

## 초음파속도법에 의한 고강도 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 연구

Estimating Compressive Strength of High Strength Concrete  
by Ultrasonic Pulse Velocity Method

임 서 형\*

강 현 식\*\*

Lim, Seo-Hyung

Kang, Hyun-Sik

### Abstract

The purpose of this study is to suggest the non-destructive equation for the estimation of concrete strength by ultrasonic pulse velocity at the age of 28day compressive strength of 600~1000kg/cm<sup>2</sup>. For this purpose, selected test variables were water-binder ratio, replacement ratio of silica fume, binder content, maximum size of coarse aggregate and sand-aggregate ratio.

From the results, the average increase or decrease of ultrasonic pulse velocity is 61m/sec for each 1% of moisture content. And the correlation equation between the ultrasonic pulse velocity and the compressive strength of concrete is as follows.

$$F_c = 896.3V_p - 3514 \quad (R^2 = 0.81)$$

where,  $F_c$  : compressive strength(kgf/cm<sup>2</sup>),  $V_p$  : ultrasonic velocity(km/sec)

**keywords** : ultrasonic pulse velocity, compressive strength, non-destructive test, moisture content

### 1. 서 론

콘크리트의 압축강도를 추정하기 위한 비파괴시험 방법에는 타격법, 진동법, 국부파괴법, 전·자기법, 방사선·중성자법 등이 있으며 또한, 이들 방법을 조합한 복합법이 있다. 이 중 진동법의 하나인 초음파속도

법은 타격법인 반발도법과 더불어 콘크리트의 압축강도를 추정하는데 가장 일반적으로 이용되고 있는 수단이라 할 수 있다.

콘크리트의 내부를 통과하는 초음파의 속도를 산정하여 콘크리트의 압축강도를 추정하는 초음파속도법에 관한 연구는 1945년 캐나다의 Leslie와 Cheesman<sup>(1)</sup>

\* 정희원, 전주산업대학교 건축학과 조교수, 공학박사

\*\* 정희원, 전주산업대학교 건축학과 조교수, 공학박사

• 본 논문에 대한 토의분 2001년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2002년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

그리고 1948년 Jones<sup>(2)</sup> 등이 진공관을 이용한 장비 를 개발하면서부터 시작되었다. 이후 영국과 네덜란드 에서 진공관을 이용하지 않고 초음파전파시간을 디지 털로 측정할 수 있는 PUNDIT(Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester)가 개발 되면서 연구가 본격화되어 1951년에는 Whitehurst<sup>(3)</sup> 의 연구가 ASTM<sup>(4)</sup> 규준에 채택되기도 하였다.

1983년 일본건축학회에서는 콘크리트의 강도 추정을 위 한 비파괴 시험방법 메뉴얼<sup>(5)</sup>을 작성하고 압축강도 추정식 을 제안하였다. 이 제안 식은 국내에서 가장 많이 활용되 는 것으로 추정되며, 압축강도 적용범위는 100kgf/cm<sup>2</sup>이 상 600kgf/cm<sup>2</sup>이하의 건축구조용 콘크리트로 되어 있다.

그러나, 콘크리트를 구성하는 재료 특히 혼화재료의 개발 및 제조기술이 꾸준히 향상되어 건축물에 사용되 는 콘크리트의 압축강도는 계속해서 높아지고 있다. 1975년 미국 시카고 지역에 74층의 Water Tower Place에 630kgf/cm<sup>2</sup>, 1984년 225Waker Dr.건물 에 980kgf/cm<sup>2</sup> 그리고 1988년 시카고의 Two Union Square 빌딩<sup>(6)</sup>에 1330kgf/cm<sup>2</sup>의 콘크리트 가 각각 사용되었다. 이와같은 현황은 국내<sup>(7)~(9)</sup>에서 도 동일하다. 따라서, 고강도 콘크리트의 압축강도를 추정할 수 있는 연구가 필요한 시점이라 하겠다.

그러므로 본 연구는 재령 28일 압축강도가 600 kgf/cm<sup>2</sup>~1000kgf/cm<sup>2</sup>인 콘크리트를 대상으로 초음 파속도법을 이용하여 압축강도를 추정할 수 있는 제안 식을 제시하는데 목적이 있다.

