

고강도콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식의 적용성에 관한 연구

A Study on the Application of Non-Destructive Testing Equation for the Estimation of Compressive Strength of High Strength Concrete

김 무 한*
Kim, Moo-Han

최 세 진**
Choi, Se-Jin

강 석 표**
Kang, Suk-Pyo

김 재 환**
Kim, Jae-Hwan

장 종 호**
Jang, Jong-Ho

ABSTRACT

Recently, it is being studied on the high strength concrete in many laboratories and being applied to the construction field actually. But non-destruction testing equation that to be proposed about normal strength concrete in Japan has been using because the systematic study results for the estimation of compressive strength of high strength concrete do not exist. So it is essential to suggest the non-destruction testing equation for the estimation of compressive strength of high strength concrete.

This is an experimental study to analyze and investigate the non-destruction testing equation for the estimation of compressive strength of high strength concrete.

The results are as follows:

The relation between rebound number, pulse velocity and compressive strength of high strength concrete have lower coefficient than combined method of rebound number and pulse velocity. Also new non-destructive testing equation for the estimation on the compressive strength of high strength concrete was suggested in this study, and it is considered that these equations have possibility to be applied in domestic construction field.

키워드 : 비파괴검사, 반발도, 초음파속도, 압축강도추정, 고강도콘크리트,

Keywords : non-destruction, rebound number, pulse velocity, estimation of compressive strength, high strength concrete.

1. 서 론

콘크리트의 고강도화는 부재단면 축소로 인한 자원절약과 경비절감의 경제적인 효과 외에도 콘크리트 부재의 프리캐스트화, 장지간 스패 및 초고층화가 가능하다는 점 등 보통강도 콘크리트에 비해 많은 구조적 장점이 입증됨에 따라 실제 구조물에 대한 적용이 최근 들어 국내·외적으로 비약적인 증가 추세에 있다.1)

한편 미국, 일본 등 선진 외국에서는 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대한 연구를 바탕으로 고강도콘크리트 구조물에 대한 강도 및 내부탐사를 위하여 비파괴시험에 의한 콘크리트 강도 추정식의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 비파괴시험에 대하여 각국마다 기준 및 지침을 제정시켜 놓고 있다.2) 그러나 반발도 및 초음파속도를 이용하여 압축강도를 추정하기 위한 제안식을 나타낸 그림 1 및 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 기존의 제안식에 의해 추정된 압축강도 값은 제안식마다 상당한 차이를 보이고 있다.

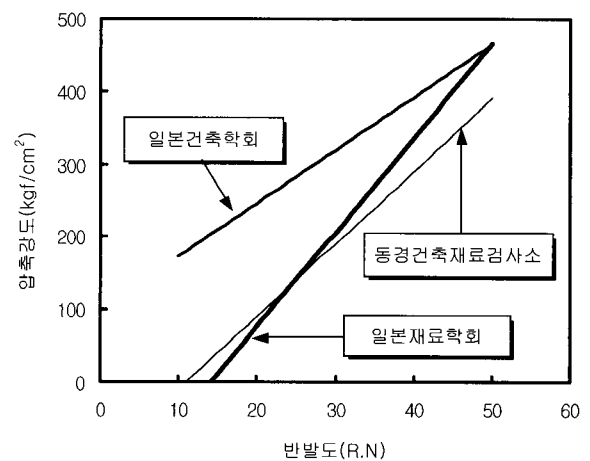


그림 1. 반발도에 따른 기존 제안식의 비교

* 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수·공박

** 정희원, 충남대학교 대학원 건축공학과

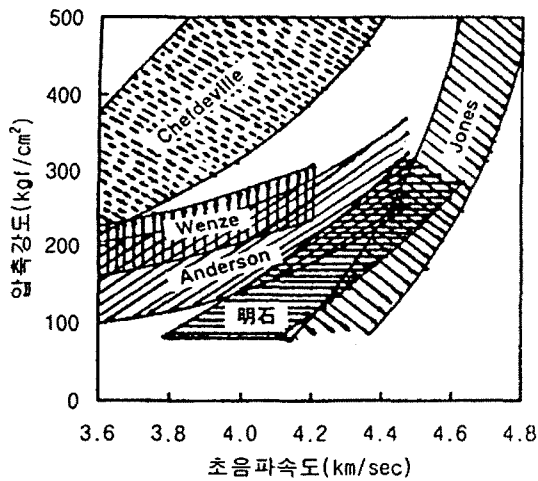


그림 2. 초음파속도에 따른 기존 제안식의 비교

또한 국내에서는 체계화된 연구 결과가 없는 상태에서 대부분 일본에서 수십년 전에 보통강도 수준의 콘크리트를 대상으로 제안된 추정식을 사용하고 있으나 콘크리트에 사용되는 시멘트, 골재 및 혼화제 등 사용재료와 아울러 콘크리트의 배합방법 또한 외국과 상이한 점이 크기 때문에 최근들어 급증하고 있는 고강도콘크리트에 대한 비파괴 추정식의 제시가 시급히 요구되어지고 있는 실정이다.3),4)

