

충격공진법과 초음파속도법을 통한 콘크리트 압축강도 예측의 신뢰성 평가

Reliability Evaluation for Prediction of Concrete Compressive Strength through Impact Resonance Method and Ultra Pulse Velocity Method

이 한 결¹⁾ 이 병 재²⁾ 오 광 진³⁾ 김 윤 용^{4)*}
Han-Kyul Lee Byung-Jae Lee Kwang-Chin Oh Yun-Yong Kim

Abstract

Non-destructive testing (NDT) methods are widely used in the construction industry to diagnose the defects/strength of the concrete structure. However, it has been reported that the results obtained from NDT are having low reliability. In order to resolve this issue, four kinds of NDT test (ultrasonic velocity measurements by P-wave and S-wave and the impact resonance methods by longitudinal vibration and deformation vibration) were carried out on 180 concrete cylinders made with two kinds of mix proportions. The reliability of the NDT results was analyzed and compared through the measurement of the actual compressive strength of the concrete cylinders. The statistical analysis of the results was revealed that the ultrasonic velocity method by S-wave is having lowest coefficient of variation and also most capable of stable observation. Analytical equations were established to estimate the compressive strength of the concrete from the obtained NDT results by relating the actual compressive strength. Moreover the equation established by the ultrasonic velocity method by S-wave had the highest coefficient of determination. Further studies on the stability of non-destructive testing depending on various mixing conditions will be necessary in the future.

Keywords : Compressive strength, Impact resonance method, Non-destructive test, Ultrasonic pulse velocity method

1. 서 론

콘크리트는 도로, 항만, 댐, 지하구조물, 건축물 등 수많은 구조물의 건설재료로 사용되어 현대 문명을 이루는 근간이 되고 있으며 그 중요성은 나날이 증대되고 있다. 그러나 이와 동시에 콘크리트구조물들은 준공 직후부터 열화가 시작되어 정해진 사용수명이 점점 줄어들어 내구성과 구조안전성도 감소된다. 이는 콘크리트의 화학적·물리적 특성이 수분, 염분, 이산화탄소, 반복하중, 산성물질 등 여러 열화요인에 의해 영향을 받기 때문이다. 따라서 콘크리트구조물의 열화를 사전에 감지하고 보수하는 진단 및 유지관리는 시공과정과 준공이후 전 사용주기에 걸쳐 필수적으로 수행되어야 한다. 우리나라의 경우 1990년대 성수대교와 삼풍백화점 붕

괴로 인적·물질적으로 막대한 손실을 경험하였고, 1995년 “시설물의 안전관리에 관한 특별법(시특법)”의 제정과 “건설기술관리법” 개정을 통해 건설구조물 유지관리의 기준을 마련하였다. 시특법과 함께 고시된 “시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침”에는 구조물진단의 계획단계부터 점검방법과 대책마련에 이르기까지 구조물진단에 대한 세부지침들이 제시되어 있다. 이중 현장조사 및 시험 단계에서는 콘크리트의 비파괴강도실험을 수행할 것을 요구하고 있다 (Park et al., 2003).

비파괴실험법은 구조물에 손상을 입히지 않고 균열과 같은 구조물의 결함이나 강도 예측이 가능하기 때문에 그 유용성을 인정받아 널리 쓰이고 있다. 비파괴실험을 통한 콘크리트 압축강도 추정법에는 초음파속도법, 반발경도법, 충격반

1) 정희원, 충남대학교 토목공학과 석사과정
2) 정희원, (주)제이엔티아이엔씨 기술연구소 선임연구원
3) 정희원, 한국시설안전공단 건설평가실 차장
4) 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : yunkim@cnu.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2015년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

향기법, 충격공진법 등이 있다. 그중 초음파속도법과 반발경도법의 경우 그 간편성으로 인해 주로 사용되고 있다.