## 2. 실 험

### 2.1 사용 재료

시멘트는 국내 S사 보통 포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였고, 잔골재(S)는 비중 2.58, 흡수율 1.8%, 조립을 2.6인 합친산 강모래를, 흙은골재(G)는 비중 2.6인 부순자갈을 최대크기 25mm(G25)와 20mm (G20)으로 입도 조정하여 각각 사용하였다. 실리카흙 (silica fume, SF)은 노르웨이산 Elken micro-silica 로서 비중 2.1, 비표면적은 20.5m<sup>2</sup>/g이다. 고성능감 수제는 폴리카본산계 표준형을 사용하였다.

### 2.2 배합

콘크리트의 물결합재비(W/B)는 21, 24, 27, 30%, 단위결합재(B)량은 520, 560, 600kg/m<sup>3</sup> 그 리고 혼화제로서 실리카흙 혼입율은 0%, 10%, 잔골 재율(S/a)은 33, 38, 43%, 굵은골재 최대크기는 20, 25mm로서 총 20종류의 콘크리트에 대하여 목표 슬럼프 18±1.5cm, 목표공기량 4.5±1.0%가 되도록 하였다. 이에 대한 콘크리트 배합은 Table 1과 같다.

### 2.3 실험 방법

#### 2.3.1 비빔

초고강도 콘크리트를 제조하기 위한 비빔 방법은 우 신 결합재와 잔골재를 강제식 믹서에 투입한 후 30초 동안 건비빔을 한 다음 배합수와 고성능감수제를 넣어 120초 동안 그리고 굵은골재를 넣고 90초 동안 비빔 을 하여 총 비빔시간을 4분으로 하였다.

#### 2.3.2 제작 및 양생

시험체는 KS F 2403에 준하여 크기  $\Phi 10 \times 20$ cm 로 각 배합당 9개씩 제작하였으며, 24시간이 지난 다음 탈형 후 소정의 재령까지 표준양생시켰다.

#### 2.3.3 초음파전파속도(음속)

시험체의 길이, 중량 및 초음파전파시간은 연마기를 이용하여 시험체 표면을 연마하고 시험체 표면의 물을 닦아낸 다음 각각 측정하였다. 음속 측정기기는 ELE 社의 PUNDIT이며, 시험체의 양 측정점에 발진자와 수신자를 서로 교환하면서 초음파 전파시간을 2회 측 정하여 그 평균값을 구하였다. 이 때 시험체의 측정면 과 진자를 밀착시키기 위해 시험체 표면에 그리스를 도포하고 일정한 힘으로 양 진자를 가압하였으며, 측 정시간은 0.1 $\mu$ sec(10<sup>-7</sup>sec) 단위로 측정하였다. 이 와 같이 구한 초음파전파시간과 시험체의 길이를 이용 하여 음속을 계산하였다. 측정재령은 3, 7, 28일이다.

#### 2.3.4 흡수율 변화에 따른 음속

흡수율은 재령 28일까지 표준양생한 다음 수조에서

거년 직후 시험체 표면의 물을 닦아 내고(포수상태) 온도 105±5℃의 건조노에서 항량이 될 때까지 건조시킨 다음(절건상태) 포수상태와 절건상태의 중량 차를 이용하여 산정하였다. 측정 시험체는 G25, W/B 21~30%, S/a 38%, B 560kg/m<sup>3</sup> 그리고 SF 혼입을 10%의 것을 대상으로 하였으며, 포수상태와 절건상태에서 각각 음속을 측정하였다.

### 2.3.5 압축강도

콘크리트의 압축강도는 음속을 측정한 후 KS F 2405에 준하여 재령 3, 7, 28일의 강도를 각각 측정하였다. 또한, 함수율 변화에 따라 음속을 측정한 시험체는 절건상태에서도 압축강도를 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 압축강도

재령 3, 7, 28일에서의 압축강도 및 음속 측정결과는 Table 1과 같다.

굵은골재 최대크기와 SF 혼입율에 따른 재령 7일과 28일의 관계는 Fig. 1 및 Table 2와 같다. 재령 28일의 강도를 1로 했을 때 SF를 사용한 G20과 G25의 경우 재령 7일의 강도가 평균 0.81과 0.72 그리고 OPC(G25)만을 사용한 경우 평균 0.85로 가가 나타났다.

