

## 광대역 관측소 하부 암석의 고주파수 탄성과 속도 및 감쇠상수에 대한 연구

이덕기 · 오석훈 · 윤용훈 · 양준모  
기상청 기상연구소 해양기상지진연구실

### 요 약

기상청 광대역 관측소 6개소에 대한 표층 암석의 탄성과 전달속도 및 감쇠상수를 도출하기 위하여, 실험실에서 고주파 탄성파를 암석시료에 통과시켜 도달시간 및 파형을 분석하였다. 측정되어진 암석시료의 속도는 3.2 km/s에서 5.6 km/s의 범위를 가지며 이는 암석종류, 광물입자, 배열상태, 그리고 풍화의 정도에 따라서 달라진다고 추정된다. 감쇠상수는 0.06에서 4.3 db/kHz-m의 범위를 보이며 대체로 암석시료 속도와 감쇠상수는 반비례하는 경향이 있다. 각 관측소 지진파의 평균도달 시간이상과 실험실에서 측정한 탄성과 속도를 비교하여 본 결과, 비례하는 경향을 보임을 알 수 있었다.

**주요어:** 종파 속도, 감쇠상수, 도달시간이상

**Duk Kee Lee, Seok-Hoon Oh, Yong-Hoon Youn and Jun-Mo Yang, 2002, High frequency P velocity and attenuation coefficient of the rocks under the broad-band seismic stations. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 5, n. 3, p. 165-174**

**ABSTRACT:** Seismic velocity and attenuation coefficient of the rocks under the broad-band earthquake observatories of the Korea Meteorological Administration have been measured in the laboratory by using very high frequency seismic waves. Estimated P velocities of the rocks range from 3.2 km/s to 5.6 km/s, depending on the rock type, mineral, and weathering, while, the attenuation coefficients vary from 0.06 to 4.3 db/kHz-m. It seems that P velocities is inversely proportional to the attenuation coefficients of the rocks. Average travel-time delays of the broad-band stations seem to be related with the measured P velocities in the laboratory.

**Key words:** P velocity, attenuation coefficient, travelttime delay

*(Duk Kee Lee, Seok-Hoon Oh, Yong-Hoon Youn, and Jun-Mo Yang, Marine Meteorology and Earthquake Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration, 460-18 Shindaebang-dong, Dongjak-Gu, Seoul, Korea Email: dukkee@metri.re.kr)*

### 1. 서 론

지진 관측소 하부의 암석들은 한국의 복잡한 지질환경을 반영하여 매우 다양하게 분포한다. 이들 암석의 분포에 따라 P파 속도와 감쇠상수는 국내·외 지진의 탐지 및 분석에 영향을 미치게 된다. 따라서 전국에 걸쳐 고른 관측망을 가지고 있는 기상청 광대역 관측소 하부의 암석 속도 및 감쇠상수 연구는 지진정밀탐지 및 지진연구의 기초자료를 제공할 수 있다. 그러나 실험실에서 측

정하는 암석의 속도 및 감쇠상수는 실제 지진파의 속도와 감쇠상수와는 차이가 있을 것으로 인식되어 왔다. 이런 인식의 배경에는 깊이에 따른 암석 조성의 차이, 압력 및 온도의 변화 등과 같은 변수들을 실험실에서 충분히 보정하기가 어려운데 한 이유가 있다. 또한 실험실에서의 탄성과 속도 측정에 사용되는 주파수는 대역의 한계를 가진다. 암석시료의 크기가 작기 때문에 P파 속도를 측정하기 위하여 인공적으로 발생시키는 탄성파의 입력파형 주파수는 MHz에 가깝다. 그러

나 실제 지진파의 주파수 대역은 진원-관측소 거리에 따라서 차이는 있지만 약 10 Hz 까지라고 할 수 있다. 따라서 MHz에 가까운 고주파 가정으로 측정되어진 암석의 속도 및 감쇠상수와 최대 10 Hz의 주파수 대역을 가지는 실제의 지진파 속도 및 감쇠상수와 선형적인 관련성에 대하여서는 아직까지 확립된 정설이 없다. 그럼에도 불구하고 초고주파 탄성과 속도를 실험실에 측정하는 것은 만약 그 지역의 지진파 평균도달시간 이상 자료가 있다면 이를 비교하므로써 일치·불일치성에 대한 고찰에 매우 중요한 자료를 제공할 수 있다는데 있다.

실험실에서의 탄성파전달속도 측정은 Birch (1960)가 최초로 암석에 대하여 실시하였으며 Boyce(1976)가 이 방법을 미고결 해양 퇴적물에 대하여 적용한 후 현재까지 수은기둥 방법을 사용하여 왔다(김대철, 1989). 그러나 기존의 수은기둥 방법은 시료 및 표준물질을 통과한 신호를 실시간으로 바로 처리할 수 없었으며 또한 신호의 시작을 측정자가 주관적으로 결정함으로써 측정자에 따라 속도값이 차이가 나며 수은기둥을 자주 보정하여야 했다. 이러한 문제의 해결 방안으로 김대철 등 (1999)은 알루미늄을 표준시료로 사용하여 PC와 측정장치를 바로 연결하여 PC상에서 자동적으로 암석 및 퇴적물 시료의 속도 및 감쇠상수를 구하는 시스템을 개발하였다. 김 등이 2000년에 개발한 속도 및 감쇠계수측정 시스템은 펄스발생기