따라서 본 연구에서는 시멘트, 골재 및 혼화제 등의 사용재료와 물결합재비에 따른 고강도콘크리트를 제작하여 측정 한 압축강도, 반발도, 초음파속도의 데이터 및 충남대학교 건축재료·시공학 연구실에서 1990~2001년 사이에 제작된 다양한 고강도콘크리트의 기존데이터를 외국의 제안식과 비교·검토하고 통계적인 처리 및 해석에 의하여 국내의 실정에 맞는 고강도콘크리트의 압축강도추정을 위한 비파괴시험식을 유도하고 그의 적용성을 검토하고자 하였다.

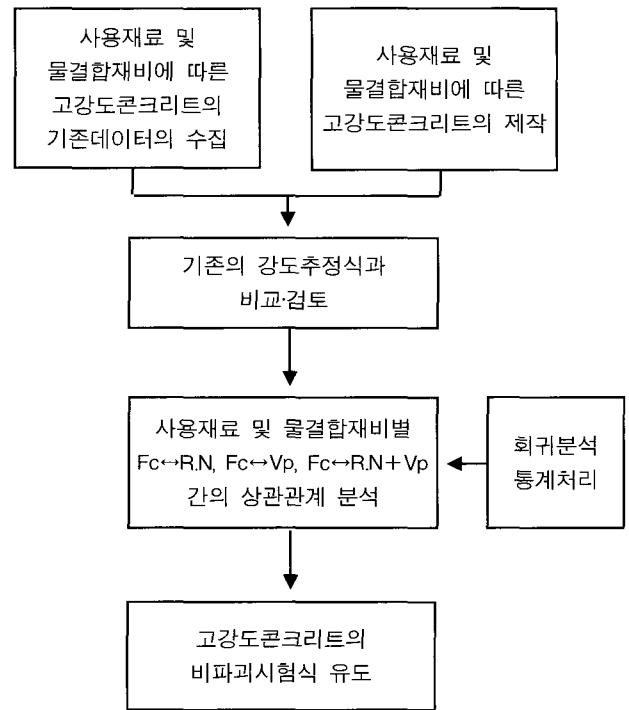


그림 3. 연구의 프로세스

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 프로세스는 그림 3과 같으며 실험계획은 표 1에서 보는 바와 같이 시리즈 I에서는 설계기준강도 500 ~ 600kgf/cm²의 고강도콘크리트의 사용재료에 따른 비파괴시험식을 검토하기 위하여 시멘트 종류는 보통포틀랜드시멘트(O.P.C)와 비라이트시멘트(H.B.C) 2수준, 굵은골재 종류는 산지별로 수도권, 충청권, 전라권, 경북권, 경남권 5수준, 암종별로 돌로마이트, 응회암, 천매암, 편마암, 화강암 5수준, 고성능

표 1. 실험계획

구 분	설계기준강도 (kgf/cm ²)	실험요인 및 수준		측정항목	
시리즈 I	500~600	사용 재료	시멘트※	보통포틀랜드시멘트(O.P.C), 비라이트시멘트(H.B.C)	압축강도 (kgf/cm ²) 초음파속도 (km/sec) 반발도 (R.N)
			굵은 골재	산지별 : 수도권, 충청권, 전라권, 경북권, 경남권	
				암종별 : 돌로마이트, 응회암, 천매암, 편마암, 화강암	
혼화제※	나프탈렌계(N형), 멜라민계(M형), 폴리카르본산계(P형)				
시리즈 II	360~700	물결합재비※	25~45%		

※ 기존의 데이터 포함

감수제 종류는 나프탈렌계, 멜라민계, 폴리카르본산계 3수준으로 설정하였다. 또한 시리즈II에서는 설계기준강도 360~700kgf/cm² 범위의 고강도콘크리트의 물결합재비에 따른 비파괴시험식을 검토하기 위하여 물결합재비를 25~45% 범위로 설정하였다.

측정항목으로서 경화콘크리트의 압축강도, 반발도, 초음파속도를 재령 3, 7, 28, 56, 91일에 각각 측정하였다.