그러나 비파괴실험법을 통한 압축강도 추정치의 가장 큰 문제는 추정값에 대한 신뢰도가 떨어진다는 것이다. 이는 근본적으로 콘크리트가 균질하지 않은 재료이기 때문에 갖는 불확실성이 존재하고, 동시에 비파괴실험법의 측정방법이나 측정환경, 측정자의 숙련도와 같은 재료 외적인 영향요인들도 갖고 있기 때문이다.

초음파속도법의 경우 초음파가 전파되는 경로에 콘크리트 내부 결함이나 공극이 있을 경우 파동에 회절이 일어나 전파시간이 늘어나고 파의 속도가 낮게 측정되는 현상이 발견된다 (John et al., 2012; ACI, 1998). 또한 초기재령 콘크리트는 초음파속도의 변화폭이 상당히 크기 때문에 재령에 대한 고려도 포함되어야 한다 (Cho, 2008). 콘크리트의 함수율에 의한 영향은 함수율 1% 변화에 따라 초음파속도가 약 60m/sec의 증감을 보이는 것으로 알려져 있다 (Lim and Kang, 2001). 공극과 재령, 함수율뿐만 아니라 사용된 골재도 초음파속도법의 결과값에 상당한 영향을 주며 기존의 압축강도 추정식 적용이 적합하지 않다는 보고도 있다 (Kim et al., 2007).

따라서 대부분의 비파괴실험법들은 이론적인 배경을 가지고 있다 할지라도 다양한 영향인자들을 고려한 많은 실험 데이터 축적이 필수적이며, 이에 근거한 통계적 추정값을 제시한다. 현재 비파괴실험에 관한 연구는 실제강도와 추정값 사이에 상이한 결과값이 나오는 모순을 해결하여 비파괴실험에 대한 신뢰도를 높이는데 집중되고 있으며, 신뢰성 평가와 검사법 규격화를 통해 비파괴실험의 현장적용성을 높이는 방안을 모색하고 있다 (Komlos et al., 1996). 또한 비파괴실험의 결과값에 영향을 주는 다양한 요인들에 대한 정성적인 인식을 넘어 정량적으로 접근하는 연구도 시도되고 있다 (Jain et al., 2013).

본 연구의 목적은 통계적 분석을 통해 다양한 측정방식의 비파괴실험 결과를 비교하고 이를 통해 보다 정확한 압축강도 예측이 가능한지를 살펴보는 데 있다. 또한 기존의 초음파속도법 추정식과 비교를 통해 충격공진법을 통한 압축강도 예측의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 실험개요

비파괴실험 결과에 대한 통계적 분석과 비교를 위해서는 여러 종류의 비파괴실험법들이 적절한 수의 표본에 대해 각각 독립적으로 수행되어야 한다. 또한 각 결과값과 압축강도값과의 상관성을 검증하기 위해 비파괴실험 후에는 압축강도 시험이 이루어진다. 본 연구에서는 종진동과 변형진동의 충격공진법, P파와 S파 초음파속도법의 총 4가지 비파괴실험을 실시하였으며, 실제 측정된 압축강도값과 비교 평가하여 검증하였다.

2.1 공시체제작

2.1.1 재료 및 배합

강도에 따른 비파괴실험 결과값의 경향을 살펴보기 위하여 공시체의 목표배합강도를 30 MPa와 40 MPa로 달리 갖게 하였다. 2가지 목표배합강도에 대하여 물-결합재비 (W/B)를 각각 45%와 30%로 하였고, 플라이애시와 고로슬래그를 각각 15%씩 혼입한 3성분계시멘트와 부순잔골재, 최대크기 25mm의 굵은골재, 혼화제로 AE감수제를 사용하였다. 배합조건은 Table 1과 같다.

2.1.2 공시체 제작 및 양생

공시체는 KS F 2403에 의하여 $\phi 150 \times 300$ mm의 실린더형 압축공시체로 제작하였으며, 각각 90개의 공시체를 만들었다. 공시체는 타설후 3일안에 탈형하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 양생온도로 수중양생을 하였다. 비파괴실험 24시간 전에 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 공기 중에서 건조시켰다.

