

# 미고결 해저퇴적물의 음파전달속도 측정에 관한 연구\*

김 대 철  
부산수산대학 응용지질학과

## Laboratory Determination of Compressional wave Velocity for Unconsolidated Marine Sediment

Dae-Choul KIM

*Department of Applied Geology, National Fisheries University of Pusan  
Pusan 608-737, Korea*

Laboratory measurement of compressional wave velocity for two piston cores has been carried out successfully. The cores penetrated into the Holocene mud deposit located just off the Pusan harbor. Differences between the mercury delay method using a mercury column and the time delay method utilizing a digital processing oscilloscope for the observed velocity are negligible. Thus, both methods can be used independently to determine the velocity of unconsolidated marine sediment. The core velocity is, however, always higher than the velocity calculated from the seismic profile. This result should be considered seriously to interpret a seismic profile, otherwise one may encounter systematic error in calculating sediment thickness.

### 서 론

해저퇴적물의 음향학적 성질의 연구는 여러가지 기술적인 난점때문에 별로 활발하지 않았으나 심해저 시추계획(Deep Sea Drilling Project: DSDP)이 시작되어 긴 코어가 얻어지면서 활기를 띠기 시작하였다. 미고결 퇴적물의 경우는 아주 느린 속도, 낮은 신호대 잡음비(S/N), 비교적 큰 감쇄, 시추시 시료의 교란 등의 문제로 더욱 어려웠다. 또한 특수하게 제작된 Sample holder를 쓰지 않으면 시료의 모양(길이)을 유지할 수 없기 때문에 측정오차가 커지는 등의 문제점이 있었으나 최근들어 새로운 기술이 많이 개발되어서 현재는 해양관측선에서 코어를 절개하는 경우 거의 필수적으로 실시하는 항목의 하나이다(Garrison, 1981).

해저퇴적물의 음파전달속도는 속성작용과의 연관성, 다른 물리적 성질의 해석등에도 필요하지만 사실은 그 자체로서도 중요하다(Kim et al., 1985). 실제로 해상에서 탄성파탐사를 할 때 퇴적층의 두께를 측정하기 위해서는 각 층별로 음파전달속도를 알고 있어야 한다. 물론 개략적인 속도구조는 탄성파자료분석을 통해 계산해 낼 수가 있지만 실제 측정치와 차이가 나는 경우가 많고 이런 경우 층후계산이 틀리게 된다. 더우기 정확한 반사면의 위치와 반사계수와 직접적인 관계가 있는 음향 임피던스를 계산하기 위해서는 코어에 대한 음파전달속도의 측정이 필요하다.

Fig. 1은 적도 서태평양의 한 대양대지(Ontong Java Plateau)에서 광각의 탄성파 반사법을 이용하여 측정한 퇴적층의 속도구조와 그 곳에서 채취한

\*이 논문은 1988년도 문교부 지원 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

심해저 시추코어를 실험실에서 측정된 속도와의 차이를 비교한 것이다. 해저면 1,000~1,300m 사이에 강한 반사면이 나타나고 이 반사면은 에오세의 처트층인 것으로 판명이 났지만 이 구간에서 나타나는 이러한 급격한 속도변화의 양상이 탄성과 속도구조상에는 완만한 곡선으로만 나타나기 때문에 이러한 자세한 속도변화를 알아내기가 어렵다는 것을 뚜렷하게 보여준다(Milholland et al., 1980). 물론 본 연구지역인 부산항 외곽의 대륙붕에서 채취된 코어는 길이도 위에서 언급한 코어보다 훨씬 짧고 퇴적물의 조직과 성분도 큰 차이가 나지만

총길이 2m 내외의 코어에서도 약간의 속도변화를 관찰할 수 있어 동일 반사면 내에서의 음파전달속도가 균일하다고 가정하는 탄성과 자료를 이용한 간접적인 속도계산방법에 문제점이 있음을 추측할 수 있다.