표 2. 사용재료의 물리적 성질

시멘트	보통포틀랜드시멘트 : 비중 : 3.15 비라이트시멘트 : 비중 : 3.20	
혼화재	플라이애시, 비중 2.13	
잔골재	강모래, 제염사	최대치수 : 5mm 비중 : 2.54 ~ 2.56, 조립율 : 2.60 ~ 3.04
굵은골재	부순자갈,	최대치수 : 20, 25mm 비중 : 2.56 ~ 2.65, 조립율 : 6.02 ~ 6.54
혼화제	나프탈렌계, 멜라민계, 폴리카르본산계	

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료의 물리적성질은 표 2에 나타낸 바와 같이 시멘트는 비중 3.15의 1종 보통포틀랜드시멘트와 비중 3.20의 비라이트시멘트를 사용하였으며, 혼화제는 비중 2.13인 플라이애시를 사용하였다. 또한 골재로서 잔골재는 비중 2.54 ~ 2.56의 강모래와 제염사, 굵은골재는 최대치수 20, 25mm의 부순자갈을 사용하였으며, 혼화제는 나프탈렌계, 멜라민계, 폴리카르본산계 고성능감수제를 사용하였다.

2.3 비빔방법

콘크리트 비빔은 그림 4에서 보는 바와 같이 용량 100ℓ의 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 시멘트, 플라이애시, 잔골재를 투입하여 30초간 건비빔 한 후, 물과 고성능감수제를 투입하여 각각 60초간, 굵은골재를 투입하여 60초간 비빔을 실시하였으며 총 비빔시간은 210초 소요되었다.

2.4 시험방법

1) 압축강도 시험방법

경화콘크리트의 압축강도 시험방법은 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 최대하중을 측정후 다음 식에 의하여 압축강도를 산정하였으며, 측정장치는 Shimadzu의 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하였다.

$$\sigma_c = P/A(\text{kgf/cm}^2)$$

여기에서 σ_c : 압축강도 (kgf/cm²)

P : 최대하중(kgf)

A : 공시체의 단면적(cm²)

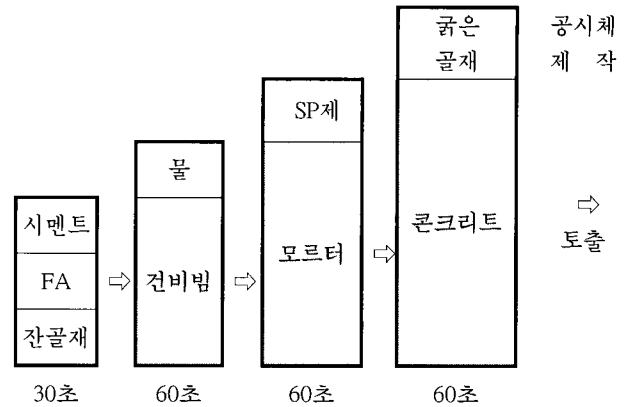


그림 4. 콘크리트의 비빔방법

2) 반발도 시험방법

Ø15×30cm의 공시체의 표면에 3cm 간격으로 그리드를 표시한 다음 25kgf/cm²의 압축하중을 가하여 고정후 N형 슈미트 해머를 사용하여 타격각도 0°로 25회 타격한 후 그 평균값으로 반발도를 산정하였다. 단 평균값과 ±20% 이상의 오차가 있는 측정값은 제외하였으며 이에 대한 값을 보정하여 반발도의 평균값을 산정하였다.

3) 초음파속도 시험방법

영국 C.N.S 사의 PUNDIT를 이용하여 50KHz의 단자를 고정시킨 상태에서 계기의 수신호가 안정된 상태로 될 때 유효숫자를 읽어 전파시간(μs)으로 하였으며 측정시에는 측정대상 공시체면에 구리를 발라서 단자와 공시체면 사이에 공극이 생기지 않도록 하여 각 재령의 3개의 원주형공시체를 길이방향으로 측정하여 평균치로 하였고 전파시간은 다음 식에 의해서 산정하였다.

$$V_p = L/T(\text{km/sec})$$

여기에서 V_p : 초음파속도 (km/sec)

L : 공시체 길이(cm)

T : 전파시간 (μs)

2.5 기존의 강도추정식

반발도를 통한 기존의 압축강도 추정식은 다음과 같다.

- ① 일본재료학회식 : $F_c = 13R - 184$
- ② 일본건축학회식 : $F_c = 7.3R + 100$
- ③ 동경도건축재료검사소식 : $F_c = 10R - 110$

초음파속도를 통한 기존의 압축강도 추정식은 다음과 같다.