(Tektronix TM 502A), 증폭기, 시료거치기, 오실로스코프(Tektronix TDS 3012), 그리고 GPIB(General Purpose Interface Bus, IEEE488.2, Iotech)가 장착되고 소프트웨어가 설계된 컴퓨터로 구성되어 있다(Fig.1). Fig. 1에 설명한 바와 같이 오실로스코프의 채널1에는 펄스발생기에서 생성된 신호가 표시되며 채널2에는 펄스발생기에서 생성되어 시료 거치대를 통과하고 증폭기를 통과하여 변형되고 시간이 지연된 신호가 표시된다. 오실로스코프의 채널1과 2에 나타나는 신호들은 컴퓨터에 장착된 GPIB와 설계된 소프트웨어에 의하여 컴퓨터로 전송되어 자료처리된다. 컴퓨터에 설계된 소프트웨어는 오실로스코프와 컴퓨터를 연결하는 인터페이스인 GPIB에서 제어되어서 디지털화된 자료를 이용하여 시료의 속도 및 감쇠계수를 구할 수 있게 한다. 시료의 속도 및 감쇠계수를 한번 측정할 수 있도록 고안되었으나 측정값이 실제값에서 많이 벗어나는 경우를 생각할 수 있으므로 자동적으로 여러 번 측정하여 평균값으로서의 측정치를 구할 수 있도록 고안되었다.

이번 연구에서는 6개의 기상청 광대역 관측소 하부의 기반암석의 P파속도 및 감쇠상수를 김대철 등(2000)이 개발한 장치 및 소프트웨어를 이용하여 측정한 후 각 관측소에서 원거리 지진자료의 도달시간 분석을 통하여 측정되어진 평균 지진파 도달시간 이상자료와 비교하였으며 아울러 암석시료의 현미경사진 분석을 통한 속도분석을

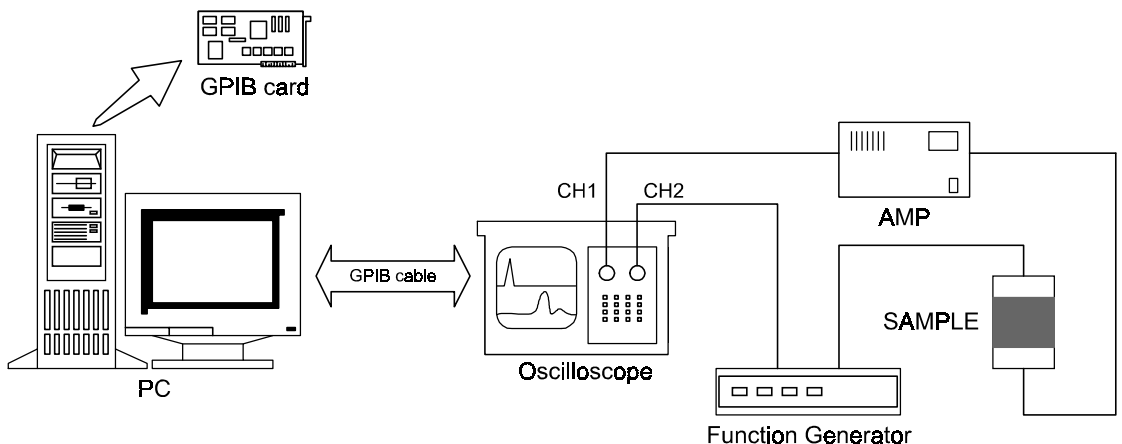


Fig. 1. System for measuring the P velocity and attenuation coefficient of rocks (After Kim *et al.*, 1999)

실시하였다.

## 2. 속도 및 감쇠상수 측정방법

Fig. 1에서 오실로스코프의 채널1에는 신호발생기(pulse generator)에서 생성되는 표준신호가 표시되며 채널2에는 일정한 길이의 알루미늄 시료를 시료거치대에 설치하게 되면 표준신호가 알루미늄 시료를 통과하고 그 결과가 표시된다. 여기서 알루미늄 시료의 길이를  $L_{al}$  m(예를 들면 0.0254 m) 그리고 속도를  $V_{al}$  m/s라고 고정시키면(예를 들면 6260 m/s) 이론상으로는 채널1에 표시되는 표준신호에 대한 알루미늄 시료의 도달시간의 차이는  $L_{al}/V_{al}$  초(예를 들면 4.0575 ms)가 된다. 표준신호의 시작은 트리거링되는 시점이다. 그러나 전기회로의 특성상 신호를 발생시킬 때마다 상변화(phase change)가 일정하지 않으므로  $V_{al}$  m길이(예를 들면 0.0254 m)의 알루미늄 시료를 통과한 신호와 표준신호의 도달 시간차이를 측정하여  $L_{al}/V_{al}$  초(예를 들면 4.0575 ms)를 감하여 알루미늄 시료의 보정치(C)로 계산한다. 이 알루미늄 시료의 보정치는 전기회로의 시간지연의 차이에 의한 것이며 연속측정시 이 보정치는 비슷한 값을 가진다고 가정한다. 다음으로 시료거치대에 속도를 측정하고자 하는 암석 또는 퇴적물 시료를 설치하고 이를 통과하는 신호와 표준신호의 도달 시간차이를 측정하여 알루미늄 보정치(C)를 감하여 주면 속도를 측정하고자 하는 시료의 속도와 길이에 의한 순수한 시간지연이 계산되게 된다. 그러므로 순수한 시간지연을 속도를 측정하고자 하는 시료의 길이  $L_s$ 로 나누게 되면 시료의 속도를 계산하게 된다.

