Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 4, pp. 53-58, August 2017
Copyright@2017 by The Korean Society of Safety (pISSN 1738-3803, eISSN 2383-9953) *All right reserved.* *https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2017.32.4.53*

RC 및 PSC 콘크리트에서 반발도 및 초음파 속도의 변화에 대한 연구

사민형 · 윤영근 · 이인복 · 우인성 · 오태근†

인천대학교 안전공학과

(2017. 5. 2. 접수 / 2017. 6. 20. 수정 / 2017. 7. 10. 채택)

A Study on the Statistical Distribution of Rebound Number and Ultrasonic Pulse Velocity in RC and PSC Concrete Structures

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

Department of Safety and Environmental Systems Engineering, Incheon National University

(Received May 2, 2017 / Revised June 20, 2017 / Accepted July 10, 2017)

Abstract : The rebound hammer test and the measurement of ultrasonic pulse velocity(UPV) have been widely used for the physical properties & condition evaluation of reinforced & prestressed concrete structures for a long time, but the acoustoelastic effects by the prestressing in the prestressed concrete structures on the rebound number and ultrasonic pulse velocity have not been studied clearly. Therefore, this study investigated the data distribution of the rebound numbers and ultrasonic pulse velocities in reinforced and prestressed concrete slabs of 3000 x 3000mm with a thickness of 250 mm. Also, the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test was done in order to identify statistical consistency and reliability. The statistical analysis results show that the rebound number and ultrasonic pulse velocities increased about 1.9% and 2.5%, respectively when prestressing was applied. As expected, the UPV shows better statistical reliability and potential for in situ evaluation than the RB because the RB are more sensitive to testing posture, surface condition, temperature and humidity so on. The experimental data in this study can be used for the condition assessment of reinforced and prestressed concrete structures by the rebound number and ultrasonic pulse velocity

Key Words : rebound hammer test, ultrasonic pulse velocity (UPV), condition evaluation, acoustoelastic effects, reinforced concrete, prestressed concrete

1. 서 론

철근 및 프리스트레스 콘크리트 구조물에서의 물리적 성질 및 내 · 외부 상태의 정확한 측정 · 평가는 품질보증(Quality Assurance), 품질관리(Quality Control), 건전도 모니터링 등의 시공 및 유지관리의 측면에서 중요하다. 보통 이를 위해서 현장에서 표준공시체를 제작하거나 코어 샘플을 채취하는데 이는 많은 시간, 예산 및 인력을 소비하고 구조물 자체에 손상을 줄 수 있으며 미관에 좋지 못하다. 이를 해결하기 위해서는 비파괴 검사와 같이 구조물에 영향을 최소화 할 수 있는 방법이 필요하다.

콘크리트 구조물의 물리적 성질, 상태 또는 손상평가를 위한 가장 효과적인 비파괴 평가 방법 중 하나는 초음파 측정이다[1]. 이 방법은 강재뿐만 아니라 철근 및 프리스트레스 콘크리트 구조물에도 널리 사용되고 있으며 재료특성, 열화, 결함 등을 파악하는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 최근 미국과 유럽에서는 프리스트레스 콘크리트 구조물의 손상 및 열화평가에 대한 신뢰성 있는 비파괴 진단방법의 개발 및 이와 연계된 유지보수의 필요성을 강조하고 있다. 하지만 프리스트레스 콘크리트 구조물에서는 프리스트레싱에 의한 음향탄성효과(Acoustoelasticity)로 인해 콘크리트 내부에서 초음파 속도가 변할 수 있기 때문에 초음파법 적용 시 사전 분석 및 검토가 필요하다[2]. 비록 많은 연구자들이 음향탄성효과에 기반을 둔 구조물 건전도 모니터링 기술들을 개발했지만, 콘크리트 구조물에 대한 연구결과는 찾아보기 어렵다. 가장 큰 이유는 콘크리트 매체는 불균질 · 비탄성 특성을 지니며 내부응력변화에 따른 초음파 속도의 변화가 상대적으로 크지 않기 때