- ① 일본건축학회식 : $F_c = 215V_p - 620$
- ② J. Pyszniak 식 : $F_c = 92.5V_p^2 - 508V_p + 782$
- ③ 山田和夫의 2인식 : $F_c = 172.5V_p - 499.6$
- ④ V. M. Malhotra & N. J. Carino 식
 $F_c = 1.46V_p - 15913$

복합법에 의한 기존의 압축강도 추정식은 다음과 같다.

- ① 일본건축학회식 : $F_c = 8.2R + 269V_p - 1094$

표 3(a). 경화콘크리트 측정결과 (사용재료)

사용재료			압축강도(kgf/cm ²)				초음파속도(km/sec)				반발도(R.N)			
			7일	28일	56일	91일	7일	28일	56일	91일	7일	28일	56일	91일
시멘트 및 고성능 감수제	OPC I	N형	546	697	746	797	4.78	4.83	4.94	4.92	40	47	47	48
		M형	530	650	736	787	4.80	4.83	4.93	4.92	41	47	47	48
		P형	539	689	750	800	4.69	4.78	4.87	4.95	40	47	47	48
	OPC II	N형	580	710	796	850	4.89	4.93	5.02	4.97	42	47	50	50
		M형	606	717	800	882	4.85	4.86	4.97	4.95	42	47	48	50
		P형	639	761	850	911	4.95	4.90	5.01	5.04	42	46	49	49
굵은 골재	산지별	수도권	615	711	760	770	4.90	4.87	4.85	4.93	42	46	47	48
		충청권	544	696	685	690	4.89	4.89	4.88	4.96	41	45	45	46
		전라권	603	755	713	720	4.94	4.90	4.89	4.91	40	45	46	46
		경북권	624	771	756	767	4.92	4.95	4.98	5.03	42	45	46	46
		경남권	594	773	759	781	4.90	4.96	5.00	5.06	40	45	46	47
	암종별	돌로마이트	488	607	651	670	4.77	4.87	4.92	5.02	37	43	46	46
		응회암	487	609	667	652	4.72	4.71	4.82	4.90	36	42	45	46
		천매암	447	552	613	630	4.74	4.73	4.80	4.89	36	43	45	45
		편마암	459	611	650	660	4.69	4.68	4.77	4.92	35	39	44	45
		화강암	536	676	787	793	4.63	4.71	4.94	5.04	39	42	46	47

표 3(b). 경화콘크리트 측정결과 (물결합재비)

W/B (%)	단위수량 (kg/m ³)	압축강도(kgf/cm ²)					초음파속도(km/sec)					반발도(R.N)				
		3일	7일	28일	56일	91일	3일	7일	28일	56일	91일	3일	7일	28일	56일	91일
30	165	462	558	669	699	796	4.62	4.81	4.86	5.08	4.96	31	39	44	51	51
	175	517	588	723	804	851	4.62	4.79	4.85	4.95	4.94	32	41	44	50	51
	185	532	615	412	782	889	4.51	4.75	4.80	4.92	4.91	35	41	45	50	51
35	165	402	502	606	701	769	4.59	4.76	4.85	4.86	4.91	29	36	42	49	50
	175	406	493	625	708	753	4.52	4.70	4.74	4.90	4.89	30	39	42	49	51
	185	411	486	625	658	705	4.51	4.68	4.72	4.82	4.90	30	38	41	50	50
40	165	220	360	450	572	618	4.25	4.51	4.79	4.74	4.90	20	26	33	38	42
	175	220	357	473	561	615	4.25	4.50	4.75	4.70	4.91	18	27	34	38	43
	185	213	255	344	402	456	4.21	4.50	4.72	4.73	4.89	18	22	29	37	31

- ② 明石외 : $F_c = 10.2(KR) + 223V_p - 960$
(K : 재령에 대한 보정계수)
- ③ 谷川외 : $F_c = 9.9R + 79.2V_p - 273$
- ④ 中山외 : $F_c = 1.11(0.00082R^3 + 11.03V_p - 32.7)0.942$

여기에서 F_c : 압축강도(kgf/cm²)
R : 반발도값(R.N)
 V_p : 초음파속도(km/sec)

3. 실험결과 및 고찰

표 3(a) ~ (b)는 경화콘크리트의 측정결과를 나타낸 것이다. 또한 본 연구에서는 기존의 연구결과를 참고하여 다음 식을 이용하여 표 3(a) ~ (b)의 데이터와 기존데이터의 회귀분석을 하였으며 표 4는 회귀분석 결과를 나타낸 것이다.

$$F_c = aR + bV_p + C$$

여기에서, F_c : 압축강도(kgf/cm²)

R : 반발도값(R.N)

