

초음파를 이용한 중회귀분석법에 의한 콘크리트의 압축강도추정

박 의 근* · 한 응 교** · 김 완 규***

Estimate of Compressive Strength for Concrete using Ultrasonics by Multiple Regression Analysis Method

I. G. Park, E. K. Han and W. K. Kim

Abstract Various types of ultrasonic techniques have been used for the estimation of compressive strength of concrete structures. However, conventional ultrasonic velocity method using only longitudinal wave cannot be determined the compressive strength of concrete structures with accuracy. In this paper, by using the introduction of multiple parameter, e. g. velocity of shear wave, velocity of longitudinal wave, attenuation coefficient of shear wave, attenuation coefficient of longitudinal wave, combination condition, age and preservation method, multiple regression analysis method was applied to the determination of compressive strength of concrete structures.

The experimental results show that velocity of shear wave can be estimated compressive strength of concrete with more accuracy compared with the velocity of longitudinal wave, accuracy of estimated error range of compressive strength of concrete structures can be enhanced within the range of ± 10 % approximately.

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물이 적당한 강도를 가지고 있는가에 대한 평가나 경년열화가 진행되고 있는 건축물의 품질, 신뢰성, 균일성, 내구성등의 성질을 조사하기위한 콘크리트 구조물의 비파괴 평가에 초음파

의 물리적 성질을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)}

콘크리트 구조물에서 압축강도를 측정하는 것은 매우 중요하다. 콘크리트 압축강도 측정방법으로는 콘크리트 구조물로 부터 코어를 직접 채취하고 압축강도시험을 하는 직접적인 방법과 슈밋트 해머에 의

* 천안공업전문대학 용접기술과

** 한양대학교 정밀기계공학과

*** 한국산업인력관리공단

접수 : 1991년 9월 11일

한 반발경도 측정법³⁾, 초음파 종파음속법⁴⁾, 및 양자 병용법등의 비파괴적 방법이 있다. 이 중 초음파 종파음속법은 미리 종파음속과 압축강도와의 관계를 구하여 놓고 종파 음속으로 부터 압축강도와의 관계를 구하는 방법으로 이 방법은 간편하고, 실시간 측정이 가능하기 때문에 현장에서 잘 이용되고 있으나 충분한 측정정도(精度) 및 신뢰성을 갖지 못하는 것이 가장 큰 문제점이다. 고체중의 초음파 전파에 관한 이론적·학문적 체계는 거의 완성되었다고 해도 과언이 아니다. 그러면서도 실제 초음파 계측에는 이론상의 조건이 얻어지기 어렵기 때문에 그대로 적용하는 것은 곤란하다. 특히 다변량의 복잡성을 갖는 콘크리트는 초음파의 감쇠가 심하기 때문에 적용하는 초음파의 주파수는 10~500kHz 정도로 낮으며 이로인해 초음파의 지향성이 거의 상실되어 이에 대한 실험적 연구의 어려움이 있다. 일반적으로 음속과 탄성계수와와의 관계는 단일함수로 나타낼 수 있으며 음속으로 부터 탄성계수를 정확히 측정하는 것이 가능하다. 그러나 콘크리트 구조물은 모래, 시멘트, 자갈 등의 혼합물질로 구성되어 있어 압축강도 추정에 영향을 미치는 인자가 매우 많기 때문에 단일함수로 음속과 압축강도의 관계를 나타내는 것은 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 저주파 초음파를 이용하여 콘크리트 구조물의 비파괴적인 압축강도 추정법에 대해 ① 초음파에 의해 콘크리트 압축강도의 추정이 가능한가 ② 초음파의 음속을 정밀하게 측정하는 것으로부터 압축강도의 오차 정도를 향상할 수 있는가 ③ 초음파의 어느 정보가 압축강도의 추정에 가장 강한 상관관계를 갖는가 ④ 콘크리트의 성분에 의존하지 않고 음속으로부터 압축강도를 결정할 수 있는가 하는 단순한 의문으로부터 실험적 연구를 하였다. 즉, 초음파 계측에 의해 얻을 수 있는 정보(종파음속, 횡파음속, 종파 감쇠계수, 횡파 감쇠계수)의 어느것이 압축 강도와 강한 상관관계를 갖는가. 또 콘크리트의 정보(물·시멘트 비, 세골재율, 양생 기간, 양생 조건등)을 고려했을 경우 어떻게 되는가, 그리고 이들 다수의 정보간에 상관 관계를 조사하고 요약하는 데 중회귀분석이라는 다변량해석법^{4,5,6)}을 적용하여 압축강도 추정을 위한 중회귀식을 통계

적으로 해석하였다. 그 결과 종파음속등의 단독 정보로부터 압축강도를 추정하는것 보다 횡파의 도입과 복수인자를 이용한 중회귀분석에 의해 압축강도의 오차범위를 종래에 비해 매우 높은 약 ±10% 범위까지 높일 수 있었다.

