

## 아크릴 및 스테인리스강 시험편의 P-, S-파 속도 산출에 미친 영향 요인 고찰

이상규 · 이태종\*  
한국지질자원연구원

### A study on the Factors Affected on the P- and S-wave Velocity Measurement of the Acrylic and Stainless Steel Core

Sang-Kyu Lee and Tae Jong Lee\*

*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)*

**요 약:** 암석시료에 대한 음파 속도측정의 정확성을 검증하고 정밀한 측정을 위한 기초적인 실험의 일환으로 아크릴과 스테인리스강 재료의 시료에 대하여 길이와 축하중을 달리하여 각각에 대해 3회씩 측정된 총 864 경우에 대하여, 시험편을 통과한 초동 주시를 측정하고 분석하였다. 축하중이 가해진 상태에서의 S-파 측정은 P-파에 비해 측정에 어려움이 있었으며 이에 따라 반복측정, 길이, 축하중에 의한 편차도 S-파가 훨씬 크게 나타났다. 또한, 재질에 따라서는 스테인리스강 시험편보다는 아크릴 시험편의 초동주시 편차가 약 2배 정도 양호하게 나타났으며 이는 아크릴 시험편의 경우가 트랜스듀서와 시험편 간의 접촉 coupling이 안정적이며 또한 동일한 시간 분해능이나 유사한 전기적 잡음에 비하여 초동 주시가 길기 때문으로 판단된다. 실험결과, 아크릴 시험편과 스테인리스강 시험편의 탄성과 속도를 측정할 때는 60~90 mm 정도의 길이를 갖는 시험편을 20 kg (27.7 N/cm<sup>2</sup>)~30 kg (41.6 N/cm<sup>2</sup>) 내외의 축하중 하에서 측정하는 것이 가장 좋으며, 스테인리스강 시험편의 S-파 속도는 길이 50 mm 이하의 시험편을 사용하여 측정해야 한다. 이러한 실험 결과는 암석 코어의 속도 측정시 시스템 지연의 측정 및 보정에 활용될 수 있을 것이다.

**주요어:** 아크릴, 스테인리스강, P-파속도, S-파속도, 축하중, 코어길이

**Abstract:** A total of 864 measurements for P- and S- wave velocity of acrylic and stainless steel core samples have been performed with respect to their lengths and axial load applied. S-wave velocity measurement was much harder than P-wave velocity, so that it showed higher deviation in measured S-wave velocity with respect to repeated measurement, length of the cores, and the axial load applied. Velocity measurements for acrylic cores showed more stable and less than half of the variation between the measurements than the stainless steel cores. This seems to be come from better coupling between the transducers and acrylic cores than stainless cores, and from larger value of the first arrival time in a similar system noise environments. From the analysis of the 864 measurements, it is recommended that the length of the core be 60~90 mm, axial load between 20 kg (27.7 N/cm<sup>2</sup>) and 30 kg (41.6 N/cm<sup>2</sup>) for measurement of wave velocity of the acrylic and stainless steel cores. Especially for measuring S-wave velocity of stainless steel core, core length should be less than 50 mm, otherwise it will be affected by mode conversion or others. These results can be used in measurement and correction for system delay in wave velocity measurement for rock cores.

**Key words:** acrylic, stainless steel, P-wave velocity, S-wave velocity, axial load, length of core

## 서 론

암석코어에 대한 실내 탄성과 속도의 정확한 측정은 지반을 구성하는 암석의 탄성적 성질을 예측하거나 탄성과 탐사나 물리검층 자료의 해석을 위해 매우 중요하다. 이러한 중요성에

따라 국내에서도 기존에 많은 연구자들에 의해 각기 다른 시스템과 측정방식을 통해 탄성과 속도측정 연구가 이루어져 왔다(이상규 등, 2010; 성낙훈, 2010; 서만철 등, 2000; 권병두와 허식, 1988; 권병두와 진홍성, 1987; 김영화 등, 1997; 김영화와 홍순호, 1990; 김영화, 1983).

이때, 측정되는 탄성과의 속도는 펄스 발생기에서 발생하는 펄스의 고유주파수와 암석시료의 입자의 크기, 코어의 길이 및 직경, 그리고 파장 등에 의해 오차를 달리하게 되며 또한 코어와 송수신 트랜스듀서간의 밀착정도에 따라 달라지게 된다 (ASTM D-2845-08; ISRM, 1977; 한국암반공학회, 2005). 그

2011년 9월 26일 접수; 2011년 10월 24일 수정; 2011년 10월 30일 채택;  
\*Corresponding author  
E-mail: megi@kigam.re.kr  
Address: KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu,  
Daejeon 305-350, Korea

럼에도 불구하고 기존의 연구 결과는 코어시료의 직경, 길이, 사용한 고유주파수 등에 대해 일부만 기술되어 있어 측정된 탄성과속도의 정확도를 검증하기 어려운 경우가 많다. 또한, 밀착력에 대해서는 기존 연구결과에서는 언급된 것을 찾아보기 어려우며 일반적으로 코어와 트랜스듀서를 손으로 눌러 측정하는 것이 대부분이다. 이러한 방식은 정성적인 방법으로 매 측정시마다 코어-트랜스듀서간 밀착력은 달라질 수밖에 없을 것이다. 반면, ISRM 표준시험법에서는 밀착압력을 10 N/cm<sup>2</sup> 정도로 할 것을 추천한다.

본 연구에서는 시험편의 길이, 속도, 밀착력 등이 속도측정의 정밀도에 미치는 영향을 고찰하고자, 우선 이상규 등(2010)에서 개발된 탄성과 속도 자동 연속측정 장치를 정량적이며 일정한 일축 압력을 가한 상태에서 탄성과 속도의 측정이 가능하도록 개선하였다. 이를 이용하여 일정한 축하중을 유지하면서 길이가 서로 다른 아크릴과 스테인리스강(stainless steel)으로 만든 원주형 시험편의 축하중 변화에 따른 P-, S- 파 속도를 측정하고 그 특성을 분석하였다.

**시험편과 실험 장치**

**시험편**

실험에 사용한 시험편은 아크릴과 스테인리스강의 2가지 재료로 그 길이가 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 mm인 원주형으로 성형한 것이다. 성형 후에 시험편의 길이를 버니어 캘리퍼스로 소수점 이하 둘째 자리까지 5회 측정한 후 평균하여 속

도계산에서는 소수점 이하 셋째 자리까지 사용하였다. 이때, 코어의 직경은 30 mm 이다.

**실험 장치**

측정을 위한 실험장치는 원주형 시험편을 통과한 초동의 주행시간을 자동으로 연속하여 발췌하고 기록할 수 있는 기존의 실험장치(이상규 등, 2010)를 개선하여 사용하였는데, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

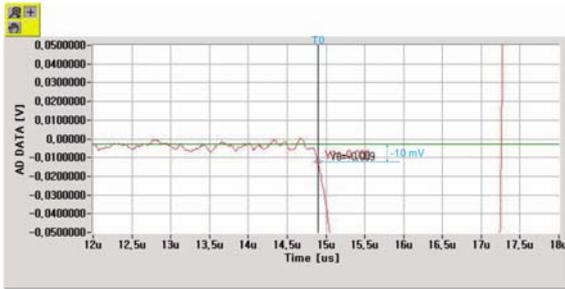
**코어 홀더와 load cell 및 DPI의 통합**

초동 주시를 발췌하는 동안 시험편과 송·수신 트랜스듀서간의 축하중을 하부 압력셀(load cell)에 의하여 감지하고 DPI(digital processor indicator)에 표시된 하중을 보며 수동으로 조절하던 코어 홀더를 일체형으로 통합하고 자동화하였다. 시험편과 상·하 트랜스듀서가 처음 접촉하는 직전의 상태를 기준으로 하여 상부 트랜스듀서의 수직 변위와 이에 따른 하중을 모니터링하면서, 실측 하중이 원하는 하중에서 일정 수준 이상 벗어날 때 스텝모터로 하향 수직변위를 추가함으로써 일정 하중을 자동으로 유지하도록 하였다.