암석 또는 퇴적물의 감쇠와 물리적 특성과의 관련성은 감쇠의 원인규명이외에도 비탄성 모델의 설정에도 매우 중요하다. Toksoz등(1979)의 연구에 의하면 음파가 매질을 통과할 때 평면파의 진폭은 매질의 물리적 성질 및 전파거리에 따라 감소한다고 하는데 그 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_1(f) &= G(f,r) \exp[-a_1(f)r] \exp[i(2pft-k_1r)] \\ A_2(f) &= G(f,r) \exp[-a_2(f)r] \exp[i(2pft-k_2r)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 진폭을,  $r$ 은 시료의 길이를,  $f$ 는 주파수를,  $k$ 는 파수를,  $G(f,r)$ 은 전파거리에 따르는 기하학적 감쇠를, 그리고  $a(f)$ 는 주파수의 감쇠함수이다. 아래첨자 1과 2는 각각 기준시료와 비교시료를 의미한다. 기준시료와 비교시료의 길이는 같다고 가정한다. 진폭의 비는 다음과 같다.

$$\ln(A_1/A_2) - \ln(G_1/G_2) = (a_2 - a_1)r \quad (2)$$

$a(f)$ 가 주파수에 선형적으로 비례하고(Jackson and Anderson, 1970; Hamilton, 1972; Sears and Bonner, 1981)  $\ln(G_1/G_2)$ 가 측정주파수 범위에서 일정한 값(C)을 갖는다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln(A_1/A_2) - C = (g_2 - g_1)fr \quad (3)$$

$g_2$ 와  $g_1$ 은 각각 비교시료와 기준시료의 감쇠계수가 된다. 만약 알루미늄을 표준시료로 사용한다면 알루미늄 표준시료의 감쇠계수는 0으로 근사할 수 있다.

$$\ln(A_{al}/A_2) - C = g_2 fr \quad (4)$$

여기서  $A_{al}$ 은 알루미늄 시료의 파형이 된다. 그러므로 알루미늄을 표준시료로 사용한다면 비교시료의 감쇠계수는 일정한 주파수 구간에서  $\ln(A_{al}/A_2)$ 의 기울기를 계산하여 시료의 길이로 나누어 주면 된다. 감쇠정도를 나타내는 척도로서  $a(f)$ 대신에  $g$ 를 사용하는 이유는 특정한 주파수에서의 값이 아닌 단위 주파수로 표시하는 것이 유용하기 때문이다. 본 연구에서는 감쇠계수를 나타내는 단위로서 진폭의 비를 자연로그로 취하여 구한 Neper/kHz-m의 단위를 쓰지않고 대신에 dB/kHz-m의 단위로 표시하였다. 1 Neper는 약 8.686 dB에 해당한다.

측정 알고리즘은 암석이나 퇴적물 시료의 속도와 감쇠계수를 단일측정 및 평균측정을 선택적으로 수행하도록 고안되었다. 단일순서도(Fig. 2)에 나타난 바와 같이 먼저 알루미늄 표준시료를 설치하고 알루미늄 표준시료의 보정치를 계산한다.

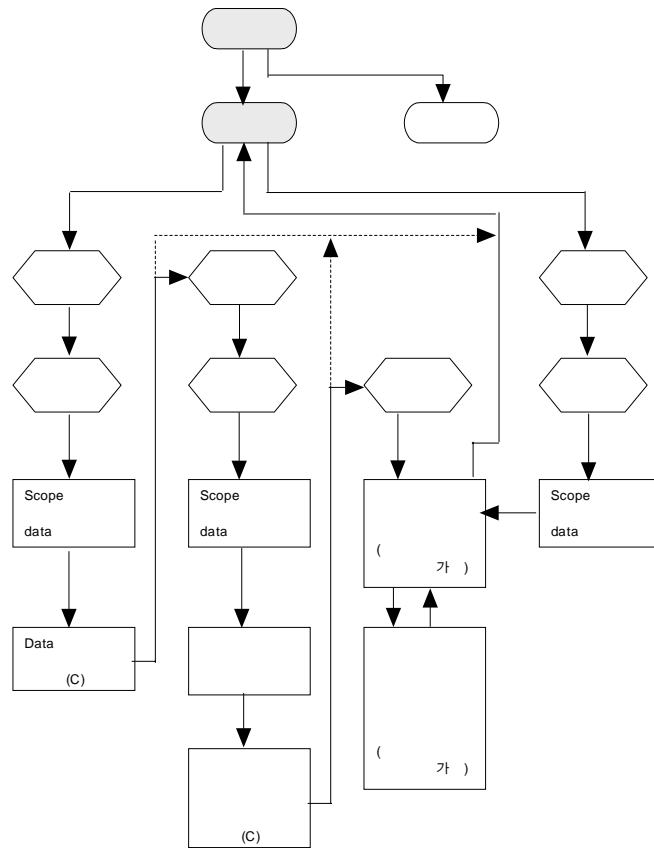


Fig. 2. Flow chart for measuring P velocity and attenuation coefficient in the laboratory.