2. 초음파 음속과 압축강도의 관계

반 무한 등방 탄성체에 평면파가 X방향으로 전파하는 경우의 운동 방정식은 탄성과 이론으로부터 다음의 편미분 방정식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial X^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial X^2}$$

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial X^2} \dots\dots\dots (2)$$

단 $\xi, \eta,$ 및 ζ 는 각각 X, Y, 및 Z 방향의 변위, λ, μ 는 Lamé 정수, ρ 는 밀도이다. 여기서 식(1)은 입자의 진동방향과 파의 진행방향이 일치하는 종파이고, 식(2)는 입자의 진동방향과 파의 진행방향이 수직인 2 종류의 횡파 SV파, SH파를 나타낸다.

다시말해 탄성체 중에는 종파와 횡파가 존재하며, 종파의 음속을 V_L , 횡파의 음속을 V_s 라 하면 음속은 각각 다음식으로 주어진다.

$$V_L = \sqrt{\frac{K + (4/3) \cdot G}{\rho}} \dots\dots\dots (3)$$

$$E = K + (4/3) \cdot G \dots\dots\dots (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 E는 재료의 종탄성율, K는 체적탄성율 및 G는 횡탄성율이다. 다음에 재료의 파괴 패턴에는 벽개파괴, 전단파괴 두 종류가 있고, 단결정 구조의 이론벽개강도와 이론전단강도를 비교하면 이론벽개강

도가 크기 때문에 그 재료의 최대강도는 일반적으로 이론 전단강도에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다.

콘크리트의 경우는 조직의 불균질, 공극, 골재, 매트릭스 계면에서의 응력집중현상을 가지므로 상기 결정 구조의 파괴거동과 단순히 비교하는 것은 어렵지만 그 강도가 최대전단응력이나 전단변형에너지에 의해 지배되는 것으로 잘 알려져 있다. 다시말해 상기의 여러 탄성을 중에서 재료의 파괴와 가장 밀접한 관계에 있는 파라메타는 전단변형을 지배하는 횡탄성을 G 이다. 종파음속 V_L 은 K 와 G 의 합성함수 또는 E 만으로 표시된다.

경화 콘크리트의 경우 K 와 G 의 값은 거의 같은 값이 된다. 따라서 파괴현상 다시말해 콘크리트의 강도 변화에 대해 그렇게 민감하게 변화하지 않는다고 생각되어 진다. 이에 반해 횡파의 음속 V_s 는 전단변형을 지배하는 G 만의 함수로 표시되고 재료의 강도 변화에 민감하게 변화한다. 즉 종파음속보다 재료의 강도변화에 대해 횡파음속이 더욱 민감한 거동을 하는 것을 식(3) 및 식(5)로부터 알 수 있다. 다시말해 식(3)을 이용하여 음속과 압축강도와의 관계를 실험적으로 구하고 종파음속으로부터 압축강도를 추정하는 방법이 주었다.

이상으로부터 압축강도 추정의 수단으로 종래의 종파음속보다 횡파 초음파를 이용하여 압축강도를 추정하는 것이 더 적합함을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

본 실험에 사용한 저주파 초음파계측기의 Block Diagram은 Fig. 1과 같으며 초음파탐촉자의 제원은 Table 1과 같다.

이 계측기의 특징은 회로구성이 전부 디지털화 되어 16 Byte CPU에 의해 제어되고 콘크리트용으로 주파수 대역을 좁게하고 송신펄스 폭을 넓게한 것으로 50ns의 시간분해능으로 초음파의 전파시간을 측정한다.

실험에 사용한 저주파 초음파 탐촉자로는 0.1 Z40 N의 종파 수직탐촉자와, 0.1 L40SN의 횡파수직탐촉

Table 1. Specification of ultrasonic probes

Model	Vibrator			Central Freq. (kHz)	Remark
	Material	Size(mm)	Cut		
0.1Z40N	PZT	φ 40		103	φ 10 Central Hole
0.1L40SN	LiNbO ₃	φ 40	Y 136°	97	

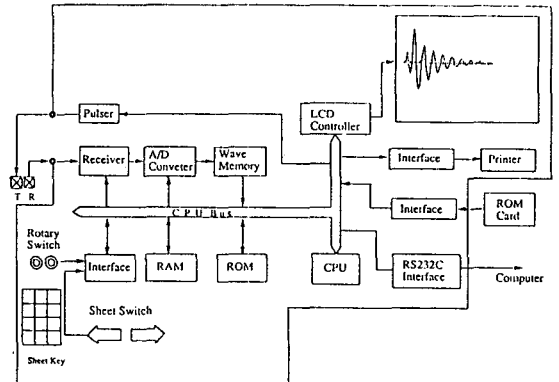


Fig.1 Block diagram of low frequency ultrasonic flaw detector

자 두개를 사용하였다. 종파 수직 탐촉자는 공진주파수 100kHz, φ40의 PZT진동자를 사용한 것이다. 횡파 수직탐촉자는 공진주파수 100kHz, φ40의 Y-Cut 136°의 니오산리튬(LiNbO₃) 단결정 진동자를 사용하여 만든 탐촉자로 종파의 발생이나 모드변환이 잘 일어나지 않으며 양 탐촉자 모두 그리스, 그리세린등의 접촉매질을 사용하지 않아도 충분한 감도로 콘크리트중에 초음파의 송수신이 가능한 Dry Coupling Type의 탐촉자이다.