본 연구의 목적은 국내에서 처음 시도되는 미고결 해저퇴적물의 음파전달속도의 측정을 위한 실험장치의 개발과 실제로 측정된 자료를 탄성과를 이용한 간접적인 방법에 의해 얻어진 결과와 비교하여 탄성과 측정자료의 오차를 줄이려는 데 있다.

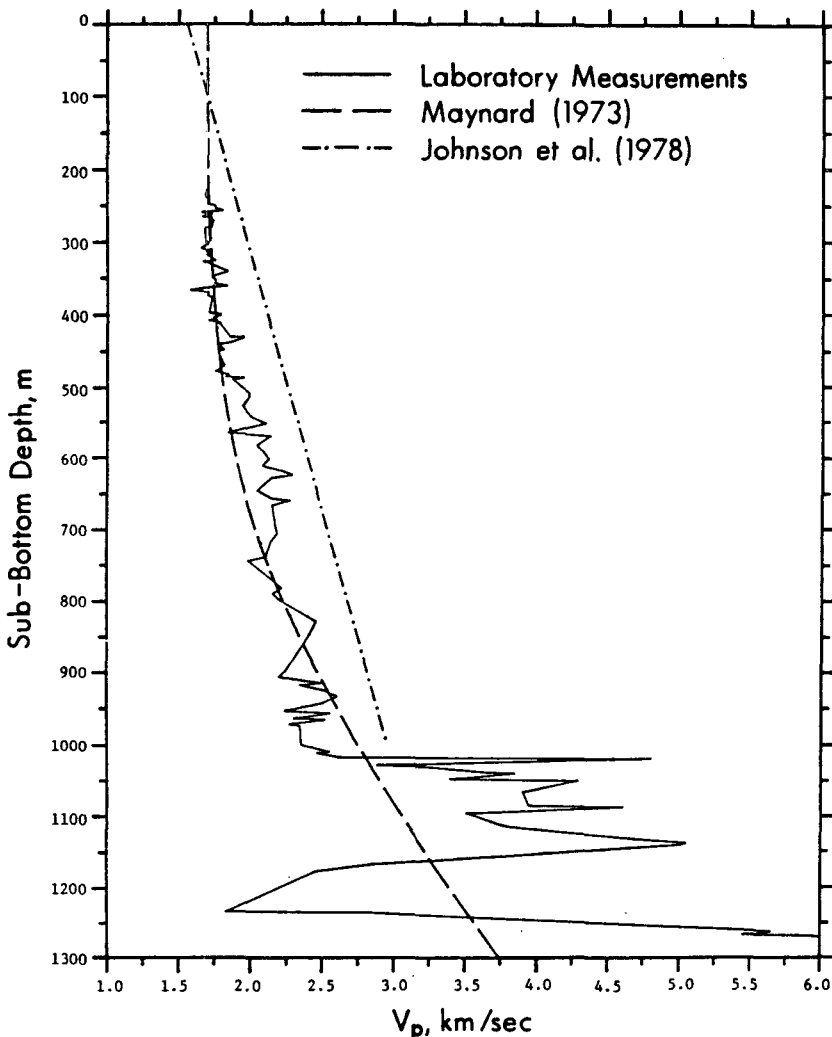


Fig. 1. Comparison of laboratory and seismic wide-angle reflection measurements of compressional velocity for DSDP site 289. (modified after Milholland et al., 1980). Note the big difference in velocity determined by laboratory and seismic techniques for the sequence deeper than 1,000m depth. The laboratory data were measured under the ambient condition.

### 실험장치 및 시료

#### 음파전달속도 측정

심해저 시추계획(DSDP)에서 개발한 음파속도 측정장치는 Hamilton frame으로서 펄스를 압전탐촉자로 변환시켜 통과된 신호를 증폭하여 기준물질과 비교하는 원리로 되어있다(Boyce, 1976). 이 방법은 Birch(1960)가 처음 고안한 방법이지만 미고결 해저퇴적물에 적용시키기 위하여 변형시켜서 사용되었다.