† 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

문이다[3]. 균질하고 등방성인 무한 체에 대한 탄성파에 대한 이론적 연구는 잘 진행되어 왔지만 일정하지 않은 응력장하에서 콘크리트와 같은 비균질 및 비탄성 재료에 대해서는 이론적 접근이 어려운 실정이다. 따라서 현장에서 철근 및 프리스트레스 콘크리트 구조물에 대해서 초음파 속도 분포의 변화를 실험적으로 조사하고 분석 할 필요가 있다. 본 연구에서는 철근 및 프리스트레스 슬래브에서 응력장의 여부와 크기에 따른 초음파 속도를 측정하고 통계적 분포를 조사하였다. 또한 현장에서 가장 많이 적용되는 반발도법도 같이 적용하여 초음파 속도 변화와의 비교 · 분석을 실시하였다.

2. 반발도 시험법 및 초음파 속도법

2.1 반발도 시험법(Rebound Hammer Test, RB)

반발도 시험법(RB)은 콘크리트 표면에 슈미트 해머(schmidt hammer) 등으로 타격하고 이에 따른 기기의 반발력과 콘크리트 탄성계수, 강도 등과의 상관관계를 이용하는 방법이다. 측정기기가 비교적 경제적이고 시험도 간편하기 때문에 준공검사의 첫 단계로 손쉽게 적용되는 경우가 많지만 타격자세, 표면상태, 습도, 온도 등 다양한 요인의 영향을 받아 결과의 정확성이 높지 않다. 반발도법은 주로 콘크리트 공사 시 품질의 균질성 판정 또는 각 부재 간에 있어서 콘크리트의 품질 비교 수단으로 규정하고 있으며 콘크리트 강도추정 수단으로는 추정 강도의 신뢰성 때문에 일부국가에서 강도추정의 보조수단으로만 규정하고 있는 실정이다. ASTM에[4] 의하면 반발도법은 콘크리트 강도를 결정하는 수단이 아니라 콘크리트 품질의 균질성을 판정하는 수단으로 규정하고 있으며 일본건축학회나 RILEM에서도[5] 강도추정의 보조수단이라고 규정하고 있다. 그러나 영국 BSI 및 독일 DIN에서는 콘크리트 강도추정 수단으로 되어있다[6]. 강도추정을 위해서는 대상구조물의 콘크리트 코어강도와 반발도와의 상관관계를 구하여 구조물의 강도를 추정하도록 규정하고 있으며 타격방향, 콘크리트 재령, 온도, 습도 등에 따라 보정한 기준 반발도를 이용해야 한다. 다음의 식들은 국내의 안전진단 전문기관에서 통상적으로 적용하는 반발도를 이용한 압축강도 추정식이다[6].

- 일본재료학회에 의한 강도 추정식
  $F_c = 1.3R_o - 18.4(MPa)$
- 일본건축학회 의한 강도 추정식
  $F_c = 0.73R_o + 10(MPa)$
- U.S. Army 시험식
  $F_c = -12.6 + 0.8R_o + 0.00932R_0^2(MPa)$

여기서, Fc : 콘크리트 압축강도(MPa), R_0 : 타격방향, 재령, 온도, 습도 등에 따라 보정된 반발도

2.2 초음파 속도법(Ultrasonic Pulse Velocity, UPV)

초음파 속도법(UPV)은 보통 압축파(Pressure wave, P-wave)를 이용하며 파의 이동거리와 도착 시간을 측정하여 Fig. 1에서와 같이 속도를 측정한다[4]. 초음파 속도법은 통과법과 간접법의 두 가지 유형이 있으며 통과법에서 송신기는 하나의 표면을 통해 초음파를 전송하고, 수신기는 반대 표면에서 그것을 검출한다. 반면, 간접법은 표면 근처의 압축파 경로를 사용하며 콘크리트의 한 면만 접근 할 수 있거나 표면 균열의 깊이를 결정할 때 주로 사용된다.