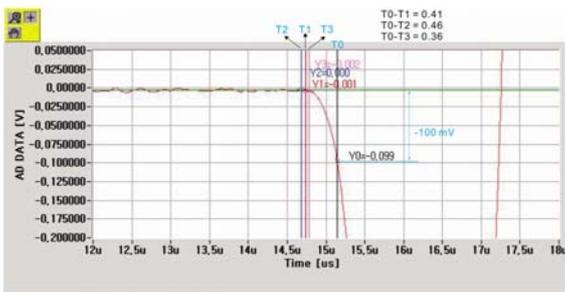
**DAS**

DAS(data acquisition system)로는 12bit 해상도로 2개 채널 아날로그 입력이 가능한 National Instruments사의 PCI-5124를 사용하였다. 각 채널은 200 MHz 샘플링이 가능하도록 샘플링 간격을 5 nano-sec로 하여 기존의 장치 보다 20배 향상시켰으

(a) first arrival picking (Lee et al (2010))



(b) first arrival picking (this study)



(c) picking results

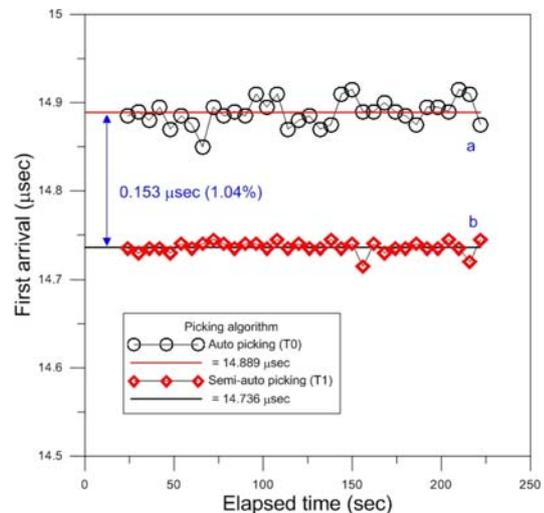


Fig. 1. Two different methods for picking the first arrival (a & b) and comparison of their results (c).

며 LabView를 이용한 프로그램으로 구동한다.

**초동주시 발체 방법**

Fig. 1은 이 연구에서 사용한 초동 주시의 발체 방법(b)을 기존의 방법(a) (이상규 등, 2010)과 비교하여 보인 그림으로서, 길이가 40 mm인 아크릴 시험편을 80 kg (110.9 N/cm<sup>2</sup>)의 축하중을 가하면서 P-파의 초동 주시를 측정한 것이다. (a)는 초동 주시를 발체 할 때 마다 수시로 변하는 dc 오프셋선(초록색 수평선)을 기준으로 하여 평균 잡음 수준을 상회하는 gap을 지정 (여기서는 -10 mV) 함으로서 초동 주시(T<sub>0</sub>)를 발체하는 방법이다. 이때 gap을 적절히 지정함으로써 초동 주시를 완전자동으로 발체할 수 있으나 gap이 클수록 발체한 초동 주시가 실제보다 길게 측정된다. 또한 발체 지점, T<sub>0</sub>는 잡음으로 인해 진폭이 불안정하므로 초동 주시 또한 편차가 크며(c) 참조)잡작스러운 전기적 잡음이 발생하면 엉뚱한 지점을 발체할 수도 있다. (b)는 이러한 단점을 보완하기 위해 고안된 방법으로, 파형의 진폭이 비교적 안정되어 있는 위치에 gap(이 그림에서는 -100 mV)을 지정하고 여기서부터 초동 발체 지점(T<sub>1</sub>)을 수동으로 찾아가는 것이다. T<sub>1</sub>을 잘 선택했다면 그 때의 진폭은 샘플링 때 마다 ± 잡음수준 내에서 진동할 것이며 일정 시간동안 측정된 값을 평균하면 0에 가까운 값(cross over point)을 얻게 된다. T<sub>1</sub> 근처에서 T<sub>2</sub>와 T<sub>3</sub>를 추가로 지정하여 각각의 진폭을 비교하면 초동주시를 보다 정확하게 발체할 수 있다. Fig. 1(c)에는 (a), (b)의 방법으로 발체한 초동주시를 그 평균값과 함께 나타내었다. 그림에서 여러 번 반복해서 발체되는 초동주시는 새로운 방법에 의한 초동발체가 안정적인 반복성을 보임을 확인할 수 있다. 한편, 초동 주시의 평균이 14.889 μsec 인 (a)가 14.736 μsec 인 (b) 보다 0.153 μsec (+1.04%) 길게 발체되며 평균값(실선)으로부터의 편차도 큰 것을 볼 수 있다. 발체 방법에 따른 이 차이는 시스템 지연(system delay)을 산출할 때에 동일한 발체 방법을 사용하여 보정하면 제거할 수 있게 된다.

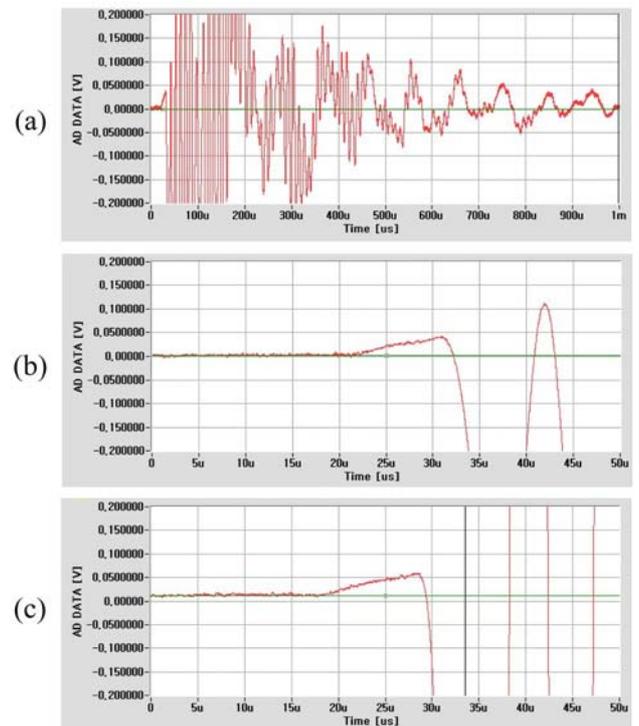
**예비실험**

**축하중과 초동 주시**

100 kHz의 고유주파수를 갖는 일본 OYO 사의 S-파 트랜스듀서를 이용하여 아크릴 시험편과 트랜스듀서 간 밀착력을 높이기 위한 축하중을 증가시키면서 길이가 40 mm 인 원주형 아크릴 시험편을 통과하는 S-파의 파형을 모니터링하고 그 일부를 Fig. 2에 나타내었다. 축하중이 5 kg (6.9 N/cm<sup>2</sup>)에서부터 80 kg (110.9 N/cm<sup>2</sup>)까지 증가하는 동안에 S-파 crossover까지의 주행시간이 약 33 μsec (Fig. 2b)에서부터 29 μsec (Fig. 2c)까지 4 μsec 정도 감소하는 것을 볼 수 있다. 축하중이 증가할 때 아크릴 시험편의 길이방향으로의 감소가 무시할

수 있을 정도라고 가정하면 이와 같은 주행시간의 감소는 S-파의 속도가 상대적으로 1,210 m/sec 에서 1,380 m/sec로 170 m/sec 정도 빨라지는 효과와 같다.