본 연구에서는 전통적으로 사용되는 속도측정의 기준인 수은기둥을 이용한 방법(Birch, 1960)과 디지털 오실로스코프(Digital Processing Oscilloscope)를 이용한 시간차 방법(Kim, 1985) 두가지 모두가 사용되었다. 수은기둥에는 1MHz의 Barium Titanate Transducer가 사용되었고 시료에는 역시 같은 주파수의 PZT Transducer가 사용되었다.

Birch(1960)의 방법은 동일한 펄스를 시료와 수은기둥에 통과시켜 이중 제일 먼저 도착한 신호(First arrival)를 오실로스코프상에서 서로교차시키고 이때 수은기둥의 길이를 측정하여 속도를 계산하는 방법인데 계산식은

$$V_p = L_s \cdot V_m / L_m \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서  $V_p$ =시료의 음파전달속도
- $L_s$ =시료의 길이
- $V_m$ =수은의 음파전달속도(25℃에서 1.450km/s)
- $L_m$ =수은의 길이

Kim(1985)의 방법은 수은기둥 대신에 속도를 알고 있는 물질을 표준재료로 사용한다. 본 연구에서는 순수한 알미늄( $V_p=6.244km/s$ )이 사용되었다. 역시 시료와 표준재료를 통과한 신호를 디지털 오실로스코프에 입력 시킨 후 각각의 첫번째 피크 사이를 시간차( $\Delta T$ )를 커서(Cursor)를 이용하여 측정 한 후 속도계산을 한다. 물론 첫번째 피크보다는 First arrival을 선택하는 것이 이론상 더욱 정확 하지만 실제로는 잡음 때문에 정확한 위치를 선정하기 어려우므로 첫번째 피크를 택하였다. 계산식은

$$V_p = L_s / (\Delta T + L_r / V_r) \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서  $\Delta T$ =시료와 표준재료 사이의 통과시간
- $L_r$ =표준재료의 길이
- $V_r$ =표준재료의 음파전달속도

측정오차는 두 방법 모두 2% 이내로 상당히 정확하지만 Birch(1960)의 방법은 수은기둥을 자주 보정(Calibration)해 주어야 하고, 속달이 필요한 반면에 Kim(1985)의 방법은 일단 표준재료에 대한 자료를 입력시켜두면 훨씬 빠른 속도로 연속 측정 할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 시료를 통과하는 초음파의 파장과 통과거리의 비( $\lambda/L$ )가 1보다 작아야 하므로 1 MHz의 주파수를 사용하는데(Kolsky, 1953), 이 경우에도 펄스의 파장이 퇴적물을 구성하는 최대 크기의 입자보다도 훨씬 크기 때문에 정확도는 유지 될 수 있다.

압전탐촉자(Piezoelectric transducer)를 시료에 직접 접촉을 시키면 다중반사(시료와 탐촉자사이 또는 시료와 backing사이)가 일어나 잡음이 커져 측정오차가 발생할 가능성이 있으므로 backing으로 PZT의 음향 임피던스( $23.7 \times 10g/cm^2 \cdot s$ )와 유사한 납( $25.3 \times 10g/cm^2 \cdot s$ )을 사용하여 탐촉자를 역으로 통과한 신호를 반사시키지 않고 소멸시킬 수 있도록 하였다(Sears and Bonner, 1981).

