Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 2, pp. 98-104, April 2017
Copyright@2017 by The Korean Society of Safety (pISSN 1738-3803, eISSN 2383-9953) *All right reserved.* *https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2017.32.2.98*

콘크리트 넓은 보의 상태평가를 위한 초음파 속도의 통계학적 분포에 대한 연구

윤영근 · 이인복 · 사민형 · 오태근†

인천대학교 안전공학과

(2017. 2. 22. 접수 / 2017. 3. 20. 수정 / 2017. 3. 22. 채택)

A Study on the Statistical Distribution of Ultrasonic Velocities for the Condition Evaluation of Concrete Wide Beam

Young-Geun Yoon · In-Bok Lee · Min-Hyung Sa · Tae Keun Oh†

Department of Safety and Environmental Systems Engineering, Incheon National University

(Received February 22, 2017 / Revised March 20, 2017 / Accepted March 22, 2017)

Abstract : The ultrasonic pulse velocities of pressure, shear, and Rayleigh waves (P-, S-, and R- waves) have been used for the condition evaluation of various concrete structures, but the statistical distribution according to the wave type has not been studied clearly in view of data reliability and validity. Therefore, this study analyzed the statistical distribution of P-, S-, R-wave velocities in concrete wide beams of 800 × 3100 mm (width x length) with a thickness of 300 mm. In addition, we investigated an experimental consistency by the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test. The experimental data showed that the R-, S- and P- wave velocities in order have better statistical stability and reliability for in situ evaluation because R- and S-waves are less sensitive to confinement and boundary conditions. Also, good correlations between wave velocities and strength and modulus of elasticity were found, which indicate them as appropriate techniques for estimating the mechanical properties.

Key Words : ultrasonic pulse velocity (UPV), P-wave, S-wave, R-wave, condition evaluation, concrete structures, statistical distribution

1. 서 론

콘크리트 구조물의 유지관리 및 보수보강을 위해서는 균열, 내부공극, 결함 등의 손상된 영역을 탐지할 수 있어야 하고 또한 재료의 물리적 성질을 파악할 수 있어야 한다. 이와 같은 상태조사는 실험실에서 뿐만 아니라 현장의 다양한 위치에서 비파괴 방법을 사용하여 수행될 수 있다. 콘크리트구조물에서는 주로 슈미트해머(Schmidt Hammer), 초음파(Ultrasonics), GPR(Ground Penetration Radar) 등의 다양한 비파괴기술이 적용되어 왔으며 이를 통해 내부의 수분, 공극 등의 불균질성, 밀도, 탄성계수, 강도 등의 물리적 성질 뿐만 아니라 구조물 치수, 균열 위치 등의 파악도 가능하게 해주고 있다[1]. 콘크리트 구조물의 평가를 위한 가장 효과적인 비파괴 평가방법 중 하나는 초음파법이며 주로 초음파 펄스 속도(Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) 또는 에코(Echo)를 이용하며 다른 방법에 비해 쉽고 간단하며 직접적인 정보를 준다는 장점을 지닌다. 특히 초음파 펄스 속도 시험법은 탄성계수 및 압축강도와 같은 콘크리트 구조물의 물리적 특성을 조사하는데 있어 효과적이고 신뢰성이 높다고 평가받고 있다[2].

균질한 물질에 대한 탄성파 이론은 명확한 반면에 내부의 수분, 공극, 골재 등으로 인한 불균질성을 지닌 콘크리트 재료에 대한 초음파 적용은 신호잡음, 감쇠, 에너지 소산 등의 다양한 문제점과 한계를 갖고 있다. 따라서 콘크리트 구조물에 대한 초음파 종류별 펄스 속도분포를 실험적으로 조사하고 분석할 필요가 있다. 일반적으로 초음파 검사법은 속도, 감쇠, 주파수 등을 변수로 하여 표준 시험체로부터의 초음파 펄스 속도를 기준 값으로 정하고 이와 비교하여 재료 조건 및 열화

† Corresponding Author : Tae Keun Oh, Tel : +82-32-835-8294, E-mail : tkoh@inu.ac.kr
Department of Safety and Environment Systems Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