이후 시료 거치대에 암석이나 퇴적물 시료를 설치하고 암석 시료의 속도를 계산한다. 이후 알루미늄 및 암석의 파형을 퓨리에 변환하여 진폭스펙트럼의 자연 로그비를 표시하면서 알루미늄 표준시료의 최대진폭 주파수에서 앞뒤로 0.13 MHz의 범위를 가지는 주파수 대역에서 최소 자승법을 이용하여 기울기를 구한 다음, 암석이나 퇴적물 시료의 길이로 나누어주고 dB단위로 고쳐주면 감쇠상수가 계산된다. 한편 평균측정에서는 단일 측정에서 설명된 기능들이 일정한 횟수만큼 자동 반복측정되어 평균적인 속도 및 감쇠계수를 구하여 정확성을 기하도록 고안되었다. 그러나 이번에 사용된 오실로스코프는 2개의 채널만 가지므로 매번 속도측정마다 알루미늄보정치를 계산하여 주어야하는 불편함이 있다. 특히 자동적으로 평균 속도를 구할 때는 매번 알루미늄 표준시료와 암

석이나 퇴적물 시료를 번갈아가며 설치할 수 없으므로 평균 알루미늄 보정치를 먼저 계산한 후 이 보정치가 현실점에서 수행하고자 하는 평균속도계산에서 보정치로서의 의미를 가진다고 가정한다. 실제로 보정치는 측정시스템의 전기회로의 위상지연과 관련있고 이 위상지연의 정도는 매우 임의적인 성격을 보여 주지만 평균보정치는 만약 측정회수가 충분히 크다면 시간에 관련 없이 일정한 값을 보여준다.

일정한 주파수대역에서 알루미늄 표준시료 및 암석/퇴적물 시료의 진폭스펙트럼비의 자연로그의 값에서 기울기를 구하는 과정은 단순한 최소자승법을 사용하였다. 상기 설명한  $\ln(A_{al}/A_2) - C = g \cdot fr$  식을  $y_i = a + bx_i + e_i$  로 근사하면  $e_i = y_i - (a^* + b^* x_i)$  로 되며 최소자승법은  $e_i^2$  을 최소화 하는  $a^*$  와  $b^*$  를 찾는다.

$$a^* = \bar{y} - b^* \bar{x}$$

$$b^* = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (5)$$

여기서  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$  및  $S_{yy}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \\ S_{xy} &= \sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y} \\ S_{yy} &= \sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $x_i$ 의 평균을  $\bar{x}$ 라하고  $y_i$ 의 평균을  $\bar{y}$ 라하고 한다 그리고  $n$ 은 측정하고자 하는 주파수 대역의 주파수 갯수이다. 95%의 신뢰도를 가지는  $b$ 의 구간을 구하기 위해서

$SSE = S_{yy} - \hat{b}S_{xy}$ 와  $MSE = SSE / (n - 2)$ 를 설정하면, 95%의 신뢰도를 가지는  $b$ 의 구간은  $t$ 분포 표로부터 아래와 같이 결정할 수 있다.

$$\left( b^* - t_{0.05/2, n-2} \sqrt{\frac{MSE}{S_{xx}}}, b^* + t_{0.05/2, n-2} \sqrt{\frac{MSE}{S_{xx}}} \right)$$

### 3. 측정 결과 및 토론

알루미늄 시료는 한 변이 2.54 cm인 정육면체를 사용하였는데 정확한 감쇠상수를 도출하기 위하여서는 암석샘플 역시 한변이 2.54 cm인 정육면체를 사용하여야 한다. 그러나 본 연구에 사용된 암석 샘플의 경우 Table 1에 나타난 바와 같이 한 변의 길이가 차이가 있어서 감쇠상수를 정확하게 측정하기에는 무리가 있다. 이는 감쇠상수를 구하기 위하여 도달과형을 주파수 대역에서 분석할 때 제일 먼저 도달하는 직접 도달파와 육면체의 측면에서 반사되어 도달하는 파의 도달시간 조건이 다르기 때문에 측정되어진 감쇠상수가 각 관측소 하부 암석의 감쇠를 나타내는데는 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있다. 실제로 이번 연구에 사용된 입력파형은 그 중심주파수가 약 0.5 MHz인 아주 고주파이다. 이 중심주파수는 실제 지진파형의 중심주파수(~ 10Hz)에 비하여 너무나도 높기 때문에 실험실에서 고주파를 이용하여 측정한 암석의 감쇠상수가 반드시 저주파인 지진파에 적용하여도 된다는 보장이 없다. 이런 고주파 파형의 감쇠상수는 암석시료의 입자배열이나 성분 등에 의하여 매우 크게 변할 수 있다. 측정된 결과를 관측소의 평균도달시간 이상과 암석의 현미경 사진과 함께 토의한다.

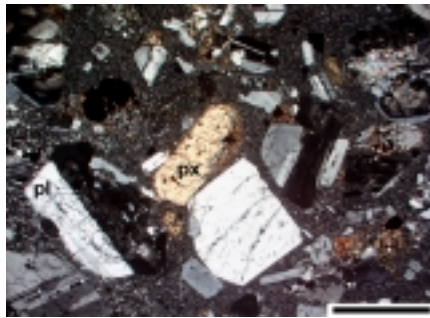
**Table 1.** Length of the rock samples (hexahedron sample) used to measure P velocity and attenuation of the broad-band stations of KMA.

