

조합법에 의한 현장 콘크리트 강도의 비파괴측정에 관한 연구

A Study on the Determination of In-Situ Concrete Strength by Combined Nondestructive Testing Method

o임선택* 김창환* 김영진** 정한중**
Lim, Seon Taek Kim, Chang Hwan Kim, Young Jin Jeong, Han Jung

ABSTRACT

The main disadvantages of destructive testing methods are the delay in obtaining test results, the relatively high cost of testing, and the lack of reproducibility in the test results. As a result, nondestructive testing methods are generally used.

There are three objectives in this paper. The first is to determine the equations of the compressive strength of concrete estimated by Schmidt hammer technique, ultrasonic pulse velocity method and combined method respectively in laboratory. The second is to determine the correction factors according to the concrete age which affects most in evaluating the compressive strength of in-situ concrete. The third is to examine the applicability of the equations to evaluation of the compressive strength of in-situ concrete structures.

I. 서론

지난 70여년 이상 콘크리트의 품질관리 및 구조물 강도평가의 방법으로, 표준양생 원주형공시체의 28일 강도측정이 가장 널리 사용되어 왔으며, 대부분의 국가에서 강도평가방법으로 채택하고 있다. 이는 표준양생 공시체에 의한 강도 결정방법이 표본추출, 시편제작 및 시험방법이 용이하며 시험에 따른 변동성이 작기 때문이다.

그러나, 현장 콘크리트구조물의 강도는 타설, 다짐 및 양생조건 등의 차이로 표준공시체의 강도와 다르며, 반드시 28일에만 측정하는 것이 아니라 균열 등이 발생했을 때 구조물의 안전성 평가를 위하여 수시로 측정하게 된다. 이때 정확한 강도측정은 현장에서 채취한 코어강도에 의한 것이지만, 이 방법은 시간과 비용이 많이 소요되며 구조물에 손상을 끼치기 때문에, 제한적으로 사용된다. 이러한 이유로 현장에서 가장 보편적으로 사용되는 것이 슈미트햄머와 초음파속도측정에 의한 비파괴시험법이다[1].

따라서 본 연구의 목적은 초음파속도측정 및 슈미트햄머를 이용한 현장 콘크리트구조물의 강도측정을 신뢰성있게 실시하기 위하여, 실내시험에 의한 강도추정식을 산정한 후, 현장적용을

통하여 그 타당성을 검증하는데 있다.

II. 비파괴시험장비를 이용한 실내시험

1. 실내시험방법

비파괴측정장비중 슈미트햄머와 초음파속도측정장비를 이용하여 압축강도를 예측하고 재령보정계수를 구하기 위한 시험방법은 다음과 같다.

- 시험용 공시체의 제작
- 시험체에 대한 비파괴강도측정
- 실측 압축강도의 측정
- 강도추정식산정 및 재령보정계수의 도출

2. 시험용 공시체의 제작

표 1과 같은 5종류의 콘크리트에 대하여 각각 32개의 $\Phi 10 \times 20$ cm인 공시체를 제작하였으며, 슬럼프는 8.5 ± 1 cm로 하였다.

표 1. 콘크리트 배합표

배합 경우	W/C (%)	s/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	σ_{ck} (kg/cm ²)
1	73	44	193	264	851	1072	180
2	68	44	193	284	831	1072	210
3	63	43	193	306	809	1072	240
4	59	43	193	327	788	1072	270
5	55	41	193	351	764	1072	300

* (주)대우 건설기술연구소, 연구원

** (주)대우 건설기술연구소, 선임연구원

3. 초음파속도측정에 의한 비파괴강도측정

3.1 시험방법

초음파 속도측정법은 20 kHz이상의 초음파를 콘크리트속에 방사하여, 그 전파시간 t 로부터 구한 전파속도 V ($L/t, L$: 전파거리)를 이용하여 콘크리트의 품질과 강도를 평가하는 것이다. 전파시간의 측정정도는 $\pm 2\%$ 이하이고, 시간과 거리를 고려한 초음파속도의 측정정도는 대략 $\pm 3\%$ 로 정도가 높은 것으로 알려져 있다[2].

콘크리트 내부를 진행하는 초음파속도 V 는 식 (1)과 같다.

$$V = \sqrt{E_c(1-\nu)/\{\rho(1+\nu)(1-2\nu)\}} \quad (1)$$

여기서, E_c 은 콘크리트의 탄성계수이고, ρ 는 밀도, ν 는 포아슨비이다. 초음파 속도와 실측강도와의 시험적 관계를 도출하기 위하여, 동일 공시체에 대하여 KS F 2418(콘크리트 중의 펄스속도 시험방법)에 의한 초음파속도와 실측 압축강도를 측정한다.