#### 밀도, 함수율 및 공극율 측정

퇴적물의 밀도는 벽면을 얇게 처리한 정사면체를 이용하여 체적을 측정 한 후 계산하였다.

$$\text{진밀도}(\rho, g/cm^3) = W_w / V_w \dots\dots\dots (3)$$

- 여기서  $W_w$ =포화된 시료의 무게
- $V_w$ =시료의 체적

$$\text{함수율}(W_c, \%) = \{(W_w - W_d) / W_w\} \times 100 \dots\dots (4)$$

여기서  $W_d$ 는 시료를 110℃에서 24시간 가열한 후 건조기에서 2시간 이상 건조시킨 후의 무게이다. (4)식에서 염분 보정을 하면(염분도를 35% 로 가정)

$$\text{함수율}(\%) = 1.0363 \times \{(W_w - W_d) / W_w\} \times 100 \dots\dots (5)$$

$$\text{공극율은} \text{공극율}(\phi, \%) = \{(W_w - W_d) / W_w\} \times 100 \dots\dots (6)$$

의 식에서 계산하고(Boyce, 1973: 1976), 이 때도 물론 염분보정은 필요하다.

#### 시료 및 입도분석

시료는 88년 5월에 부산수산대학 실습선 부산

402호를 이용하여 피스톤식 시추기를 이용하여 채취하였다. 부산항 부근의 8개 지점에서 시추를 하였으나 본 논문에서는 기존자료와 비교하기 위하여 김·석(1985)이 속도를 측정한 지점과 바로 인접한 지역인 B-05(35°05'N, 129°09'E)와 B-11(35°03'N, 129°07'E)의 2개의 시추코어를 선택하였다 (Fig. 2). 수심은 각각 47m와 52m이었다.

B-05 코어는 총 길이 190cm로서 조개껍질이 풍부한 이토(mud)로 되어있고, B-11 코어는 총 길이가 128cm이지만 하부로 갈수록 조개껍질의 함량이 증가하여 Sample Holder의 삽입이 어려워 표층 10cm되는 지점에서만 속도측정이 실시되었다. 2개의 코어 모두에서 극표층(0~10cm)에서는 조개껍질의 함량이 적었다. 퇴적물의 물포화도가 속도에 결정

적인 영향을 미치므로 코어의 개봉 즉시 속도를 비롯한 각종 물리적 성질을 측정하였다.

Sample holder는 4각형의 플라스틱 튜브로서 탐촉자를 부착시킬 수 있도록 서로 마주보는 방향에 2쌍의 구멍을 내어 수직 수평 성분의 속도를 측정할 수 있도록 고안되었다. 재질은 시료보다 음파전달속도가 느린 것으로 하였으나 반으로 절개한 코어에 삽입할 수 있도록 끝을 예리하게 처리하였다.

퇴적물의 입도는 Folk(1968)와 Galehouse(1971)에 의한 Sieve와 Pipette방법으로 분석하였다. 각 입도별 백분율로부터 Folk and Ward(1975)의 그래프 방법을 이용하여 모래, 실트, 점토의 함량비와 평균값, 중앙값, 왜도 등 조직 표준치를 계산하였다.