이와같이 재령 7일의 압축강도가 재령 28일의 0.72~0.85사이에 들고 평균 0.79로서 보통강도 콘

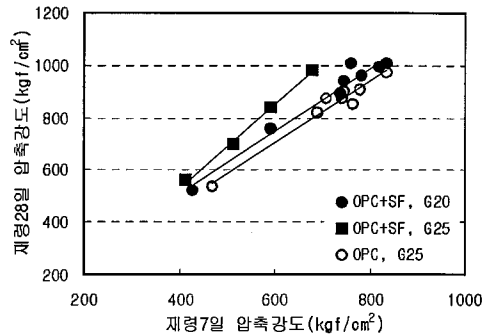


Fig. 1 재령 7일과 28일의 압축강도 관계

Table 1 콘크리트 배합표 및 실험결과

G <sub>max</sub> (mm)	W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )					Slump (cm)	음속 (km/sec)			압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )				
			W	OPC	S	G	SF		3일	7일	28일	3일	7일	28일		
25	21	38	118	560	651	1063	0	19.3	4.800	4.894	4.911	701	834	974		
	24		134		636	1037		18.8	4.712	4.846	4.860	624	741	874		
	27		151		619	1009		19.3	4.723	4.820	4.783	595	688	819		
	30		168		602	982		18.8	4.497	4.526	4.622	340	469	533		
	24	33	135		552	1120		17.2	4.808	4.855	4.919	605	708	871		
		43	135		719	953		17.7	4.728	4.852	4.873	658	746	895		
		38	125		520	657		1072	19.2	4.761	4.859	4.869	705	764	850	
			144		600	613		1000	18.5	4.769	4.876	4.883	714	778	902	
20	21	38	118	504	643	1049	56	18.6	4.648	4.847	4.931	708	834	1008		
	24		134		626	1022		19.3	4.651	4.757	4.860	597	784	958		
	27		151		610	995		17.9	4.470	4.575	4.682	460	593	760		
	30		168		593	968		19.2	4.265	4.340	4.430	337	427	523		
	24	33	134		544	1104		18.5	4.569	4.670	4.777	557	739	888		
		43	134		709	939		18.4	4.624	4.74	4.869	622	821	990		
		38	125		468	649		1059	52	17.3	4.683	4.813	4.837	602	745	939
			144		540	604		985	60	17.5	4.615	4.690	4.920	614	762	1005
25	21	38	118	504	643	1049	56	17.9	4.589	4.679	4.845	535	679	981		
	24		134		626	1022		18.0	4.369	4.564	4.709	446	594	824		
	27		151		610	995		18.4	4.345	4.469	4.632	386	515	694		
	30		168		593	968		18.3	4.213	4.355	4.509	307	412	562		

크리트의 0.67정도에 비하여 초기의 강도증진율이 높게 나타나고 있다.

이는 폴시멘트비가 낮아질수록 시멘트 입자들이 서로 가까이 있으면서 수화생성물인 겔의 형성이 급격히 이루어지기 때문이다.

결합재와 굵은골재 최대치수에 따른 재령 7일 강도에서의 28일 강도 예측은 Table 2에서와 같이 기여율 0.96~0.99로 매우 정도 높게 추정할 수 있다.

S/a에 따른 콘크리트의 압축강도는 S/a가 커질수록 즉, 단위산골재량이 많아질수록 결합재 및 굵은골재 최대치수와 상관없이 커지고 있다. SF를 사용한 콘크리트의 압축강도는 단위결합재량이 520kg/m<sup>3</sup>에서 560, 600kg/m<sup>3</sup>으로 많아짐에 따라 세령 28일에서 19, 47kgf/cm<sup>2</sup>씩 증가되었으며 또한, OPC만을 사용한 콘크리트의 경우 각각 24, 28kgf/cm<sup>2</sup> 증가되었다. 이와같이 단위결합재량이 많아졌음에도 불구하고 강도증진이 낮은 이유는 단위결합재량이 많아질수록 미수와 시멘트입자 또한 증가돼 오히려 강도발현이 저해된 것으로 판단된다.

W/B의 역수인 결합재물비와 재령 28일의 압축강도와 의 관계는 결합재물비 3.3~4.8의 범위 내에서 Fig.