V_p : 초음파속도(km/sec)

a, b, C : 실험상수

표 4. 회귀분석 결과

구 분	실험상수			다중상관계수 (R)	표준오차 (SE)	F비	유의한 F	결정계수 (R2)
	a	b	C					
시리즈 I (사용재료)	12.671	-	97.868	0.8563	84.0187	384.822	5.3E-42	0.7332
	-	501.632	-1782.03	0.8589	91.6187	390.982	3.2E-42	0.7377
	11.206	125.763	-422.905	0.8934	78.9584	227.308	1.1E-40	0.7981
시리즈 II (물결합재비)	14.294	-	8.057	0.7671	108.206	1806.27	8.7E-246	0.5882
	-	335.271	-1033.76	0.6269	131.438	815.211	1.2E-138	0.3925
	11.605	193.440	-778.642	0.8322	93.6146	1393.99	0	0.6925

3.1 반발도에 의한 압축강도 추정

그림 5는 사용재료 및 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 반발도와 압축강도의 관계를 일본재료학회, 일본건축학회, 동경도건축재료검사소에 의한 강도추정식 및 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식과 비교하여 나타낸 것이며 그림 6은 실측압축강도와 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식에 의한 추정압축강도의 관계를 나타낸 것이다.

일본건축학회식의 경우 압축강도 350kgf/cm² 이하의 보통 강도수준에서는 어느 정도 일치하는 것으로 나타나고 있으나 고강도 영역으로 갈수록 실측데이터를 과소평가하고 있는 것으로 나타났으며 일본재료학회식과 동경도건축재료검사소식은 모든 강도 영역에서 실측치의 분포 범위를 크게 하위하고 있어 국내의 현실을 감안하면 적용하기 어려울 것으로 판단된다.

본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식은 다음과 같다.

① 사용재료별

$$F_c = 12.67R + 97.868 \quad (R=0.8563)$$

② 물시멘트비별

$$F_c = 14.29R + 8.057 \quad (R=0.7671)$$

3.2 초음파속도에 의한 압축강도 추정

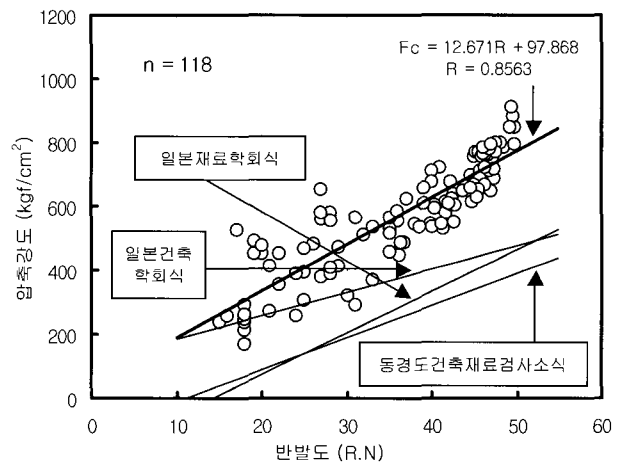
그림 7은 사용재료 및 물결합재비에 따른 초음파속도와 압축강도의 관계를 일본건축학회, J. Pyszniak에 의한 강도추정식 및 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식과 비교하여 나타낸 것이며 그림 8은 실측압축강도와 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식에 의한 추정압축강도의 관계를 나타낸 것이다.

일본건축학회식 및 J. Pyszniak식은 본 연구의 실측치와 다소 일치하는 부분도 있으나 대체적으로 분포범위를 하위하고 있으며, 또한 본 연구에 의한 추정식의 상관성은 비교적 낮게 나타나고 있어 초음파 속도 단독으로 콘크리트의 압축강도를 추정하는 것은 어려울 것으로 판단된다.

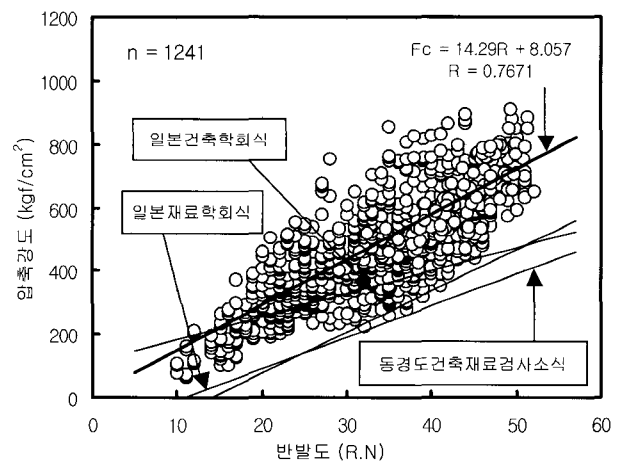
본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식은 다음과 같다.