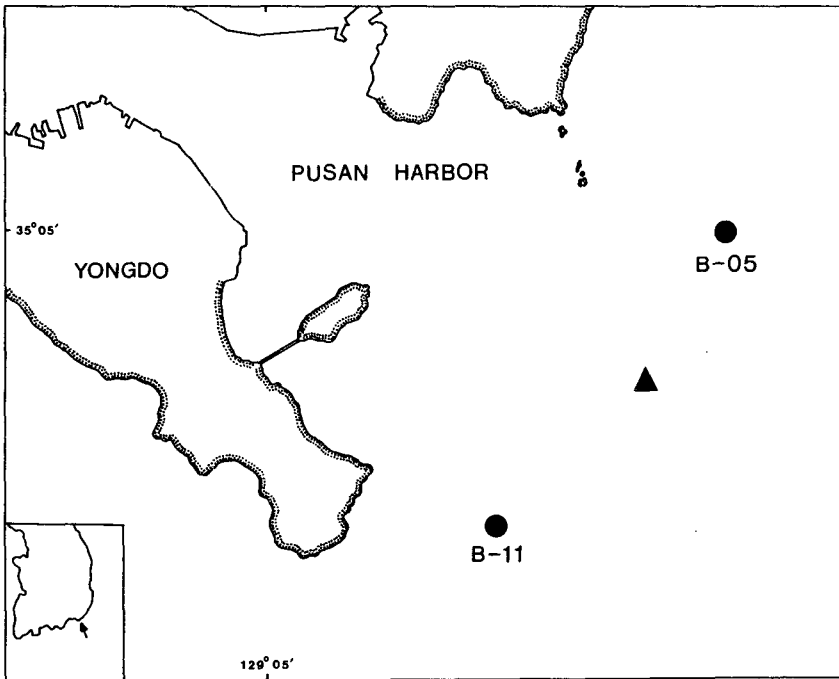


Fig. 2. Map showing the study area. Circles represent coring sites for this study and a triangle indicates the site studied by Kim and Suk(1985).

### 결과 및 고찰

수은기둥을 이용하여 Birch(1960)의 방법에 의한 속도측정결과가 Table 1과 2에 나와 있다. 시간차 방법에 의한 결과는 본 실험의 통상적인 측정오차인 1~2% 이내로 나타나 이 두가지 측정방법에 의한 실험결과가 일치된다고 생각되어 따로 표를 작성하지 않았다. Table 1과 2에서  $V_{ph}$ 는 수평방향

(코어축의 수직방향),  $V_{pv}$ 는 수직방향(코어축과 같은 방향),  $V_{pm}$ 은 두 방향속도의 평균값이며, 밀도( $\rho$ ), 공극율( $\phi$ ), 중앙값( $Md$ ), 평균값( $Mz$ ), 왜도( $Sk$ )등으로 각각 표시되었다.

한반도 주변 해저퇴적물의 음파전달속도는 조(1985)에 의해 최초로 측정되었다. 그러나 실제로는 직접측정이 아니었고 탄성과 자료로부터 음파전달속도를 간접적으로 계산하는  $T^2-X^2$  method와

Table 1. Acoustic, physical and textural parameters of the B-05 core.

Depth (cm)	V <sub>ph</sub>	V <sub>pv</sub>	V <sub>pm</sub>	ρ	Wc	φ	Gravel	Sand	Silt	Clay	Md	Mz	Sk
5	1.557	1.542	1.560				0.21	5.85	49.62	44.31	7.56	7.37	-0.12
10	1.582	1.596	1.589	1.52	46.9	71.3	0.52	5.27	42.46	51.75	8.15	7.75	-0.26
20	1.602	1.593	1.598	1.55	44.5	69.0	6.92	11.27	36.86	44.95	7.67	6.97	-0.43
30				1.54	47.7	73.4	6.14	12.30	36.70	44.87	7.62	7.01	-0.39
40	1.634	1.594	1.614	1.63	41.6	67.8	10.41	11.97	31.50	46.12	7.64	6.37	-0.51
50	1.630	1.605	1.618	1.57	45.1	70.9	8.64	15.46	31.98	43.92	7.35	6.14	-0.46
60	1.570		1.570	1.59	43.4	69.1	2.90	11.80	37.90	47.39	7.83	7.40	-0.36
70				1.63	42.0	68.5	9.62	13.33	30.12	46.93	7.68	6.28	-0.52
80				1.62	43.4	70.3	2.50	14.77	33.08	49.66	7.96	7.20	-0.44
100	1.666	1.603	1.635	1.56	44.0	68.7	5.11	11.26	34.44	49.19	7.97	6.96	-0.49
110				1.61	42.0	67.6	1.54	9.63	28.79	60.04	8.83	8.15	-0.54
120				1.57	43.2	67.8	16.50	26.54	36.48	36.98	6.91	5.75	-0.42
130	1.597	1.628	1.613	1.59	42.4	67.4	19.74	24.80	36.50	38.70	7.09	5.95	-0.44
140	1.595	1.605	1.600	1.52	47.8	72.7	12.53	17.96	37.87	44.17	7.54	6.96	-0.39
150				1.56	43.7	68.2	2.03	10.42	31.33	56.22	8.51	7.83	-0.48
160				1.52	43.2	65.6	16.84	21.88	35.45	42.67	7.35	6.20	-0.45
170				1.60	40.2	64.3	2.27	11.11	31.57	55.05	8.45	7.74	-0.48
180				1.57	43.2	67.8	3.13	13.68	37.27	45.91	7.65	7.17	-0.39

