성과속도 증가가 다른 암석에 비하여 크게 나타났다.

재계산된 탄성과속도는 각섬암이 이 지역 하부 지각에 대한 탄성과 특성을, 편마암류 및 편암은 상부지각 암석의 탄성과

특성을 지시한다고 생각된다. 한편 사문암의 측정치는 높은 사문암화 정도를 반영하기는 하지만 상부 맨틀의 암석에 대한 탄성파의 특성을 지시한다 볼 수 있다.

주요어: P파 속도, S파 속도, 초염기성암, 사문암, 상부맨틀

## 서론

하부 지각 및 상부 맨틀에 대한 정보는 직접적인 접근이 어려운 바, 이를 지역 기원암에 대한 실험실에서 탄성과 측정치는 현 상태의 지각구조 및 상부 맨틀 깊이의 암석역학적 특성에 대한 간접적인 정보를 제공한다. 지금까지 이에 대한 접근은 현무암 및 킴벌라이트의 포획암(Boyd *et al.*, 1978; Griffin *et al.*, 1984; Vaselli *et al.*, 1995) 및 지구조적으로 지표면에 노출된 암상에 대한 연구를 근거로 한다(Weaver and Tarney, 1981; Christin and Lundquist, 1982). 한편 이런 접근들은 실험암석학적으로 제시된 지열온도계와 지압계의 결과치 및 야외에서 지진파를 근거로 제시된 암석역학적 자료와의 결합에 의해서 지각 및 상부맨틀구조에 대한 수직적인 암상의 변화에 대해 적용되어 왔다(Jackson *et al.*, 1990; O'Reilly *et al.*, 1990).

기존의 심부지각 구조의 연구들은 시생대의 대륙지각내의 고압변성대 지역들에서 노출된 수직단면내의 암상의 변화가 상부로부터 녹색편암상에서 각섬석편암, 그라뉴라이트 상으로 바뀌며, 이 그라뉴라이트상의 변성암에 내포된 염기성~초염기성암의 암체에(Fountain and Sailsbury, 1981) 대한 실험실의 탄성과 결과치들이 실제적인 심부지각 구조 연구에 접근될 수 있음을 보여주고 있다(Christensen and Fountain, 1975; Manghnani *et al.*, 1974; Kay and Kay, 1981). 상부맨틀의 특성에 대해서는 지구조 운동과 관련되어 안구형 및 타원체 또는 불규칙하게 신장된 형태로서 산출되는 알파인형의 초염기성암(Moores and MacGregor, 1972; Ozawa, 1994)의 접근에 의해 가능하며, Colemann (1971)은 실험실에서 측정된 초염기성암의 탄성과 속도의 측정 결과치는 사문암화 작용 정도에 따라 좌우되지만 실제의 신선한 초염기성암의 밀도를 고려 했을 때 실제 상부맨틀 초염기성암의 결과치에 합당함을 보여주고 있다.

한편 포획암의 연구에서도 심부 지각기원의 그라뉴라이트 및 에크로자이트 포획암들의 결과치를 보정할 경우, 심부 지각구조에 대한 실제 지진파의 측정치와

유사함을 보여주고 있다(Jackson and Arculus, 1984). 상부맨틀기원의 초염기성암 포획암의 연구에서는 레조라이트 및 파이록시나이트의 측정치가 부분적으로는 이방성을 보이기는 하지만 실제 포획암 산출지의 상부맨틀의 암석학적 특성에 어느 정도 접근되어질 수 있음을 보여준다(Jackson *et al.*, 1990; O'Reilly *et al.*, 1990).

충남 서부 부여, 청양, 홍성, 예산 지역에는 지표면에 노출된 알파인형의 초염기성암이 다수 지역에서 분포하고 있다. 이 암석들은 대부분이 수 십 m 에서 수 Km 크기의 장단경을 가지고 분포하며 주변의 변성암류와 단층접촉으로 산출되고 있으며(Wee *et al.*, 1993; Choi *et al.*, 1997), 전체 또는 부분적으로 사문암화 및 활석화되어있다(우영균 외, 1991; 윤상필 외, 1994). 주변의 변성암은 녹색편암상에서 각섬암상의 변성도를 보이는 편마암과 함각섬석 흑운모 편암과 이들 내에 부분적으로 협재 되어 나오는 각섬암이다(이상헌 · 최기주, 1994). 이 지역의 초염기성암에 대한 기존 연구들로서는 광상학적(Song and Moon, 1991; 우영균 외, 1991; 윤상필 외, 1994) 및 지화학적 성인적 연구가 되어있다(Wee *et al.*, 1993; Choi *et al.*, 1997).

이 연구는 충남서부 지역에 분포하는 사문암, 활석 및 이의 인접지역에 분포하는 변성암들에 대한 탄성파에 의한 암석물리학적 접근으로서, 대표적인 사문암, 활석, 각섬암, 흑운모~편암, 각섬석~편암, 그리고 편마암의 시료들을 채취하여 P파 및 S파의 탄성파속도( $V_p$  및  $V_s$ )를 측정하였다. 이 연구는 이들 지역에 대한 지각부터 상부맨틀 깊이에 이르는 수직적인 암상의 변화를 인지하고 각 암석들의 탄성파속도 분석을 통한 물성의 변화 양상을 해석하였다.

## 일반지질 및 암석

연구 지역에 대해 일반지질 및 암석학적 연구들이 다수 진행되어 왔다(엄상호 · 이민성, 1963; 이종혁 · 김성수, 1963; 충남탄전지질도, 1974; 김서운 외, 1976, 윤상필 외, 1994; 이상헌 · 최기주, 1994; Choi *et al.*, 1997).