2.2 실험방법

실험은 재령 3, 7, 28일에 대하여 수행되었으며 콘크리트 공시체에 대한 비파괴실험 후 압축강도와 변형률 측정을 통해 탄성계수를 측정하였다. 비파괴실험은 충격공진법의 종진동, 횡진동, 초음파속도법의 S파와 P파를 측정하는 순으로

Table 1 Mix proportions

Mix	f_{cr} (MPa)	G_{max} (mm)	Slump (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit mass (kg/m^3)						
						C	W	S	G	FA	Slag	AE
30	30	25	150	45	45.9	259	173	777	934	58	69	2.32
40	40			30	45.6	357	165	714	868	94	99	3.58

Note : f_{cr} = the target strength; FA = fly ash; Slag = blast furnace slag and AE = air entraining agent

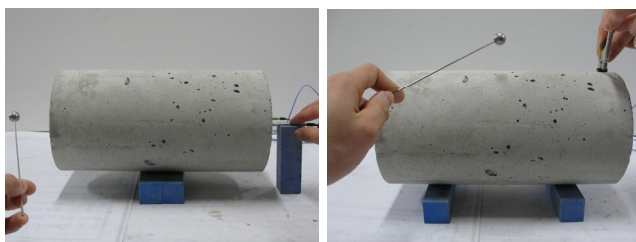
실시하였다. 각 재령일별로 30개 공시체에 대해 시험을 수행하였다.

2.2.1 충격공진법

공시체의 1차 공명진동수를 얻기 위해 KS F 2437에서 제시하는 방법에 따라 수행되었다. 충격공진실험은 Fig. 1(a), 1(b)와 같이 종진동 (longitudinal mode)과 변형진동 (transverse mode) 2가지 방법이 사용되었다. 공시체에 진동을 주기위해 충격용 강봉으로 KS F 2437에서 지시한 가진위치에 타격을 가하였다. 충격에 의한 공진 주파수 측정은 PCB PIEZOTRONICS사의 5Hz~60kHz의 범위를 갖는 센서를 부착하였다.

2.2.2 초음파속도법 (S파, P파)

초음파측정은 KS F 2731에서 제시하는 콘크리트의 초음파속도법에 따라 측정하였고, 발진자와 수신자가 공시체들 사이에 두고 일직선상에 배치되는 직접법을 사용하였다. 초음파속도 측정 장비는 초음파를 보내는 송신탐촉자와 초음파를 받는 수신탐촉자, 파동의 위상차로 속도를 측정할 수 있는 펄스리시버로 구성되어서 Fig. 2의 (a), (b)와 같이 측정한다. 본 연구에서는 펄스리시버로 MKC NDT사의 Ultracon-170을 사용하였고 52 kHz의 탐촉자를 사용하였다. 시험전에 초음파의 안정적인 전달을 위해 콘크리트와 탐촉자 사이에 그리스를 도포하였다.



(a) longitudinal mode (b) transverse mode

Fig. 1 Impact resonance method



(a) P-wave (b) S-wave

Fig. 2 Ultra pulse velocity method

2.2.3 압축강도측정

압축강도는 위의 비파괴실험이 수행된 후 바로 진행되었다. Fig. 3과 같이 KS F 2405에서 제시하는 방법에 따라 측정되었다. 재하속도는 KS에서 제시하는 범위에 맞추어 0.6 MPa/s이 되도록 하였다.

3. 실험결과 및 분석

먼저 측정값의 분포를 살펴보았다. 표준편차는 자료의 분산도를 나타내는 중요한 지표이나 본 연구의 측정값들은 배합과 재령에 따라 범위의 차이가 커서 표준편차값을 서로 비교하는데 한계가 있다. 따라서 분산의 정도를 평균에 대비해 상대적으로 측정가능한 변동계수를 통하여 비교하였다. 변동계수 (COV, coefficient of variation)는 식 (1)과 같이 구한다.

$$COV(\%) = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (1)$$

여기서, σ 는 표준편차이고 μ 는 평균을 나타낸다.