① 사용재료별

$$F_c = 501.63V_p - 1782 \quad (R=0.8589)$$

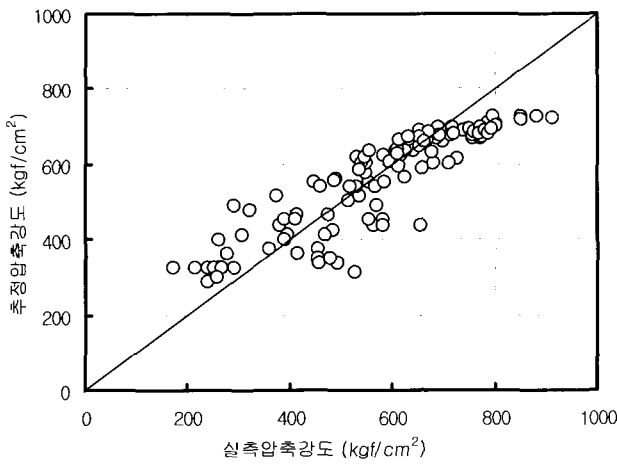


(a) 시리즈 I (사용재료)

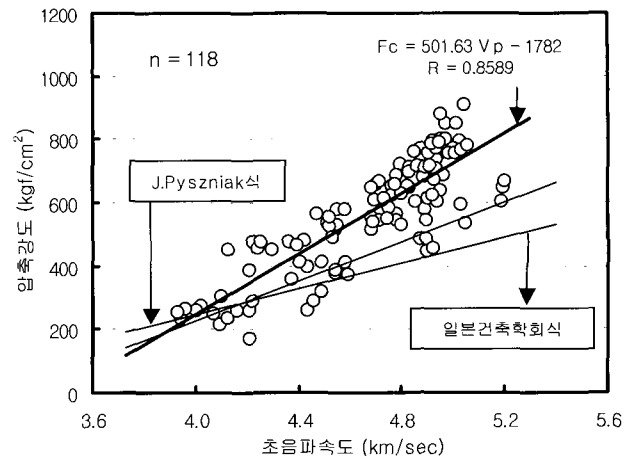


(b) 시리즈 II (물결합재비)

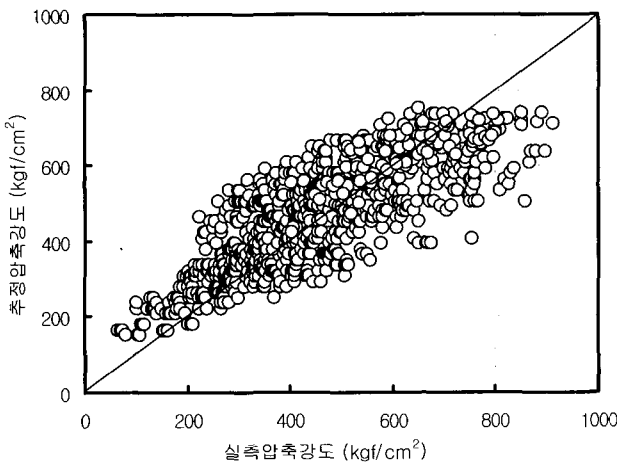
그림 5. 반발도와 압축강도의 관계



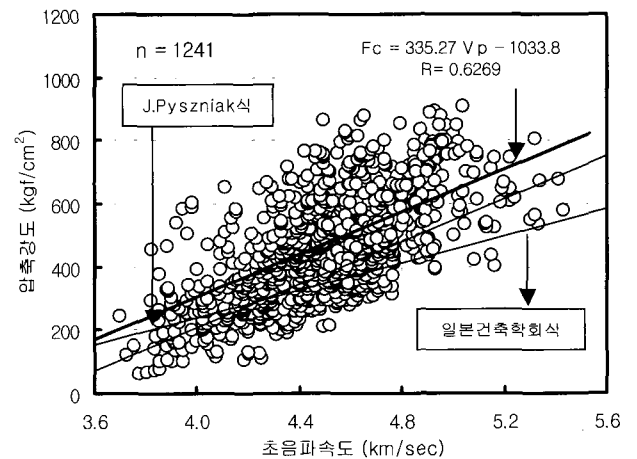
(a) 시리즈 I (사용재료)



(a) 시리즈 I (사용재료)



(b) 시리즈 II (물결합재비)



(b) 시리즈 II (물결합재비)

그림 6. 반발도에 의한 추정압축강도와 실측압축강도의 관계

그림 7. 초음파속도와 압축강도의 관계

② 물시멘트비별

$$F_c = 335.27V_p - 1033.8 \quad (R=0.6269)$$

3.3 복합법에 의한 압축강도 추정

그림 9는 사용재료 및 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 복합법에 의한 추정압축강도와 실측압축강도의 관계를 일본건축학회의 강도추정식과 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식과 비교하여 나타낸 것이며, 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식은 다음과 같다.