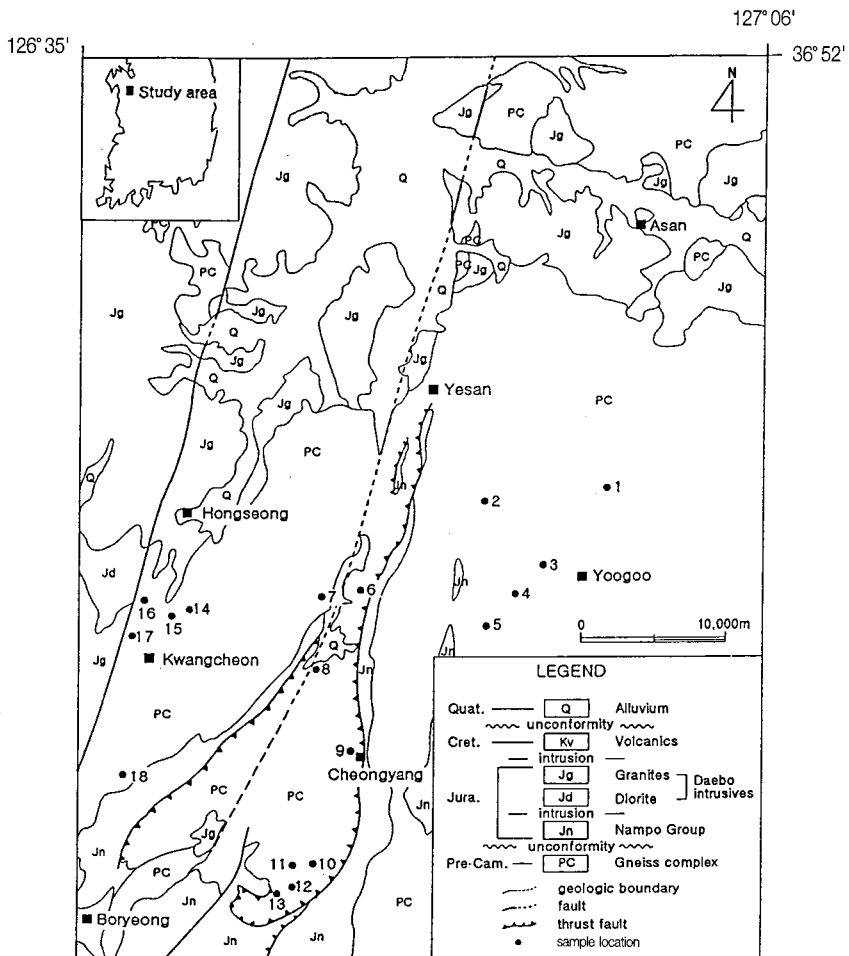
이 지역은 크게 하부의 선캠브리아기의 경기 편마암을 기반암으로 하여 이와 부정합관계로 선캠브리아기의 편마암 및 변성퇴적암류, 그리고 이와 부정합관계로 놓여 있는 중생대의 퇴적암류 그리고 이의 관입암으로 구성되어 있다.

편마암은 기반암으로서 연구 지역의 대부분을 점령하며 호상, 대상 안구상 편마암으로 구성된다. 변성퇴적암류로는 각섬석~흑운모 편암이 있다. 한편 이들 암석 외에도 다수의 각섬암이 이 지역의 암체들에 협재되어 분포하고 있으나 위의 암체와의 관계는 불분명하다. 편마암류는 주 구성광물로 석영, 흑운모, 사장석을 부구성광물로 석류석, 규선석, 알칼리장석, 백운모, 스펀, 불투

명광물을 포함하며, 편암은 주 구성광물인 석영, 장석, 흑운모, 각섬석과 부 구성광물인 백운모, 알칼리 장석, 인회석, 불투명광물로 구성되어 있다. 각섬암은 주 구성광물인 사장석, 각섬석을 부 구성광물인 단사휘석, 스피넬, 녹리석, 자철석, 적철석으로 구성되어 있다.

**밀도 및 탄성파속도 측정**

탄성과 측정을 위해 사문암 및 변성암의 암석시료를 10cm 지름과 10cm 높이의 원주로 준비하였다. 각 시료에 대하여 밀도와 탄성과 P파 속도(Vp) 및 S파 속도(Vs)를 측정하였다. 탄성과 속도는 초음파 전파를 이용한 다기능물성시험기로 측정하였으며, 원하는 온도~압



**Fig. 1.** Sample locality of serpentinite, amphibolite, amphibole~, biotite~schist and gneiss. 1, Yoogoo; 2, Cheongdang; 3, Nokcheon; 4, Pyeongan; 5, Daeheung; 6, Migok; 7, Gwangsi; 8, Bibong; 9, Sariul; 10, Daedong; 11, Myeongheung; 12, Taewon; 13, Booyeo; 14, Weolheon; 15, Wolrim; 16, Hongseong; 17, Kwangcheon; 18, Jeongjeon.

Table 1. Densities, compressional and shear wave velocities of each sample at room temperature.