Table 2 재령 7일(F<sub>7</sub>)과 28일(F<sub>28</sub>)의 압축강도 관계

구분	관계식	F <sub>7</sub> /F <sub>28</sub>
OPC+SF, G20	$F_{28} = 1.20(F_7) + 30 (R^2=0.97)$	0.81
OPC+SF, G25	$F_{28} = 1.59(F_7) + 103 (R^2=0.99)$	0.72
OPC, G25	$F_{28} = 1.18(F_7) - 8 (R^2=0.96)$	0.85

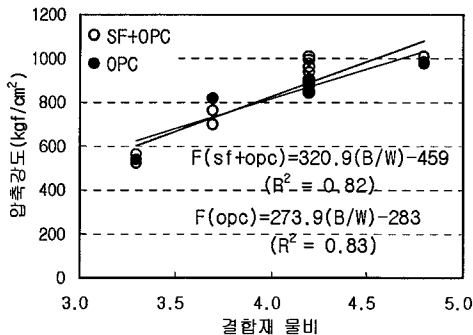


Fig. 2 결합재물비와 압축강도

2에서와 같이 직선적으로 나타낼 수 있으며, 기여율 0.82~0.83로서 추정식의 정도가 높다고 판단된다.

### 3.2 함수율에 따른 음속과 압축강도

함수율에 따른 콘크리트의 음속은 Table 3, Fig. 3과 같다. Table 3에서의 함수율은 포수상태일 때 그리고 Fig. 3의 함수율 0%는 절건상태를 나타낸다. Table 3에서와 같이 W/B가 21%에서 30%로 높아짐에 따라 함수율은 3.7%에서 6.3%로 커지고 있으며, Fig. 3에서와 같이 각 W/B에서 함수율이 낮아짐에 따라 음속은 느려지고 있다. 이는 콘크리트 내부의 모세관공극 등에 채워져 있는 수분이 증발됨에 따라 미세공극이 많아져 초음파가 우회하여 전달되기 때문이다. W/B 21~30% 범위 내에서 함수율 1% 변화에 따라 음속은 50~69m/sec로 평균 61m/sec가 차이하고 있다. 즉, 습윤상태일수록 음속은 커지게 된다. 기존 연구결과에 의하면 渡辺<sup>(5)</sup>은 함수율 1% 증감으로 음속이 50~60m/sec, 野崎<sup>(10)</sup>은 약 90m/sec가

Table 3 함수율에 따른 음속과 압축강도

W/B (%)	함수율 (%)	함수율 1%에 따른 음속 (m/sec)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
			포수	절건
21	3.7	50	981	1004
24	4.9	69	824	860
27	5.2	62	694	734
30	6.3	62	562	604

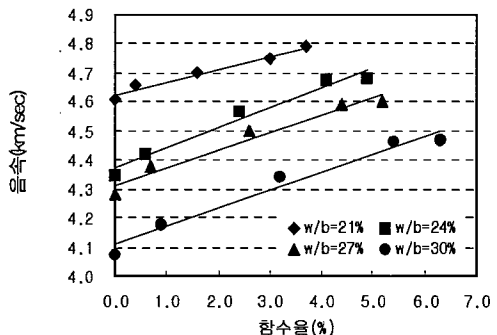


Fig. 3 함수율과 음속

증감한다는 보고가 있으며, 渡辺 연구결과와 매우 일치하고 또한, 보통강도 콘크리트의 경향과 큰 차이가 없다고 판단할 수 있다.

이와같이 함수율 1% 변화에 따른 음속이 콘크리트의 추정 압축강도에 미치는 영향은 음속 50~69m/sec 범위 내에서 식 (6)에 의하면 평균 61kgf/cm<sup>2</sup>가 된다. 이 값은 본 연구의 범위인 재령28일 압축강도 600~1000kgf/cm<sup>2</sup>의 6~10%에 해당되며, 그 값이 비교적 크다고 판단된다. 또한, 함수율이 증가하게 되면 음속은 커지지만 콘크리트의 압축강도는 낮아지기 때문에 고강도 콘크리트를 사용한 구조체의 품질관리를 위하여 음속법을 적용할 경우 환경조건 또는 부위별 함수율에 따른 음속의 변화로 압축강도 추정값은 더 큰 오차가 생길 것으로 예상된다.