실험에 사용한 시험체는 2개의 그룹을 사용하였다. 하나는 Table 2.와 같이 물·시멘트비(W/C), 세골재율(s/a) 등의 배합을 변화시킨 것(이하 A 시리즈 시험체라 한다)으로 양생은 모두 수중양생하였으며 측정시의 양생 기간은 28일이다.

다른 하나는 시험체의 배합을 Table 3.과 같이 일정하게하고 양생조건을 변화시킨 시험체이다.(이하 B 시리즈 시험체라 한다) 양생 방법은 4종류가 있는데 ① 측정시까지 수중 양생한 시험체 ② 3일간 수중 양생후 실내 양생(공기중 양생)한 시험체 ③ 7

Table 2. Combination of A-series test piece

Ratio of water to cement W/C(%)	Unit(kg/m ³)				Ratio of fine aggregate s/a(%)	Volume of air Vair(%)
	Water (W)	Cement (C)	Fine aggregate (S)	Compound (kg)		
45	180	400	754	1	100	-
45	180	400	754	1	44	4.8
45	180	400	839	1	49	4.8
45	180	400	668	1	39	2.5
55	180	327	815	0.82	100	-
55	180	327	815	0.82	46	3.0
55	180	327	904	0.82	51	4.3
55	180	327	726	0.82	41	3.0
65	180	277	870	0.69	100	-
65	180	277	870	0.69	48	3.3
65	180	277	961	0.69	53	4.4
65	180	277	780	0.69	43	2.5

Table 3. Combination of B-series test piece

Ratio of water to cement W/C(%)	Unit(kg/m ³)				Ratio of fine aggregate s/a(%)	Volume of air Vair(%)
	Water (W)	Cement (C)	Fine aggregate (S)	Compound (kg)		
54	172	319	779	0.80	44.4	-

일간 수중 양생후 실내 양생한 시험체 ④ 14일간 수중 양생후 실내 양생한 시험체이다. 측정일의 양생기간은 4~38일이다. 모든 시험체는 직경 $\phi 100$, 높이가 200mm의 원주이고, 시험체의 수는 1 배합마다 5 개로하고 시험체는 콘크리트 타설후 온도 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 시험일까지 수중 양생하였다.

3-2. 실험방법

측정은 시험체를 송수신 탐촉자 사이에 끼우고 투과법으로 음속과 감쇠계수를 종파와 횡파에 대해 측정하였다. 시험체를 세워, 아래에서부터 송신 탐촉자, 시험체, 수신 탐촉자의 순으로 배치하고 탐촉자 및 시험체의 자중만으로 측정하기 때문에 안정되어 재현성이 좋은 실험이 가능하며 접촉매질을 사용하지 않고도 충분한 감도로 초음파의 송수신이 가능하다. 초음파에 의한 측정항목은 종파음속(V_L), 횡파음속(V_s), 종파 감쇠계수(α_L) 및 횡파 감쇠계수(α_s)의 4가지이다.

횡파음속 만으로도 동형탄성률(압축강도)의 추정은 가능하나, 비교 검토하기 위해 종파음속도 같이 측정한다. 감쇠계수는 골재입자의 직경을 보정하는 목적으로 측정하였다. 음속은 시험체 두께를 상대진폭법에 의하여 측정한 전파시간으로부터 구한다. 감쇠계수 α 는 송수신 탐촉자를 직접 마주 보게하여 얻어진 수신과 펄스의 최대 진폭시의 전압치 V_{max} 와, 콘크리트 시험체를 송수신 탐촉자에서 얻어진 수신과 펄스의 최대 진폭시의 전압치 V_{max} 와의 차(dB)을 시험체 두께 T로 나누어 다음과 같이 구한다.

$$\alpha = \frac{20\text{Log}(V_{\text{max}}/V_{\text{max}})}{T} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 확산손실의 보정은 하지 않았다.

압괴 시험은 초음파 측정 직후에 50t 암슬라형 만능시험기에 의해 압축시험을 하여 압축강도를 계산하였다. 압축강도는 압괴강도를 시험체의 단면적으로 나누어 구한다. 실험결과의 해석은 압축강도(σ_c)와 초음파에 의한 4 항목의 측정치 즉 종파음속(V_L), 횡파음속(V_s), 종파 감쇠계수(α_L), 횡파 감쇠계수(α_s)와 콘크리트 시험체의 정보로서 세골재율(s/a), 물·시멘트비(W/C), 및 양생기간(Age)의 합계 7 항목에 대하여 각각의 관계를 통계적으로 해석하고, 인자분석을 하여 검토한다. 또, 이러한 7 항목의 인자를 사용하여 중회귀분석을 한 압축강도와와의 관계에 대하여 검토하였다.

4. 실험결과 및 고찰

A 시리즈 시험체의 측정결과를 Fig. 2~Fig. 4에 나타낸다. 이 시험체는 모두 수중양생하고, 양생기간은 전부 28일이며 세골재율(s/a), 물·시멘트비(W/C)를 변화시켜 제작한 시험체이다. 실험결과를 상관관계로 정리한 결과를 Table 4.에 나타내고 있다. A 시리즈 시험체의 경우 상관관계는 거의 없으며 압축강도와 물·시멘트 비, 횡파음속과는 상관관계가 있고 상관 계수 γ 는 -0.82, 0.707이다.