Sample no.		$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (Avg) (g/cm <sup>3</sup> )	Vp (m/s)	Vp(Avg) (m/s)	Vs (m/s)	Vs(Avg) (m/s)	Vp(Avg)/Vs(Avg)	Rock
1	X	2.70		5556		2857			Serpentinite
	Z	2.74	2.72	5882	5719	3106	2982	1.92	
11	X	2.64	-	5814	-	3165	-	1.84	Serpentinite
13	X	2.74		5575		2938			Serpentinite
	Z	2.72	2.73	6024	5800	3311	3125	1.84	
15	X	2.66	-	6024	-	3311	-	1.82	Serpentinite
16	X	2.62		5102		2825			Serpentinite
	Z	2.61	2.62	5550	5326	2970	2898	1.84	
19	X	2.85		5814		3205			Schist
	Z	2.86	2.86	6309	6062	3497	3351	1.81	
3	X	2.25		4164		2201			Talc
	Z	2.25	2.25	3874	4019	2282	2241	1.79	
5	X	2.81		5097		2851			Talc
	Z	2.81	2.81	5208	5153	2948	2900	1.78	
7	X	2.78		5800		2976			Talc
	Z	2.79	2.79	5155	5478	2747	2971	1.84	
10	X	2.65	-	5376	-	2976	-	1.81	Serpentinite
8	X	3.09		6250		3546			Amphibolite
	Z	3.04	3.07	6494	6602	3704	3625	1.82	
17	X	3.08		5002		2794			Schist
	Z	3.06	3.07	5748	5375	3290	3042	1.77	
18	X	2.70		5261		2975			Schist
	Z	2.85	2.78	5319	5290	2960	2968	1.78	
6	X	2.75		5562		3109			Schist
	Z	2.75	2.75	5435	5499	3165	3137	1.75	
4	X	2.72		4313		2614			Gneiss
	Z	2.75	2.74	5263	4788	2994	2804	1.71	

력 조건이 준비되면 컴퓨터로 제어되는 연속된 초음파 전달 실험을 통하여 탄성파속도가 측정된다. 탄성파속도 측정시 시료를 변질 또는 편리방향에 직각(X) 및 평행방향(Z)으로 제작하여 각 시료에 대하여 20 MPa 로

부터 70 MPa 범위의 압력변화에 따른 탄성파의 속도변화를 측정하였다. 측정시료의 채취위치는 Fig. 1에 나타내었으며, 속도 측정은 중국과학원 지구물리연구소 고온고압실험실에서 실시하였다. 이들의 결과치를 Table

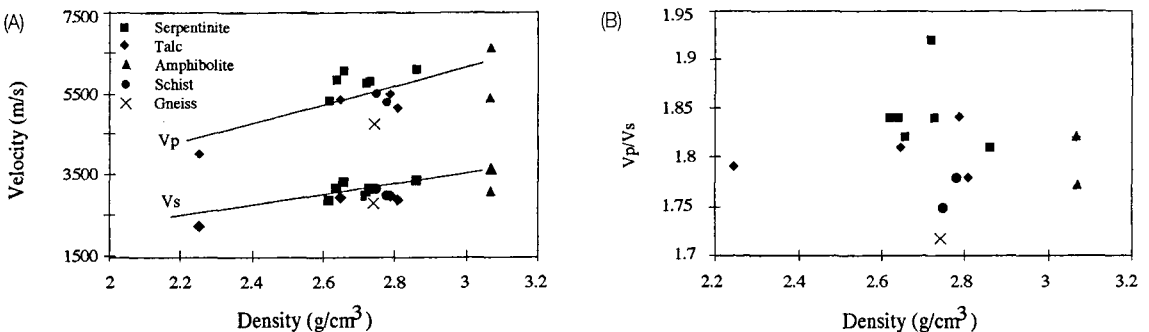


Fig. 2. Relationships of velocity (A) and Vp/Vs (B) versus density from the western part of Chungnam. Symbols; filled square for serpentinite, filled diamond for talc, filled triangle for amphibolite, filled circle for schist and cross for gneiss.

1 및 Table 2에 나타내었으며, Fig. 2~Fig. 5에 도시하였다.

**밀도와 탄성파속도 관계**

상온의 실내온도에서 측정된 밀도와 탄성파의 관계를 Fig. 2에 도시하였다. 밀도의 경우 사문암은 2.69g/cm<sup>3</sup>의 평균밀도와 2.62~2.73g/cm<sup>3</sup>의 비교적 좁은 범위의 분포를 보이고 활석은 2.62g/cm<sup>3</sup>의 평균밀도와 2.25~2.81g/cm<sup>3</sup>의 넓은 분포범위를 갖는 한편, 변성암류는 2.91g/cm<sup>3</sup>의 평균밀도와 2.74~3.07g/cm<sup>3</sup>의 분포범위를 보인다(Table 1). 밀도분포로 볼 때 활석은 사문암 또는 다른 변성암류에 비해 넓은 밀도의 변화를 보이는 바, 이는 사문암이 변질작용을 받아 활석으로 변해가는 과정 중에서 변질 정도의 차이에 의한 현상으로 해석된다. 동일 지점에서 채취한 시료를 이용하여 변질 또는 편리방향에 직각방향 및 평행방향에 따라 제작한 시료의 밀도를 측정된 결과 0.03~0.15g/cm<sup>3</sup>의 비교적 작은 밀도 차이를 보였다.

시료의 변질 또는 편리방향에 직각 방향으로 탄성파 속도를 측정된 결과와 밀도와의 관계를 분석한 결과 다음과 같은 상관관계를 얻었다.

$$V_p = 1460 \cdot \rho + 1396 \text{ m/s}$$

$$V_s = 995 \cdot \rho + 242 \text{ m/s}$$

$\rho$ 는 시료의 밀도이며 g/cm<sup>3</sup>이다. 밀도증가에 따라 P파의 속도 증가가 S파의 속도증가보다 1.47배 더 증가함을 알 수 있다. P파 속도와 S파 속도와와의 비를 분석한 결과 밀도와의 특별한 상관성은 보이지 않았으며, 사문암이 활석이나 변성암류보다 높은 Vp/Vs 비를 나타내는 경향을 보였다(Table 1). 탄성파속도 평균치의 경우, 사문암은 5719~6062m/s의 Vp 와 2898~3351m/s의 Vs 값을 보이나 활석은 4019~5478m/s의 Vp 와 2241~2976m/s의 Vs 값을 보였다. 변성암중 각섬암은 5375~6372m/s의 Vp 와 3042~3625m/s의 Vs 값을 보였고 각섬석 및 흑운모 편암은 5290~5499m/s의 Vp 와 2968~3137m/s의 Vs 값을 보였으며 편마암은 4788m/s의 Vp 와 2804m/s의 Vs 값을 보였다.