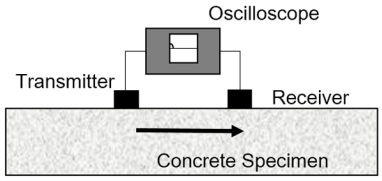

Fig. 1. Test scheme for the ultrasonic pulse velocity measurement.

보통 전송파의 도달로 인한 표면 응답은 송 · 수신기의 신호펄스의 출력을 오실로스코프에 전송하여 시간영역 파형으로 표시하며 펄스의 이동시간은 전송된 펄스와 수신된 펄스사이의 시간간격을 분석하여 계산할 수 있다. 콘크리트에 초음파 속도법은 콘크리트에서의 음속과 압축강도 사이에 상관성이 높다는 경험적 사실에 기초한 것이다. 기존의 연구 및 실험결과에 의하면 적합한 초음파 신호 주파수는 50~200 kHz의 범위이고 적절한 강도 범위는 10~60 MPa이다. 또한 콘크리트를 탄성체로 가정하면 초음파 속도와 동적탄성계수와의 관계는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[7].

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

여기서 V_P는 P파의 속도이고 E, ρ, υ는 동적탄성계수, 밀도, 포아송비이다.

3. 시험체 및 측정방법

3.1 시험체

콘크리트 구조물에서 반발도 값 및 초음파 속도값에

Table 1. Information on the prestress strand

Tendon type	Diameter (mm)	Area (mm^2)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	Jacking force (kN)
SWPC7B	12.7	98.7	3.5	1860	128.5

대한 프리스트레싱의 영향을 알아보기 위해 Fig. 2에 보이는 3가지 유형의 철근 및 프리스트레스 콘크리트 슬래브 (S1, S2 및 S3)를 제작하고 일련의 시험을 수행하였다. 모든 슬래브는 가로 및 세로 길이가 3000 mm × 3000 mm이고, 두께는 250 mm, 20 mm 및 230 mm 깊이에서 560 mm 및 280 mm 간격으로 D13 철근을 배근하였다. S2 및 S3 슬래브는 각각 2방향 및 1방향으로 직경이 12.7 mm인 7개의 SWPC7B 스트랜드를 350 mm 간격으로 배치하고 프리스트레싱하였으며 SWPC7B의 세부사항은 Table 1과 같다.

콘크리트 재료로는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고 물시멘트비(w/c)는 0.48, 공기 함량은 6%이었다. 콘크리트 타설시, 슬럼프는 150 mm, 밀도는 2250 kg/㎥로 측정되었다. 동일한 배치에서 150 mm × 300 mm 표준 실린더 10개를 제작하였고 28일 동안 공기 양생하여 콘크리트 압축강도 시험 방법(KS F 2405 or ASTM C-39)에 따라 압축강도시험을 수행하였고 ASTM C-469를 따라 탄성 계수 (Ec) 및 포아송 비(v)를 측정하였다. 28일 평균 압축강도의 평균값은 14.84 MPa, 탄성계수는 17.68 MPa, 포아송비는 0.16이었으며 동탄성계수 (Ed)는 식(2)에 따라 21.30 GPa로 계산되었다[8].