3.1 실험 결과

3.1.1 압축강도 측정결과

Table 2는 각 배합·재령별 압축강도의 평균값과 표준편차, 변동계수이다. Mix 30의 변동계수는 4.05~4.58로 ACI 214에서 규정하는 압축강도 분포도 기준가운데 ‘중음’ (4.0~5.0)에 해당되는 것으로 나타났다 (ACI, 2011). Mix 40의 경우 변동계수가 3.09~3.60으로 ‘우수함’과 ‘중음’의 사이에 해당



Fig. 3 Set-up for compressive strength test

Table 2 Summary of statistical analysis (f_c)

	Age	Mix No.	N	μ	COV
f_c [MPa]	3	Mix 30	30	7.17	4.58
		Mix 40	30	21.1	3.60
	7	Mix 30	30	10.1	4.12
		Mix 40	30	29.1	3.09
	28	Mix 30	30	19.3	4.05
		Mix 40	30	44.9	3.49

Note: N=the number of accepted samples used for the statistical analyses;
 μ =average strength of samples and COV=coefficient of variation

된다. 이는 Mix 40이 Mix 30에 비하여 안정적으로 측정된 우수한 압축강도값의 분포를 가지고 있음을 나타낸다.

3.1.2 충격공진법 측정 결과

충격공진법을 통해 측정한 공시체의 1차 공명 진동수를 KS F 2437에서 제시하는 식에 대입하여 동탄성계수를 구하였다. 종진동인 경우는 식 (2)를, 변형진동인 경우는 식 (3)을 따른다.

$$E_{dl} = 400 \times 10^{-5} \frac{L}{A} \times W \times f_1^2 \quad (2)$$

$$E_{dt} = 161 \times 10^{-5} \frac{L^3 T}{d^4} \times W \times f_2^2 \quad (3)$$

여기서, E_{dl} 은 종진동시의 동탄성계수 (MPa), E_{dt} 는 변형진동시의 동탄성계수 (MPa), W 는 공시체의 질량 (kg), f_1 은 종진동의 1차 공명진동수 (Hz), f_2 는 변형진동의 1차 공명진동수 (Hz), L 은 공시체의 길이 (mm), d 는 원주공시체의 지름 (mm), A 는 공시체의 단면적 (mm^2), T 는 회전반지름이다.

동탄성 계수의 계산결과는 Table 3과 4에 나타난 바와 같다. 먼저, 동탄성계수 측정값의 변동계수는 최소 2.18에서 최대 5.37로 값을 가져 측정값의 분포가 전체적으로 안정적인 것으로 나타났다. 또한 종진동과 변형진동 간의 변동계수 차이가 ± 0.5 미만의 차이를 보여 진동방법에 따른 측정값의 안정성 차이는 적은 것으로 나타났다. 다만 동탄성계수 측정값 중 변형진동 Mix 30의 재령 3일 측정값들이 변동계수 5.37로 상당히 분산되는 것으로 나타났다. 이는 초기재령에서 콘크리트의 경화가 아직 완전하게 이루어지지 않아서 공시체의 밀도가 낮기 때문인 것으로 판단된다.

충격공진법 실험결과 값과 실제 압축강도 값을 회귀분석

Table 3 Summary of statistical analysis (E_{dl})

	Age	Mix No.	N	μ	COV
E_{dl} [GPa]	3	Mix 30	30	13.2	3.98
		Mix 40	30	23.3	2.47
	7	Mix 30	30	17.5	4.37
		Mix 40	30	25.9	2.10
	28	Mix 30	30	23.7	3.67
		Mix 40	30	30.3	2.18

Table 4 Summary of statistical analysis (E_{dt})

	Age	Mix No.	N	μ	COV
E_{dt} [GPa]	3	Mix 30	30	14.1	5.37
		Mix 40	30	23.0	2.52
	7	Mix 30	30	17.0	4.93
		Mix 40	30	25.2	2.30
	28	Mix 30	30	22.9	3.81
		Mix 40	30	29.5	2.35