함수율에 따른 콘크리트의 압축강도는 Table 3에서와 같이 포수상태보다 절건상태에서 2.3~7.5%(23~42kgf/cm<sup>2</sup>)정도 증가되었다. 이는 콘크리트 내부공극의 수분이동에 의한 골재주변의 응력발생, 물의 윤활작용, 건조에 의한 미찰계수의 증가 및 물의 표면장력 등에 기인한 것으로 보고<sup>(11),(12)</sup>되고 있다. 그러나, 포수상태와 절건상태에서의 압축강도 변화는 폴시멘트비 45~65%의 범위 내에서 보통강도 콘크리트를 대상으로 실시한 기존의 연구결과<sup>(13)</sup>인 33~46%보다 매우 낮으며, 향후 이에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

### 3.3 잔골재율과 음속

S/a에 따른 음속과 압축강도와의 관계는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서와 같이 재령 28일의 음속으로 판단되는 약 4.7km/sec이상일 경우 음속이 같으면 S/a가 높을수록 즉, 굵은골재량이 적을수록 압축강도는 높게 나타나고 있다. 이와 반대로 동일 압축강도에서는 굵은골재량이 많을수록 음속은 증대하고 있다. 따라서, 굵은골재량이 많을수록 일반적으로 콘크리트의 강도는 저하되지만 음속은 증대된다는 기존의 연구결과<sup>(14),(16)</sup>와 일치된다.

### 3.4 굵은골재 최대치수와 음속

굵은골재 최대치수에 따른 음속과 압축강도와의 관

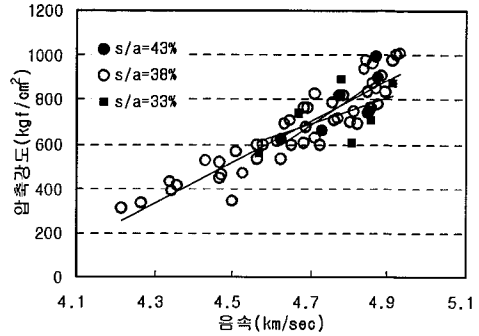


Fig. 4 잔골재율에 따른 음속과 압축강도

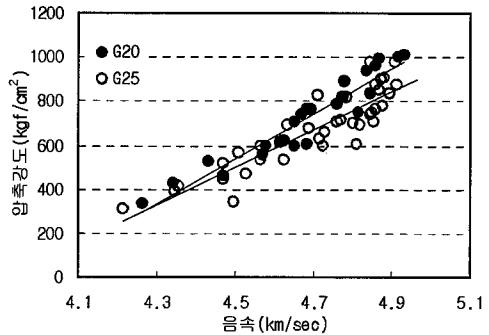


Fig. 5 굵은골재 최대치수에 따른 음속과 압축강도

계는 Fig. 5와 같다. 굵은골재의 최대치수 G25가 G20보다 동일 압축강도에서 음속은 크게 나타나고 있다. 즉, 압축강도 800kgf/cm<sup>2</sup>에서 G25가 G20보다 음속은 약 2% 커진 것으로 나타났으며, 이는 압축강도가 높을수록 뚜렷이 나타나고 있다. 음속 4.8~4.9km/sec 근처에서 음속 2%의 차이는 식 (6)에 따라 압축강도로 환산하면 약 90kgf/cm<sup>2</sup>가 된다. 따라서, 굵은골재 최대치수가 클수록 압축강도는 저하되지만 음속은 증대한다고 판단할 수 있다.

### 3.5 단위결합재량과 음속

B에 따른 음속과 압축강도와의 관계는 Fig. 6과 같으며, 압축강도 800kgf/cm<sup>2</sup> 전후에서 B가 많을수록 음속은 낮게 즉, 동일 음속에서 B가 많을수록 압축강

도는 높게 나타나고 있다. 그러나, B 560, 600kg/m<sup>3</sup>의 음속과 압축강도 증가 경향은 거의 비슷하고 또한 압축강도 800kgf/cm<sup>2</sup> 정도에서 음속의 차이는 약 0.3%로 작은골재 최대치수에 따른 음속의 차이보다 매우 작게 나타나고 있다. 단, B 520kg/m<sup>3</sup>의 음속은 압축강도 600~850kgf/cm<sup>2</sup>의 범위 내에서 B 560, 600kg/m<sup>3</sup>에 비하여 최대 1.9% 증가되었다.

