

초음파 속도법에 의한 현장 콘크리트 강도추정의 신뢰성 향상

Reliability Improvement of In-Place Concrete Strength Prediction by Ultrasonic Pulse Velocity Method

원 중 필* · 박 성 기**
Won, Jong Pil · Park, Sung Ki

Abstract

The ultrasonic pulse velocity test has a strong potential to be developed into a very useful and relatively inexpensive in-place test for assuring the quality of concrete placed in structure. The main problem in realizing this potential is that the relationship between compressive strength and ultrasonic pulse velocity is uncertain and concrete is an inherently variable material. The objective of this study is to improve the reliability of in-place concrete strength predictions by ultrasonic pulse velocity method. Experimental investigation was carried out to examine the effects of factors such as water-cement ratio, cement content, s/a rate, and curing condition of concrete. Accuracy of the prediction expressed in empirical formula are examined by multiple regression analysis and linear regression analysis, and practical equation for estimation the concrete strength are proposed. Multiple regression model uses water-cement ratio, cement content, s/a rate, and pulse velocity as dependent variables, and the compressive strength as an independent variable. Also, linear regression model is used to only pulse velocity as dependent variables.

Comparing the results of the analysis, the proposed equation expressed highest reliability than other previous proposed equations.

I. 서 론

콘크리트의 압축강도는 콘크리트 품질을 평가하는 중요한 지표로 사용되고 있다. 일반적으로 콘크리트의 품질을 평가하기 위해 내구성 지수가 사용되기도 하지만 이러한 지표들은 압축강도로부터

예측이 가능하기 때문에 콘크리트의 압축강도는 가장 중요한 지표로 사용되고 있다. 실제 콘크리트 구조물에 타설된 콘크리트의 경우, 경화 정도의 판정에 의한 거푸집 제거 시기의 결정이나 이미 사용되어지고 있는 구조물의 동해, 화재 지진 등의 사고 및 노후화에 따른 안전성의 재평가 등

* 건국대학교 농축산생명과학대학
** 건국대학교 대학원

키워드 : 다중회귀분석, 상관성, 신뢰성, 인자,
초음파속도

에 있어 압축강도는 매우 중요한 평가 인자로 사용되고 있다.

현존하는 콘크리트 구조물의 강도를 평가하기 위한 방법으로 흔히 사용되고 있는 방법은 콘크리트 구조물에서 직접 코어를 채취하여 이로부터 압축강도를 측정하는 방법이다. 이러한 방법은 콘크리트 구조물의 강도가 재료나 배합, 그리고 타설에서 양생까지의 시공조건에 따라 구조물 전반에 걸쳐 일정하게 나타나지 않기 때문에 코어를 채취할 위치의 선정이 어렵고 코어의 채취에 소비되는 비용이 많이 소요되며, 이로 인해 구조물에 손상을 입히게 되는 단점을 갖는다. 많은 연구자들에 의해 이러한 단점을 개선하려는 노력이 이루어졌고, 이러한 노력으로 경제성 및 편의성을 도모하고 현장 구조물로부터 직접적으로 강도를 평가할 수 있는 다양한 종류의 비파괴 검사(NDT: Non-Destructive Test) 기술이 개발되었으며, 현재까지도 이에 대한 연구가 진행되어 오고 있다.^(1,6,14)

콘크리트의 강도 추정을 위한 비파괴 시험 방법 중에서 초음파 속도법은 사용의 간편성, 비용의 절감, 구조물에의 적용성 등의 많은 장점을 가지고 있기 때문에 이미 미국, 영국, 일본, 그리고 RILEM(국제구조재료시험연구기관연합)에서 초음파 속도법에 의한 콘크리트 강도추정을 위한 규정을 마련하여 콘크리트 품질관리에 이용하고 있다.^(11,12) 우리 나라의 경우, 1970년대 초에 콘크리트의 품질검사를 위한 비파괴시험에 관한 연구보고를 시작으로 최근까지 많은 연구가 진행되고 있다.^(4,5,7,8,9) 하지만 현재 초음파 속도법은 주된 수단으로보다는 다른 방법과 병용하는 보조적인 수단으로 그 사용이 제한되어 지고 있다. 초음파 속도법의 사용이 제한되어 지고 있는 가장 큰 이유는 콘크리트 압축강도와 초음파 속도 사이의 상관관계가 간단하지 않고, 콘크리트를 구성하고 있는 많은 인자들의 영향으로 인해 신뢰성이 떨어진다는 문제점 때문이다. 실제로 많은 연구자들에 의해 초음파 속도로부터 콘크리트의 압축강도를 추정하려는 노력이 이루어졌고, 이들로부터 초음파 속도에 의한 압축강도 추정식들이 만들어졌지만