$$E_c = 0.83E_d\ (GPa) \tag{2}$$

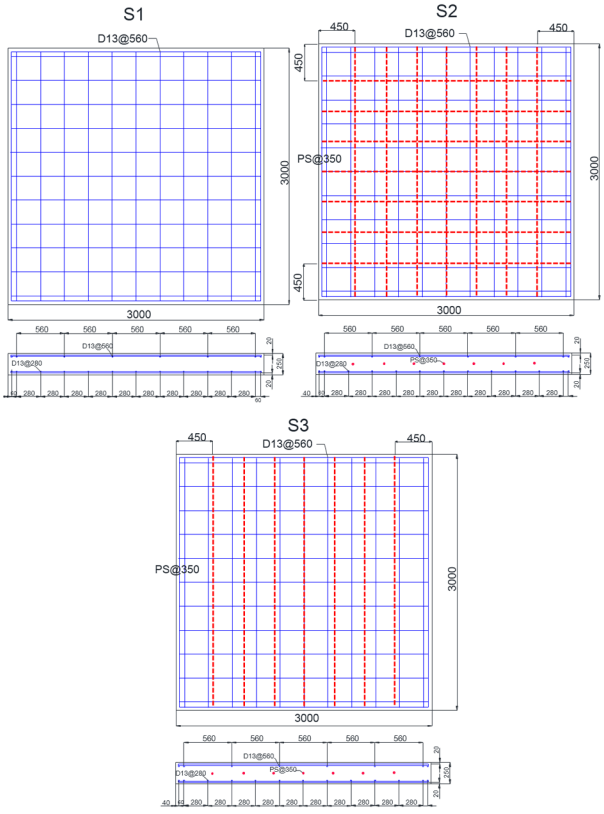

Fig. 2. The top & side views of specimens S1, S2, and S3. All dimensions in millimeters.

3.2 측정방법

3.2.1 반발도 측정

반발도법 측정을 위해 슈미트해머로 Proseq -XXX을 사용하였으며 시험방법은 Fig. 3과 같이 정해진 격자를 이용하여 표면에 수직으로(타격 각도 -90°) 타격하여 그 반발도 값을 측정하였다.

각 슬래브에서 시험은 Fig. 4에 표시된 격자를 따라 표면에서 232번 수행되었다. 시험 격자는 353 mm × 100 mm의 크기로 구성되었고 위치명은 가로방향으로 A, B, C, D, E, F, G, H로 세로방향으로 1~29로 명명하였다.

Fig. 3. Rebound hammer test in a grid on the concrete slab surface.

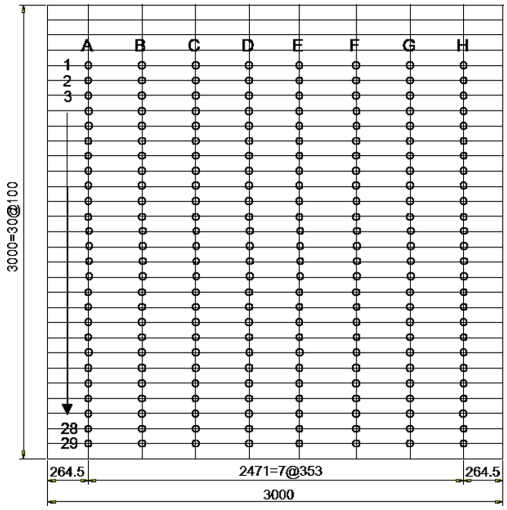

Fig. 4. A top view of test point grid for the rebound hammer test.

3.2.2 초음파 속도 측정

콘크리트 초음파 펄스 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(Fig. 5).

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. 6에 표시된 격자를 따라 표면에서 40번 수행되었다. 시험 격자는 353 × 100 mm 간격으로 구성되었고 위치명은 가로방향으로 A, B, C, D, E, F, G, H로 세로방향으로 1, 2, 3, 4, 5로 명명하였다. Fig. 6에서의 O는 송수신기의 위치이며 X는 송수신기 사이의 평균측정값을 의미한다.

Fig. 5. UPV test in a grid on the concrete slab surface.

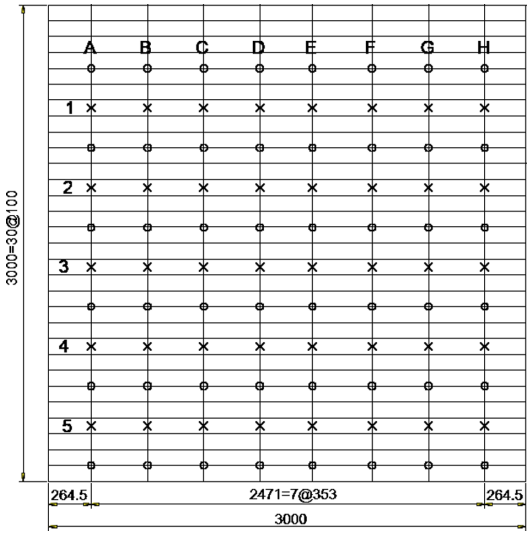

Fig. 6. A top view of the test point grid for UPV.