① 사용재료별

$$F_c = 11.21R + 125.76V_p - 422.91 \quad (R=0.8934)$$

② 물시멘트비별

$$F_c = 11.61R + 193.44V_p - 778.64 \quad (R=0.8322)$$

본 연구에서 제안하고 있는 강도추정식으로 추정된 압축강도는 압축강도 약 500kgf/cm² 이하에서는 실측압축강도보다 다소 높게 평가되고 있으며, 약 500kgf/cm² 이상에서는 다소 낮게 평가되는 것으로 나타났다. 또한 일본건축학회에서 제안하고 있는 강도추정식은 본 데이터를 다소 과소평가하고 있

는 것으로 나타났으며 반발도법 및 초음파속도법을 단독으로 사용하는 경우보다 복합법에 의한 강도추정식의 경우 상관계수가 각각 0.8934, 0.8322로 나타나 강도추정정도가 향상되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

고강도콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식의 적용성에 관하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

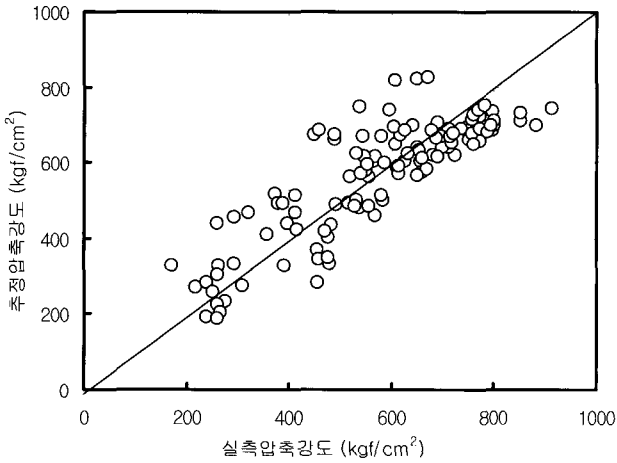
1) 반발도에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 얻었다.

① 사용재료별

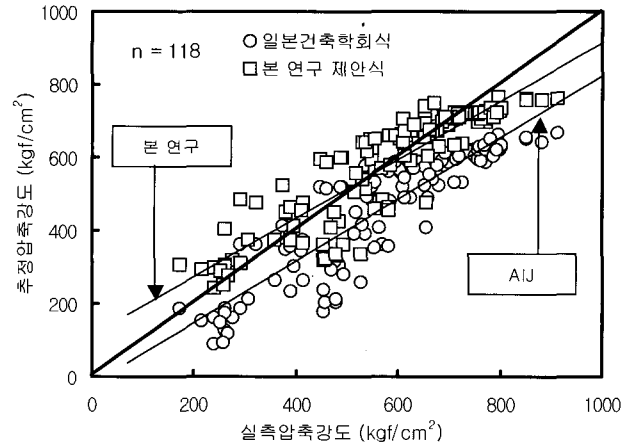
$$F_c = 12.67R + 97.868 \quad (R=0.8563)$$

② 물시멘트비별

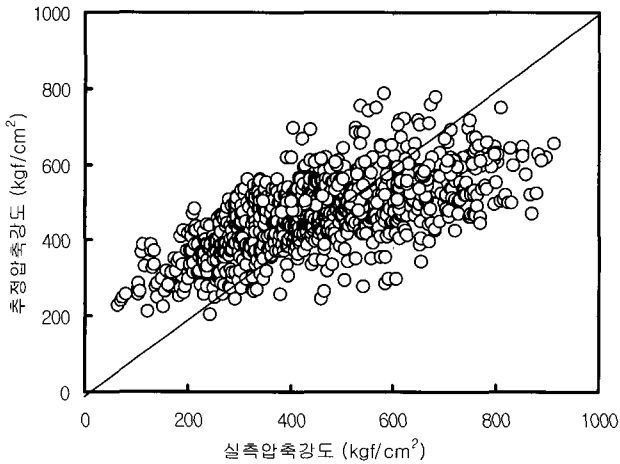
$$F_c = 14.29R + 8.057 \quad (R=0.7671)$$