이러한 추정식들도 콘크리트의 배합에 사용된 조건들이 변할 때, 상관관계가 많이 떨어진다는 단점으로 인해 현장에서의 사용에 제한이 있다.^(2,3) 따라서 본 연구에서는 콘크리트 강도 추정을 위한 비파괴 시험방법 중에서 사용의 간편성과 신속성으로 인한 시간의 절약과 측정결과로부터 강도뿐만 아니라 콘크리트 내부특성 평가도 가능하다는 장점을 가지고 있는 초음파 속도법을 사용하여 신뢰성이 높은 콘크리트 압축강도를 추정하려는데 그 목적이 있다.

II. 사용재료 및 실험변수

1. 시멘트 및 골재

본 연구에서는 H사의 보통 포틀랜드시멘트 (Type I)가 사용되었고, 잔골재는 강모래가 사용되었으며, 굵은골재는 최대 치수 25mm의 부순골재가 사용되었다. 사용된 시멘트 및 골재의 물리적 특성은 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of cement

Fineness (cm ² /g)	Specific gravity	Stability (%)	Compressive strength (kgf/cm ²)		
			3 days	7 days	28 days
3.488	3.15	0.08	224	308	404

Table 2 Physical properties of fine and coarse aggregate

Type of aggregate	Specific gravity (SSD)	Absorption (%)	F.M
Fine Agg.	2.59	0.67	2.99
Coarse Agg.	2.62	0.35	-

2. 배합설계

본 연구는 재령, 단위 시멘트량, 물-시멘트 비, 잔골재율, 그리고 양생조건(수중과 기중)에 따른 초음파 속도의 변화 경향을 파악하고 이에 상응하는 콘크리트 압축강도와의 상관관계로부터 콘크

Table 3 Mix proportions

S/a (%)	C (kg/m ³)	W/C = 0.55			W/C = 0.50			W/C = 0.45			Remarks
		W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	
41	280	154	791.1	1147.2	140	806	1168.8	126	820.9	1190.4	Cured in water
	340	187	735.6	1066.7	170	753.7	1093	153	771.9	1119.3	
	400	220	680.1	986.2	200	701.4	1017.2	180	722.8	1048.1	
43	340	187	771.5	1030.5	170	790.5	1056	153	809.5	1081.3	Cured both in water and in air
	400	220	713.3	952.8	200	735.7	982.7	180	758	1012.5	

리트의 압축강도를 예측할 수 있는 추정식을 제안하고자 하였다.

배합설계에서는 단위 시멘트량을 280, 340, 400kg /m³으로 변화시키고, 각 단위시멘트량에 대하여 물-시멘트 비를 45, 50, 55%, 잔골재율을 41%와 43%로 변화시켰으며, 단위시멘트량이 340kg/m³과 400kg/m³인 두 가지 배합을 사용하여 양생 방법에 따른 초음파 속도 및 압축강도의 변화를 측정하기 위하여 수중양생과 더불어 기중양생을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 배합 설계를 Table 3에 나타내었다.

3. 실험방법

가. 공시체의 제작 및 양생

본 실험에서는 60 l의 강제식 믹서를 사용하여 굵은 골재, 잔골재, 시멘트를 순서대로 투입하고, 1분동안 건 비빔을 실시한 후 물을 첨가하여 약 1분 30초간 비빔을 실시하였다. 공시체는 KS F 2403(실험실에서 콘크리트의 압축 및 휨 강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법)에 따라 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 제작하였다. 다짐은 진동 테이블(3600rpm)을 사용하여 다짐하였으며, 완성된 공시체는 24시간 동안 초기 양생을 실시한 후, 탈형하여 소정의 재령에서 초음파 속도와 압축강도를 측정하였다. 양생은 수중양생의 경우에는 23±2°C의 수조에서 실시하였으며, 기중양생의 경우에는 습도 50~60%, 온도 23±2°C의 실내에서 양생하였다.

나. 압축강도

실험 공시체의 제작은 $\phi 100 \times 200$ mm의 실린더 공시체를 각 배합(15배합)에 대하여 9개씩 제작하여 3일, 7일, 28일 재령에서 각각 3개씩 KS F2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 실험을 실시하였으며, 2회 반복 실시하였다.