Table 2. Acoustic, physical and textural parameters of the B-11 core.

Depth (cm)	V <sub>ph</sub>	V <sub>pv</sub>	V <sub>pm</sub>	ρ	Wc	φ	Gravel	Sand	Silt	Clay	Mz	Md	Sk
10	1.592	1.551	1.540	1.52	47.8	72.6	2.46	16.27	46.32	34.95	6.54	6.94	-0.24
20				1.84	25.7	47.2	0	88.86	4.76	6.38	1.61	1.57	0.42

Ray parameter method (Bryan, 1974; 1980)를 이용하여 속도를 분석, 계산하였다. 조(1985)의 결과에 의하면 남해도 남쪽의 현생 세립질 퇴적물의 평균속도는 1.494km/s이고, 이 층의 평균 두께는 약 20m 정도인 것으로 나타났다. 비슷한 시기에 부산항 부근에서 해저면에 철제구조물을 설치하여 측정된 결과는 1.444~1.461km/s 정도로 나타났다(김·석, 1985). 그러나 이 방법은 생물교란 등의 효과에 의하여 실제의 현생 퇴적층의 속도보다 느리게 나타나므로(Richardson and Young, 1980), 실제의 음파전달속도는 1.480~1.540km/s 정도일 것으로 추정하였다(김·석, 1985).

이러한 값은 Table 1에서 제시한 1.540~1.635 km/s에 비해서는 약 4~6 낮은 값이다. 특히 Fig. 2에 표시된 김·석(1985)이 측정한 지점외의 논문에서 인용하지 않은 나머지 3개 지점의 경우도

본 연구지역과 지리적으로 근접되어 있으면서 속도는 물론이고 퇴적물의 입도와 공극율등 속도에 영향을 미칠 수 있는 다른 성질들이 유사한 것으로 나타났다. 따라서 측정오차 한계를 훨씬 넘어선 이와 같은 결과는 측정방법에 기인하는 구조적인 문제라고 볼 수 있다.

조(1985)나 김·석(1985)의 경우와 같이 탄성파를 이용하여 계산한 표층퇴적물의 속도가 주변 해수의 음파전달속도보다도 느리게 나타나는 경우가 있는데 그 이유로서 모래나 기반암 같이 속도가 큰 층위에 세립질의 clayey silt가 퇴적되는 경우 해수보다도 속도가 느려지는 sediment sound channel의 존재 가능성을 생각해 볼 수도 있으나(Hamilton, 1970), 일반적으로 Sediment sound channel은 심해에서 주로 나타나는 현상이고 대륙붕 지역에서는 존재가 의심스럽다. 더우기 본 연구에서 사용된 시

료는마지막 빙하기 후에 퇴적된 제4기 퇴적층으로 생각되기 때문에 반부유상태로 존재하는 Sediment sound channel의 속도로는 생각할 수가 없다. 참고로 Uniboom을 이용하여 동남해역(본 지역보다 약간 외양)의 퇴적층 연구결과도 약 20~30m 두께의 세립질의 홀로세 퇴적층이 존재하고 있음을 지시하고 있다(Park and Yoo, 1988).