**탄성파 속도 이방성**

시료의 변질 또는 편리방향과 직각방향(X) 및 평행방향(Z)으로 탄성파속도를 측정 분석한 결과(Fig. 3), 각

암체별로 보던 직각방향의 경우 사문암은 5102~5814 m/s의 Vp 와 2825~3205m/s의 Vs 값을 보이나 평행방향은 5882~6039m/s의 Vp 와 2970~3497m/s의 Vs 값을 보였다. 직각방향의 경우 활석은 4164~5800m/s의 Vp 와 2201~3194m/s의 Vs 값을 보이나 평행방향은 3874~5208m/s의 Vp 와 2282~2976m/s의 Vs 값을 보였다.

변성암중 직각방향의 경우 각섬암은 5002~6250m/s의 Vp 와 2794~3546m/s의 Vs 값을 보이나 평행방향은 5748~6494m/s의 Vp 와 3260~3704m/s의 Vs 값을 보였다. 직각방향의 경우 각섬석~편암과 흑운모~편암은 5261~5562m/s의 Vp 와 2975~3109m/s의 Vs 값을 보이나 평행방향은 5319~5435m/s의 Vp 와 2960~3165m/s의 Vs 값을 보였다. 편마암은 4313m/s의 Vp 와 2614m/s의 Vs 값을 보이나 평행방향은 5263m/s의 Vp 와 2994m/s의 Vs 값을 보였다.

전체적으로 직각 방향의 값이 평행방향의 값보다 높았는데 Vp는 대략 300~900m/s 차이를 보였고 Vs는 50~450m/s 차이를 보였다(Fig. 3). 특히 변성암이 큰

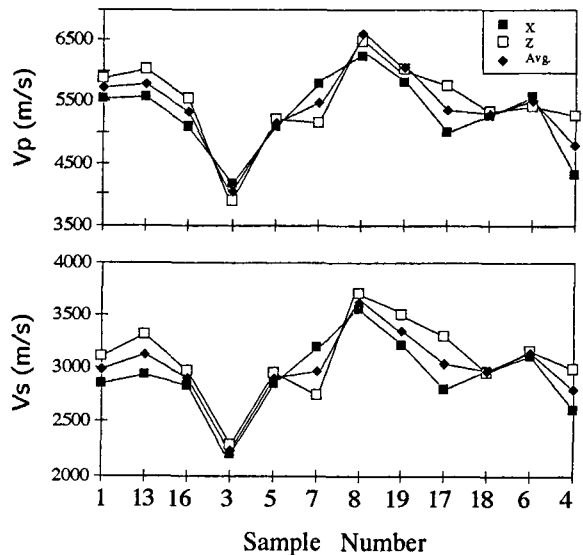


Fig. 3. Vp and Vs for each samples from the western part of Chungnam. Rock name of each sample is shown in Table 1, X means data measured by the X direction of the samples and Z means those measured by the Z direction of the samples, 1, 13, 16 for serpentinite, 3,5,7 for talc, 8 for amphibolite, 19, 17, 18, 6 for schist and 4 for gneiss.

Table 2. Compressional and shear wave velocities with increasing pressure at room temperature.

Sample No	Direction	m/s	P(MPA)					Rock	
			20	30	40	50	60		70
1	X	Vp	5556	5576	5592	5604	5611	5614	Serpentine
		Z	6024	6046	6062	6071	6077	6072	
		Avg.	5790	5811	5827	5839	5844	5843	
	X	Vs	2890	2909	2927	2941	2952	2959	
		Z	3425	3436	3448	3457	3465	3471	
		Avg.	3158	3173	3188	3199	3209	3215	
11	X	Vp	5814	5882	5952	6024	6066	6094	Serpentine
	X	Vs	3289	3325	3356	3378	3401	3420	
13	X	Vp	5607	5607	5607	5639	5639	5639	Serpentine
		Z	6024	6061	6098	6136	6154	6176	
		Avg.	5816	5834	5853	5888	5897	5918	
	X	Vs	3165	3186	3207	3222	3237	3249	
		Z	3356	3378	3397	3409	3417	3424	
		Avg.	3261	3282	3302	3316	3317	3337	
5	X	Vp	5208	5263	5319	5360	5385	5400	Talc
		Z	5208	5220	5232	5241	5247	5252	
		Avg.	5208	5242	5276	5301	5316	5326	
	X	Vs	3030	3049	3067	3086	3106	3113	
		Z	3030	3049	3069	3088	3106	3122	
		Avg.	3030	3079	3068	3087	3106	3118	
10	Z	Vp	5376	5435	5495	5534	5556	5572	Serpentine
	Z	Vs	3047	3080	3106	3125	3144	3156	
8	X	Vp	6250	6250	6250	6250	6250	6250	Amphibolite
		Z	6494	6512	6530	6547	6562	6577	
		Avg.	6372	6381	6390	6399	6406	6414	
	X	Vs	3546	3546	3546	3546	3546	3546	
		Z	3704	3731	3759	3778	3800	3817	
		Avg.	3625	3639	3653	3662	3673	3682	
18	X	Vp	5261	5317	5373	5433	5486	5544	Schist
		Z	5618	5681	5747	5814	5862	5894	
		Avg.	5440	5499	5560	5624	5674	5719	
	X	Vs	2975	2993	3011	3029	3144	3056	
		Z	3268	3300	3333	3356	3378	3398	
		Avg.	3122	3147	3172	3193	3261	3277	
4	X	Vp	4760	4900	4996	5046	5097	5130	Gneiss
		Z	5495	5556	5618	5650	5668	5681	
		Avg.	5128	5228	5307	5348	5383	5406	
	X	Vs	2934	3013	3058	3096	3126	3145	
		Z	3226	3247	3268	3289	3300	3310	
		Avg.	3080	3130	3163	3193	3213	3328	

차이를 보였다(Table 1). 이러한 현상은 변성암의 경우 특정 방향성의 지체구조성 힘에 의한 광역변성작용을 받았음을 의미한다.