Fig. 2는 종파 음속과 압축강도의 관계를 나타내

Fig. 7은 종파 감쇠계수와 압축강도와의 관계이다. 이들은 서로 약한 상관관계를 보인다. 본시험체의 경우 콘크리트의 배합은 일정하고 골재입자등에 의한 초음파의 감쇠는 일정하다고 생각되어진다. 100 kHz 정도의 주파수(콘크리트의 음속을 4000m/s로 한 경우의 파장은 40mm)에서는 골재입자에 의한 산란 감쇠는 그다지 영향을 주지 않는다. 본 실험 결과에서 감쇠를 지배하는것은 시험체 중의 공기량이라고 생각되어진다. 즉 공기량이 가장 작다고 생각할 수 있는 수중 양생 시험체의 감쇠가 다른 것에 비해 작은 것을 알 수 있다.

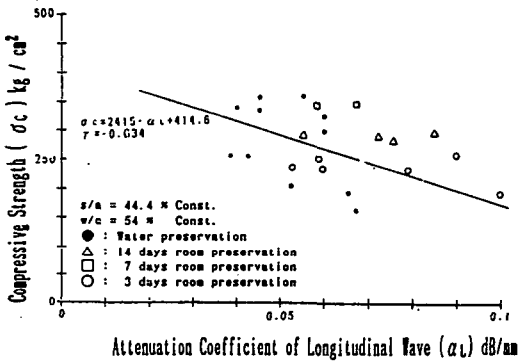


Fig. 7 Relation between attenuation coefficient of longitudinal wave and compressive strength

Fig. 8은 횡파음속과 압축강도와의 관계를 나타내며 A 시리즈 시험체의 경우와 같은 강한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 종파음속의 경우는 수중양생 시험체와 다른 것과는 약간 차가 있으나 횡파의 경우는 차가 거의 없다. 따라서 횡파음속을 이용하면 콘크리트의 성분, 양생방법에 영향을 받지 않고 압축강도를 추정할 수 있다고 생각된다. 또한, A 시리즈의 경우 압축강도와의 관계에 있어서 종파음속보다도 횡파음속이 상관계수가 높은것은 G가 압축강도를 지배하기 때문이다.

Fig. 9는 횡파 감쇠계수와 압축강도와의 관계이다. 종파의 경우와 마찬가지로 음의 상관관계를 갖는다. 감쇠계수는 종파의 약 2배를 나타내고 있다. 이것은

종파와 같은 주파수에서 음속은 약 1/2되고, 파장도 약 1/2이 되기 때문이다. 종파의 경우 감쇠를 지배하고 있는것은 공기량이라고 생각되지만 본 결과로는 반드시 그렇다고 말할 수는 없는 것 같다. 결국 횡파는 고체중에서 전파하는 파이기 때문에 공기중 수중 등에서는 전파하지 않는다.

본 결과는 공기량과 수분량 모두가 횡파감쇠계수에 영향을 미친다고 생각되어진다. 이 때문에 수중 양생 시험체의 횡파감쇠계수도 크게 나오는 경향을 나타내고 있다.

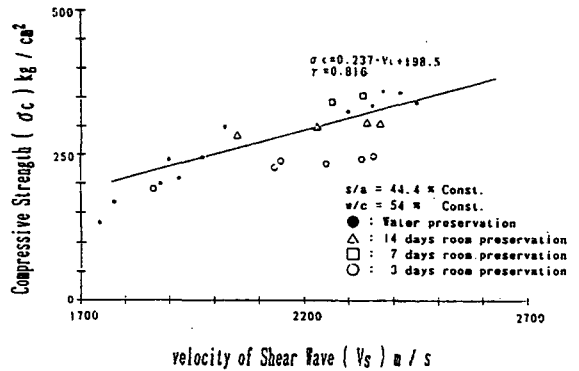


Fig. 8 Relation between velocity of shear wave and compressive strength

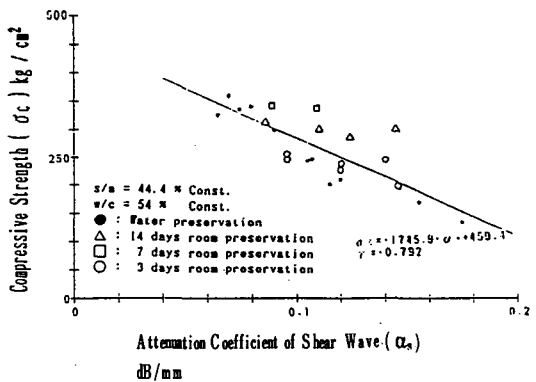


Fig. 9 Relation between attenuation coefficient of shear wave and compressive strength

며, 파라미터는 물·시멘트이다. 물·시멘트비가 작을수록, 즉 시멘트양이 많을수록 압축강도는 증가하는 경향을 보이지만 편차는 크며, 종파음속과 압축강도의 상관관계는 거의 없다.