	Length of 1st face (cm)	Length of 2nd face (cm)	Length of 3rd face (cm)
Kwangju (KWA)	2.78	2.74	2.78
Chuncheon (CHC)	2.74	2.76	2.64
Uljin (ULJ)	2.43	2.51	2.21
Daekwanryung (DGY)	2.84	2.78	2.83
Seosan (SES)	2.62	2.63	2.60
Chungju (CHJ)	2.60	2.61	2.54

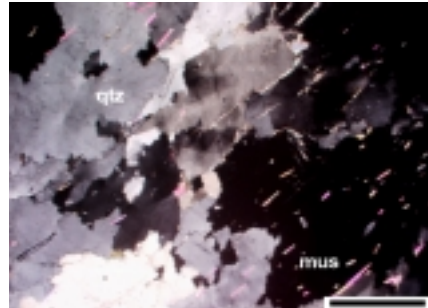
### 3.1. 광주지진관측소

광주지진관측소 하부의 암석은 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 전형적인 반상조직을 보이는 반상안산암이다. 이 암석시료의 속도 및 감쇠상수를 1000번 연속 측정하여 95%의 신뢰구간으로 계산한 결과 속도는 3면이 각각 5469~5477 m/s, 5515~5527 m/s, 그리고 5597~5609 m/s로 측정되었으며 감쇠상수는 0.04, 0.06, 그리고 0.09 db/kHz-m

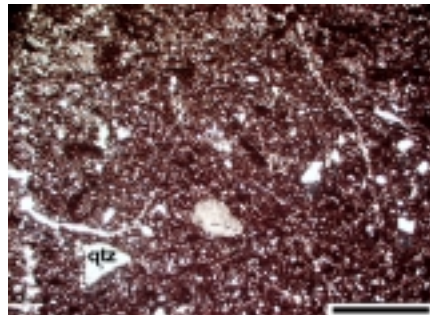
로 측정되었다(Table 2). 암석시료의 속도는 6개의 관측소중 제일 빠른 특징을 나타내며 감쇠상수는 두번째로 낮은 것으로 평가되었다. 이렇게 암석 속도가 높고 감쇠상수가 낮게 계산되는 이유는 성분 기질 광물 대부분이 매우 미세하여 편광현미경하에서도 겨우 결정질임을 식별할 수 있는 은미정질(cryptocrystalline)로 나타나기 때문으로 사료된다. 삼면속도의 변화 폭이 약 170 m/s



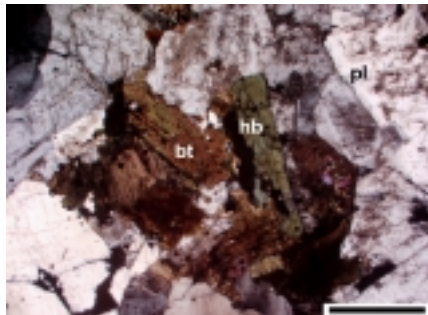
(a)



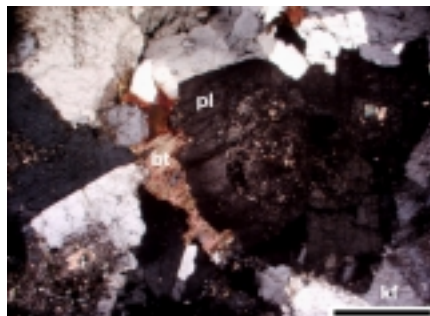
(b)



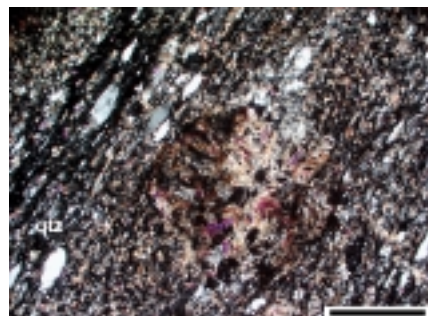
(c)



(d)



(e)



(f)

**Fig. 3.** Microscopic view of rock samples of Kwangju (a), Chuncheon (b), Uljin (c), Daekwanryung (d), Seosan (e) and Chungju (f). Scale bar located at the bottom corresponds to 1 mm.

**Table 2.** Measured P velocity and attenuation coefficient of 6 broad-band stations of KMA.

	P velocity (m/s)			Attenuation coef. (db/kHz-m)		
	1st face	2nd face	3rd face	1st face	2nd face	3rd face
KWA	5521 ± 6	5473 ± 4	5603 ± 6	0.06 ± 0.00	0.09 ± 0.00	0.04 ± 0.00
CHC	4847 ± 18	5281 ± 32	5409 ± 15	0.09 ± 0.00	0.09 ± 0.01	0.05 ± 0.00
ULJ	4401	4207	3513	0.01	0.01	0.01
DGY	3558	3534	3249	2.66 ± 0.10	2.13 ± 0.01	-
SES	4134	3853	3242	4.31 ± 0.20	3.13 ± 0.30	-
CHJ	5488	4919	4894	0.34 ± 0.01	0.12 ± 0.00	0.13 ± 0.01

로 매우 작는데 이는 광물입자의 배열이 일정한 방향성이 없는 데에 기인한다고 볼 수 있다. 사장석 반정은 4 mm 이하의 자형 내지 반자형으로 산출되는데, 반정의 크기가 큰 것부터 작은 것까지 연속적으로 매우 다양하게 나타나는 세리에이트 조직(seriate texture)을 보여준다. 일부 사장석 반정들은 외형이 둥글게 나타나는데, 이는 채용용된 증거인 것으로 생각된다. 휘석 반정은 자형의 독립적인 단사휘석이며 개방니콜에서 연녹색을 보인다. 실제 지진자료를 이용한 광주관측소 하부의 지진파도달시간이상은 6개의 관측소중 가장 빠른 도달시간 이상을 보여준다(Fig. 4). 이 사실로부터 실제로 광주 관측소 하부의 빠른 도달시간이상은 기반암인 안산암의 빠른 속도 구조에 의한 것이라고 유추할 수 있으며 이는 감쇠상수 측정결과와도 일치한다. 그러나 이런 빠른 구조의 깊이에 대하여서는 정밀한 지구물리 조사가 필요하다.