한편, 축하중의 증가에 따라 시험편의 길이는 감소할 수 있으며, 이러한 길이의 감소는 측정된 초동주시로부터 시험편의 속도계산에 있어서 매우 중요할 것이다. Fig. 3a는 길이가 80 mm인 아크릴 시험편을, 3b는 아크릴 시험편 없이 상·하 트랜스듀서를 직접 접촉시키고 축하중을 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 kg 순으로 증가시키면서 측정한 S-파 초동주시를 동일한 시간대의 하중, 변위와 함께 보인 것이다. 상·하 트랜스듀서를 직접 접촉한 경우에 축하중이 5~80 kg까지 증가하는 동안 하중 축은 아래로 0.761 mm 변위하였고 초동 주시는 0.935 μsec로부터 0.05 μsec 까지 0.885 μsec 변한 반면, 80 mm 길이의 아크릴 시험편의 경우에는 하중 축이 아래로 0.76 mm 변위하였고 초동 주시는 61.846 μsec로부터 58.181 μsec 까지 3.665 μsec 감소하였다. 축하중의 증가에 따른 변위는 두 경우가 거의 일치하는 결과로, 축하중이 80 kg까지 증가하여도 아크릴 시험편의 길이에는 변화가 없다는 것으로 해석할 수 있으며, 축하중은 밀착력에 주로 기여하는 것으로 볼 수 있다. 또한, 상·하 트랜스듀서를 직접 접촉하여 하중을 증가시킬 때도 초동 주시가 감소하는 것은 축하중 변화에 따라서 시스템 지연(system delay)도 변한다는 것을 의미한다.



**Fig. 2.** Examples of recorded waveform with axial load of (a) 4.91 kg (b) 5 kg, and (c) 80 kg. Note that the first arrival differs significantly between (b) and (c).

**초동 주시의 반복성**

발체한 초동 주시의 반복성을 확인하기 위하여 축하중을 Fig. 3과 같이 단계적으로 변화시키면서 길이가 다른 아크릴과 스테인리스강 시험편의 P-, S-파 초동 주시를 각각 3회씩 측정하고 비교하였다.

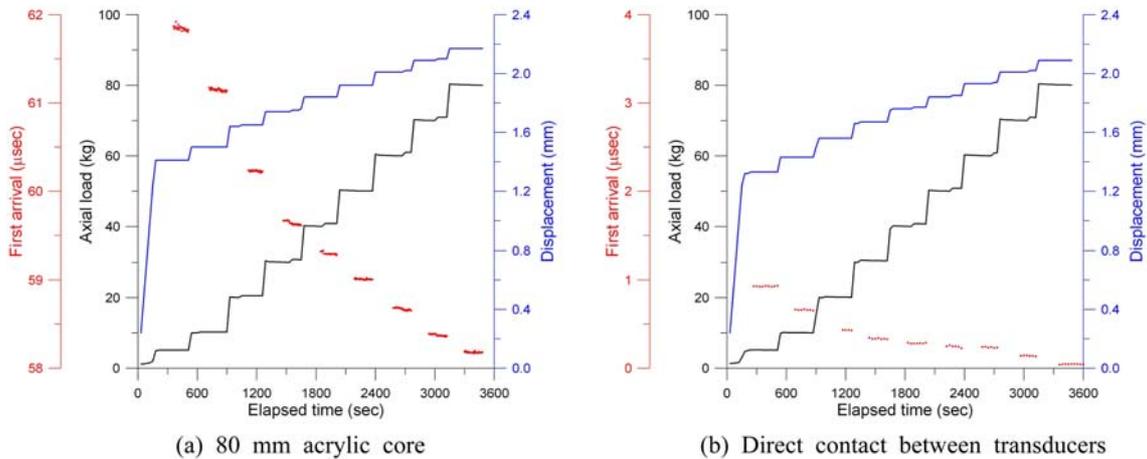
Table 1에는 아크릴 시험편의 S-파 초동 주시를 3회 측정했을 때 그 편차의 폭을 백분율로 보였으며, Fig. 4에는 반복성이 제일 양호한 길이가 70 mm(a)인 경우와 반복성이 이례적으로 나쁜 길이 40 mm(b)의 경우를 비교하여 보인 것이다. 전자는 하중 변화에 따라서 0.11~0.29%의 편차를 보이는 반면, 후자는 1.39~2.12%의 편차를 보인다. 시험편의 길이와 축하중에 따른 총 72 경우 중에서 3회 측정의 편차 폭이 1% 이상인 경우는 12 경우로, 그 평균은 1.6%이며, 편차 폭이 1% 미만인 경우는 60 경우로 평균은 0.4%이다. 축하중이 가해진 상태에서의 S파 측정이 모드 변환 등에 의해 매우 어려운 것 (ASTM D2845-08)을 감안한다면 어떠한 경우에도 반복성은 매우 뛰어나다고 할 수 있다.

아크릴 시험편의 P-파에서는 반복성이 좋은 90 mm의 경우

에 0.06~0.19%의 편차 폭을 나타내고, 반복성이 나쁜 80 mm의 경우에는 0.5~0.65%의 편차 폭을 보인다(Table 2 참조). 총 72 경우에 대해서 3회 측정의 편차 폭이 0.5% 이상인 경우는 17 경우로 평균 0.58%이며, 편차 폭이 0.5% 미만인 경우는 55 경우로 평균은 0.24%이다.

한편, 스테인리스강 시험편에 대하여는 S-파 초동 주시 중에 반복성이 제일 양호한 길이 100 mm인 경우에 0.08~1.47%, 반복성이 나쁜 길이 30 mm인 경우에 하중 변화에 따라서 0.32~8.14%의 편차 폭을 보였다. 총 72 경우 중에서 3회 측정의 편차 폭이 2% 이상인 경우는 17 회로 평균 3.7%이며, 편차 폭이 2% 미만인 경우는 55 경우로서 평균 1.07%이다. 스테인리스강 시험편의 P-파에서는 반복성이 좋은 100 mm의 경우에는 0.06~0.32%의 편차 폭을 나타내고, 반복성이 나쁜 30, 40 mm의 경우는 0.43~1.36%의 편차 폭을 보인다. 총 72 경우 중에서 3회 측정의 편차 폭이 0.8% 이상인 경우는 18 경우로 평균 1.03%이며, 편차 폭이 0.8% 미만인 경우는 54 경우로 평균 0.41%이다.

3회씩 측정된 초동 주시의 편차 폭은 P-, S-파 모두에서 스



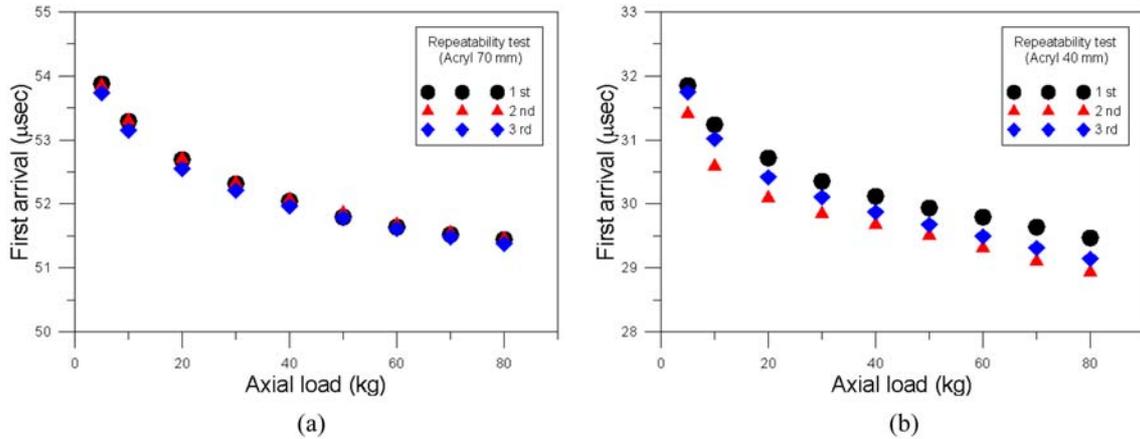
**Fig. 3.** First arrival time and displacement change with respect to axial load applied.

**Table 1.** Per-cent deviation of S-wave first arrival picks for acrylic specimen when measured three times in the same condition and procedure.