다. 초음파 속도

소정의 재령까지 양생이 완료된 공시체는 우선 0.05mm의 정밀도를 갖는 버니어 캘리퍼스를 사용하여 초음파 속도 측정길이를 측정하였으며, 초음파 속도는 공시체와 양진자가 일직선에 오도록 그 위치를 설정하고, 각 측정 지점에서 발진자와 수신자의 위치를 바꾸어 측정하여 그 평균값을 측정치로 하였다. 또한 시험체와 진자의 접촉정도를 높이기 위하여 측정면에 그리스를 바르고 일정한 힘을 가하여 측정기계의 눈금이 안정되는 시점의 전파시간을 기록하였다. 측정치는 다음의 식(1)을 사용하여 초음파 속도로 환산하였다.

$$V_p = \frac{L}{T} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 V_p : Pulse 속도(km/s)

L : 공시체의 경로길이(km)

T : 전파시간(sec)

본 연구에서는 초음파속도의 측정을 위하여 영국 C.N.S사의 PUNDIT(Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester)를 사용하였

으며, 2회 반복 실시하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 영향인자

본 연구에서 영향인자로 배합에 고려된 물-시멘트 비, 단위시멘트량, 잔골재율에 따른 압축강도의 변화를 Fig. 1~Fig. 4에 나타내었다. Fig. 2에서와 같이 물-시멘트 비의 감소에 따라 압축강도 및 초음파 속도는 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 단위시멘트량의 변화에 따른 압축강도 및 초음파 속도는 단위시멘트량의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 잔골재율의 변화에 따른 압축강

도 및 초음파 속도도 다른 영향인자와 비슷한 경향으로 변화하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 각 영향인자들이 압축강도 및 초음파 속도에 영향을 미치며, 각각의 영향인자를 고려한 추정식을 제안하는 것이 초음파 속도법에 의한 강도 추정치의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

2. 회귀모델 제안

위의 실험결과를 바탕으로 하여 초음파 속도와 압축강도 사이의 상관관계를 분석하였다. 기존 추정식이 단순한 회귀분석에 의해 성립된 관계가 대부분이기 때문에 연구에서는 콘크리트를 구성하는 배합 인자인 물-시멘트 비, 단위시멘트량, 잔골재

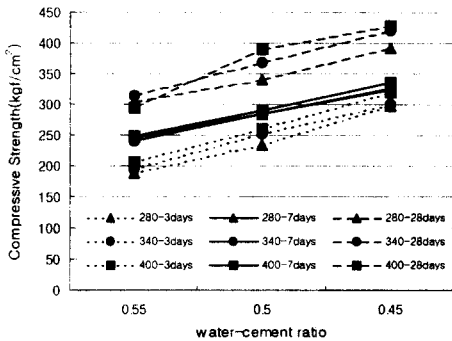


Fig. 1 Compressive strength (cement content)

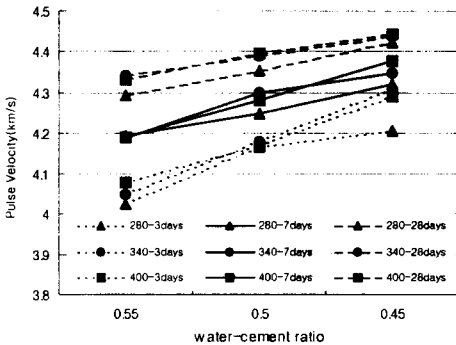


Fig. 2 Pulse velocity (cement content)

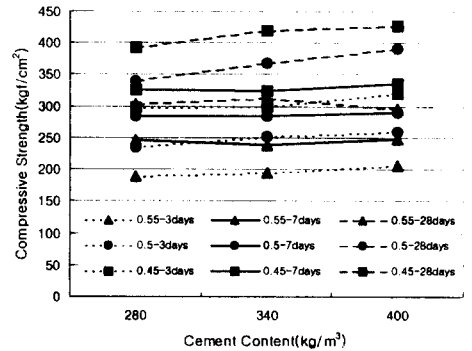


Fig. 3 Compressive strength (water-cement ratio)