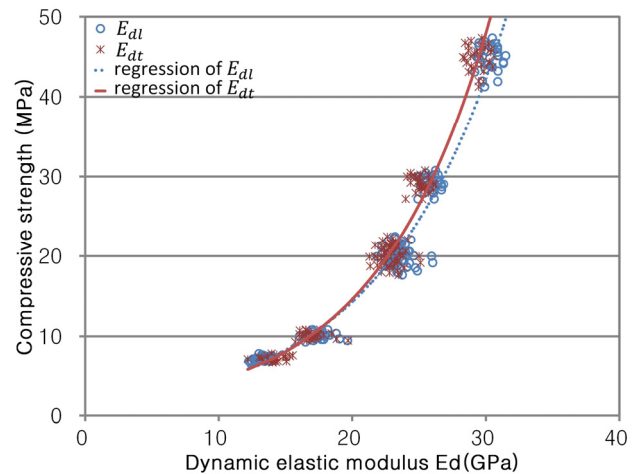


Fig. 4 Relationship between dynamic elastic modulus and compressive strength

한 결과는 Fig. 4에 나타나 있으며, 압축강도 추정식은 식 (4)와 (5)와 같다. 종진동이 변형진동의 결정계수값이 비슷하게 나타나 압축강도 예측에 대한 신뢰도 역시 비슷한 것으로 판단된다.

$$f_c = 1.37e^{0.12E_{dl}} \quad (R^2 = 0.97) \quad (4)$$

$$f_c = 1.63e^{0.11E_{dt}} \quad (R^2 = 0.97) \quad (5)$$

여기서, f_c 는 콘크리트의 압축강도이고 E_{dl} 와 E_{dt} 는 각각

중진동과 변형진동으로 수행한 충격공진법으로 구한 동탄성 계수이다.

3.1.3 초음파속도의 측정 결과

P파와 S파의 속도측정값에 대한 각 재령별 평균과 변동계수 값은 Table 5와 6에 나타난 바와 같다. 각 측정값의 변동계수는 전반적으로 ACI 214R에서 규정된 ‘ 좋음 ’ 과 ‘ 우수함 ’ 사이의 값을 나타내었다. P파 변동계수의 최대값은 재령 3일에 대하여 2.57로 나타났고 최소값은 0.81로 재령 28일에서 가장 낮게 나타났다. S파의 변동계수의 값도 재령 3일에 2.42로 가장 크게 나타났고 최소값은 0.81로 재령 28일에서 가장 낮게 나타나 재령이 높아질수록 변동계수 값이 낮아지는 동일한 경향을 나타내었다. 즉, 초음파속도의 측정값은 재령이 높아질수록 더욱 밀집되고 안정된 분포를 보이고 있다. 한편, S파와 P파를 비교 했을 때, S파의 변동계수가 P파에 비해 더욱 낮게 나타나 S파의 측정값이 더욱 안정적임을 보였다.

배합에 따라서는 Mix 30보다 Mix 40이 더 낮은 변동계수 값을 보이는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트가 경화됨에 따라 조직이 치밀해지고 고밀도화되어 파동이 더욱 안정적으로 전달되었기 때문으로 판단된다.

앞서 취득한 실험결과 값을 바탕으로 압축강도와 초음파속도와의 관계를 Fig. 5에 나타냈다. 회귀 분석을 통해 얻은 압축강도의 추정식은 식 (6)~(7)과 같으며 S파의 결정계수가 더 높은 것으로 나타났다.