Length (mm)	Load (kg)							
	30	40	50	60	70	80	90	100
5	0.63	1.39	0.33	0.33	0.26	0.48	0.51	0.30
10	0.64	2.12	0.20	0.45	0.29	0.40	0.34	0.17
20	0.63	2.06	0.29	0.12	0.29	0.26	0.42	0.19
30	0.83	1.71	0.40	0.14	0.22	0.08	0.42	0.40
40	0.73	1.50	0.46	0.27	0.20	0.22	0.51	0.57
50	0.25	1.49	0.56	0.41	0.14	0.19	0.68	0.76
60	0.21	1.62	0.70	0.39	0.11	0.16	0.81	0.86
70	0.63	1.80	0.65	0.27	0.14	0.19	1.07	0.87
80	1.19	1.86	0.58	0.21	0.14	0.16	1.30	0.88

**Table 2.** Per-cent deviation of P-wave first arrival picks for acrylic specimen when measured three times in the same condition and procedure.

Length (mm)	Load (kg)							
	30	40	50	60	70	80	90	100
5	0.32	0.43	0.72	0.17	0.53	0.65	0.16	0.35
10	0.12	0.01	0.59	0.45	0.39	0.52	0.19	0.3
20	0.13	0.05	0.4	0.35	0.38	0.55	0.14	0.14
30	0.08	0.1	0.45	0.43	0.32	0.62	0.13	0.13
40	0.22	0.23	0.62	0.45	0.37	0.60	0.12	0.11
50	0.16	0.14	0.62	0.46	0.39	0.57	0.10	0.09
60	0.11	0.21	0.58	0.46	0.42	0.55	0.07	0.07
70	0.14	0.24	0.53	0.52	0.43	0.50	0.06	0.14
80	0.18	0.18	0.48	0.47	0.47	0.54	0.07	0.12



**Fig. 4.** Repeatability test for S-wave first arrival picks for the acrylic specimen of lengths (a) 70 mm and (b) 40 mm, which showed the best and the worst repeatability, respectively.

테인리스강 시험편이 아크릴 시험편 보다 2배 정도 크며, 따라서 아크릴 시험편의 반복성이 스테인리스강 시험편 보다 양호하다. 이것은 아크릴 시험편의 경우가 트랜스듀서와 시험편 간의 접촉 coupling이 안정적이며 또한 일정한 전기적 잡음에 비하여 상대적으로 초동 주시가 길기 때문으로 해석된다.

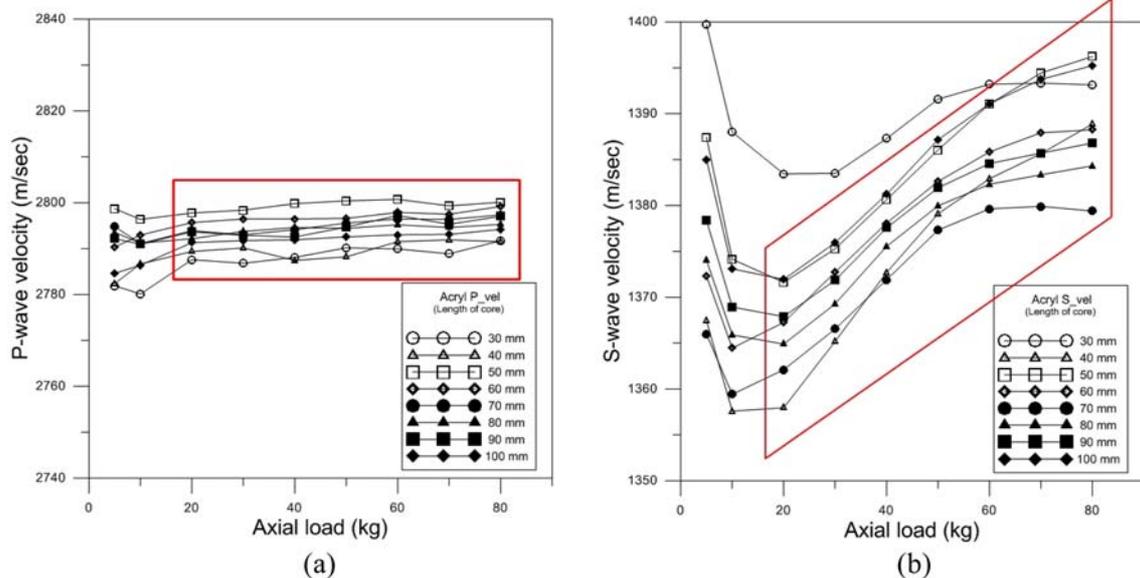
**P-, S-파 속도 산출에 미친 영향 요인**

아크릴과 스테인리스강 재료의 시료에 대하여 길이와 축하중을 달리한 총 144 경우와 각각에 대한 P-파와 S-파 속도를 각 3회씩 반복측정 하여 총 864회의 실험을 실시하였다. 이때, 초동 주시는 경우의 수마다 6초 간격으로 약 5분간 측정 한 후에 자료의 질이 좋은 구간을 평균하여 사용하였다. Table 3은 이러한 실험조건을 정리한 것이다.

**Table 3.** List of parameters for total of 864 experiments.

Parameter	Number of parameters	Remarks
1. seismic velocity	2	P- or S-wave
2. type of core	2	acrylic or stainless steel
3. core length	8	30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 mm
4. axial load	9	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 kg
5. repeat measurement	3	

초동 주시로부터 시스템 지연을 뺀 보정주시로 시험편의 실제 길이를 나누어 얻은 탄성파 속도를 보면, 아크릴 시험편의 길이와 축하중이 모두 변할 때 3회 측정의 경우에서 P-파는 2787 ~ 2810 m/sec, S-파는 1353 ~ 1400 m/sec의 속도를 나타내어 각각 0.83%, 3.47%, 스테인리스강 시험편에서의 P-파는



**Fig. 5.** Measured P- and S-wave velocity for acrylic cores of various length with respect to the axial load applied.

5623 ~ 5740 m/sec, S-파는 2849 ~ 3376 m/sec의 속도를 나타내어 각각 2.04%, 18.50%의 편차를 보였다.

**축하중의 영향**

Table 3와 같이 길이 30 ~ 100 mm인 아크릴 시험편에 대하여 축하중을 달리하며 얻은 1 회의 P-, S-파 속도를 Fig. 5와 Table 4, 5에 정리하였다. 동일한 길이일 경우에 축하중에 따라서 P-파는 0.14 ~ 0.43%, S-파는 1.23 ~ 2.28% 편차를 보이며, 3회 측정의 전 경우에는 P-파는 0.25 ~ 1.26%, S-파는 1.99 ~ 3.54%로 확대된다. 20 kg 이상의 하중에서 P-파는 비교적 균일한 속도(2787 ~ 2810 m/sec(편차: 0.83%))를, S-파는 증가하는 속도(1353 ~ 1400 m/sec(편차: 3.47%)) 특성을 보인다(Fig. 5).

스테인리스강 시험편은 동일한 길이일 경우에 축하중에 따라서 3회 측정의 전 경우에서 P-파는 0.92 ~ 2.05%, S-파는

13.23 ~ 16.0%의 편차를 보인다. 하중이 20 kg 이상에서 P-파는 5663 ~ 5738 m/sec, 30 ~ 60 mm 길이의 S-파는 2849 ~ 3376 m/sec의 속도를 나타내어 각각 1.32%, 18.50%의 편차를 보인다. P-파의 경우에 일부 길이가 짧은 시험편(30, 50 mm)의 속도 분포는 중앙값으로부터 멀어진다(Fig. 6a 참조). 이것은 실험장치의 동일한 시간 분해능(5 nano-sec; 따라서 속도 분해능)에 비하여 발췌된 주기가 상대적으로 짧기 때문에 편차가 커지는 것으로 해석된다.