를 평가한다. 전통적으로 종파(P파)는 그 생성 및 측정이 용이하여 콘크리트 구조에 쉽게 적용되어 왔다. 그러나 P파의 에너지 크기가 횡파(S파) 및 표면파(R파)보다 훨씬 작기 때문에 P파 펄스 속도에 대한 실험 데이터의 통계적 안정성은 S파 또는 R파보다 떨어진다고 알려져 있다[3]. 또한, P파는 콘크리트 내의 수분에 영향을 받기 때문에 최근에는 S파 및 R파를 이용한 초음파 시험이 늘어나고 있는 실정이다. 본 연구에서는 지진이나 전단보강에 용이하여 최근 많이 시공되고 있으며 반사파의 영향이 미미하여 초음파 속도측정에 적합한 콘크리트 넓은 보에서의 P, S, R파 속도를 측정하고 각 파 속도에 대한 통계적 분포를 조사하였고 이는 콘크리트 구조물에 대한 효과적인 초음파 법을 적용하기 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

2. 초음파 펄스속도와 측정법

탄성체에 대해서 P파 및 S파는 매질 내를 이동하고 R파는 주로 표면을 따라 이동하며 각 파의 속도는 탄성계수, 질량, 밀도에 따라 달라진다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}} \quad (1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E(1-v)}{2\rho(1+v)}} \quad (2)$$

$$V_R = \frac{0.87+1.12v}{1+v}\sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{1}{2(1+v)}} \quad (3)$$

여기서 V_P, V_S, V_R는 P파, S파, R파의 속도이고 E, ρ, υ는 동적탄성계수, 밀도, 포아송비이다.

R파는 대부분이 표면 근처에 머무르며 물질 내부로 갈수록 지수함수로 진폭이 감소한다. R파는 표면에서 충격하중에 의해 쉽게 생성되며 큰 진폭 때문에 P파 및 S파보다 쉽게 감지된다. 또한 R파는 침투 깊이가 보통 파장의 2배 이상에 제한된다. Fig. 1은 포아송비(υ)가 0.25인 반무한 탄성체에 대하여 충격하중에 의해 생성된 각 파의 변위 및 에너지 분포를 보여주며, P, S, R파의 에너지 크기는 각각 7, 26, 67%이다.

보통 콘크리트내의 P파 속도는 펄서-리시버에 연결된 한 쌍의 트랜스 듀서(송수신기)를 이용하여 송신기에서 생성된 펄스를 수신기에서 측정한다(Fig. 2(a)). S파의 측정은 전단파 토모그래피 상용장비인 MIRA를 이용하면 정확히 측정이 가능하다. MIRA는 SAFT

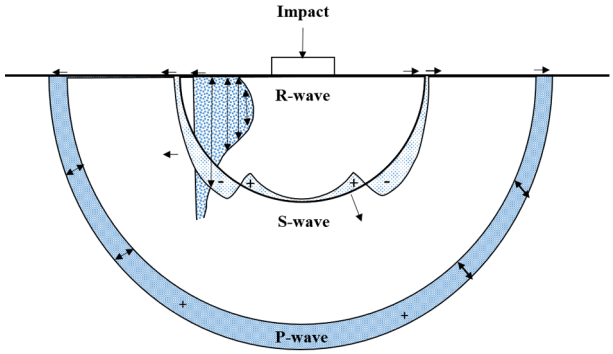
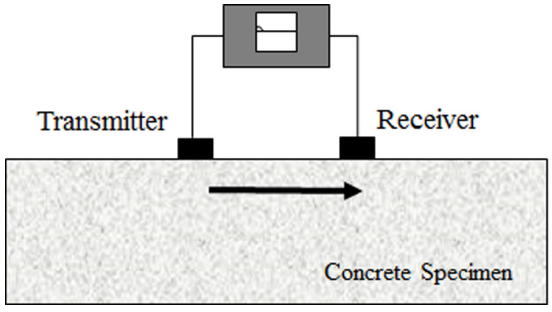
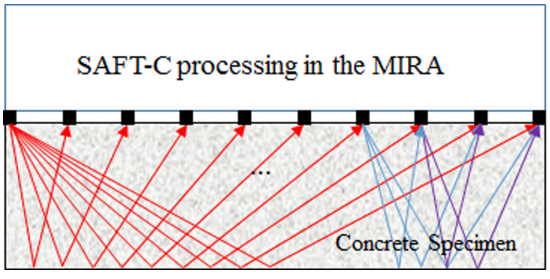