### 3.6 SF치환율과 음속

SF을 B에 대하여 0, 10%치환한 콘크리트의 음속과 압축강도와의 관계는 Fig. 7과 같다. SF 10%인 콘크리트의 음속은 동일한 압축강도일 경우 SF 0%의 콘크리트에 비하여 1.8~3.8%, 평균 2.8% 낮게 나타나고 있다.

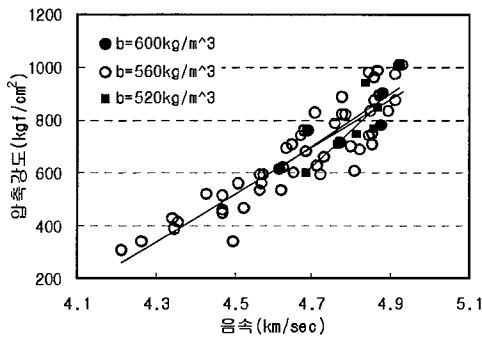


Fig. 6 결합재량에 따른 음속과 압축강도

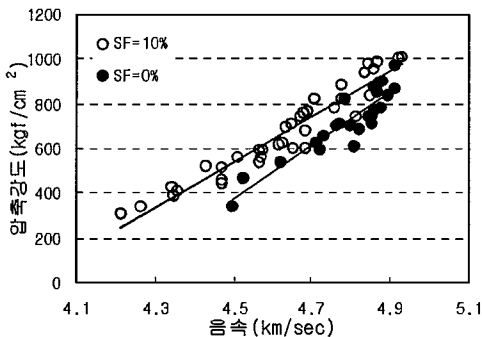


Fig. 7 실리카폼 치환율에 따른 음속과 압축강도

즉, 음속이 동일할 경우 SF을 사용한 콘크리트의 압축강도가 약 96~171kgf/cm<sup>2</sup> 높게 나타나고 있다. SF을 사용한 콘크리트는 포졸란 반응과 micro filler 효과에 의하여 0.1μm 이상의 큰 공극은 작아지고 골재와 결합재 사이의 부착력이 커지면서 콘크리트의 강도가 증가되었기 때문이다. 따라서, SF을 10% 치환한 콘크리트는 SF을 사용하지 않은 콘크리트에 비하여 동일 음속에서 압축강도가 높게 나타난다고 할 수 있다.

SF치환율 0, 10%의 압축강도 추정식은 식 (4), (5)와 같다.

$$F_c = 1198.4V_p - 5020 \quad (R^2 = 0.83) \quad (4)$$

$$F_c = 1010.0V_p - 4001 \quad (R^2 = 0.92) \quad (5)$$

여기서,

$F_c$  : 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

$V_p$  : 음속(km/sec)

### 3.7 음속과 압축강도 추정

본 실험 범위 내에서 측정된 음속은 4.213~4.931km/sec, 압축강도는 307~1008kgf/cm<sup>2</sup>이며, 총 데이터는 60개이다. 이와같은 범위에서 음속과 압축강도와의 관계는 Fig. 8 그리고 식 (6)과 같은 추정식으로 나타낼 수 있다.

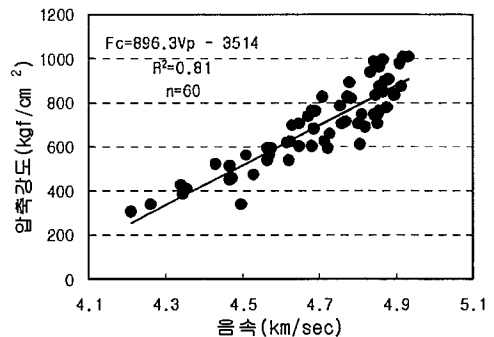


Fig. 8 음속과 압축강도와의 관계

$$F_c = 896.3V_p - 3514 (R^2 = 0.81) \quad (6)$$

여기서,

$F_c$  : 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

$V_p$  : 음속(km/sec)

또한, 실측한 압축강도와 식(6)으로 추정된 압축강도와의 관계는 Fig. 9와 같다. 실측강도와 추정강도와의 차이는 평균 66kgf/cm<sup>2</sup>이며, 표준편차는 44kgf/cm<sup>2</sup>이다. 또한 기여율은 0.81, 상관계수는 0.9로 나타나 비교적 그 정도가 높다고 판단된다.