#### 압력변화에 따른 탄성파속도의 변화

20 MPa 로부터 70 MPa의 압력변화에 따른 탄성파 속도 측정치를 Fig. 4에 도시하였다. 각 암체별로 보면 Vp의 평균치는 실내온도에서 20 MPa로 변함에 따라 사문암은 16~71m/s, 활석은 0~54m/s, 각섬석, 흑운모

편암은 150m/s, 편마암은 340m/s로 증가했으나 각섬암은 변화를 보이지 않았다(Table 2). Vs의 평균치는 실내 온도에서 20 MPa로 변함에 따라 사문암은 24~176m/s, 활석은 40~71m/s, 각섬석, 흑운모 편암은 54m/s, 편마암은 274m/s로 증가했으나 각섬암은 변화를 보이지 않았다.

한편 20 MPa로부터 70 MPa로 변함에 따라 Vp 평균치 값에서 (Fig. 4) 사문암은 58~131m/s, 활석은 118~196m/s, 각섬암은 42m/s, 각섬석 편암은 279m/s, 편마

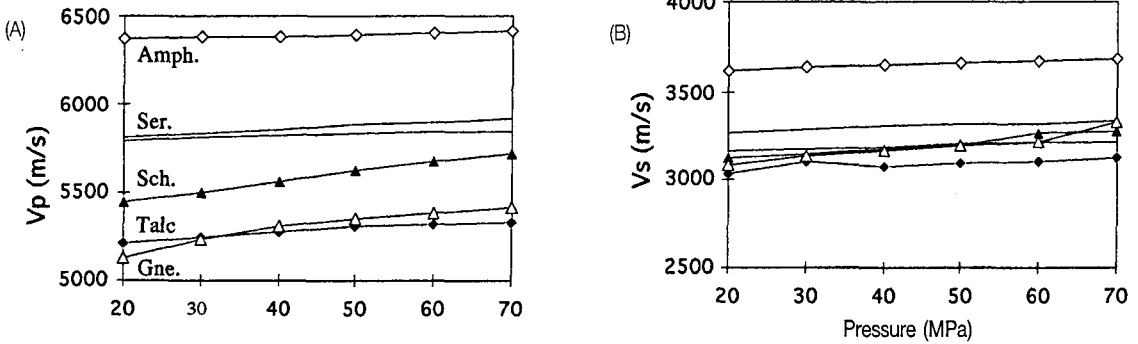


Fig. 4. Plot of  $V_p$  (A) and  $V_s$  (B) versus pressure for the serpentinite, amphibolite, amphibole~, biotite~schist and gneiss from the western part of Chungnam.

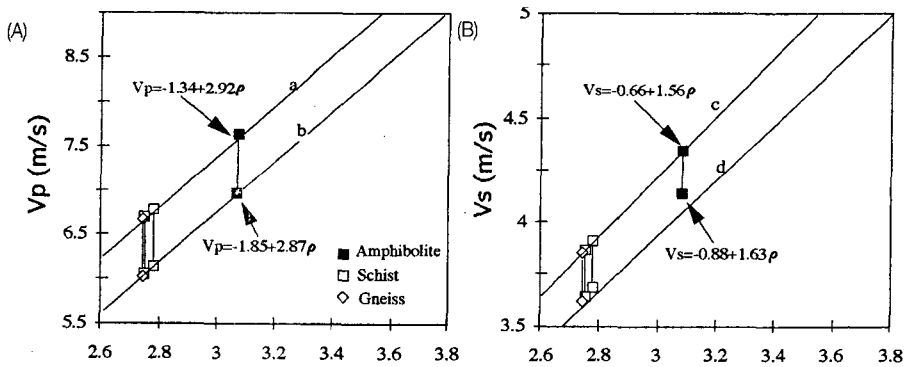


Fig. 5. Relationships between  $V_p$  (A) or  $V_s$  (B) versus density at 10 Kb for amphibolite schist and gneiss from the western part of Chungnam. Lines of a and b are from Birch(1961), line c is from Manghani *et al.*(1971), and line d is from Kovach and Robinson(1969).

암은 276m/s로 증가하여 편암 및 편마암의 변성암류의 탄성파속도 증가율이 사문암과 활석에 비하여 크게 나타나고 있다. 20 MPa로부터 70 MPa로 변함에 따라  $V_s$  평균치 값에서 사문암은 57~76m/s, 활석은 88~109m/s, 각섬암은 57m/s, 각섬석 편암은 50m/s, 편마암은 240m/s로 증가했다.

### 토론

많은 연구자들에 의해 밀도와 탄성파속도와와의 관계가 논의되었다. Birch(1961)는 최초로 규산염과 산화물 사이에서 밀도와  $V_p$ 의 관계가 균일하게 직선적으로 변함을 지적했고 Manghani *et al.*(1971)은 그라뉴라이트와 에크로자이트 상에 대한 탄성파속도의 접근에서 이러한 관계를 확인한 바 있다. 그 외의 연구들(Simons, 1964; Christensen, 1968; Liebermann, 1970; Chung,

1970) 또한 밀도와  $V_s$ 가 정의의 관계를 보임을 언급했다. 한편 사문암에 대한 암석물리학적 연구에서 Christensen(1966)은 캘리포니아의 Burro Mountain의 사문암화 된 페리도타이트가 밀도와  $V_p$ 의 관계에서 밀도의 증가에 따라  $V_p$ 가 일정한 증가를 보임을 밝혔으며, Coleman (1971)은 사문암화가 진행됨에 따라 밀도 및  $V_p$ 가 역의 관계가 있음을 보여주고 있다.