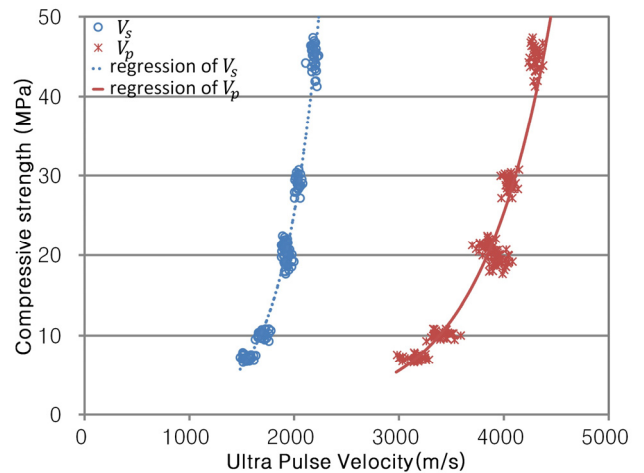


Fig. 5 Relationship between ultra pulse velocity and compressive strength

$$f_c = 0.079e^{0.0029V_s} \quad (R^2 = 0.97) \quad (6)$$

$$f_c = 0.060e^{0.0015V_p} \quad (R^2 = 0.94) \quad (7)$$

여기서, f_c 는 콘크리트의 압축강도이고 V_p 와 V_s 는 각각 P파와 S파로 수행한 초음파속도법의 초음파속도이다.

3.2 결과 분석

3.2.1 변동계수 비교

Fig. 6은 비파괴실험의 변동계수 값들을 비교한 결과이다. 비파괴실험법들 중에서 변동계수 값이 가장 낮은 S파 측정값의 신뢰성이 가장 높은 것으로 판단되며 동탄성계수의 변형진동이 가장 불안정한 측정값인 것으로 나타났다.

3.2.2 결정계수 비교

회귀분석에서 두 개의 변수간의 상관성을 나타내는 결정계수 값은 한 변수의 값을 통해 다른 한 변수의 값을 얼마나 잘 예측할 수 있는가를 나타내며, 결정계수가 높다는 것은 더 높은 신뢰도를 갖고 있다는 것을 의미한다 (Ang and Tang, 2007). 비파괴실험의 결정계수 값들 중 S파를 통한 강도예측식이 실제강도와 가장 높은 결정계수 값을 가져 가장 높은 신뢰도를 갖는 것으로 판단된다. 또한 P파를 통한 압축강도 예측의 결정계수가 가장 낮아 신뢰도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 변동계수 값을 통해 평가한 측정값의 안정성은 압축강도 예측의 신뢰성에 영향을 주는 것으로 판단된다.

Table 5 Summary of statistical analysis (V_p)

	Age	Mix No.	N	μ	COV
V_p [m/s]	3	Mix 30	30	3150	2.57
		Mix 40	30	3839	1.38
	7	Mix 30	30	3407	2.25
		Mix 40	30	4056	1.01
	28	Mix 30	30	3967	1.41
		Mix 40	30	4300	0.81

Table 6 Summary of statistical analysis (V_s)

	Age	Mix No.	N	μ	COV
V_s [m/s]	3	Mix 30	30	1553	2.42
		Mix 40	30	1911	0.91
	7	Mix 30	30	1700	2.15
		Mix 40	30	2039	0.84
	28	Mix 30	30	1934	1.38
		Mix 40	30	2190	0.81