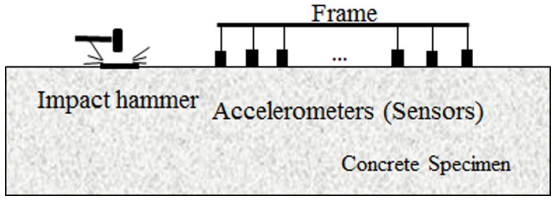
Fig. 1. Distribution of displacement and energy in P–, S–, and R–waves from a transient load on a half space for v=0.25[4].



(a) P-wave measurement



(b) S-wave measurement



(c) R-wave measurement

Fig. 2. Test schemes for the P–, S–, and R–wave measurement.

(Synthetic aperture focusing technique, 집속신호합성기법) 알고리즘을 기반으로 아날로그 필터링과 시공간 처리를 통해 각 측정 위치에서 펄스 반사의 모든 가능한 조합의 수신을 통해 정확한 S파 속도와 측정단면에 대한 B-스캔 이미지를 제공한다(Fig. 2(b)). R파 속도의 측정에 있어서는 통상적으로 P파와 마찬가지로 두 개

의 송신과 수신기를 사용하여 유효 파고점(peak)사이의 시간차를 사용한다. 그러나 파고점을 잡는 데 있어 측정 오류가 발생할 수 있어 MASW (multichannel analysis of surface waves, 표면파 다중채널분석)시험법을 통한 측정 데이터를 유도파 분산곡선로 표현하여 R-wave를 도출하면 보다 정확한 값을 얻어낼 수 있다[5]. MASW 시험법은 Fig. 2(c)에서와 같이 충격하중으로 생성된 R파가 일정한 간격으로 배치된 센서를 통해 수집된 N개의 파 신호를 기반으로 하며 오프셋 시간 영역에서 측정된 데이터들은 2차원 푸리에 변환(식 (4))을 통해 주파수 위상 속도 영역으로 표현될 수 있다.

$$S(w,c_P)=\int e^{-i(w/c_P)x}\,U(x,w)\,dx \qquad (4)$$

여기서 U(x,ω)는 각 센서에서 측정된 변위(u(x,t))의 푸리에 변환을 통해서 계산된 표준화 복합 스펙트럼이고, ω는 각주파수, C_P는 위상속도이다.

Fig. 3은 보통강도 콘크리트의 물성치를 지닌 대상체에 대한 위상속도분산곡선의 예를 보여주며, 다양한 모드 중에 A0와 S0모드는 R파의 속도에 수렴하는 것을 알 수 있다.

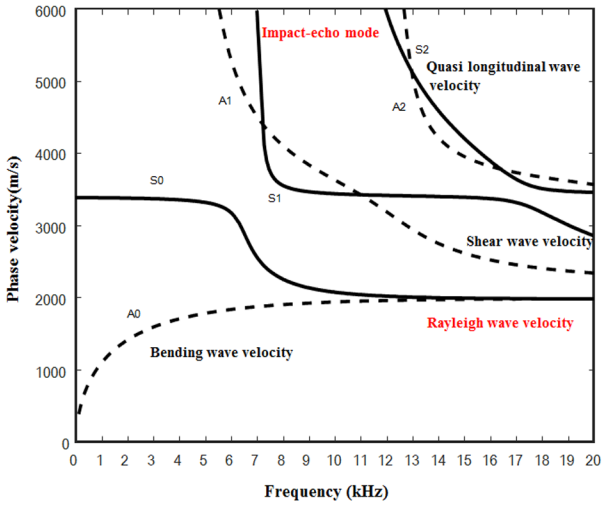
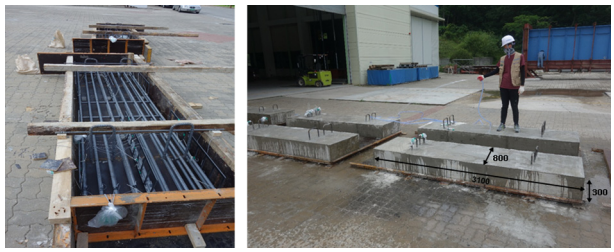