Table 4. Coefficient of autocorrelation(A-series).

	σ_i	V_L	α_L	V_s	α_s	s/a	W/C
σ_i	1.0	-0.15	0.01	0.70	0.05	0.34	-0.82
V_L	-0.15	1.0	0.11	0.13	0.63	0.23	0.16
α_L	0.01	0.11	1.0	0.17	0.37	-0.14	-0.08
V_s	0.70	0.13	0.17	1.0	0.01	-0.46	-0.61
α_s	0.05	0.06	0.37	0.01	1.0	-0.15	-0.11
s/a	0.34	-0.23	-0.14	-0.46	-0.15	1.0	0.05
W/C	-0.82	0.16	-0.08	-0.61	-0.11	0.05	1.0

측강도를 추정하는 것이 좋을 것을 알 수 있다.

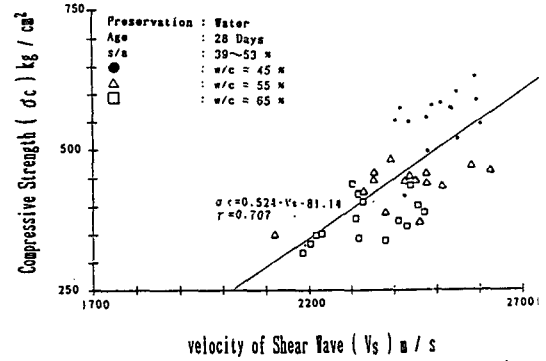


Fig. 3 Relation between velocity of shear wave and compressive strength

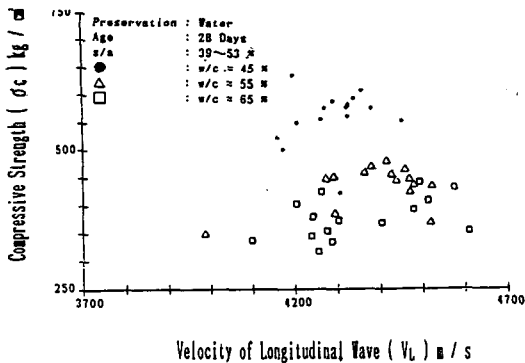


Fig. 2 Relation between velocity of longitudinal wave and compressive strength

Fig. 3은 횡파음속과 압축강도의 관계이다. 양자의 상관계수 γ 는 0.707이며 물·시멘트비가 클수록 횡파속도는 느리고 압축강도는 작은 것을 알 수 있다. 종파음속과 압축강도사이에는 상관관계가 거의 없는 것에 비해, 횡파음속과 압축강도 사이에는 상관관계가 있는것은 G가 압축강도를 지배하고 있기 때문이라고 생각된다.

Fig. 4 압축강도와 물·시멘트 비의 관계를 나타내고 있다. 이들의 결과는 횡파음속으로 압축강도의 추정이 가능하지만 편차가 커 오히려 W/C로부터 압

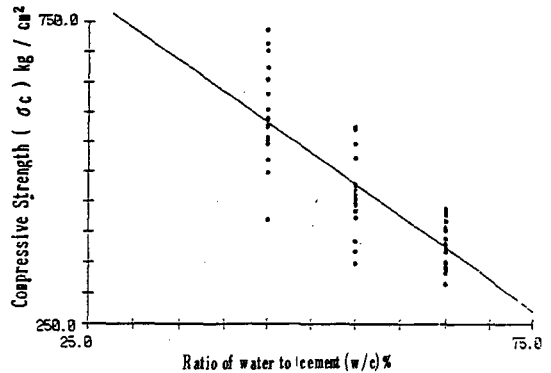


Fig. 4 Relation between the ratio of water to cement and compressive strength

다음에 이러한 측정치를 이용하여 압축강도를 기준변수, 초음파의 측정치(종, 횡파음속, 종파, 횡파 감쇠계수)를 설명변수로 하여 중회귀분석을 하고 중회귀식을 계산하면 다음과 같은 결과가 얻어진다.

$$\sigma_c = 0.1594 \cdot (V_L) - 2374 \cdot (\alpha_L) + 0.3934 \cdot (V_s) + 7450 \cdot (\alpha_s) + 250.4 \dots \dots \dots (7)$$

이 경우의 중상관계수는 0.494로 작은 값이다. 그

다음에 A 시리즈 시험체와 같이 압축강도를 기준으로하고, 초음파의 정보를 설명변수로 하여 중회귀 분석을 하면 다음과 같은 중회귀식이 얻어진다.

$$\sigma_c = 0.3183 \cdot (V_L) + 509.1 \cdot (\alpha_L) + 0.05518 \cdot (V_s) + 108.2(\alpha_s) - 1146 \dots\dots\dots (9)$$

이 경우의 상관계수는 0.829가 된다. 이것은 콘크리트 성분이 일정하여 콘크리트의 성분을 보정한 형이 되기 때문이다. 또 초음파의 정보에 콘크리트 양생 기간의 정보를 가하여 중회귀분석을 하면 이 중회귀식은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_c = 0.0181 \cdot (V_L) + 513.1 \cdot (\alpha_L) + 0.05407 \cdot (V_s) + 108.1(\alpha_s) + 0.03899 \cdot (Age) - 1172 \dots\dots\dots (10)$$

이때의 상관계수는 0.896이 되고 A 시리즈 시험체의 결과와 같아진다. 결국 양생 기간이 압축강도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

마지막으로 A, B 시리즈 2 종류의 시험체를 정리하여 상관관계를 조사하고 중회귀분석을 하여 압축강도에 대해 해석을 하면 Table 6과 같다.