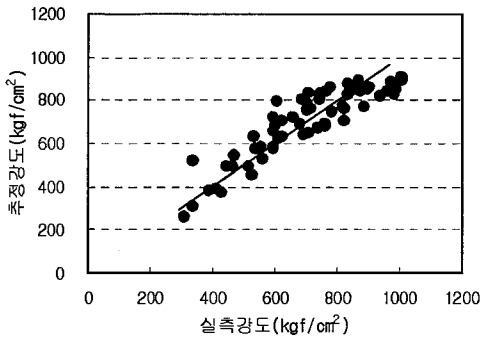


Fig. 9 실측강도와 추정강도와의 관계

#### 4. 결 론

초음파속도법을 이용하여 재령 28일 압축강도가 600kgf/cm<sup>2</sup>~1000kgf/cm<sup>2</sup>인 고강도 콘크리트의 압축강도를 추정하고자 하는 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 함수율 1% 변화에 따른 초음파속도는 50~69m/sec, 평균 61m/sec 증가된다.
- 2) 콘크리트의 초음파전파속도는 동일한 압축강도일 경우 굵은골재의 최대치수가 클수록, 단위굵은골재량이 많을수록 증가되지만, 단위결합재량에 따른 초음파전파속도의 변화는 뚜렷하지 않고 또한, 동일한 음속일 경우 실리카흙을 사용한 콘크리트의 압축강도가 높게 나타난다.

- 3) 초음파전파속도에 따른 콘크리트의 압축강도 추정식은 다음과 같다.

$$F_c = 896.3V_p - 3514 (R^2 = 0.81)$$

여기서,

$F_c$  : 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

$V_p$  : 초음파전파속도(km/sec)

#### 참 고 문 헌

1. Cheesman, W. J., "Dynamic Testing of Concrete with the Soniscope Apparatus", Proceedings, Highway Research Board, V.29, 1949, pp.176~183
2. Jones, R., "The Nondestructive Testing of Concrete", Magazine of Concrete Research(London), V.1, No.2, June 1949, pp.67~78
3. Whitehurst, E. A., "Soniscope Tests in Concrete Structures", Journal of ACI, Vol.47, No.6, 1951, pp.433~444
4. ASTM C 597 : Standard Method of Test for Pulse Velocity through Concrete
5. 日本建築學會, "콘크리트 강도 정의のための非破壊試験方法マニュアル", 1983
6. Godfrey, Jr. K. A., "Concrete Strength Record Jumps 36%", Civil Engineering, Vol. 57, No. 10, pp.84~88
7. 신상우, "분당 삼성 초고층APT에 500kg/cm<sup>2</sup>이상의 고강도 콘크리트 시공 및 구조적 거동", 한국콘크리트학회지, 제2권 4호, 1990.12, pp.8~21
8. 권영호 외, "700kg/cm<sup>2</sup> 고강도 콘크리트의 현장 적용", 한국콘크리트학회 추계학술발표대회 논문집, 1993.11, pp.124~131
9. 윤영수 외, "신대방동 추상복합건물에 1200kg/cm<sup>2</sup> 초고강도 콘크리트의 시공", 한국콘크리트학회지, 제8권 3호, 1996. 6, pp.78~83
10. 野崎, 中山, "超音波法, シュミットハンマー法によるコンクリートの複合非破壊試験, 第2回コンクリート共學年次講演會講演論文集, 1975, pp.137~140
11. 岡島達雄, "콘크리트의力學的性質と水分", セメント・コンクリート, No.464, 1985.10, pp.18~26
12. 大塚佐吉, "콘크리트의組織構造と力學的性質", 콘크리트工學, Vol.19, No.11, 1981.11, pp.58~67

- 
13. 김인수, "할수상태에 따른 콘크리트의 역학적 성상에 관한 연구", 한양대학교대학원, 1992.6, pp.78~80  
14. 谷川恭雄, 山田和夫, "複合非破壊試験法によるコンクリートの強度の推定", セメント・コンクリート, No. 393, 1979, pp.10~17

15. 尼崎省二, 明石外世樹, "シュミットハンマと超音波法によるコンクリートの非破壊試験", セメント・コンクリート, No.385, 1979, pp.16~22

(접수일자 : 2001년 1월 27일)