Fig. 3. Phase velocity dispersion curves determined by MASW : A density of 2250 kg/m^3, an elasticity of 23 GPa, and a fixed Poisson's ratio of 0.167 are assumed for the concrete structures.

3. 초음파 측정

3.1 시험체

콘크리트 구조물에 대한 초음파 속도의 통계적 분포를 조사하기 위해서 8개의 동일한 콘크리트 넓은 보를 제작하였으며 각각 W1, W2, ... W8로 명명하였다. 단면 치수는 300 mm × 800 mm × 3100 mm(두께 x 폭 x 길이)이며 피복두께 250 mm에서 가로 564 mm, 세로 87.5 mm 간격으로 D13의 철근보강을 하였다(Fig. 4).



(a) before casting (b) after casting

Fig. 4. Concrete wide beam test specimen.

콘크리트 재료로써 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 물시멘트비(w/c)는 0.48, 공기 함량은 6%이었다. 콘크리트 타설시, 슬럼프는 150 mm, 밀도는 2250 kg/m^{3}로 측정되었다. 동일한 배치에서 150 mm × 300 mm 표준 실린더 10개를 제작하였고 28일 동안 공기 양생하여 ASTM C-39에 따라 압축강도시험을 수행하였고 ASTM C-469를 따라 탄성 계수 (Ec) 및 포아송비(v)를 측정하였다. 28일 평균 압축강도의 평균값은 14.84 MPa, 탄성계수는 17.68 MPa, 포아송비는 0.16이었으며 동탄성계수(Ed)는 식(5)에 따라 21.30 GPa로 계산되었다[6].

$$E_c=0.83E_d\ (GPa) \qquad (5)$$

3.2 시험방법

3.2.1 P파 속도 측정

콘크리트 P파 속도는 펄서-리시버(Model :Ultracon-170)에 연결된 한 쌍의 송수신기를 이용하였다. 송신기는 200 V의 50 kHz의 정사각형 종파 펄스를 생성하고 수신기는 콘크리트 보의 표면을 따라 전달되는 종파를 측정하였다.

펄서-리시버를 통해 측정된 신호는 디지털 오실로스코프(Model : NI-PXI 5105)로 전달되어 화면에서 신호를 확인하고 디지털 신호로 저장하였다. 파가 이동하는 동안의 전기적 잡음으로 신호식별에 있어서 오차가 발생하기 때문에 128번의 파형에 대해 시간평균법을 (Time Average)를 적용하였다.

각 시험은 Fig. 5에 표시된 격자를 따라 표면에서 24번 수행되었다. 시험 격자는 114 × 100 mm 간격으로 구성되었고 위치명은 가로방향으로 A, B, C, D, E, F로 세로방향으로 I, II, III, IV로 명명하였다. Fig. 5에서의 O는 송수신기의 위치이며 X는 송수신기 사이의 평균 측정값을 의미한다.

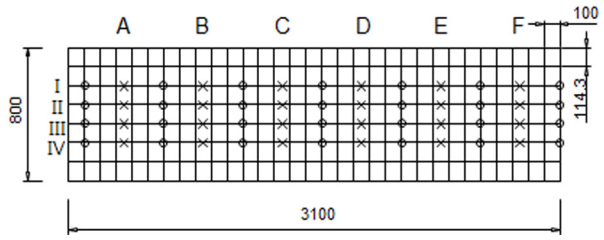


Fig. 5. A planar view of the test point grid for P-wave measurements.