**3.2. 춘천지진관측소**

춘천지진관측소 하부의 암석은 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 석영과 백운모로 구성되어 있는 규암이다. 대부분 파동 소광을 보이는 석영은 5 mm 정도의 크기이며 경계면에서 불규칙적으로 맞물려 모자이크 조직을 보인다. 이 암석시료의 속도 및 감쇠상수를 1000번 연속 측정하여 95%의 신뢰 구간으로 계산한 결과 속도는 3면이 각각 4829~4865 m/s, 5249~5313 m/s, 그리고 5394~5424 m/s 로 측정되었으며 감쇠상수는 0.05, 0.08~0.10, 그리고 0.09 db/kHz-m로 측정되었다(Table 2). 암석 시료의 속도는 6개의 관측소중 2번째로 빠른 특징을 나타내며 감쇠상수는 3번째로 낮은 것으로

평가되었다. 이렇게 암석속도가 높게 평가되고 감쇠상수가 낮게 계산되는 이유는 표면상으로 치밀하며 장석의 함유량이 매우 적은 규암이기 때문인 것으로 사료된다. 실제 지진자료를 이용한 춘천관측소 하부의 지진파도달시간이상은 6개의 관측소중 제일 느린 도달시간 이상을 보여준다(Fig. 4). 실험실에서 측정되어진 암석의 속도와 실제 지진파를 이용한 도달시간이상과는 광주 관측소와는 달리 일치하지 않는다. 이는 춘천관측소 부근 하부지각 또는 상부맨틀에 도달시간이상을 유발할 수 있는 저속도층이 존재할 수 있다는 것을 의미한다. 다른 한편으로는 고주파수 가정을 실제 지진파 속도에 적용시킬 수 없다는 가능성을 제시하기도 한다.

**3.3. 울진지진관측소**

울진지진관측소 하부의 암석은 Fig. 3(c)에 나타난 바와 같이 적색 실트스톤이다. 이 암석은 석영, 사장석의 광물편과 이암 암편 그리고 미약한 엽리를 가지는 적색의 기질로 이루어져 있다. 석영은 1.5 mm 이하의 타형이며 단일한 광물입자로 산출된다. 사장석은 0.5 mm 이하의 입자로 산출되며 흑운모는 0.5 mm 이하의 단일한 결정으로 소량 산출되며 엽리면과 평행하게 배열되어 있다. 암편으로는 4 mm 이하의 변질이 심한 이암 암편이 확인되는데, 외형이 불규칙적이며 엽리 방향으로 신장되어 나타난다. 이 암석시료의 속도 및 감쇠상수를 단일 측정한 결과 속도는 3면이 각각 3513 m/s, 4207 m/s, 그리고 4401 m/s 로 측정되었으며 감쇠상수는 0.01, 0.01, 그리고 0.01 db/kHz-m로 측정되었다(Table 2). 암석시료의 속

도는 6개의 관측소중 4번째로 빠른 특징을 나타내며 감쇠상수는 제일 낮은 것으로 평가되었다. 치밀한 암석임에도 불구하고 이렇게 암석속도가 상대적으로 낮은 것은 사장석의 광물편 그리고 이암의 암편을 많이 포함하고 있기 때문으로 사료된다. 삼면속도의 변화 폭이 약 900 m/s로 매우 큰데 이는 엽리면의 발달에 기인한다고 볼 수 있다. 실제 지진자료를 이용한 광주관측소 하부의 지진파도달시간이상은 6개의 관측소중 2번째로 느린 도달시간 이상을 보여주는데(Fig. 4) 이는 실험실에서 측정된 속도의 경향과 일치한다. 다만 감쇠상수가 매우 낮게 평가되는 것은 현재로는 설명이 어렵다.

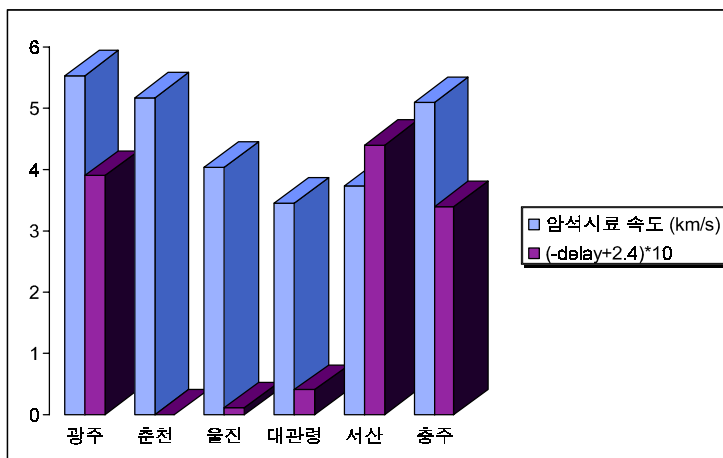
**3.4. 대관령지진관측소**

대관령지진관측소 하부의 암석은 Fig. 3(d)에 나타난 바와 같이 화강암으로서 등립상, 조립질의 암석으로 주구성 광물은 사장석, 알칼리 장석, 석영, 흑운모, 각섬석으로 구성되며, 부구성 광물로는 녹염석, 녹니석, 불투명 광물, 인회석, 스피인소량 산출된다. 석영-알칼리 장석-사장석이 모드조성으로는 화강섬록암에 해당될 것으로 생각된다. 사장석은 8 mm 이하 크기의 자형 내지 타형으로 산출되고 광물 내부에 흑운모 결정을 포함하는 전형적인 포이킬리틱 조직(poikilitic texture)을 가지는 사장석도 확인된다. 석영은 5 mm 이하의 타형으로 산출되는데 파동소광을 보이며 재결정화되