4. 시험결과 및 분석

4.1 반발도값과 초음파 속도값의 통계분석

반발도 값과 초음파 속도값의 통계적 신뢰성을 확보하기 위해 가능한 많은 데이터 확보를 하였으며 초음파 속도의 측정의 경우 128개의 파형에 대한 평균 시간을 계산하였다. Table 2는 측정된 데이터의 샘플의 수, 평균, 표준편차, 변동계수(COV), 최대 및 최솟값을 나타내고 있다.

Table 2. Results of the statistical analysis for rebound number and ultrasonic pulse velocity

Specimen		S1	S2	S3	Avg.
RB	Sample No.	232	232	232	232
	Avg. (μ)*	29.08	29.65	29.64	29.46
	Std (σ)**	2.2	2.4	2.5	2.3
	COV***	7.48%	8.01%	8.42%	7.97%
	Max	34.0	36.0	35.0	
	Min	20.0	26.0	24.0	
UPV	Sample No.	40	40	40	40
	Avg. (μ)*	3285	3367	3362	3338
	Std (σ)**	97	146	110	118
	COV***	2.95%	4.34%	3.27%	3.52%
	Max	3472	3818	3733	
	Min	3002	3160	3130	

RB : Rebound hammer test, UPV : Ultrasonic pulse velocity
Avg(μ) * = average velocity
Std (σ) ** = standard deviation
COV*** = coefficient of variable (= σ/ μ X 100 [%]).

반발도 값 및 초음파 속도값의 범위는 철근 콘크리트 슬래브 (S1)에 대해 각각 20~34, 3002~3472 ㎧로 저강도의 콘크리트 물성치에 해당하는 값인 것으로 판단되었다. 특히, 공시체의 표준시험으로부터 얻은 동적탄성계수(21.3GPa), 밀도(2250 kg/㎥), 포아송비(0.16)를 이용하여 얻은 이론적인 초음파 속도값인 3174 ㎧와 비교할 때 합리적인 범위 내에 있는 것으로 판단된다.

반발도 값의 평균은 S1(29.08)을 기준으로 S2(29.65) 및 S3(29.46)에서 각각 1.96% 및 1.91% 증가하였고, 초음파 속도의 경우에는 S1(3285 m/s)를 기준으로 S2 (3367 m/s), S3(3362 m/s)에 대해서 2.50%, 2.34%로 증가하였다. 이는 프리스트레싱 효과(음향탄성효과)로 인해 표면 및 내부에서의 응력장이 변화하여 반발도 값과 초음파 속도값에 영향을 준 것으로 판단된다. 변동계수 (COV)의 경우에도 프리스트레싱의 영향으로 그 값이 증가하였고 전체적으로 반발도 시험값이 초음파 속도값에 비해 2-3배 정도 컸다. 반발도 시험의 경우에는 타