Table 6. Coefficient of autocorrelation (A+B-series)

	σ_c	V_L	α_L	V_s	α_s	s/a	W/C	Age
σ_c	1.0	0.53	-0.61	0.77	0.36	0.47	-0.46	0.35
V_L	0.53	1.0	-0.70	0.58	-0.54	0.12	0.14	0.56
α_L	-0.61	-0.70	1.0	-0.60	0.71	-0.27	-0.07	-0.73
V_s	0.77	0.13	0.17	1.0	0.01	-0.46	-0.61	0.78
α_s	0.05	0.06	0.37	0.01	1.0	-0.15	-0.11	-0.76
S/a	0.34	-0.23	-0.14	-0.46	-0.15	1.0	0.05	0.08
W/C	-0.82	0.16	-0.08	-0.61	-0.11	0.05	1.0	0.02
Age	0.35	0.55	-0.73	0.78	-0.76	0.08	0.02	1

압축강도는 횡파음속과의 상관이 강해 어느 정도로 압축강도의 추정이 가능하다. 이 목적은 제조방법, 양생방법, 콘크리트의 배합 등 완전히 다른 데이터로부터 압축강도 추정을 위한 일반식을 구하기 위한 것이다. 종파음속과의 관계를 Fig. 10, 횡파와의 관계를 Fig. 11에 나타낸다.

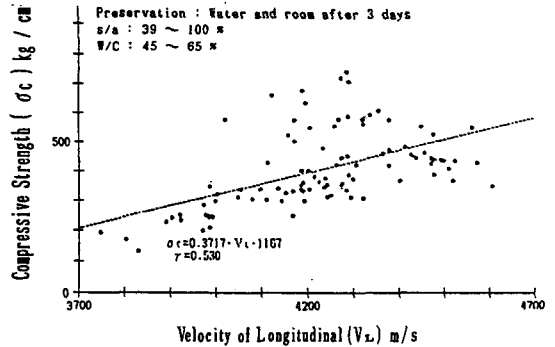


Fig. 10 Relation between velocity of longitudinal wave and compressive strength

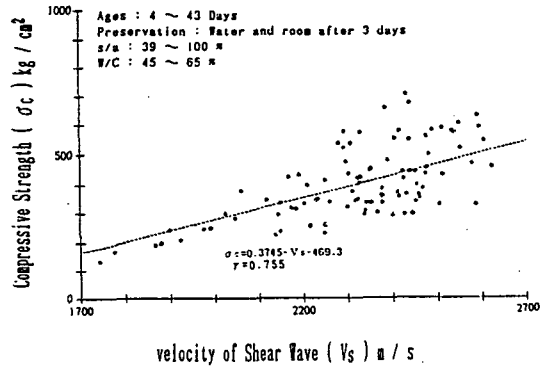


Fig. 11 Relation between velocity of shear wave and compressive strength

종파의 경우 약한 상관관계를 나타내고 횡파의 경우는 강한 상관관계를 나타내는 것을 알 수 있다. 단독정보로부터 압축강도를 구하는 경우 횡파음속을 정확히 측정할 수 있음을 알 수 있다. 앞의 경우와 같이 중회귀 분석을 하면 중회귀분석에 의해 압축강도를 어느 정도의 오차로 평가할 수 있는가를 검토한다. 압축강도를 기준변수, 콘크리트 3개의 정보량을 설명변수로서 중회귀분석을 하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\sigma_c = 3.10 \cdot (S/A) - 10.1 \cdot (W/C) + 5.90 \cdot (Age) + 630 \dots\dots\dots (11)$$

이 경우의 상관계수는 0.753이다. 마찬가지로 초음파의 데이터만을 설명변수로서 압축강도를 구하면

다음과 같이 된다.

$$\sigma_c = 0.115 \cdot (V_L) - 4230 \cdot (\alpha_L) + 0.207 \cdot (V_s) + 1482(\alpha_s) - 518 \dots\dots\dots (12)$$

이 경우의 상관계수는 0.668로 그다지 양호하지 않다. 그러나 콘크리트의 정보와 초음파의 정보를 이용해서 종합적으로 압축강도를 계산하면 (13)식이 얻어지고 그 상관계수는 0.915가 되고, 특히 강한 상관관계가 성립한다.

$$\sigma_c = 0.220 \cdot (V_L) - 3313 \cdot (\alpha_L) + 0.212 \cdot (V_s) + 475 \cdot (\alpha_s) + 2.80 \cdot (S/a) - 9.26 \cdot (W/C) - 5.39 \cdot \text{Age} - 423 \dots\dots\dots (13)$$

여기서 중회귀식의 물리적 의미에 대해서 생각해보면 V_L , V_s 는 현시점에서 G , E , K 의 평가 데이터이고, α_L , α_s 는 현시점에서 콘크리트 타설시의 골재입자, 수분량, 공기량 등을 종합한 평가 데이터, 또 세 골재율(S/a), 시멘트 비(W/C) 등은 초음파 측정시에는 파악되지 않는 콘크리트 타설시의 콘크리트 특성에 의한 보정의 항, 양생 기간(Age)는 타설시 부터 현재까지의 시간경과에 따른 콘크리트 여러물성의 보정 항으로 생각할 수 있다. 따라서 (13)식을 콘크리트의 압축강도의 추정을 위한 일반식으로 간주할 수 있다.