스테인리스강의 S-파는 시험편 길이가 70 mm 이상이면 시험편 고유의 S-파 속도를 제시하지 못하고 30 ~ 60 mm까지의 길이에서도 S-파는 하중 변화에 따라서 편차가 크며(최대: 50 mm 때 16%), 하중이 증가할수록 길이 변화에 따른 속도 편차도 증가하는 경향을 보인다(Fig. 6b 참조). 스테인리스강 시험편의 P-파, S-파 모두 아크릴 시험편 보다 속도의 편차가 매우 크다.

**Table 4.** P-wave velocity for acrylic specimen with various axial loads and core lengths at first trial.

Length (mm) \ Load (kg)		Length (mm)								Velocity change due to length change
		30	40	50	60	70	80	90	100	
Load (kg)	5	2782	2782	2799	2790	2795	2794	2792	2785	0.61
	10	2780	2787	2796	2793	2791	2791	2791	2786	0.58
	20	2788	2789	2798	2796	2794	2792	2794	2791	0.36
	30	2787	2790	2798	2796	2793	2794	2793	2792	0.39
	40	2788	2787	2800	2796	2794	2795	2793	2792	0.47
	50	2790	2788	2800	2797	2796	2794	2795	2793	0.11
	60	2790	2792	2801	2798	2796	2795	2797	2793	0.29
	70	2789	2792	2799	2798	2796	2795	2795	2793	0.36
	80	2792	2792	2800	2799	2797	2795	2797	2794	0.29
Velocity change due to axial load change	0 ~ 80	0.43	0.36	0.18	0.32	0.21	0.14	0.21	0.32	
	20 ~ 80	0.18	0.18	0.11	0.11	0.14	0.11	0.14	0.11	

**Table 5.** S-wave velocity for acrylic specimen with various axial loads and core lengths at first trial.

Length (mm) \ Load (kg)		Length (mm)								Velocity change due to length change
		30	40	50	60	70	80	90	100	
Load (kg)	5	1400	1367	1387	1372	1366	1374	1378	1385	1.54
	10	1388	1358	1374	1364	1359	1366	1369	1373	1.18
	20	1383	1358	1372	1367	1362	1365	1368	1372	1.03
	30	1384	1365	1375	1373	1367	1369	1372	1376	0.81
	40	1387	1373	1381	1378	1372	1376	1378	1381	0.66
	50	1392	1379	1386	1383	1377	1380	1382	1387	0.73
	60	1393	1383	1391	1386	1380	1382	1385	1391	0.80
	70	1393	1386	1394	1388	1380	1383	1385	1394	1.01
	80	1393	1389	1396	1388	1379	1384	1387	1395	1.23
Velocity change due to axial load change	5 ~ 80	1.23	2.28	1.75	1.76	1.55	1.39	1.39	1.68	
	20 ~ 80	0.72	2.28	1.75	1.54	1.32	1.39	1.39	1.68	

축하중이 아크릴 시험편에서는 20 kg 보다 클 때, 스테인리스강 시험편에서는 30 kg 보다 크면 축하중의 일부가 시험편에 수직 응력으로 작용하여 S-파 속도를 증가시킨다.

**시험편의 길이**

Fig. 7은 시험편의 길이가 30 mm에서부터 100 mm까지 변할 때, 축하중 40 kg에서 측정된 초동 주시를 도시한 것으로서 a는 아크릴 시험편과 b는 스테인리스강 시험편의 P-파와 S-파를 나타낸다. 직선 접합으로 얻은 P-파의 속도는 아크릴이 2794 m/sec, 스테인리스강이 5680 m/sec 이며, 아크릴의 S-파 속도는 1378 m/sec 이다. 그러나 스테인리스강의 S-파는 하나의 직선으로 접합되지 않고 시험편의 길이가 60 mm 이하에

서는 3206 m/sec, 80~100 mm에서는 9223 m/sec의 기울기를 갖는 직선에 접합된다. 이와 같은 현상은 축하중이 40 kg인 경우 뿐만 아니라 5~80 kg 전체에서 관찰할 수 있다. 이는 특정한 경우에는 시험편의 길이가 길면 정확한 S-파 속도를 산출할 수 없음을 보이는 것이다. 이는 80 mm 이상에서는 시험편의 길이가 길어서 모드변환 등에 의한 조화파가 먼저 도달한 것으로 추측되며 따라서 시험편의 길이는 60 mm 보다 짧게 해야 한다. 길이가 긴 스테인리스강 시험편의 S-파 측정에서 나타나는 이러한 현상에 대해서는 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

아크릴 시험편에 가한 축하중이 변할 때, 시험편 길이 변화에 따른 P-, S-파의 속도를 Fig. 8a, b에 나타내었다. 시험편 길

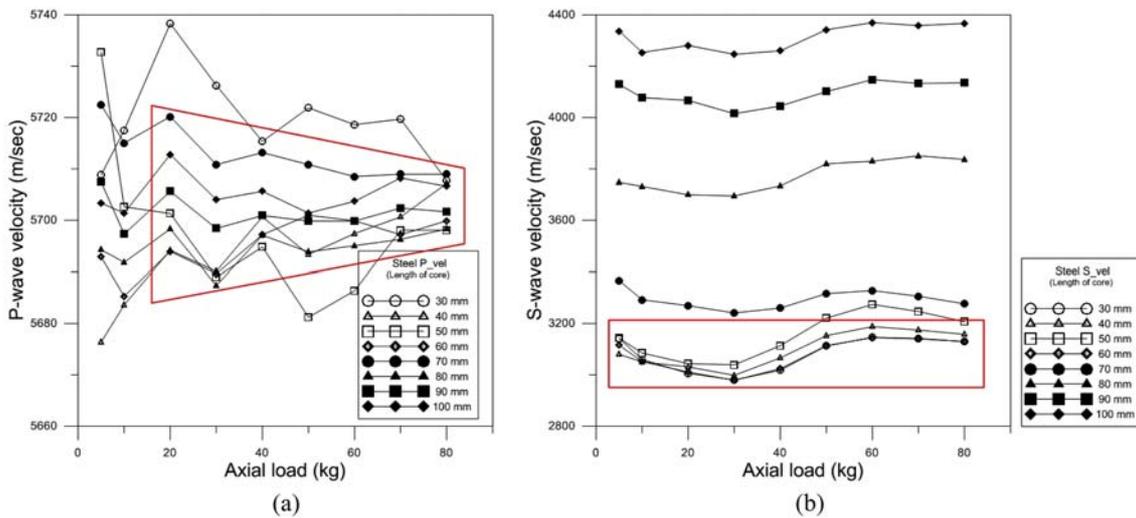


Fig. 6. Measured P- and S-wave velocity for stainless steel cores of various length with respect to the axial load applied.

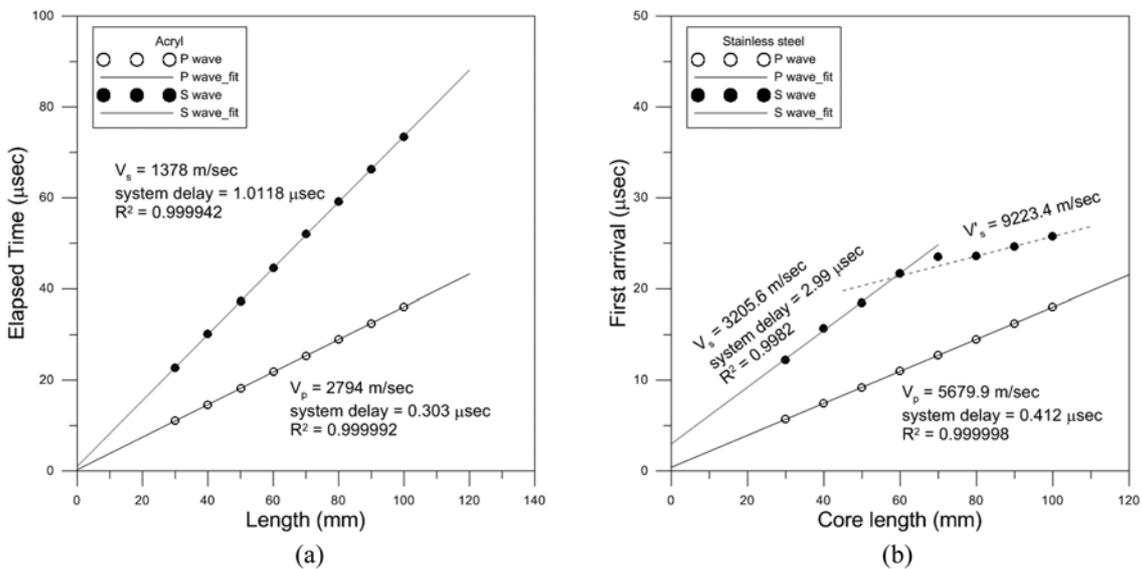


Fig. 7. Measured P- and S-wave velocity for (a) acrylic and (b) stainless steel cores with respect to the length of the cores at 40 kg of axial load.