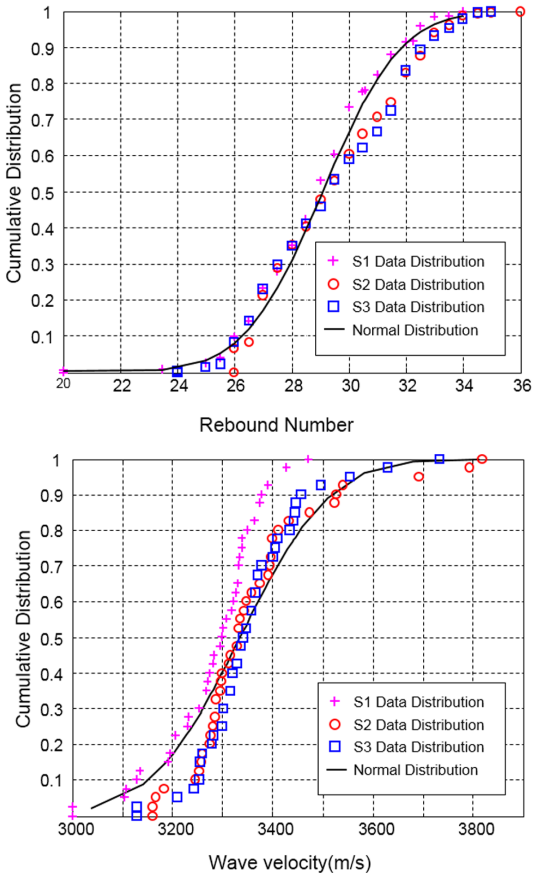

Fig. 7. Cumulative normal distribution function of rebound number and ultrasonic pulse velocity.

격자세, 표면상태, 온도, 습도 등 초음파 속도시험법 보다 다양한 인자에 의해서 영향을 크게 받기 때문이라고 판단된다. 따라서 보다 정확한 물리적 성질 및 상태 파악을 위해서는 반발도법보다는 초음파 속도법을 이용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

또한 반발도 값 및 초음파 속도값에 대한 변동계수를 이용하여 ACI 214R에[9] 따라 데이터 적절성을 판단한 경우(Table 1의 COV) 반발도 값에 있어서는 변동계수 값이 Poor(> 6.0%)의 범주에 들어갔고 초음파 속도값에 있어서는 Excellent (<3.00%) 또는 Very Good (3.0 ~ 4.0%)에 해당된 것으로 나타났다. Fig. 7은 S1, S2, S3 슬래브에 대한 반발도 값과 초음파 속도값을 정규누적분포함수와 비교하여 보여주고 있으며 전체적으로 정규분포를 따르고 있음을 확인할 수 있다.

또한 Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정을[10] 통해 반발도 값과 초음파 속도값의 통계학적 분포에 대한 정량적 분석을 하였으며 5% 유의수준에 대한 적합도 검정에 대한 분석결과를 Table 3에 나타냈다. 여기서 D5%는 일반적으로 사용되는 5% 유의수준에 해당하는

Table 3. Results of Kolmogorov–Smirnov goodness–of–fit test

Type of Measurement	Type of Slab	Goodness-of-fit test		
		D5%	Probability Distribution	p-value
RB	S1	0.07	Normal	0.20
	S2	0.11	-	0.0067
	S3	0.11	-	0.0077
UPV	S1	0.13	Normal	0.44
	S2	0.18	Normal	0.11
	S3	0.14	Normal	0.37

분포누적함수의 확률값을 나타내며 임계 값보다 커야 정규분포라는 가정을 만족한다는 의미이다. Table 3에서 보듯이 반발도 값에 있어서는 S1의 경우에만, 초음파 속도값에 대해서는 모든 슬래브에(S1, S2, S3) 대해서 5% 유의수준에서 정규분포를 만족되고 있음을 확인할 수 있었다. 한편, p-value는 관측된 표본통계가 통계적 가설과 같거나 그 이상인 확률을 나타내며 전체적으로 초음파 속도값이 반발도 값에 비해 2배 이상 큰 것을 확인하였다. 이는 통계학적으로 초음파 속도값이 반발도 값에 비해 신뢰성이 높은 정규분포를 갖고 있다는 의미이다. 또한 S1, S3, S2의 순으로 p-value 값이 감소하였으며 이는 프리스트레싱이 크고 내부의 응력장이 일정하지 않을 때 통계학적으로 값의 변동이 크다고 판단할 수 있을 것이다.

4.2 표준공시체 시험값과의 비교

반발도법과 초음파 속도법의 철근 및 프리스트레스 콘크리트 구조물에 대한 비파괴 방법으로써의 정확성을 판단하기 위해 표준공시체로부터 측정된 강도, 탄성계수와의 비교・분석을 실시하였다.