어 있다. 이 암석시료의 속도 및 감쇠상수를 단일 측정된 결과 속도는 3면이 각각 3249 m/s, 3534 m/s, 그리고 3558 m/s 로 측정되었으며 감쇠상수는 2.1~2.7 db/kHz-m로 측정되었다(Table 2). 암석시료의 속도는 6개의 관측소중 제일 느리며 감쇠상수는 두 번째로 높은 것으로 평가되었다. 이렇게 암석속도가 상대적으로 낮은 것은 암석시료가 신선하지 않으며 이는 Fig. 3(d)에서 볼 수 있듯이 거정질의 사장석이 다량 함유되어있기 때문으로 사료된다. 실제 지진자료를 이용한 광주관측소 하부의 지진파도달시간이상은 느린 도달시간 이상을 보여주는데(Fig. 4) 이는 실험실에서 측정된 속도의 경향과 일치한다. 감쇠상수 또한 도달시간이상의 경향성과 일치한다.

**3.5. 서산지진관측소**

서산지진관측소 하부의 암석은 Fig. 3(e)에 나타난 바와 같이 거정질 화강암으로서 사장석, 석영, 흑운모, 장석이 주구성 광물을, 백운모, 인회석, 녹니석이 부구성 광물을 구성하고 있다. 사장석은 5 mm 이하의 자형 내지 반자형으로 산출되는데, 선택적으로 견운모화 되어 있으며 석영은 1.5mm 이하의 타형으로 나타나며, 결정 간의 경계가 서로 맞물려 모자이크 조직을 보이고 각 결정은 파동소광을 보인다. 작은 크기의 석영 입자들이 다른 광물들의 경계에서 관찰되기도 한다. 흑운모는



**Fig. 4.** Comparison between P velocity measured in the laboratory (blue) and negatively scaled average travel-time delay (red).



5 mm의 갈색의 타형 결정으로 나타나며, 벽개면이 휘어지거나 깎여지는 양상을 보이는 것으로 보아 연성-전성 변형을 받은 것으로 추정되며 부분적으로 변질에 의해 녹니석화 되어 있다. 이 암석시료의 속도 및 감쇠상수를 단일 측정한 결과 속도는 3면이 각각 3242 m/s, 3853 m/s, 그리고 4134 m/s로 측정되었으며 감쇠상수는 3.1~4.3 db/kHz-m로 측정되었다(Table 2). 암석시료의 속도는 6개의 관측소 중 두번째로 느리며 감쇠상수는 제일 높은 것으로 평가되었다. Table 2의 속도측정결과에서 나타나듯이 속도의 변화가 측정하는 면에 따라 27% 정도 변화하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 3(e)에서 나타나듯이 거정질 입자의 배열방향 및 풍화의 정도에 의하여 속도의 방향성이 나타난 것으로 사료된다. 실제 지진자료를 이용한 서산관측소 하부의 지진파도달시간이상은 제일 빠른 도달시간 이상을 보여주는데(Fig. 4) 이는 실험실에서 측정된 속도 및 감쇠상수의 경향과는 정반대의 결과이다. 암석시료를 표면에서 채집한 것이라 풍화의 상태가 심하여 암석의 속도가 심층에 있는 암석에 비하여 낮게 평가되었고 또한 거정질이라서 고주파 파형이 통과하면서 장석의 낮은 속도에 영향을 받은 것으로 사료된다.

### 3.6. 충주지진관측소

충주지진관측소 하부의 암석은 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 천매암이다. 석영입자의 광물편과 규암, 이암 또는 실트암의 암편을 포함하며 기질에는 슬레이트 벽개와 파랑벽개가 잘 발달하고 있다. 석영입자와 규암 역은 5 mm 이하로 산출되며 벽개면을 따라 신장되어 평행하게 배열하고 있다. 두 방향의 벽개면이 확인되는데, 광물편과 암편들은 주된 벽개면(S2)을 따라 신장되어 배열하고 있지만 기질을 구성하는 광물들은 약한 벽개면(S1)을 따라 배열하고 있다. 이 암석시료의 속도 및 감쇠상수를 단일 측정한 결과 속도는 3면이 각각 4894 m/s, 4919 m/s, 그리고 5488 m/s로 측정되었으며 감쇠상수는 0.12~0.34 db/kHz-m로 측정되었다(Table 2). 실제 지진자료를 이용한 충주관측소 하부의 지진파도달시간이상은 빠른 도달시간 이상을 보여주는데(Fig. 4) 이는 실험실에서 측정

한 속도 및 감쇠상수의 경향과는 일치한다.