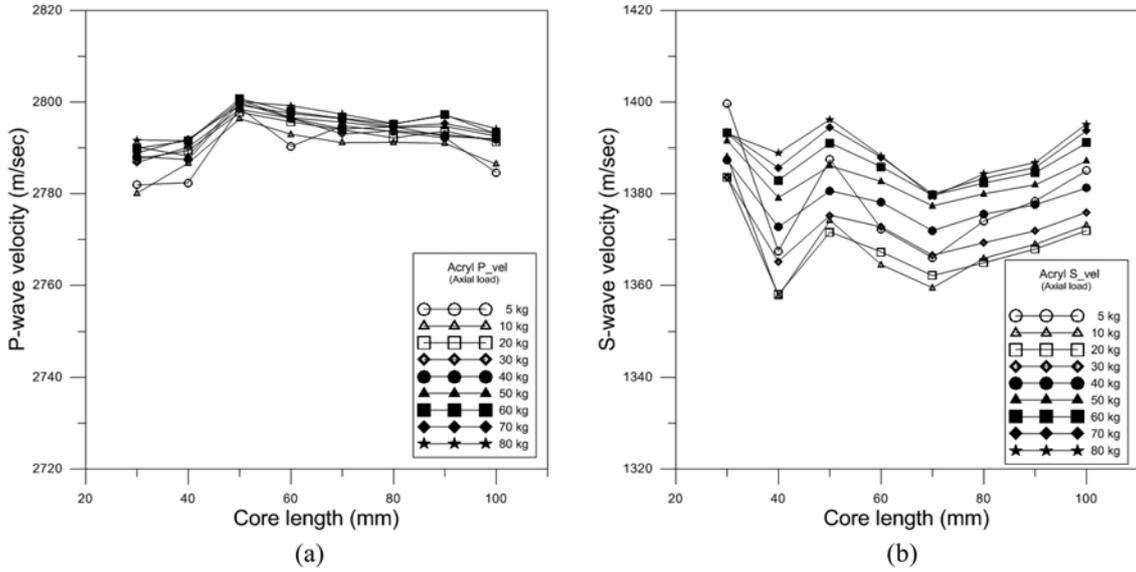


Fig. 8. Measured P- and S-wave velocity for acrylic cores under various axial loads with respect to the length of the cores.

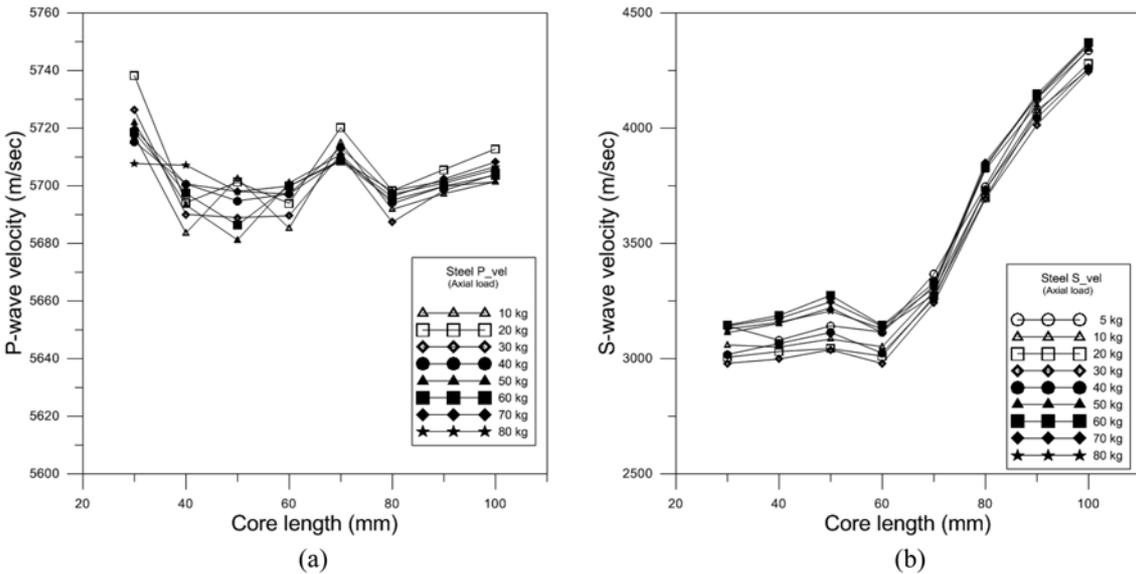


Fig. 9. Measured P- and S-wave velocity for stainless steel cores under various axial loads with respect to the length of the cores.

이 변화에 따른 특징은 규칙적이지 않으며 20 kg 이상의 동일한 하중일 경우에 시험편의 길이에 따라서 P-파는 0.47%까지, S-파는 1.23%까지 변할 수 있다(Table 4, 5 참조). 이것은 동일한 길이에서 20~80 kg 하중 변화 때의 P-파의 편차 0.18% 보다는 크며 S-파의 편차 2.28% 보다는 작은 수준이다. 3 회 측정된 결과를 종합하면, 동일한 하중일 경우에 시험편의 길이에 따라서, P-, S-파는 각각 0.61~1.19%, 2.14~2.93%의 편차를 보이며 시험편의 길이가 60~70 mm 일 때 상대적으로 균일한 속도를 얻을 수 있다.

스테인리스강의 경우(Fig. 9a, b), 시험편 길이 변화에 따른 P-파 속도는 축하중이 5 kg인 경우를 제외하면 비교적 균일한 분포를 보이며, 길이 70 mm의 P-파와, 길이 50 mm의 S-파에

서 보이는 속도 불균질성은 전기적 잡음 등의 체계적(systematic)이지 않은 요인인 것으로 판단된다. P-파는 0.77%까지, S-파는 60 mm 길이까지에서 4.10%까지 변할 수 있다. 3회 측정된 결과를 종합하면, 동일한 하중일 경우에 시험편의 길이에 따라서, P-, S-파는 각각 0.62~1.94%, 3.33~18.5%의 편차를 보인다. P-파 속도는 특별한 경우(스텐-3rd, 70 mm)를 제외하면 시험편의 길이가 70~90 mm 일 때 상대적으로 균일한 속도를 얻을 수 있으나 안정적인 S-파 속도를 얻을 수 있는 시험편 길이는 확실하지 않다.

시스템 지연(system delay)

축하중이 5 kg에서부터 80 kg까지 변할 때, 아크릴 시험편

의 길이 변화에 따른 P-, S-파의 초동 주시를 도시한 후에 직선 fitting으로 얻은 속도와 시스템 지연을 산출하여 Table 6에 정리하였다.