반발도법에 있어서는 표준공시체로부터 측정된 압축강도와 가장 가까운 값을 도출하게 하는 일본건축학회의 강도 추정식을 사용하여 비교하였으며, 초음파 속도법에 있어서는 표준공시체로부터 도출된 동탄성

Table 4. Comparison of RB and UPV with and static test

Type of test	Samples	Avg.	fck (MPa)	Edu (GPa)	Static test		Error (%)
					fck (MPa)	Ed (GPa)	
RB	S1	29.1	18.08	-	14.84	-	15.22
	S2	29.7	18.65	-	14.84	-	17.89
	S3	29.6	18.64	-	14.84	-	17.82
UPV (m/s)	S1	3285	-	22.81	-	21.3	7.04
	S2	3367	-	23.96	-	21.3	12.49
	S3	3362	-	23.88	-	21.3	12.11

계수(Ed)와 식(1)을 이용하여 계산된 동탄성계수(Edu)를 비교함으로 시험측정값의 정확성을 검증하였다. Table 4에서 초음파 속도값으로부터 도출된 동탄성계수값과(Edu) 표준공시체로부터 계산된 값(Ed)과의 오차는 S1, S2, S3에 대해 각각 7.04, 12.49, 12.11%로 반발도법에 비해 오차율이 낮은 것으로 나타났으며 프리스트레싱이 클수록 초음파 속도값이 증가하여 이에 따른 탄성계수의 증가로 인해 오차가 커지는 것으로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구는 철근 및 프리스트레스 콘크리트 슬래브에서의 반발도값와 초음파 속도값의 변화를 조사하였고 다음의 결론을 얻었다.

- 반발도 값 및 초음파 속도값은 기존 강도 추정식과 탄성체에 대한 파동 이론값과 비교하여 합리적인 범위에 속하였다.
- 초음파 속도법이 반발도법에 비해 정확도와 통계적 안정성이 확인되었으며 이는 반발도법이 타격자세, 표면의 상태, 온도, 습도 등의 다양한 요소에 의해 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.
- Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정을 통해 반발도법의 경우에는 S1에 대해서만, 초음파 속도법에 대해서는 모든 슬래브(S1, S2, S3)에 대해서 시험값이 5% 유의 수준에서 정규 분포를 나타내며 통계적으로 신뢰할 수 있음을 확인하였다
- 프리스트레싱에 의한 음향탄성효과로 인해 반발도값에 대해서는 대략 1.9%, 초음파 속도값에 대해서는 대략 2.5%의 증가를 나타냈다.

본 연구에서의 측정된 반발도 및 초음파 속도값의 분포 및 경향이 현장에서 프리스트레스 구조물에 대한 정밀점검 또는 정밀안전진단시에 유용하게 활용되기를 기대한다.

감사의 글: 이 논문은 인천대학교 2017년도 자체연구비 지원에 의해 연구되었음.

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) R. A. Toupin and B. Bernstein, “Sound Waves in Deformed Perfectly Elastic Materials, Acoustoelastic Effect,” Journal of Acoustical Society of America, Vol. 33, pp. 216-225, 1961.
3) V. M. Malhotra and N. J. Carino, “Handbook on Nondestructive Testing of Concrete”, 2nd Edition, CRC Press, PA, USA, 2004
4) ASTM C805 / C805M-13a, “Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
5) RILEM CNDT-Committee, RILEM Tentative Recommendations for In-situ Concrete Strength Determination by Non-Destructive Combined Methods, May, 1980.
6) M.H. Lee and C.W. Choi, “A Study on the Minimum Number of Rebound Number Test and Pulse Velocity Method for Estimating Compressive Strength of Concrete,” Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 16, No. 6, pp. 833-840, 2004.
7) K.E. Graff, “Wave Motion in Elastic Solids,” Oxford University Press, London, 1975.
8) 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.
9) ACI Committee 214R, “Guide for Evaluation of Strength Test Results of Concrete,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011.
10) A. H. S. Ang and W. H. Tang, “Probability Concepts in Engineeirng Planning and Design, John Wiley and Sons,” New York, 1975.