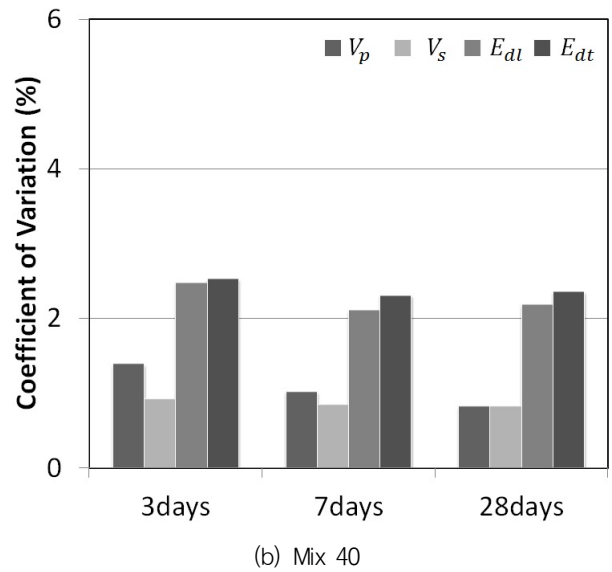
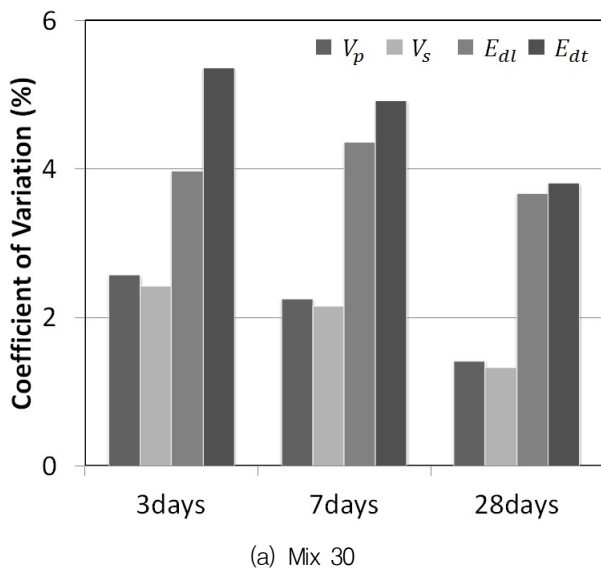


Fig. 6 Analytical results of the coefficient of variation

Table 7 Result of normality test of data

	Mix No.	f_{ck}	V_p	V_s	E_{d1}	E_{d2}
$\sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i}$	Mix 30	2.55	3.18	4.74	2.38	5.69
	Mix 40	6.96	5.10	3.45	4.44	7.96
P-value	Mix 30	0.64	0.53	0.31	0.67	0.22
	Mix 40	0.14	0.28	0.47	0.35	0.093

Note: n_i =observed frequencies and e_i =theoretical frequencies

3.2.3 정규성 검정

통계적 분석값의 신뢰성 검증을 위해 정규성 검정을 수행하였다. 정규성 검정 방법으로는 일반적으로 사용되어지는 χ^2 검정을 사용하였다. P-value가 유의수준보다 크고 통계량이 임계값 이내로 들어올 때 귀무가설이 채택되고 비파괴시험값은 정규분포를 따른다고 할 수 있다. 실험결과에 대한 정규성 검정결과를 Table 7에 나타냈으며, 각각의 실험값들은 임계값 ($c_{0.95,4}=9.49$)과 유의수준 ($\alpha=0.05$)에 대한 조건을 만족하여 정규분포를 따르는 것으로 나타났다.

4. 결론

이 연구에서는 초음파속도법의 P파와 S파, 충격공진법의 종진동과 변형진동 측정값에 대한 통계적 분석하였다. 이를 통해 측정값의 안정성과 압축강도 예측의 신뢰성을 평가하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 4가지의 비파괴시험과 압축강도에 대한 변동계수를 구한 결과 재령 3일의 변형진동으로 구한 동탄성계수의 변동계수를 제외하고 변동계수값이 ACI 214R에서 제시한 ‘ 좋음 ’ 이내의 범위에 들었다.
- (2) 변동계수값이 가장 낮은 시험방법은 S파를 통한 초음파속도법으로 가장 안정적인 측정이 가능한 것으로 나타났다.
- (3) Mix 30보다 Mix 40이 더 낮은 변동계수 값을 보이는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 고강도화에 따라 조직이 치밀해지고 고밀도화되어 파동이 안정적으로 전달되었기 때문으로 판단된다. 향후 연구를 통해 배합에 따른 측정 신뢰성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- (4) 변동계수값은 재령이 증가할수록 작아지는 경향을 보여 재령이 증가할수록 측정값의 분포가 안정적인 것으로 나타났다.
- (5) 비파괴시험결과와 실제강도간의 회귀분석을 통해 식 (4)~(7)과 같은 추정식을 얻었고 S파로 측정된 초음파속도법의 결정계수가 가장 높은 것으로 나타났다. S파에 의한 초음파속도법의 추정식이 실제강도를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비 지원

(11기술혁신F04)에 의해 수행되었으며, 이게 감사드립니다.