변성암: 각섬암, 편암, 편마암 등의 변성암류에 대한 탄성파속도 측정치를 기존의 연구들(Jackson and Arculus, 1984; O'Reilly *et al.*, 1990)이 저지각 암석들의 접근시 했던 것처럼 10 kb 로 재 계산해 Fig. 5에 도시했다. 여기에서  $V_p$ 는 Birch(1961)의 최대치( $V_p \sim 1.34 + 2.92\rho$ )와 최소치( $V_p \sim 1.85 + 2.87\rho$ )를 적용시키고  $V_s$ 는 Manghani *et al.*(1971)의 최대치( $V_s \sim 0.66 + 1.56\rho$ )와 Kovach와 Robinson(1969)의 최소치( $V_s \sim 0.88 + 1.63\rho$ ) 공식을 적용시켜 재계산하여 Fig. 5에

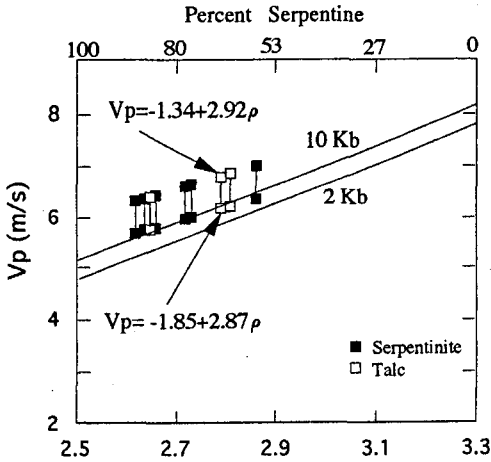


Fig. 6. Compressional wave velocities( $V_p$ ) versus percent serpentine in the serpentinized peridotite, western part of Chungnam. Plotted lines are from Coleman(1971).

도시하였다.

Fig. 5에서와 같이 전체 변성암류 측정치는 Birth(1961)의 최대치와 최소치의 범위내에 도시되었으며 각섬암은 그라뉴라이트 및 에클로자이트상 변성암 (Manghani *et al.*, 1971) 및 포획암의 결과(Jackson and Arculus, 1984)의 범위 내에 해당되며 편마암 및 흑운모 편암은 산성 그라뉴라이트의 포획암보다(Jackson and Arculus, 1984) 낮은 수치를 보였다.

각 암석별로 살펴보면 각섬암은  $V_p$  가 6800m/s 이상으로 Christensen과 Salisbury (1975)의 함휘석 편마암 (6kb 로 재계산시 6.69~7.01km/s) 및 Fountain 과 Salisbury(1981)의 산성에서 염기성 그라뉴라이트 결과치(야의 측정치, 6.7~7.3km/s), 그리고 Manghani *et al.* (1974)의 산성 그라뉴라이트 상 변성암의 측정치 (6.5~7.4km/s)와 일치한다. 한편 편마암 및 흑운모 편암은 Kay 와 Kay(1971)의 화강암 측정치(6.05km/s)와 일치한다.

따라서 이 연구에서 측정된 탄성파속도 중 각섬암은 이 지역 하부지각에 대한 탄성파의 특성에 대한 간접적인 지시자가 될 수 있으며 편마암류 및 편암의 측정치는 상부지각의 암석의 탄성파특성에 대한 간접적인 지시자가 될 수 있음을 암시한다.

사문암: 사문암 및 활석의 측정치를 Coleman(1971)의 사문암 측정치와 초염기성암 포획암의 결과치

(O'Reilly and Griffin, 1985; O'Reilly *et al.*, 1990)와 비교하여 보고자 10 kb 압력하에 전파되는 탄성파를 가정하여 재계산하여 Fig. 6에 도시하였다. 전체적인 사문암류 및 활석의 측정치는 Coleman *et al.* (1971)이 제시한 10kb 이상의 영역에 도시되었고 이 암석들이 심하게 변질 되었음을 지시한다. 사문암 및 활석을 10kb 로 재계산했을 때  $V_p$  측정치는 5.5~6.8km/s로 실제 신선한 초염기성암에 대한 탄성파 측정치인 O'Reilly *et al.*(1990)의 값 7.5~8.1km/s 값보다 낮았다. 이런 값의 차이는 사문암화 및 변질을 받았기 때문으로 생각되며 (Coleman, 1971) 연구지역의 경우 사문암은 대부분이 55~90% 정도 사문암화 된 것으로 사료된다.

하지만 일반적인 상부맨틀기원의 페리도타이트나 파이록시나이트인  $3.3\sim 3.3\text{g/cm}^3$  밀도를 갖는 신선한 상부 맨틀암을 가정하여 재계산 한다면 이 결과치들은 O'Reilly *et al.*(1990)가 실험실 탄성파측정치와 계산된 지온계 및 압력계를 근거로 가정한 30~40km 깊이의 상부맨틀의 값과 일치함을 보여준다.