축하중이 5 kg에서부터 80 kg까지 증가함에 따라서 아크릴 시험편의 P-파 속도는 2790 m/sec에서 부터 2796 m/sec까지 0.22% 정도 미약하게 증가하며, S-파 속도는 하중이 5 kg인 때를 제외하면 1368 m/sec에서부터 1389 m/sec까지 1.54% 증가한다. 반면, P/S 속도 비는 하중이 20~80 kg인 구간에서 2.042~2.013으로 감소하는 경향이 있다. 선행 연구(Hall *et al.*, 2002)에서의 하중을 확인할 수 없어서 정확한 비교는 어렵

지만, 이 연구에서의 P/S 속도 비가 선행 연구에서보다 0.65 ~ 2.10% 크게 나타난다. 축하중이 20 kg 이상으로 증가함에 따라서 아크릴 시험편의 P-, S-파 속도가 미약하나마 증가하는 것은 축하중이 트랜스듀서와 아크릴 시험편 간의 밀착력에만 기여하지 않고 일부가 아크릴 시험편에 응력으로 작용하여 속도 증가에 기여한 것으로 판단된다.

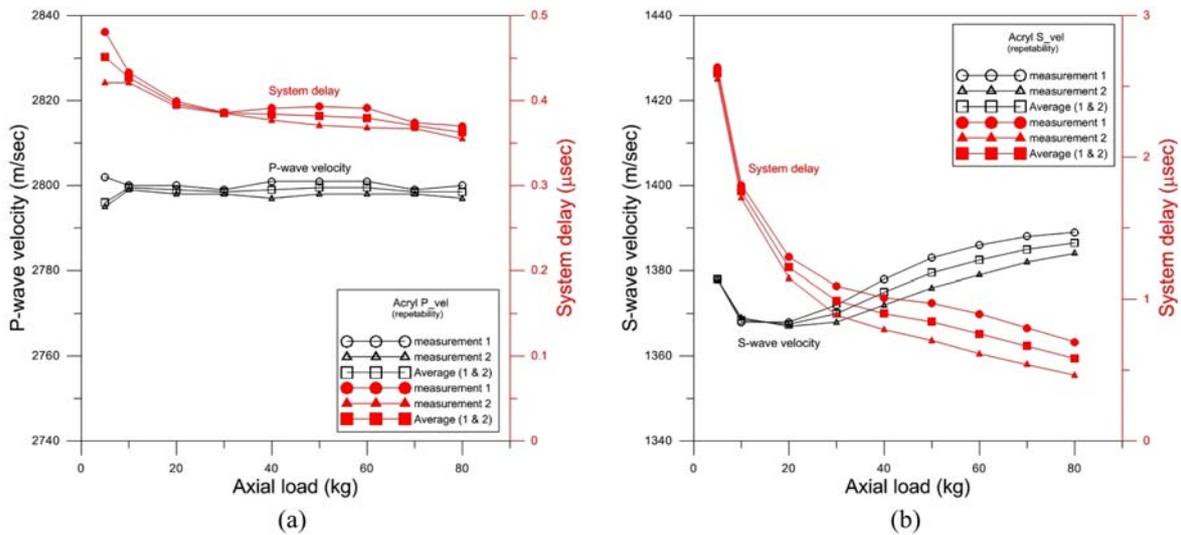
스테인리스강 시험편에 대한 실험 결과도 같은 방법으로 Table 7에 정리하였다. 5~80 kg의 축하중에 대하여 P-파 속도는 5698~5707 m/sec까지 0.16% 정도의 편차를 갖고 분포하고 S-파 속도는 3000~3190 m/sec까지 6.33%, P/S 속도

**Table 6.** P-, S-wave velocity and system delay derived from linear fitting of the first arrivals for the 8 acrylic cores of different length.

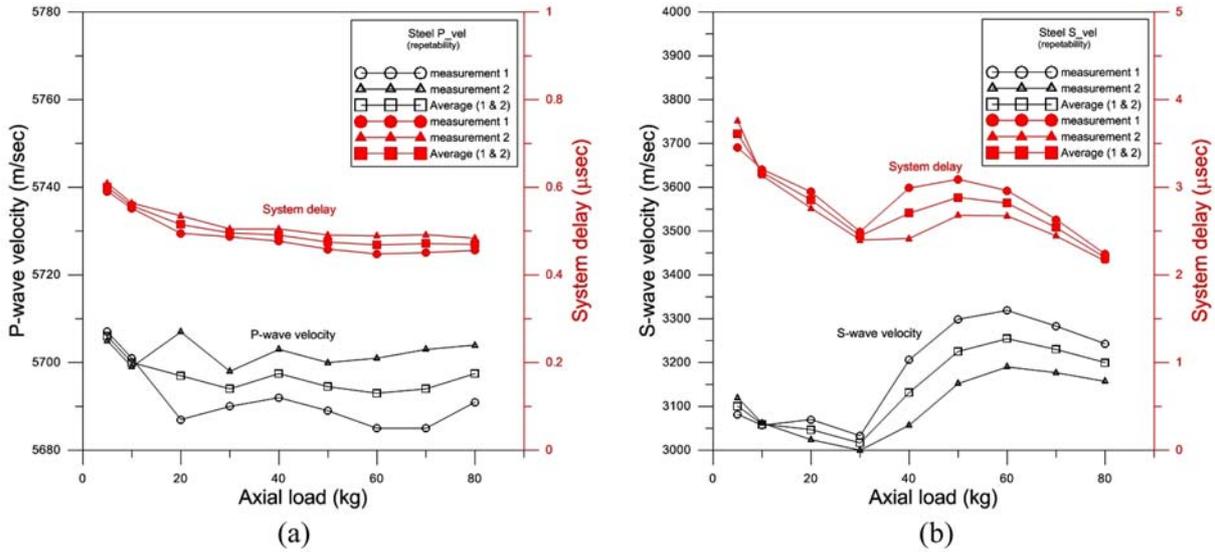
Velocity		Load (kg)								
		5	10	20	30	40	50	60	70	80
P	velocity (m/sec)	2790	2790	2793	2793	2794	2794	2796	2795	2796
	system delay (μsec)	0.386	0.336	0.332	0.315	0.303	0.302	0.303	0.292	0.296
S	velocity (m/sec)	1378	1368	1368	1372	1378	1383	1386	1388	1389
	system delay (μsec)	2.633	1.804	1.295	1.092	1.012	0.972	0.898	0.799	0.7
P/S ratio		2.025	2.039	2.042	2.036	2.028	2.020	2.017	2.014	2.013

**Table 7.** P-, S-wave velocity and system delay from 8 stainless steel cores of different length (30~100 mm). (stainless steel p-3rd/s-3rd)

Velocity		Load (kg)								
		5	10	20	30	40	50	60	70	80
P	velocity(m/sec)	5705	5699	5707	5698	5703	5700	5701	5703	5704
	system delay (μsec)	0.609	0.564	0.535	0.505	0.505	0.491	0.489	0.492	0.484
S	velocity (m/sec)	3120	3062	3024	3000	3057	3152	3190	3177	3157
	system delay (μsec)	3.762	3.134	2.762	2.399	2.416	2.679	2.674	2.445	2.159
P/S ratio		1.829	1.861	1.887	1.899	1.866	1.808	1.787	1.795	1.807



**Fig. 10.** Velocity and system delay for acrylic cores under various axial loads. Measurements are repeated three times in a same condition and two better results and their average are displayed.



**Fig. 11.** Velocity and system delay for stainless steel cores under various axial loads. Measurements are repeated three times in a same condition and two better results and their average are displayed.

비는 1.787 ~ 1.899까지 6.27% 편차로 분포하지만 하중과 속도와의 선형적 관계는 뚜렷하지 않다. 역시, 선행 연구 (Palanichamy *et al.*, 1995)에서의 하중을 확인할 수 없어서 정확한 비교는 할 수 없지만, 이 연구에서의 P/S 속도 비가 선행 연구에서보다 하중에 따라서 -1.43 ~ 4.74% 차이를 나타낸다. 스테인리스강 시험편의 경우, 축하중과 P-, S-파 속도 간에 선형적 관계가 뚜렷하지 않은 것으로 보아 축하중이 스테인리스강 시험편에 수직 응력으로 작용하여 속도 증가에 기여한 비율은 크지 않은 것으로 보인다.