References

1. Park, S. B. et al. (2003), Inspection and Maintenance of Concrete, Kimoondang Publishing Company, Seoul, 21-27 (in Korean).
2. John, T., Petro, J., and Kim, J. B. (2012), Detection of delamination in concrete using ultrasonic pulse velocity test, *Construction and Building Materials*, (26)1, 574-582.
3. ACI committee 228 (1998), Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures, Report ACI 228.2R-98, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, 5-7.
4. Cho, C. H., Calculation of Aging Effects of Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete by Non-Destructive Test, *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 12, No. 6, 2008, 173-179 (in Korean).
5. Lim, S. H., Kang, H. S. (2001), Estimating Compressive Strength of High Strength Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity Method, *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, (5)3, 123-130 (in Korean).
6. Kim, M. S., Beak, D. I., and Youm, C. S. (2007), A Study on the Strength Prediction of Crushed Sand Concrete by Ultra-sonic Velocity Method, *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, (11)4, 71-78 (in Korean).
7. Komlos, K., Popovics, S., Nurnbergerova, T., Babal, B., and Popovics, J. S. (1996), Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards, *Cement and Concrete Composites*, 18(5), 357-364.
8. Jain, A., Kathuria, A., Kumar, A., Verma, A., and Murari, K. (2013), Combined Use of Non-Destructive Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure, *Proceeding of the 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering*, Procedia Engineering, 54, 241-251.
9. Korean Agency for Technology and Standards (2014), KS F 2403 Standard test method for making and curing concrete specimens, 1-3 (in Korean).
10. Korean Agency for Technology and Standards (2013), KS F 2437 Standard test method for dynamic modulus of elasticity, rigidity and dynamic Poisson's ratio of concrete specimens by resonance vibration, 1-5 (in Korean).
11. Korean Agency for Technology and Standards (2008), KS F 2731 Testing method for velocity of ultrasonic pulses to conclude compressive strength of concrete, 1-8(in Korean).
12. Korean Agency for Technology and Standards (2010), KS F 2405 Standard test method for compressive strength of concrete, 1-3 (in Korean).
13. ACI committee 214 (2011), ACI 214R-11 Guide for Evaluation of Strength Test Results of Concrete, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, 16.
14. Ang, A. H-S., Tang, W. H. (2007), Probability Concepts in Engineering Emphasis on Applications to Civil and Engineering, 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 306-314.

Received : 12/10/2014
Revised : 01/05/2015
Accepted : 03/03/2015

요 지

콘크리트구조물의 진단에 사용되는 비파괴시험법들은 구조물에 손상을 입히지 않고 구조물의 결함이나 강도를 추정할 수 있다는 장점이 있지만 추정값에 대한 신뢰성이 떨어진다는 문제점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 2가지 배합으로 총 180개의 공시체를 제작하였고, P파와 S파에 의한 초음파속도 측정, 종진동과 변형진동에 의한 충격공진법 총 4가지의 비파괴시험을 실시하였다. 그리고 실제압축강도 측정을 통해 비파괴시험 결과값의 신뢰성을 비교 분석하였다. 각 비파괴시험법의 결과값에 대한 통계적 분석결과 변동계수값이 가장 낮은 시험법은 S파에 의한 초음파속도법으로 가장 안정적인 관측이 가능한 것으로 나타났다. 한편, 실제압축강도와의 관계를 통해 압축강도 4개의 압축강도 추정식을 제안하였으며 S파에 의한 초음파속도법의 결정계수값이 가장 높은 것으로 나타났다. 향후 다양한 배합조건에 따른 비파괴시험 신뢰성에 대한 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 비파괴시험, 압축강도, 초음파속도법, 충격공진법