3.2.2 S파 속도 측정

앞서 언급했듯이 효과적인 S파 측정을 위해 전단파 토모그래피 상용장비인 MIRA를 사용하였다. 시험방법은 단순히 장비의 트리거 버튼을 통해 각 시험위치에 있어서의 S파 속도 평균값과 B-스캔 이미지를 얻을 수 있다.

S파 측정은 P파 측정과 동일한 격자를 사용하였으며 MIRA의 폭과 길이를 고려하여 Fig. 6에서의 음영부분에 대하여 총 15번의 시험이 수행되었다. 가로방향으로 A, B, C, D, E 세로방향으로 I , II, III으로 명명하였다.

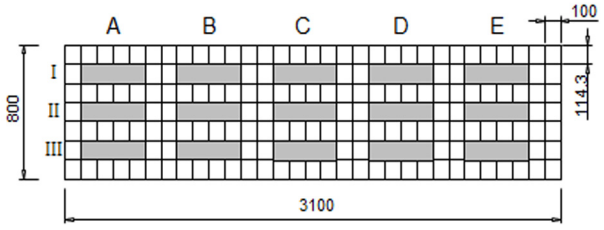


Fig. 6. A planar view of test point grid for the S-wave measurements.

3.2.3 R파 속도 측정

MASW 시험 구성을 위해서 Fig. 7과 같이 5개의 가속도계(Model : PCB 353B16)를 100 mm 간격으로 구성하고 4가지 경로 (I, II, III 및 IV)를 따라 8개의 시험에 동일하게 적용하였다. 여기서 O는 가속도계의 측정위치이며 화살표는 시험방향을 나타낸다.

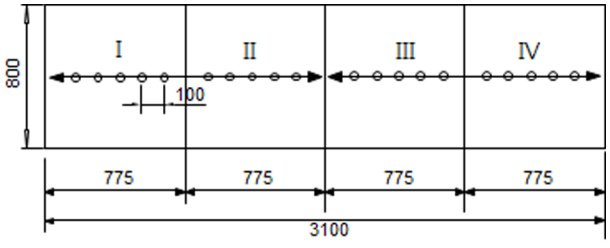
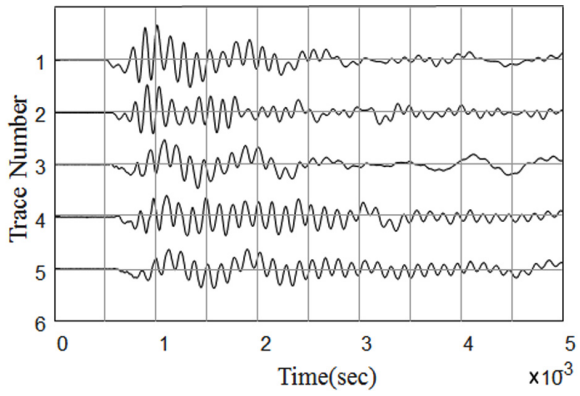
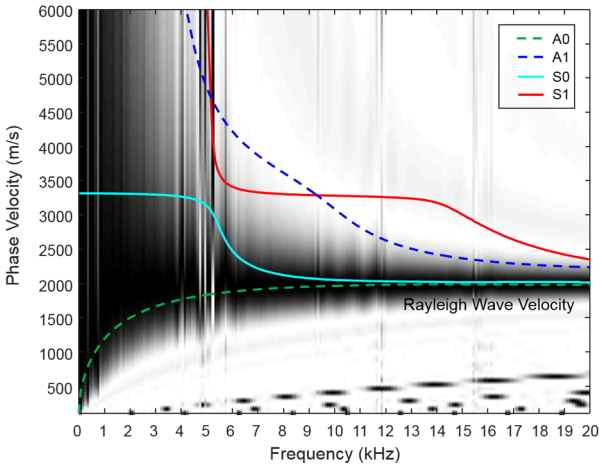


Fig. 7. A planar view of the four test paths for R-wave measurement by the MASW test.



(a) The signals in the time domain



(b) Dispersion curve

Fig. 8. Experimental MASW results along path I in specimen W1.