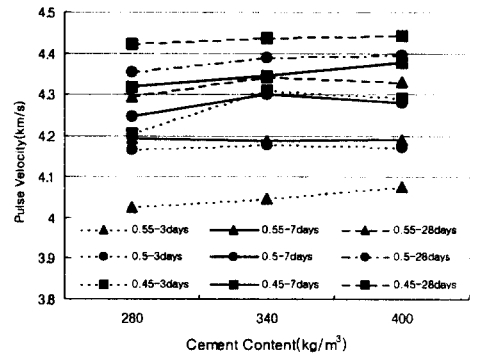


Fig. 4 Pulse velocity (water-cement ratio)

을 고려할 수 있는 다중 회귀분석을 실시하려 한다. 또한 배합 비를 알 수 없는 구조물에의 적용을 위하여 초음파 속도만을 사용한 단순회귀 분석을 동시에 실시하였다. 다중 회귀 분석의 경우에는 각 인자들의 상관계수를 구하여 인자 서로 간의 영향을 분석하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

본 연구에서는 콘크리트를 구성하는 배합 인자인 물-시멘트 비, 단위시멘트량, 잔골재율을 고려할 수 있는 다중 회귀분석을 실시하려 한다. 또한 배합 비를 알 수 없는 구조물에의 적용을 위하여 초음파 속도만을 사용한 단순회귀 분석을 동시에 실시하였다. 다중 회귀 분석의 경우에는 각 인자들의 상관계수를 구하여 인자 서로 간의 영향을 분석하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 알 수 있듯이 각 영향인자 사이의 상관계수는 0.6 이하로 매우 작게 나타났는데, 이는 각 인자를 독립변수로 한 다중회귀분석이 가능하다는 것을 나타낸다. 이러한 결과를 바탕으로

하여 다중회귀분석을 실시한 결과를 Table 5에 나타내었다.

다중회귀분석을 통하여 본 연구에서 제안된 식은 다음과 같다.

$$F_c = 492.92 V_p - 1.955(w/c) - 0.011(C) - 1.720(S/a) - 1635.55$$

여기서, F_c = 압축강도(kgf/cm²)

V_p = 초음파 속도(km/s)

w/c = 물-시멘트비(%)

C = 단위시멘트량(kg/m³)

S/a = 잔골재율(%)

또한 배합 비를 알 수 없는 콘크리트 구조물의 강도 추정을 위하여 초음파 속도만을 고려한 단순회귀식을 제안하였다. 단순회귀식의 경우, 실험의 오차를 최대한 줄이고, 이상값을 제외한 나머지 초음파 속도 값을 사용하여 제안되었으며, 추정식은 다음 식(2)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Y = aX + b + \epsilon \dots \dots \dots (2)$$

여기서, Y = 압축강도(kgf/cm²),

X = 초음파속도(km/s),

a, b = constant,

ϵ = 오차

식 (2)에서 a 와 b 는 콘크리트를 구성하는 성분 에 따라 변하게 되며, 오차 값은 평균이 0이고, 표준오차가 17.66kgf/cm²이다. 이러한 오차 값은 콘크리트가 불균질 재료이고, 초음파 속도 값이 압축강도뿐 아니라 각각의 구성물의 특성에 따른 영향을 받기 때문에 큰 값이라고 할 수 없다.^(10,13)

따라서 이러한 결과를 바탕으로 초음파 속도와 압축강도 사이의 가장 적당한 상관관계식을 구하였으며, 결과를 Table 6과 Fig. 5에 나타내었다.

단순회귀분석을 통해 초음파 속도만을 변수로 하는 추정식을 제안하였으며 제안된 추정식은 다음과 같다.

Table 4 The coefficient of relationship for individual factor

	Water-Cement Ratio	Cement Content	S/a rate	Velocity
Water-Cement Ratio	1			
Cement Content	0	1		
S/a rate	0	0.327	1	
Pulse Velocity	-0.61	0.064	-0.109	1

Table 5 The equation of multiple linear regression

	Coefficient	Std. Error	t-Value	Sig. Level
Constant	-1635.55	211.314	-8.626	0.0000
W/C ratio	-1.955	0.7953	-2.458	0.0184
Cement content	-0.011	0.0603	-0.171	0.8654
S/a rate	-1.720	2.779	-0.619	0.5393
Pulse velocity	492.92	29.223	16.867	0.0000

R-squared = 0.935
R-squared(Adj) = 0.929

Table 6 The Equation of linear regression

	Coefficient	Std. error	t-value	Sig. level
Constant	-2000	99.870	-20.034	0.0000
Pulse velocity	537.96	23.416	22.974	0.0000