기존의 알파인형의 초염기성암의 연구들은 이 암석들이 지표면에 세 가지 유형으로 지표면으로 노출될수 있음을 언급한다. 이를 간략하면 1) 마그마의 분화물 (magmatic differentiate, Maaloe and Steel, 1980; Menzies, 1984; Irifune and Ringwood, 1987; Bodinier, 1988), 2) 맨틀 슬랩(mantle slab, Quick, 1981; Sarwat and DeJong, 1984; Raymond, 1995)과 3) 맨틀 다이아피르(mantle diapir, Loomis, 1972; Dymek *et al.*, 1988)이다. 최근 Choi *et al.*(1997)은 충남 서부지역의 초염기성암지역의 야외산상, 암석학적, 광물학적 특성을 근거로 맨틀 슬랩상으로 지표면에 노출되었음을 지적했다. 따라서 이 사문암의 탄성파속도 측정치는 이들 지역의 상부 맨틀의 암석에 대한 탄성파의 특성을 간접적으로 규명할 수 있음을 지시한다고 할 수 있다.

## 결 언

충남 일원에 분포하는 초염기성 암석에 대한 밀도 및 탄성파 속도측정 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 밀도측정 결과 사문암은  $2.6\sim 2.86\text{g/cm}^3$ 의 범위이고 활석은  $2.25\sim 2.81\text{g/cm}^3$ 의 범위이며 변성암류는  $2.74\sim 3.07\text{g/cm}^3$ 의 값을 보인다. 활석은 사문암 또는 변성암류보다 넓은 밀도의 변화를 보인다.



- 2) 탄성파 속도와 밀도 사이에 비례관계가 성립하며, 특히 밀도에 따른 P파 속도 증가율이 S파 속도증가율보다 약 1.47배 크게 나타났다.
- 3) 탄성파속도의 이방성분석결과 편리와 직각 방향의 속도값이 평행방향의 값보다 높았는데  $V_p$  는 대략 300~900m/s 차이를 보였고  $V_s$  는 50~450m/s 차이를 보였다. 특히 변성암이 더 큰 차이를 보이는바, 이는 변성암의 형성이 지체구조성 압력의 영향으로 인한 광역변성작용에 의한 것임을 시사한다.
- 4) 압력의 변화에 따른 탄성파속도 변화분석 결과 압력이 20 MPa로부터 70 MPa로 변함에 따라  $V_p$  및  $V_s$  평균치에서 각각 사문암은 58~131m/s과 57~76m/s, 활석은 118~196m/s과 88~109m/s, 각섬암은 42m/s과 57m/s, 각섬석 편암은 279m/s과 50m/s, 그리고 편마암은 276m/s과 240m/s로 증가하여, 대체로 압력이 증가함에 따라 변성암의 탄성파속도 증가가 다른 암석에 비하여 크게 나타났다.
- 5) 재계산된 탄성파속도 중 각섬암은 이 지역 하부지각에 대한 탄성파의 특성에 대한 간접적인 지시자가 될 수 있으며 편마암류 및 편암의 측정치는 상부지각의 암석의 탄성파특성에 대한 간접적인 지시자가 될 수 있음을 암시한다. 한편 사문암의 측정치는 높은 사문암화 정도를 반영하기는 하지만 상부 맨틀의 암석에 대한 탄성파의 특성을 간접적으로 지시한다 볼수 있다.

## 사 사

이 연구는 한국과학재단 핵심전문연구과제(961~0401~004~2)로 수행된 "충남지역 초염기성암체의 암석학적 및 지구물리학적 연구" 중 일부로서 연구비를 지원해 준 한국과학재단에 깊이 감사드립니다. 또한 이 연구를 수행하는 동안 야외 지질 지구물리 조사와 실내 자료처리 및 해석과정에서 크게 도움을 준 공주대학교 지질학과와 대학원생들과 중국과학원 지구물리연구소 고온고압실험실의 Wu Xiangyang 교수, Fang Hua 및 Chen Zuan 씨께 깊이 감사한다.

## 참고문헌

- 김서운·유환수·우영균, 1976, 1:50,000 공주지질도폭. 국립지질조사소.
- 엄상호·이민성, 1963, 대홍지질 도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 우영균·최석원·박기화, 1991, 충남예산지역 활석광상의 성인에 대한 연구. 광산지질, 24, 363-378.
- 윤상필·문희수·송윤규, 1994, 초염기성암 기원의 평안 및 대홍활석광상의 성인과 광물화학, 자원환경지질, 27, 131-145.
- 이상현·최기주, 1994, 대홍활석광상주위의 편마암류의 지화학적 특징과 공존광물의 화학적 평형, 암석학회지, 3, 138-155.
- 이종혁·김성수, 1963, 홍성지질 도폭 및 설명서.
- Birch, F., 1961, The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 2, J. Geophys. Res., 66, 2199-2224.
- Bodiniar, J. L., 1988, Geochemistry and petrogenesis of the Lanzo peridotite body, western Alps., Tectonophysics, 149, 67-88.
- Boyd, F. R., Green, D. H. and Roy, S. D., 1978, Origin of the ultramafic nodules from some kimberlites of Northern Lesotho and Monastery Mine, South Africa, Phys. Chem. Earth., 9, 431-454.
- Choi, A. G., Song, S.H. and Woo, J.K., 1997, Genetic implications of ultramafic rocks from the Bibong area in Kyeonggi Gneiss Complex. Econ. and Environ. Geol. (in submit)
- Christensen, N. I., 1966, Elasticity of ultrabasic rocks, J. Geophys. Res., 71, 5921-5931.
- Christensen, N. I., 1968, Chemical changes associated with upper mantle structure, Tectonophysics, 6, 331-342.
- Christensen, N. I., 1974, Compressional wave velocities in possible mantle rocks to pressures of 30 kilobars, J. Geophys. Res., 79, 107-412.
- Christensen, N. I. and Fountain, D. M., 1975, Constitution of lower continental crust based on the experimental studies of seismic velocities in granulite, Geol. Soc. Am. Bull., 86, 227-236.
- Christensen, N. I. and Lundquist, S. M., 1982, Pyroxene orientation within the upper mantle, Geol. Soc. Am. Bull., 93, 279-288.
- Chung, D. H., 1970, Effects of iron/magnesium ratio on the P and S wave velocities in olivine, J. Geophys. Res., 75, 7353-7361.
- Colemann, R.G., 1971, Petrologic and Geophysical nature of