각 가속도계에서 측정된 신호는 디지털 오실로스코프(NI-PXI 5105)에 1MHz 샘플링으로 저장하였다. 앞서 설명했듯이 각 디지털 저장신호로 부터 위상속도분산곡선을 추출할 수 있으며 수렴된 A0, S0 모드로 부터 R파의 속도를 계산할 수 있다. Fig. 8은 시편 W1에서 Path I에 대해서 MASW 시험을 통해 5개의 가속도계에서 측정된 신호와 이로부터 분석된 위상속도분산이미지를 보여주고 있으며 A0 및 S0 모드가 10 kHz를 넘어서 R파 속도에 1842 m/s에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 P파 S파, R파의 통계분석

8개의 콘크리트 보(W1-W8)에 대한 P, S, R파 속도의 평균은 각각 3323 m/s, 2104 m/s 및 1864 m/s으로 나타났다. 이는 표준공시체로부터 측정된 동탄성계수

Table 1. Results of the statistical analysis for P–, S–, and R– wave velocities

Specimen		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	Total avg.
P-wave	Sample size	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Avg. (μ)*	3471	3359	3275	3327	3272	3263	3274	3341	3323
	Std (σ)**	232	231	207	302	157	153	176	122	197
	COV	6.70%	6.90%	6.30%	9.10%	4.80%	4.70%	5.40%	3.70%	5.90%
S-wave	Sample size	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Avg. (μ)*	2157	2137	2060	2117	2095	2101	2080	2087	2104
	Std (σ)**	69	39	32	50	49	69	47	75	54
	COV	3.20%	1.80%	1.60%	2.40%	2.30%	3.30%	2.20%	3.60%	2.60%
R-wave	Sample size	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Avg. (μ)*	1853	1847	1864	1858	1874	1874	1867	1872	1864
	Std (σ)**	31	34	27	19	25	11	25	15	23
	COV	1.70%	1.80%	1.40%	1.00%	1.30%	0.60%	1.30%	0.80%	1.30%

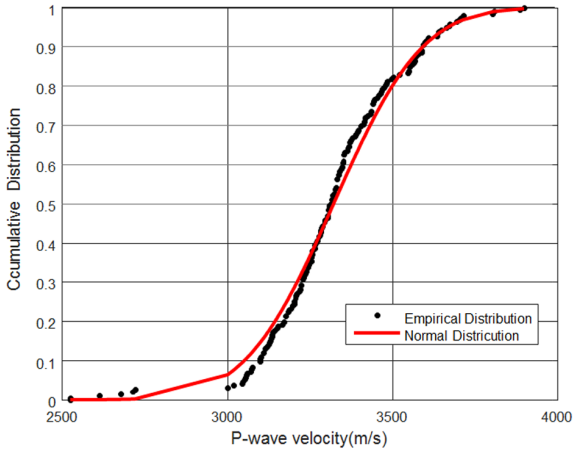
Avg(μ) * = average velocity (m/s), Std (σ) ** = standard deviation (m/s), COV*** = coefficient of variable (= σ/ μ X 100 [%]).

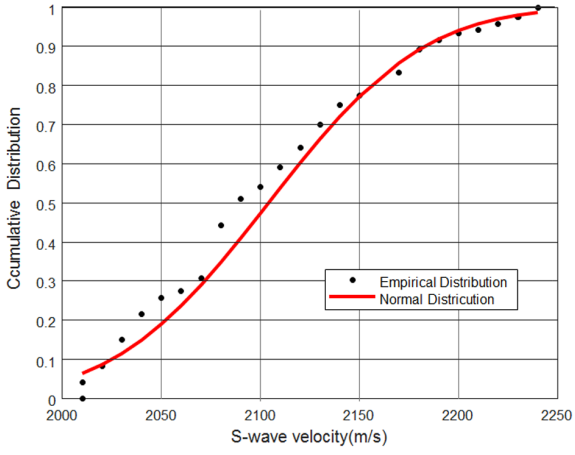
21.3 MPa, 밀도 2250 kg/㎥, 포이송비 0.16 값을 식 (1), (2), (3)에 적용하여 계산된 P파, S파, R파의 이론적 속도값 3174, 2007, 1818 m/s 들과 비교하여 합리적인 범위 내에 있다고 판단된다. 각 시편에 대한 평균(μ), 표준편차(σ), 변동계수(COV)값은 Table 1에 정리하였다. 일반적으로 파장이 약 90 mm인 50 kHz의 초음파의 경우 송신기와 수신기 사이의 파의 이동은 콘크리트 내부의 골재, 수분, 공극 등의 불균일성에 의해 영향을 받으며 초음파 신호에 잡음을 발생시키지만, 표에서 확인할 수 있듯이 P파, S파, R파 순으로 표준편차, 변동계수 값이 작게 산출되었으며 모든 초음파 속도 값들은 통계학적으로 유의함을 알 수 있다.