R-squared = 0.925
R-squared (Adj) = 0.923

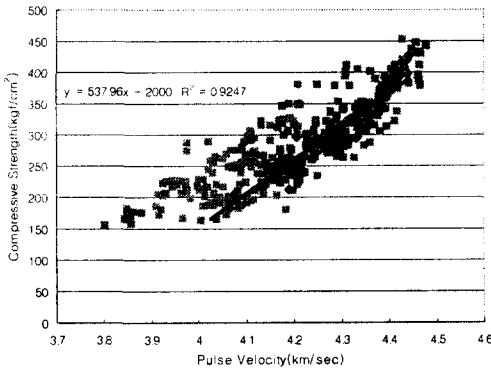


Fig. 5 The Linear regression curve

$$F_c = 537.96 V_p - 2000$$

여기서, V_p = 초음파 속도 (km/s)

회귀분석을 통해 얻어진 추정식은 그 정도를 파악하는 것이 중요한데, 회귀분석을 통해 얻어진 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로서 많이 사용되는 것이 분산분석표에 의한 F-검정, 결정계수 R^2 , 잔차평균제곱이 있다. 제안된 두 가지 회귀방정식의 분산분석 결과를 Table 7에 나타내었다.

분산분석 결과 회귀분석에 의한 추정식이 실측강도를 설명하는데 있어 매우 유의한 것으로 나타났다. 결정계수 또한 다중회귀식과 단순회귀식이 각각 0.935와 0.925로 높게 나타났다. 결정계수 값은 일반적으로 0과 1 사이의 값이 되는데 1에 가까울수록 얻어진 회귀식에 의해 설명할 수 있는 결과 값들이 많아진다는 것으로서 추정식에 의해 얻어진 콘크리트 압축강도와 실험을 통해 얻어진 실측강도 사이에는 큰 차이가 없다는 것을 나타낸다.

Table 7 Analysis of variance for regression

	Sum of square	DF	Mean of square	F-ratio	P-value
Multi-linear Regression	166556.43	4	41639.11	144.25	0.0000**
Error	11546.44	40	288.66		
Total	178102.87	44			
Linear-regression	164686.4	1	164686.4	527.82	0.0000**
Error	13416.43	43	312.01		
Total	178102.9	44			

**Statistically significant at the 99% level of confidence

3. 신뢰성 검증

본 연구에서 얻어진 추정식의 신뢰성 검증을 위하여 기존 연구자들에 의해 얻어진 연구 결과중에서 본 연구에서와 비슷한 조건에서 실험된 실험자료를 사용하여 현재 많이 사용되고 있는 압축강도 추정식과 비교 분석을 실시하였다. 본 연구에서 제안된 식과 비교하기 위해 사용된 추정식을 Table 8에 정리하였다. 본 연구에서 얻어진 추정식과 기존의 추정식을 6가지의 연구자료에 대입하여 신뢰성을 검증하였다. 신뢰성은 각 연구자료의 실측강도의 $\pm 20\%$ 값의 범위를 구하여 각 추정식으로부터 구해진 추정강도가 이 범위에 드는 정도를 파악하여 검증되었다. 신뢰성 검증 결과를 Table 9에 정리하였다.

첫 번째 예제의 경우, 얻어진 초음파 속도가 4.190km/s에서 4.490km/s의 범위로 본 연구에서 얻어진 초음파 속도 범위인 4.026km/s에서 4.443km/s

Table 8 The equation of comparison⁽²⁾

JB1 equation	$F_c = 215V_p - 620$
Kim's equation	$F_c = 361V_p - 1194$
小阪義夫 equation	$F_c = 172.5V_p - 499.6$
Oh's equation	$F_c = 510V_p - 2010$

Table 9 The Results of six equation analysis

Example No.	Pulse velocity		Multi-linear equation	Linear equation	JB1 equation	Kim's equation	小阪義夫 equation	Oh's equation
			Percentage within $\pm 20\%$ of Measured Strength (%)					
Ex(1)	Max	4.49	100	100	100	62.5	50	0
	Min	4.19						
Ex(2)	Max	4.46	85	75	75	30	70	10
	Min	4.00						
Ex(3)	Max	4.56	75	68.75	50	43.8	62.5	12.5
	Min	3.94						
Ex(4)	Max	4.28	83.3	75	58.3	41.7	83.3	0
	Min	3.98						
Ex(5)	Max	4.49	75	66.67	58.3	41.7	50	0
	Min	3.97						
Ex(6)	Max	4.35	88.89	88.88	33.33	11.11	66.67	0
	Min	3.92						