다음에 (13)식을 이용해서 각 데이터로부터 압축강도를 계산하고, 그 추정오차를 조사하였다. 그 결과를 Fig. 12에 나타낸다.

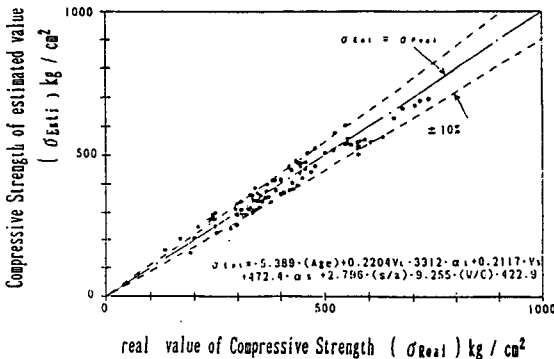


Fig. 12 Relation between real and estimated value of compressive strength

Fig. 12의 횡축은 암슬라형 만능시험기에 의한 압피시험을 하여 측정한 실제의 압축강도, 종축은 (12)식에 의해 구한 추정 압축강도이다. 그림중의 일점 쇄선이 실제의 압축강도와 추정 압축강도가 일치하는 추정 오차 영의 선이다. 또한 점선은 추정오차 $\pm 10\%$ 정도의 오차범위를 가지며 데이터 수는 98, 추정오차의 평균치는 -4.62kg/cm^2 , 추정 오차의 평균 편차 31.82kg/cm^2 의 범위까지 압축강도를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

이상의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 횡파 초음파의 도입과 복수 인자를 이용한 중회귀분석에 의한 콘크리트 압축강도의 오차정도를 종래에 비해 매우 높은 $\pm 10\%$ 범위까지 높일 수 있었다. 따라서 콘크리트와 같이 다변량의 복합 성분을 갖는 물질의 비파괴 평가에는 중회귀분석과 같은 다변량 해석법이 유용함을 알 수 있다.
 - (2) 콘크리트의 배합이 일정하면 음속만으로도 압축강도의 추정이 가능하다.
 - (3) 횡파음속은 콘크리트의 배합, 양생 방법등에 영향을 받지않고 압축강도의 추정이 가능하다.
 - (4) 실제의 콘크리트에 적용하여 이 시험법의 유용성을 확인할 수 있었으며 앞으로 콘크리트 구조물의 신뢰성, 안정성을 높일 수 있다고 생각된다.
- 앞으로의 연구 과제로는 본 연구에 사용한 시험체의 양생 기간은 43일이고, 실제의 콘크리트 구조물과 같이 수년~수십년 경과한 콘크리트에 대해서는 (13)식을 그대로 적용할 수 없을 것으로 생각된다. 즉 (13)식의 양생 기간 항목의 수정이 필요하다. 또, 이번 시험체는 $\phi 100 \times 200$ 인 원주이고, 실험에 사용한 초음파 탐촉자의 주파수, 지향성 등에서 확산손실은 거의 없는 것으로 고려하였다. 그러나 실제의 콘크리트 구조물은 반무한대의 크기가 대상이 되기 때문에 확산은 무시할 수 없는 값이 된다. 따라서 (13)식의 감쇠계수항의 보정이 필요하다.

러나, 설명변수에 콘크리트의 정보, 세골재율, 물·시멘트 비까지 고려하여 중회귀분석을 하면 중상관 계수가 0.917로 급격히 향상된다.

$$\sigma_c = 0.03543 \cdot (V_L) - 1255 \cdot (\alpha_L) + 0.1932 \cdot (V_s) + 472.2 \cdot (\alpha_s) + 0.2182 \cdot (S/a) - 8.978 \cdot (W/C) + 233.1 \dots\dots\dots (8)$$

윗 식으로부터 콘크리트 성분을 보정하는 것에 의해 상관계수가 향상한다. 역으로 압축강도와 강한 상관관계가 있는 횡파음속은 콘크리트의 성분에 그다지 영향을 받지않고 압축강도를 추정할 수가 있다. 따라서 압축강도의 측정에는 횡파음속이 적절하다고 생각한다. 그러나 압축강도의 추정정도는 횡파음속만을 측정하는 것보다도, 초음파의 복수정보와 콘크리트 성분의 정보를 사용하여 중회귀분석을 하여 종합적으로 판단하면 정도가 상당히 향상되는 것을 알 수 있다.