R파와 S파의 표준 편차와 변동계수는 P파의 표준편차와 변동계수는 작은 것으로 나타났다. 이는 P파가 초음파 중 가장 큰 속도값(가장 빠른 속도)을 갖기 때문이며, 또한 R파 및 S파에 비해 내부공극, 수분 등의 경계조건에 영향을 크게 받기 때문이다. 따라서 보다 정확한 초음파 속도를 측정하기 위해서는 S파 또는 R파를 이용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 더욱이 S파 및 R파 측정을 위한 MIRA 및 MASW 시험법은 다중센서를 이용하고 잡음 신호를 최소화하는 알고리즘을 사용하여 단일 센서를 통해 파의 경로 파악을 통한 P파 측정은 R파 및 S파 측정보다 오류가 클 수밖에 없다.

또한 초음파 속도 측정값에 대한 변동계수를 이용하여 ACI 214R에[7] 따라 데이터 적절성을 판단한 경우 (Table 1의 COV) P파의 있어서는 5.9%로 변동계수 값이 Fair(5.0 ~ 6.0%)의 범주에 들어갔고 S파 및 R파에 있어서는 각각 2.6%, 1.3%로 Excellent(<3.00%)에 해당된 것으로 나타났다.

Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정을[8] 통해 각 파형의 통계학적 분포에 대한 분석을 하였다. 비록 R파의 경우에는 총 데이터 수가 32이지만 적합도 검정에 있어 데이터 수가 20개 이상이면 유효하고 30개 이상이면





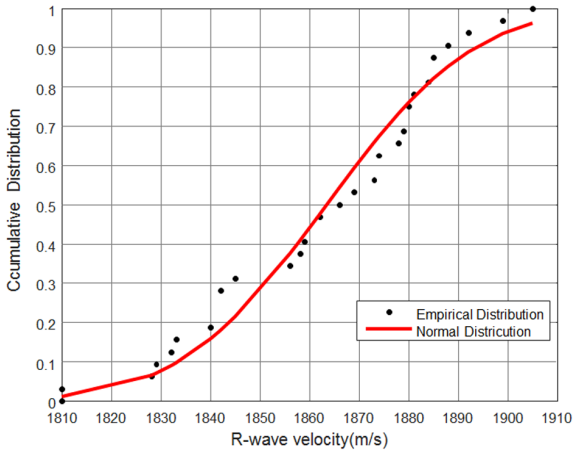


Fig. 9. Cumulative normal distribution function of P-, S- and R-wave velocities.

Table 2. Comparison of dynamic moduli from ultrasonic and static tests

Type of wave	Specimen	Goodness-of-fit test				
		Samples	Dmax	D5%	p-value	Probability Distribution
P	W1-W8	192	0.17	0.097	2.19E-05	-
S	W1-W8	160	0.18	0.122	4.88E-04	-
R	W1-W8	32	0.16	0.234	3.22E-01	Normal

적절한 것으로 판단할 수 있다[9]. Fig. 9는 P파, S파, R파에 대한 시험값을 정규 누적분포함수와 비교하여 나타내고 있으며 모든 파형에 있어 정규분포를 따르고 있음을 확인할 수 있었으며, Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정에 대한 분석결과는 Table 2에 요약하였다.