와 비슷한 범위를 가지며, 다섯 가지의 추정식 중에서 본 연구에서 얻어진 다중회귀 및 단순회귀 추정식과 일본건축학회 추정식이 총 8개의 실험자료 모두가 요구되는 범위에 드는 것으로 나타났다. 두 번째 예제의 경우에서도 얻어진 초음파 속도의 범위가 4.000km/s에서 4.460km/s로 비슷하고, 본 연구를 통해 제안된 다중회귀 추정식의 경우가 총 20개의 실험자료 중에서 17개가 요구되는 범위 내에 들어(85%) 가장 좋은 결과를 나타냈으며, 다음으로 단순회귀 추정식이 75%로 일본건축학회 추정식과 동일하게 나타났으며, 다음으로 소판의 부 공식(70%), 김무한의 공식(30%), 오창희의 공식(10%) 순으로 나타났다. 세 번째 예제의 경우에는 다른 예제와는 달리 초음파 속도 값의 범위가 3.94km/s에서 4.56km/s로 다소 차이가 크게 나타났으며, 실측강도와 추정강도 사이의 차도 다섯 가지 추정식 모두에서 약간 크게 나타났지만, 다중회귀 추정식의 경우가 가장 좋은 결과(75%)를 나타냈고 다음으로 단순회귀 추정식(68.75%)이 좋은 결과를 나타내었다. 초음파 속도와 압축강도 사이의 상관관계는 얻어진 초음파 속도 값의 영향을 가장 많이 받기 때문에 분석에서 나타난 것과 같이 본 연구에서 얻어진 초음파 속도 범위를 많이 벗어나는 경우에는 정도가 떨어지는 것을

알 수 있다. 하지만 차이가 크지 않은 경우에는 다중회귀 분석을 통하여 배합 조건을 고려한 경우가 가장 좋은 결과를 나타낸다는 것을 알 수 있으며, 초음파 속도만으로 압축강도를 추정하는 경우에는 오차의 정도를 최대한으로 줄임으로써 추정식의 신뢰성을 높일 수 있다는 것을 알 수 있다. 나머지 예제의 경우에서도 모두 본 연구에서 제안된 두 종류의 추정식의 결과가 가장 좋게 나타났다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴 시험 중에서 초음파 속도법을 이용하여 신뢰성이 높은 콘크리트 압축강도 추정식을 제안하였다. 본 추정식은 회귀분석을 이용하였으며, 제안된 추정식은 기존 연구자들에 의해 제안된 추정식과 비교하여 신뢰성을 검토하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 초음파 속도 및 압축강도는 물-시멘트 비, 단위시멘트량, 잔골재율에 따라 변화하였으며, 물-시멘트 비가 낮을수록, 단위시멘트량이 높을수록, 그리고 잔골재율이 낮을수록 압축강도 및 초음파 속도는 증가하였다.

2. 초음파 속도의 변화는 콘크리트 내에 함유된 수분에 따라 많은 영향을 받는 것으로 나타났는데, 수중양생한 공시체의 경우가 훨씬 큰 초음파 속도 값을 나타내었다. 이것은 콘크리트 내부에의 수분의 존재와 기중양생의 경우, 수화반응에 의한 수분의 손실로 인한 공극 및 미세균열이 발생하였기 때문인 것으로 사료되며, 압축강도 역시 초음파 속도와 마찬가지로 수중양생한 경우가 강도가 더 크게 나타났다.

3. 콘크리트의 강도를 결정하고 배합의 결정에 중요한 요인인 물-시멘트 비(w/c), 단위시멘트량(C), 잔골재율(S/a)에 대한 영향을 추정식에 고려하기 위하여 각각의 인자를 초음파 속도와 함께 독립변수로 하여 다중회귀분석을 실시하였다. 이로부터 다음과 같은 추정식을 얻었다.

$$F_c = 492.92 V_p - 1.955(w/c) - 0.011(C) - 1.720(S/a) - 1635.55$$

또한 배합 비를 알 수 없는 구조물에 적용을 위해 단순회귀분석을 실시하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$F_c = 537.96 V_p - 2000$$

4. 제안된 추정식을 검증하기 위하여 F-검정을 실시하였으며, 실시한 결과 회귀분석에 의한 다중회귀분석과 단순회귀분석 모두 매우 유의한 것으로 나타났으며, 결정계수도 다중회귀분석과 단순회귀분석 결과가 각각 0.935와 0.925로 높게 나타났다.