Fig. 10과 Fig. 11은 축하중이 5 ~ 80 kg으로 변할 때, 아크릴 및 스테인리스강 시험편의 길이 변화에 따른 P-, S-파의 초동 주시들을 직선 접합하여 얻은 속도와 시스템 지연(system delay)을 3회씩 산출한 후 편차가 적은 2회와 그 평균을 도시한 그림으로서, 검정색은 속도를, 붉은색은 시스템 지연을 나타낸다.

아크릴 시험편의 P-파에서는 20, 30 kg 하중 때의 속도와 시스템 지연의 편차가 가장 작아서 속도는 각각  $2799 \pm 0.04\%$ ,  $2799 \pm 0.02\%$ 이며, 시스템 지연은 각각  $0.396 \pm 0.76\%$ ,  $0.386 \pm 0.13\%$ 이다. 하중에 따른 편차가 가장 큰 경우는 40 kg에서의 속도  $2799 \pm 0.07\%$ 와 60 kg 때의 시스템 지연  $0.38 \pm 3.03\%$ 이다. S-파에서도 20, 30 kg 하중 때의 속도와 시스템 지연의 편차가 가장 작아서 속도는 각각  $1368 \pm 0.04\%$ ,  $1370 \pm 0.15\%$ 이며, 시스템 지연은 각각  $1.222 \pm 6.02\%$ ,  $0.99 \pm 10.3\%$ 이다. 하중에 따른 편차가 가장 큰 경우는 50 kg에서의 속도  $1380 \pm 0.25\%$ 와 80 kg 때의 시스템 지연  $0.583 \pm 20.17\%$ 이다. 스테인리스강 시험편의 P-, S-파는 모두 30 kg 때에 속도와 시스템 지연의 편차가 작다.

## 결론

아크릴과 스테인리스강 재질의 시료에 대하여 길이와 축하중을 달리하여 각각에 대해 3회씩 측정된 총 864 경우에 대하여, 시험편을 통과한 초동 주시를 측정하고 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 8종의 길이와 9종의 축하중 변화에 따른 72 경우를 3회씩 측정된 아크릴 및 스테인리스강 시험편의 초동 주시의 편차는 P-, S-파 모두에서 스테인리스강 시험편 보다 아크릴 시험편이 2배 정도 양호하여 좋은 경우 각각 0.24%, 0.4%를 보인다. 이것은 아크릴 시험편의 경우가 트랜스듀서와 시험편 간의 접촉 coupling이 안정적이며 또한 동일한 시간 분해능이나 유사한 전기적 잡음에 비하여 초동 주시가 길기 때문이다.

2. 시험편의 실측 길이를 초동 주시로부터 시스템 지연을 빼 보정주시로 나누어 얻은 탄성과 속도에서, 축하중이 20 kg ( $27.7 \text{ N/cm}^2$ ) ~ 80 kg ( $110.9 \text{ N/cm}^2$ ) 범위에서, 3회 측정의 전 경우에 아크릴 시험편의 P-파는 2787 ~ 2810 m/sec, S-파는 1353 ~ 1400 m/sec의 속도를 나타내어 각각 0.83%, 3.47%의 편차를 보인다. 스테인리스강 시험편의 P-파는 5663 ~ 5738 m/sec, 30~60 mm 길이의 S-파는 2849 ~ 3376 m/sec의 범위를 보여 양호한 초동 주시의 편차에도 불구하고 각각 1.32%, 18.50%의 편차를 보인다.

3. 동일한 하중일 경우에 아크릴 시험편의 길이에 따라서 P-, S-파는 각각 0.61 ~ 1.19%, 2.14 ~ 2.93%의 편차를 보이며 시험편의 길이가 60 ~ 70 mm 일 때 상대적으로 균일한 속도를 얻을 수 있다. 스테인리스강 시험편은 P-, S-파는 각각 0.62 ~ 1.94%, 3.33 ~ 18.5%의 편차를 보인다. P-파 속도는 특

별한 경우(스텐-3rd, 70 mm)를 제외하면 시험편의 길이가 70~90 mm 일 때 상대적으로 균일한 속도를 얻을 수 있으나 안정적인 S-파 속도를 얻을 수 있는 시험편 길이는 확실하지 않다.

4. 아크릴 시험편의 P-파에서는 20, 30 kg 하중 때의 속도와 시스템 지연의 편차가 가장 작아서 속도는 각각  $2799 \pm 0.04\%$ ,  $2799 \pm 0.02\%$  이며, 시스템 지연은 각각  $0.396 \pm 0.76\%$ ,  $0.386 \pm 0.13\%$  이다. S-파에서도 20, 30 kg 하중 때의 속도와 시스템 지연의 편차가 가장 작아서 속도는 각각  $1368 \pm 0.04\%$ ,  $1370 \pm 0.15\%$  이며, 시스템 지연은 각각  $1.222 \pm 6.02\%$ ,  $0.99 \pm 10.3\%$  이다.

결과를 종합하면, 아크릴 시험편과 스테인리스강 시험편의 탄성과 속도를 측정할 때는 60~90 mm 정도의 길이를 갖는 시험편을 20 kg ( $27.7 \text{ N/cm}^2$ )~30 kg ( $41.6 \text{ N/cm}^2$ )내외의 축하중 하에서 측정하는 것이 좋으며, 스테인리스강 시험편의 S-파 속도는 길이 50 mm 이하의 시험편을 사용하여야 한다. 이것은 암석 코어의 속도 측정에 활용될 수 있을 것이다. 암석코어의 속도측정시 시스템 지연의 측정 및 보정은 시스템 지연의 반복성이 양호한 아크릴 시험편을 이용하여 동일한 하중에 서의 시스템 지연을 3회 측정하고 편차가 작은 2회를 평균하여 사용하는 것이 좋을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원의 기본연구사업인 “저온 지열 열병합 발전에 활용가능한 심부 지열수자원 확보기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 권병두, 허식, 1988, 탄질에 따른 석탄의 물성 변화, 대한광산지질학회, **21**(1), 97-106.
- 권병두, 진홍성, 1987, 탄전지역에 분포하는 퇴적암류의 물리적 특성 연구, 한국지구과학회지, **8**(2), 133-142.
- 김영화, 1983, 지진파속도에 미치는 영향요인에 대한 실험적 연구, 대한지질학회지, **19**(3), 136-144.
- 김영화, 장보안, 김재동, 이찬구, 문병관, 1997, 압축피로에 의한 포천화강암의 P파속도 변화 특성, 자원환경지질, **30**(3), 231-240.
- 김영화, 홍순호, 1990, 풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구, 대한광산지질학회지, **23**(2), 221-232
- 성낙훈, 2010, 암석 물성측정 시스템 구축 및 물성 데이터베이스 활용, 박사학위논문, 전북대학교, 117p.
- 서만철, 우영균, 송석환, Hao, T., 2000, 충남지역 초염기성 암체의 지구물리학적 연구: 탄성과 속도 측정, 한국지구과학회지, **21**(3), 349-358.
- 이상규, 이태중, 성낙훈, 2010, “자동·연속 측정장치를 이용한 석모도 지표 암석의 탄성과 속도 특성 분석”, 한국지구시스템 공학회지, **47**(5), 756-770.
- 한국암반공학회, 2005, 한국암반공학회 표준암석시험법 암석의 탄성과속도 측정 표준시험법, 터널과 지하공간, **15**(4), 239-242.
- ASTM, D-2845-08 Standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock.
- Hall, K. W., Gallant, E. V., McKellar, M., Ursenbach, C. P., Stewart, R. R., and Maini, B. B., 2002, “3D ultrasonic imaging of a heavy oil recovery model”, CSEG Conference 2002 (<http://www.cseg.ca/conventions/abstracts/2002/index.cfm>, Jul. 25, 2010).
- ISRM, 1977, Suggested methods for determining sound velocity.
- Palanichamy, P., Joseph, T., Jayakumar, T., and Baldev R., 1995, Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel, *NTD & E International*, **28**(3), 179-185.