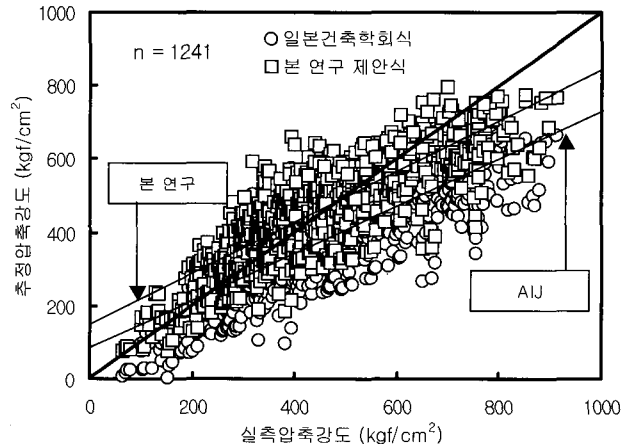
(a) 시리즈 I (사용재료)



(a) 시리즈 I (사용재료)



(b) 시리즈 II (물결합재비)



(b) 시리즈 II (물결합재비)

그림 8. 초음파속도에 의한 추정압축강도와
실측압축강도의 관계

그림 9. 복합법에 의한 추정압축강도와
실측압축강도의 관계

2) 초음파속도에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 얻었다.

① 사용재료별

$$F_c = 501.63V_p - 1782 \quad (R=0.8589)$$

② 물시멘트비별

$$F_c = 335.27V_p - 1033.8 \quad (R=0.6269)$$

3) 복합법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 얻었다.

① 사용재료별

$$F_c = 11.21R + 125.76V_p - 422.91 \quad (R=0.8934)$$

② 물시멘트비별

$$F_c = 11.61R + 193.44V_p - 778.64 \quad (R=0.8322)$$

4) 복합법에 의한 강도추정식의 상관계수가 반발도법 및 초음파속도법을 단독으로 사용하는 경우보다 상대적으로 높게 나타나 복합법에 의한 강도추정이 유리할 것으로 사료된다.

5) 비파괴시험에 의한 콘크리트의 압축강도 추정식을 실제 콘크리트 구조물에 적용하기 위해서는 향후 양생조건 및 재령을 고려한 강도추정과 적용범위 등에 관한 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 전력기술기초연구지원과제 「고강도콘크리트의 강도추정식 제안」에 관한 일련의 연구 결과로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. (과제번호 : 01-지정-14)

참 고 문 헌

1. 김무한 외, “고강도영역 콘크리트의 경제적 개발과 그 실용화에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제12권, 제7호, 1996. 7. pp.313~324
2. 日本コンクリート工学協会, “コンクリートの非破壊試験法-研究委員会報告書”, 1992.3,
3. 김무한 외, “콘크리트 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식에 관한 연구”, 한국구조물진단학회지, 제1권1호, 1997.6, pp.97~105
4. 김무한 외, “콘크리트 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식의 적용성 검토”, 대한건축학회학술발표논문집, 제17권2호, 1997, 10, pp.1239~1244
5. 日本建築学会, “コンクリート強度推定のための非破壊試験法マニュアル”, 1983
6. 日本建築学会, “建築工事標準仕様書-同解説(JASS 5)”, 1986, pp.276~297
7. RILEM CNDT-Committee, “RILEM Tentative Recommendations for In-situ Concrete Strength Determination by Non-Destructive Combined Methods(First draft)”, May, 1980
8. ASTM C 597 - Standard Test Method for Plus Velocity Through Concrete
9. ASTM C 805 - Standard Test Method for Rebound Number Through Concrete
10. 実大モデルによる超音波法, 反撥度法および複合法の検討, 日本建築学会構造系論文報告, 1991. 10, pp.276~297
11. C. Kashiwa, Non-Destructive Testing Method of Concrete, 技報堂, 1979
12. 谷川恭雄・森 博嗣・渡辺健治・三輪正保 : 高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー評価試験方法に関する研究, 第 12回コンクリート工学年次論文報告集, 第 12巻第 1号, pp.275~280, 1990.
13. 大塩 明 : セメントコンカーを骨材に用いた高強度コンクリートが得られる `コンクリート工学, Vol.14, No3. pp.34~37, 1976. 3.
14. 콘크리트品質의早期判定研究委員会, 콘크리트品質의早期判断方法に関する概況, 콘크리트工学, Vol. 17, No. 1(1979)
15. 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強度の推定, セメント・コンクリート, No. 393(1980)
16. 김무한, 콘크리트 압축강도추정을 위한 비파괴시험법에 관한 기초적 연구, 대한건축학회 춘계 학술발표대회논문집, 제6권 제1호, 1986. 4, pp.473~476
17. 한천구, 슈미트해머에 의한 콘크리트 강도 비파괴시험의 영향인자 분석에 관한 실험적 연구, 대한 건축학회 학술발표 논문집, 제7권 1호, pp.429~432, 1987.4
18. 한국표준과학연구원, 콘크리트 강도추정식 제정에 관한 연구, 2001