다음에 B 시리즈 시험체의 측정결과를 Fig. 5~Fig. 9에 나타내고 있다. 이 시험체의 콘크리트 배합 성분은 Table 5.와 같이 일정하게 하고 양생방법을 변화시켜 제작한 시험체로서 A 시리즈 시험체에 비해 좋은 상관관계를 나타내고 있다. 측정일의 양생 기간은 4일~43일이다.

Table 5. Coefficient of autocorrelation(B-series)

	σ_i	V_L	α_L	V_s	α_s	Age
σ_i	1.0	0.92	-0.63	0.82	-0.79	-0.79
V_L	0.92	1.0	-0.78	0.83	-0.89	0.86
α_L	-0.63	-0.78	1.0	-0.84	0.79	-0.84
V_s	0.82	0.83	-0.84	1.0	-0.84	0.93
α_s	-0.79	-0.89	0.79	-0.84	1.0	-0.84
Age	0.79	0.86	-0.84	-0.93	-0.84	1.0

Fig. 5는 양생기간과 압축강도와의 관계를 나타내며 파라메터는 양생방법이며 양생기간이 증가함에 따라 압축강도는 증가하여 양자간에는 강한 상관관계가 있는것을 알 수 있다.

Fig. 6은 종파음속과 압축강도와의 관계를 나타내며 강한 상관관계가 있는것을 알 수 있다. A 시리즈

시험체에서는 양자간의 상관관계는 거의 없으나 본 측정 결과가 좋은 상관관계를 갖는 것은 콘크리트의 성분이 일정한 결과라고 생각되어진다. 양생 방법에 대해서는 수중양생 시험체의 경우가 동일 압축강도에서 종파음속은 늦게 측정되고 있다. 이것은 시험체의 수분량에 의한 것이라고 생각되어진다. 수중양생 시험체는 다른 시험체에 비하여 수분량이 특히 많아서 음속이 물의 음속에 가까운 결과이다. 이상의 결과 종파 음속도 콘크리트의 성분이 일정하면 압축강도의 추정에 사용할 수 있다고 말할 수 있다.

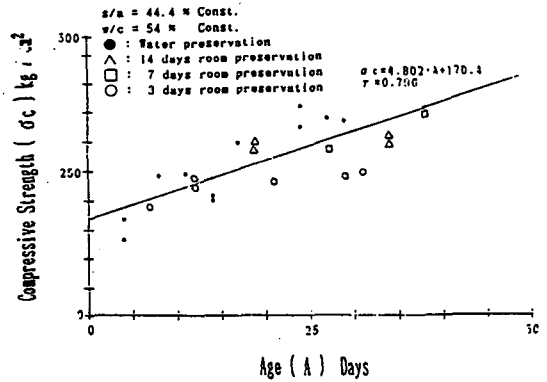


Fig. 5 Relation between age and compressive strength

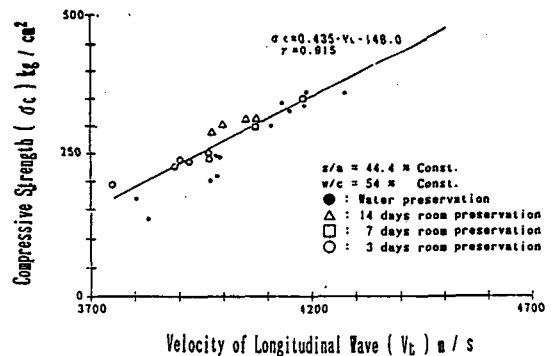


Fig. 6 Relation between velocity of longitudinal wave and compressive strength

References

1. 高林 利秋, “諸外國におけるコンクリート構造物の非破壊試験の現状”, 非破壊検査, 第 34 券, 第 10 號, 1984, pp. 702~717.
2. 笠井 芳夫, “コンクリートの壓縮強度の非破壊試験方法”, 非破壊検査, 第 34 券, 第 10 號, 1985, pp. 718~726.
3. 秋鹿, “衝撃と超音波によるコンクリートなどの構造物の非破壊検査” 第 34 券, 第 10 號, 1985, pp. 727~735.
4. 日本建築學會, “コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル”, 1983
5. 杉山高一, “多變量データ解析入門”, 朝倉書店, 1990, pp. 104~136.
6. 圓川隆夫, “多變量のデータ解析”, 朝倉書店, 1989
7. 宮島 猛, 小倉 辛夫, “超音波周波數解析法によるコンクリート探傷”, 非破壊検査 第 38 券, 第 2 號, 1988, pp. 147~148.
8. H.R.Carleton and J.F.Muratore, “Ultrasonic Evaluation of Concrete”, IEEE Ultrasonic symposium proceedings, 1986, pp. 1017~1020.
9. 廣野 進, 出口 哲夫, “新しいコンクリート及び”割れ深さ測定法と装置の開発”, 非破壊検査, 第 38 券, 第 4 號, 1989, pp. 302~308.
10. ASTM C-597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete
11. RILEM Tentative Recommendation for In-situ Concrete: Strength Determination by Non-Destructive Combined Method
12. 谷川 恭雄, 山田和夫, “複合非破壊試験によるコンクリートの強度の推定”, 日本建築學會東海支部研究報告集, No.17, 1969, pp. 5~9.