한반도 주변 해저퇴적물의 음파전달속도는 본 연구에서 최초로 측정하였기 때문에 앞에서 제시한 탄성파에 의한 간접측정결과 외에는 비교할 수 없으므로 조직과 물리적 성질이 유사하면서 지리적으로 떨어진 해역에 분포한 퇴적물의 속도와 비교하여 자료의 정확성 여부를 객관적으로 검증하는 것이 필요하리라 생각된다. 본 연구와 유사한 방법으로 Hamilton(1980)이 측정한 북태평양 여러 지역에 분포하는 대륙붕 퇴적물의 음파전달속도의 평균값을 산출한 결과를 보면 본 지역과 유사한 clayey silt의 경우 속도가 1.549km/s, 밀도 1.49g/cm<sup>3</sup>, 공극율이 71.6%이고 silty clay의 경우는 속도가 1.520km/s, 밀도 1.42g/cm<sup>3</sup>, 공극율이 75.9%으로 본 연구결과와 잘 일치된다. 이러한 결과는 본 연구의 정확성을 입증하는 증거로서도 중요하겠지만 현재 국내에서 주사시간(travel time)으로 표시된 탄성파 자료를 층후 계산에 직접적으로 이용할 수 있으므로 더욱 중요시 된다. 물론 같은 한반도 주변 대륙붕 퇴적물이라도 지역에 따라 조직, 고결정도 등에 차이가 있기 때문에 지역적으로 약간씩 차이가 있을 것이므로 현재의 피스톤식 시추기로 최대한 투과할 수 있는 홀로세 퇴적물의 정확한 속도 구조와 층후 계산을 위해서는 더욱 많은 자료가 필요하리라 생각된다.

Table 1에서 표층에 비해 퇴적층 깊이가 깊어질수록 음파전달속도가 증가하는 것은 단순한 압력 증가에 의한 효과라기 보다는 조립질 퇴적물의 증가에 의한 조직의 변화 때문으로 생각되지만 속도 변화의 원인을 밝히는 것은 본 논문의 주제가 아니므로 추후 논하기로 한다. 다만 2m 남짓한 동일 코어내에서 최대 5% 정도의 속도변화가 있다는 사실은(평균속도의 경우) 동일반사면 내의 퇴적층의 속도가 균일하다고 가정하는 간접적인 방법(탄성파 방법)에 오차가 있음을 증명하는 자료로서 주목할 만한 결과이며 홀로세해침의 결과로 퇴적된 것으로 믿어지는 한반도 주변 현생 이토층에 대한 종래의 층후 계산에 보정을 해야할 것으로 생각된다.

## 요 약

부산항 부근에서 피스톤식 시추기로 채취된 2개의 세립질 현생퇴적물코어에 대한 음파전달속도와 다른 물리적, 퇴적학적 특성이 측정되었다. 본 연구를 위해 특별히 제작된 실험 보조장치는 성공적으로 작동하였으며, 전통적인 속도측정방법인 수은기둥을 이용한 방법과 디지털 오셀로스코우프를 이용한 시간차 방법 모두의 측정값이 측정오차 한계인 1~2% 이내인 것으로 확인됨으로써 어느 방법이라도 미고결 해저퇴적물의 속도측정에 이용될 수 있음이 증명되었다.

코어에서 직접 측정된 음파전달속도는 약 1.540~1.635km/s로서 바로 인접지역에서 탄성파를 이용하여 간접적인 방법으로 계산된 수치인 1.480~1.540km/s 보다 약 4~6% 정도 더 빠른 것으로 나타났다. 이러한 차이는 직접측정의 측정오차 한계인 2%를 훨씬 능가하는 것으로 2가지 상이한 측정방법의 근본적인 차이점에 기인한다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 기존 탄성파 자료 뿐만 아니라 장래에 수행할 각종 해상 탄성파 탐사시 층후 계산에 필수적으로 고려해야 할 사항으로서 중요성을 내포한다.

## 사 사

본 연구를 위하여 수은기둥의 모델을 대여해 준 하와이 대학 지구물리연구소(Hawaii Institute of Geophysics: HIG)의 Manghnani교수에게 감사사를 드립니다. 시료채취에 도움을 준 부산수산대학 실습선 402호 승무원들에게도 사의를 표합니다. 부산수산대학 해양과학연구소 업적번호 224.