5. 제안된 추정식의 신뢰성을 파악하기 위하여 기존의 연구자들에 의해 실시된 연구 결과를 사용하여 추정강도를 구하여 추정강도가 실측강도의 ±20% 범위 내에 드는 정도를 파악한 결과 제안된 추정식들이 다른 추정공식과 비교하여 가장 높은 신뢰성을 나타내었다.

6. 추정식에 배합 인자들을 고려하는 것이 초음파 속도와 압축강도 사이의 상관관계를 높여줄 수

있으며, 초음파 속도법 사용의 보편화에도 도움을 줄 것으로 사료된다.

7. 본 연구에서 제안된 추정식은 물-시멘트 비가 0.45에서 0.70, 단위시멘트량 251kg/m³에서 404kg/m³, 그리고 잔골재율 37.5%에서 49.2%까지의 폭넓은 배합의 콘크리트에서 적용이 가능한 것으로 나타났다. 하지만 물-시멘트 비가 제시된 범위와 크게 차이가 있는 경우 또는 실험을 실시할 당시의 콘크리트 공시체 내부의 함유 수분의 차이로 인한 초음파 속도 값의 차이가 큰 경우에는 사용이 제한될 수 있다. 또한 본 제안식이 28일까지의 재령에 대하여 제안된 식이므로 장기간 재령을 갖는 콘크리트에 대하여 결과값에 다소 차이가 발생할 수 있다.

본 논문은 2000학년도 건국대학교 학술연구비 지원에 의해서 연구됨

참 고 문 헌

1. 권인규, 강병희, 오창희, 1984, 비파괴시험법에 의한 콘크리트 압축강도 추정에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표 논문집, 제9권, 제1호, pp.395-398.
2. 반호용, 1987, 초음파에 의한 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 연구, 한양대학교 대학원 박사학위논문.
3. 연길환, 윤석천, 송인춘, 반발도법과 초음파속도법의 복합법에 의한 콘크리트 압축강도의 추정, 대한건축학회 논문집, 제3권, 제3호.
4. 연길환, 1984, 초음파를 이용한 콘크리트 압축강도의 추정, 대한건축학회지, 제28권, 제120호, pp.71-74.
5. 오창희, 1971, 초음파법에 의한 고강도 콘크리트의 비파괴검사에 관한 연구 (I), 대한건축학회지, 제15권, 제42호, pp.63-69.
6. 오창희, 반호용, 1987, 초음파를 이용한 서울·경기·강원지역 레미콘의 비파괴시험에 관한

- 연구, 대한건축학회 논문집, 제3권, 제3호, 통권11호, pp.143-149.
7. 오창희, 1997, 초음파법에 의한 모르타의 비파괴시험법에 관한 연구, 대한건축학회지, 제21권, 제78호, pp.56-58.
 8. 한국에너지 연구소 부설 원자력안전센터, 1987, 콘크리트 비파괴 검사 기술개발, 한국전력공사 기술연구원.
 9. 한국에너지연구소 부설 원자력안전센터, 1988, 콘크리트 강도측정을 위한 비파괴 검사의 신뢰도 향상에 대한 연구, 한국전력공사 기술연구원.
 10. Chang, Luh Maan, Carino, Nicholas J. & Cheng-Bin Wang, 1998, Process of In-Place Evaluation of Concrete Strength, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.10, No.4, November, pp.229-236.
 11. Komlos, K., Popovics, S., Nurnbergerova, T., Babal, B. & Popovics, J. S., 1996, Comparison of Five Standards on Ultrasonic Pulse Velocity Testing of Concrete, Cement Concrete and Aggregates, V.18, No.1, Jun., pp.42-48.
 12. Komlos, K., Popovics, S., Nurnbergerova, T., Babal, B. & Popovics, J. S., 1996, Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards, Cement and Concrete Composites, 18, Mar.-Jun., pp.357-364.
 13. Leshchinsky, A. M., 1992, Non-destructive Testing of Concrete Strength : Statical Control, Material and Structures, pp.70-78.
 14. Sturup, V. R., Vecchio, F. J. & Caratin, H., Pulse Velocity as Measure of Concrete Compressive Strength, ACI, Detroit, SP-82.