## 4. 결론

측정된 암석시료의 속도와 지진자료를 이용하여 결정된 도달시간이상은 대체로 긍정적인 연관성을 보여 주며 측정된 감쇠상수와도 긍정적인 연관성을 보여준다. 춘천관측소의 경우 암석시료의 속도는 5 km/s 이상으로 높게 나타났으나 관측소 하부지각구조에 의한 평균도달시간이상은 느린 것으로 판단되었다. 이는 춘천관측소하부의 평균 지각속도구조가 다른 관측소하부에 비하여 느릴 수 있으며 표층의 퇴적암만이 비교적 빠른 속도를 보인다고 가정할 수 있다. 울진 관측소도 춘천관측소와 같은 맥락에서 해석할 수 있으며 서산관측소의 경우 도달시간이상이 빠르면서도 불구하고 기반암 표층의 속도가 늦게 평가되는 이유는 풍화된 기반암 표층과 고주파 파형이 암석시료를 통과하고 또한 거정질의 장석이 다량 함유되어 있기 때문으로 생각이 된다. 광주 관측소의 경우 암석시료의 속도가 빠르고 관측소 하부 지각구조속도가 상대적으로 빠른 것으로 사료되며 이는 암석시료가 치밀하고 풍화가 덜 진행된 결과라고 생각할 수 있다. 대관령 관측소의 경우 암석시료의 속도 및 도달시간 이상이 낮은 것으로 판명되었다. 암석시료의 감쇠상수는 Fig. 5에서 보듯이 전반적으로 암석시료의 속도에 반비례하는 일관적인 형태를 보여준다. 비교적 거정질의 입자를 가지는 서산 및 대관령의 암석시료는 매우 높은 감쇠상수를 보여준다. 이는 0.5 MHz의 고주파의 파형이 석영, 장석, 및 운모같은 거정질이나 풍화된 입자들을 지나는 과정에서 파형의 감쇠가 심하게 일어난 것으로 사료되며 충주관측소나 울진관측소 하부의 암석은 퇴적암이지만 입자가 작고 매우 치밀하여 감쇠상수가 낮은 것을 알 수 있다. 광주 관측소의 암석은 변성을 받은 것으로 생각되지만 매우 치밀하고 단단한 입자들로 구성되어서 감쇠상수가 낮고 속도가 매우 빠른 것으로 사료된다.

이와 같이 고주파 가정에서 측정되어진 암석시료의 속도나 감쇠상수를 일반 지진파의 주파수

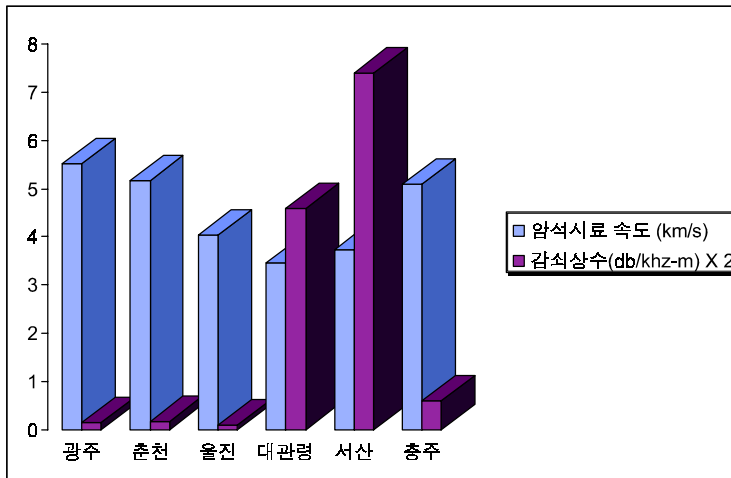


Fig. 5. Comparison between P velocity (blue) and attenuation coefficient (red) measured in the laboratory.

영역에 대하여 확대 해석하는 현실적으로 무리가 있는 것은 사실이다. 즉 지진파의 주파수 영역(~10Hz)와 암석시료 속도측정을 위한 주파수(0.5 MHz)는 만 배 이상 주파수가 차이가 나기 때문에 이 두 주파수 영역간의 상관관계에 대한 현실적인 연구가 진행되지 않는 한 고주파 가정에서 도출된 속도나 감쇠상수를 지진정밀탐지의 입력변수로 사용하기에는 무리가 있다. 따라서 현실적으로 고주파 가정에서 도출된 결과를 지진파 주파수 영역에서 사용할 수 있는 연결고리에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

### 사 사

이 연구는 기상청에 의하여 지원되는 기상지진 R&D사업의 단위과제인 “지진에너지 및 지진해일 예측기술개발” 사업에 의하여 지원되었음을 알리며 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

김대철, 1989. 미고결 해저퇴적물의 음파전달속도 측정에 관한 연구. 한국수산학회지, 22, 147-153.  
 김대철, 김길영, 서영교, 하덕호, 하인철, 윤영석, 김정창, 1999. 해양퇴적물 자동음파전달속도 측정장치, 한

국해양학회지, 4, 400-404.  
 김대철, 김길영, 이덕기, 서영교, 2000. 평균의미의 해양 퇴적물 자동음파전달속도 및 감쇠상수 측정장치, 개발완료.  
 Birch, F., 1960. The velocity of compressional waves in rocks up to 10 kilobars. Part 1. J. Geophys. Res., 65, 1083-1102.  
 Boyce, R.E., 1976. Definitions and Laboratory Techniques of Compressional Sound Velocity Parameters and Wet-water Content, Wet-bulk Density, and Porosity Parameters by Gravimetric and Gamma Ray Attenuation Techniques, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 33, U.S. Government Printing Office, PP. 931-958.  
 Hamilton, E.L., 1972. Compressional-wave attenuation in marine sediments, Geophysics, 37, 620-646.  
 Jackson, D.D., and D.L. Anderson, 1970. Physical mechanisms of seismic wave attenuation, Rev. Geophys. Space Phys., 8, 1-63.  
 Sears, F.M., and B.P. Bonner, 1981. Ultrasonic attenuation measurement by spectral ratios utilizing signal processing techniques. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, GE-19, 95-99.  
 Toksoz, M.N., D.H. Johnston and A. Timur, 1979. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements, Geophysics, 44, 681-690.

2002년 6월 1일 원고접수  
 2002년 9월 23일 원고채택