## 참 고 문 헌

- 김성열, 석봉출. 1985. 한반도 연근해저 표층퇴적물에서의 음파전달속도와 감쇄계수. 한국해양학회지, 20, 10~21.
- 조운현. 1985. 여수 남해 해저 지층내의 탄성파 전달속도와 지층구조에 관한 연구. 부산대학교 석사학위논문, 76p.
- Birch, F. 1960. The velocity of compressional waves in rocks up to 10 kilobars. 1. J. Geophys. Res., 65, 1083~1102.
- Boyce, R. E. 1973. Appendix 1. Physical property

- methods. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. 15, U. S. Government Printing Office, 1115~1128.
- 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, 931~958.
- Bryan, G. 1974. Sonobuoy measurements in thin layers. Physics of Sound in Marine Sediment. 119~130, In L. Hampton editor. Marine Science 1. Plenum, 567p.
- Bryan, G. 1980. Hydrophone-pinger experiment. J. Acoust. Soc. Am., 68, 1403~1408.
- Folk, R. L. 1968. Petrology of sedimentary rocks. Hamphill's Austin. Texas, 154p.
- Folk, R. L. and W. C. Ward. 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. J. Sed. Petrol. 25, 3~27.
- Galehouse, J. S. 1971. Sedimentation analysis. 69~94, in Carver, R. E. editor. Procedures in sedimentary petrology. N. Y. Wiley Interscience, 653p.
- Garrison, R. E. 1981. Diagenesis of oceanic carbonate sediments. A review of the DSDP prospective. SEPM Spec. Pub. No. 32, 181~207.
- Hamilton, E. L. 1970. Sound channels in surficial marine sediments, J. Acoust. Soc. Am., 48, 1296~1298.
- Hamilton, E. L. 1980. Geoacoustic modeling of the sea floor. J. Acoust. Soc. Am., 68, 1313~1340.
- Johnston, T. C., E. L. Hamilton, R. T. Bachman, and W. H. Berger, 1978. Sound velocities in calcareous oozes and chalks from sonobuoy data; Ontong Java Plateau, Western Equatorial Pacific. J. Geophys. Res., 83, 283~288.
- Kim, D. C. 1985. Diagenetic factors controlling physical, acoustic, and electrical properties of deep-sea carbonate sediments. Ph. D. Dissertation, Univ. Hawaii Honolulu, Hawaii, U. S. A.
- Kim, D. C., M. H. Manghnani and S. O. Schlanger. 1985. The role of diagenesis in the development of physical properties of deep-sea carbonate sediments. Mar. Geol., 69~91.
- Kolsky, H. 1953. Stress waves in solids. Clarendon Press, Oxford, Great Britain.
- Maynard, G. L. 1973. Seismic wide-angle reflection and refraction investigation of the sediments on the Ontong-Java Plateau. Ph. D. Dissertation, Univ. Hawaii Honolulu, Hawaii, U. S. A.
- Milholland, P., M. H. Manghnani, S. O. Schlanger and G. H. Sutton, 1980. Geoacoustic modeling of deep-sea carbonate sediments. J. Acoust. Soc. Am., 68, 1531~1360.
- Park, S. C., and D. G. Yoo, 1988. Depositional history of Quaternary sediments on the continental shelf off the southeastern coast of Korea (Korea Strait). Mar. Geol., 79, 65~75.
- Richardson, M. D., and O. K. Young, 1980. Geoacoustic models and bioturbation. Mar. Geol., 38, 205~218.
- Sears, F. M., and B. P. Bonner, 1981. Ultrasonic attenuation measurements by spectral ratios utilizing signal processing techniques. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. GE-19, 55~59.

1989년 5월 31일 접수

1989년 7월 4일 수리