Dmax는 일반적으로 사용되는 5% 유의수준에 해당하는 임계값을 의미하며 R파의 시험값에 있어서만 5% 유의수준에서 정규분포를 만족되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 p-value는 관측된 표본통계가 통계적 가설과 같거나 그 이상인 확률을 나타내며 모든 데이터에 대해 귀무가설이 기각됨을 확인할 수 있었고 그 순서는 R파, S파, P파로 나타났다. 이는 통계학적으로 R파, S파, P파 순으로 보다 신뢰성이 높은 정규분포를 갖고 있다는 의미이다.

4.2 표준공시체 시험값과의 비교

표준공시체에서 측정된 탄성계수(Ec)로 부터 계산된 동탄성계수(Ed)와 식(1), (2), (3)를 이용하여 초음파 펄스속도로부터 계산된 동탄성계수(Edu)를 비교함으로 시험측정값의 정확성을 검증하였다. Table 3에서 P파, S파, R파로부터 도출된 값과 표주공시체로부터 계산된 값과의 오차는 각각 7.01, 6.43, 5.86%로 비교적 좁은 오

Table 3. Comparison of dynamic moduli from ultrasonic and static tests

Type of wave	Samples	Ultrasonic test		Static test				Error
		Avg. (m/s)	Edu (GPa)	v	fck (GPa)	Ec (GPa)	Ed (GPa)	
P	W1-W8	3323	22.80	0.16	14.8	17.7	21.3	7.01%
S	W1-W8	2014	22.67	0.16	14.8	17.7	21.3	6.43%
R	W1-W8	1864	22.55	0.16	14.8	17.7	21.3	5.86%

차범위내에 있었으며 앞 절의 통계분석과 마찬가지로 R파, S파, P파 순으로 정확성이 높음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 넓은 보에서의 상태평가를 위한 P파, S파 및 R파의 펄스 속도의 통계적분포를 조사하기 위해 펄서-리시버, MIRA, MASW시험법을 이용하여 일련의 시험을 수행하였으며 다음의 결론을 도출하였다.

- 모든 파형의 초음파 속도측정값은 탄성체에 대한 파동 이론값과 비교하여 합리적인 범위에 속하였다.
- R파, S파, P파의 순으로 정확도와 통계적 안정성이 확인되었으며 이는 각 파형의 에너지 크기, 구속조건의 영향과 다중센서에 기반한 측정 장비 및 분석기술의 향상으로 인한 것으로 판단된다.
- Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정을 통해 R파의 시험값은 5% 유의 수준에서 정규 분포를 나타내며 통계적으로 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 최신기술의 초음파 펄스 속도측정방법을 사용하여 P파, S파-, R파 속도에 대한 신뢰할 만한 통계학적 정보를 얻었으며 이는 현장 적용에 있어서 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

References

1) L. Binda, G. Lensi and A. Saisi, “NDE of Masonry Structures: use of Radar Tests for the Characterization of Stone Masonries”, NDT&E International, Vol.31, No.6, pp. 411-419 ,1999.
2) M. Hassan, O. Burdet and R. Favre, “Ultrasonic Measurements and Static Load Tests in Bridge Evaluation”, NDT&E International, Vol. 28, No. 6, 331-337, 1995.
3) R. D. Woods, “Screening of Surface Waves in Soils,” ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 94, No. 4, pp. 951-980, 1968.

4) K. E. Graff, Wave Motion in Elastic Solids, Oxford University Press, London, 1975.
5) C. B. Park, R. D. Miller and J. Xia, “Multichannel Analysis of Surface Waves,” Geophysics, Vol. 64, No. 3, pp. 800-808, 1999.
6) F. D. Lydon and R. V. Balendran, “Some Observations on Elastic Properties of Plain Concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 16, No. 3, pp. 314-324, 1986.
7) ACI Committee 214R, “Guide for Evaluation of Strength Test Results of Concrete,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011.
8) A. H. S. Ang and W. H. Tang, Probability Concepts in Engineeirng Planning and Design, John Wiley and Sons, New York, 1975.
9) S. F, Arnold, Mathematical statistics, Englewood Cliffs, Prentice-H, NJ, 1990.