- serpentinites, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 897-918.
- Dymek, R. F., Brothers, S. C. and Schiffries, C. M., 1988, Petrogenesis of ultramafic metamorphic rocks from 3800 Ma Isua supracrustal belt, Western Greenland, *J. Petro.*, 29, 1353-1397.
- Founrain, D. M. and Salisbury, M. H., 1981, Exposed crosssections through the continental crust: implications for crustal structure, petrology, and evolution, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 56, 263-277.
- Griffin, W. L., Wass, S. Y. and Hollis, J. D., 1984, Ultramafic xenoliths from Bullenmerri and Gnotuk Maars, Victoria, Australia: petrology of sub-continental crust-mantle transition, *J. Petro.*, 25, 53-89.
- Irfune, T. and Ringwood, A. E., 1987, Phase transformations in a dynamical behavior of the subduction slab, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 86, 367-376.
- Jackson, I., Rudnick, R.L., O'Reilly, S. Y. and Bezant, C., 1990, Measured and calculated wave velocities for xenoliths from lower crust and upper mantle. *Tectonophysics*, 173, 207-210.
- Jackson, I. and Arculus, R. J., 1984, Laboratory wave velocity measurements on the lower crustal xenoliths from Calcutteroo, South Australia, *Tectonophysics*, 101, 185-197.
- Kay, R. W. and Kay, S. M., 1981, The nature of lower continental crust; inferences from geophysics, surface geology and crustal xenoliths, *Rev. Geophys. Space Phys.* 19, 271-297.
- Kovach, R. L. and Robinson, R., 1969, Upper mantle structure in the Basin and Range province, western N. America, from the apparent velocities of S-waves. *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 59, 1653-1665.
- Leven, J. H., Jackson, I. and Ringwood, A. E., 1981, Upper mantle seismic anistropy and lithospheric decoupling. *Nature*, 289, 234-239.
- Liebermann, R.C., 1970, Velocity~density systematics for olivine spinel phases pf  $Mg_2SiO_4 \sim Fe_2SiO_4$ , *J. Geophys. Res.*, 74, 5961-5972.
- Loomis, T. P., 1972, Diapiric emplacemet of the Ronda high ~temperature ultramafic intrusion, southern Spain, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 83, 2475-2496.
- Maaloe, S. and Steel, R., 1980, Mantle composition derived from the composition of lherzolites. *Nature*, 285, 321-322.
- Manghnani, M. H., Ramanantoandro, R. and Clark, S. P., 1974, Compressional and shear wave velocities in granulite facies rocks and eclogites to 10 kilobar, *J. Geophys. Res.*, 79, 5427-5446.
- Menzies, M. A., 1984, Chemical and isotopic heterogeneities in orogenic and ophiolitic peridotites. In Gass, I.G., Lippard, S.J. and Shelton, A.W. (ed.), *Ophiolites and Oceanic Lithosphere*, Blackwell, Sci. Pubs. Geol. Soc.(London) Spec. Pub., 13, 231-240.
- Moores, E. M. and MacGregor, I. E., 1972, Types of alpine ultramafic rocks and their implications for fossil plate interactions. In Shagam, R. *et al.*, eds., *studies in Earth and Space Sciences*, *Geol. Soc. Amer. Memoir*, no. 132, 209-223.
- O'Reilly, S. Y., Jackson, I. and Bezant, C., 1990, Equilibration temperatures and elastic wave velocities for upper mantle rocks from eastern Australia: Implications for the interpretation of seismological models, *Tectonophysics*, 185, 67-82.
- O'Reilly, S. Y. and Griffin, W. L., 1985, A xenolith derived geotherm for southeastern Australia and its geophysical implications, *Tectonophysics*, 111, 41-63.
- Ozawa, K., 1994, Melting and melt segregation in the mantle wedge above a subduction zone: Evidence from the chromite~bearing peridotites of the Miyamori ophiolite complex, Northeastern Japan, *J. Petro.*, 35, 647-678.
- Quick, J. E., 1981, The origin and significance of large, tabular dunite bodies in the Trinity peridotite, northern California, *Contrib. Mineral. Petro.*, 78, 413-422.
- Raymond, L. A., 1995, *Metamorphic petrology*, Wm. C. Brown Publishers, 656-675.
- Sarwat, G. and DeJong, K., 1984, Composition and origin of the Kanar Melange, southern Parkistan. In Raymond, L.A., ed., *Melange: Their nature, Origin and Significance*, *Geol. Soc. Amer. Spec. paper*, 198, 127-138.
- Simmons, G., 1964, Velocity of shear waves in rocks to 10 kilobars, *J. Geophys. Res.*, 69, 1123-1130.
- Song, Y. G. and Moon, H. H., 1991, Supergene Chloritization and vermiculitization in Hornblende Hneiss, the Cheongyang area, Korea, *J. Korean Inst. Mining Geol*, 24, 233-244.
- Weaver, B. L. and Tarney, J., 1981, Lewisian gneiss geochemistry of Archaean crustal development models, *Earth, Planet. Sci. Lett.* 55, 171-180.
- Wee, S. M., Choi, S. G. and So, C. G., 1994, Preliminary study on ultramafic rocks from the Chungnam Province, Korea, *Econ. Environ. Geol.*, 27, 171-180.