3.2 압축강도추정식의 산정

초음파 속도 및 실측 압축강도의 측정 결과는 그림 1과 같으며, 상관식은 식 (2)와 같다.

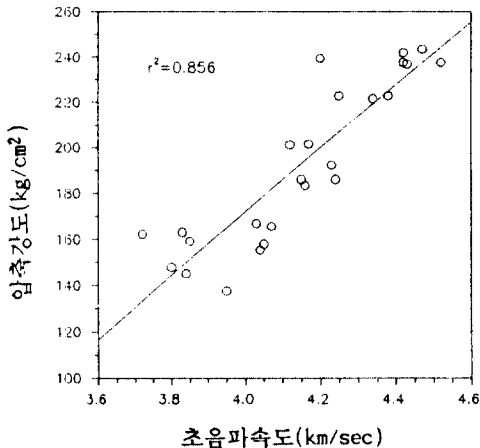


그림 1. 실측압축강도와 초음파속도의 관계

$$\sigma_v = 138.6V - 382.3 \quad (2)$$

여기서, σ_v : 추정압축강도(kg/cm²)

V : 초음파속도 (km/sec)

3.3 재령보정계수의 산정

초음파 속도값은 콘크리트의 탄성계수 및 내부의 밀도에 따라 변하며, 콘크리트 내부의 함습상태가 매우 중요한 변수로 된다[3]. 본 시험시 재령 30일에서의 측정은 28일 수중양생 및 2일 간의 기건양생 실시후 실시하였으므로, 표면은 충분히 건조되었다 할 수 있으나, 내부는 습윤상태에 가까우므로 재령 50, 100, 150, 200 및 330일에서의 공시체 내부상태와는 다소 차이가 있다고 할 수 있다. 또한 재령에 따른 초음파속도의 증가를 강도평가에 반영할 필요가 있기 때문에, 재령에 따른 보정계수를 산정하였다.

재령보정계수는 초음파 속도에 의한 추정강도의 실측강도에 대한 비로서 나타내며, 이는 그림 2와 같다.

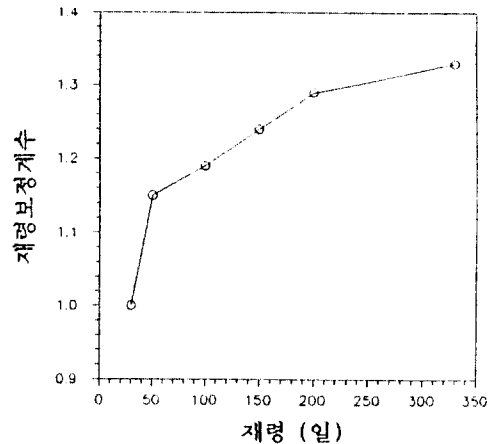


그림 2. 재령보정계수 (초음파속도법)

4. 반발경도법에 의한 비파괴강도측정

4.1 압축구속력이 반발경도에 미치는 영향

슈미트햄머 타격방향과 직각으로 압축구속력을 작용시킨 경우, 구속력의 크기에 따라 반발경도측정값은 변하게 된다[4]. 따라서 압축구속력이 반발경도에 미치는 영향을 구명하여, 적절한 압축응력을 재하하고 반발경도를 측정할 필요가 있다.

4.1.1 시험방법

28일 수중양생후 2일간 기건양생을 실시한 후 타격방향에 직각으로 압축구속력을 5, 10, 15, 20, 30, 40 및 50 kg/cm²으로 변화시켜면서 반발경도를 측정한다.

4.1.2 시험결과 및 분석

각 배합별로 압축구속력의 변화에 따른 반발경도 측정값은 표 2와 같다.

표 2. 압축구속력에 따른 반발경도값

배합 경우	압축구속력 (kg/cm ²)						
	5	10	15	20	30	40	50
1	14.3	17.5	18.3	18.4	20.4	21.2	21.0
2	15.2	17.4	18.0	18.7	20.5	21.5	22.3
3	15.3	19.7	19.9	21.0	21.9	22.8	23.0
4	15.7	18.0	21.6	22.1	24.6	25.1	25.8
5	18.2	19.2	21.9	24.6	26.7	25.6	25.9

표 2에서 압축구속력 30 kg/cm²이 작용할 때의 반발경도를 기준으로 하여, 각 압축구속력별 반발경도 값을 이에 대한 비율로 나타내면 그림 3과 같다.

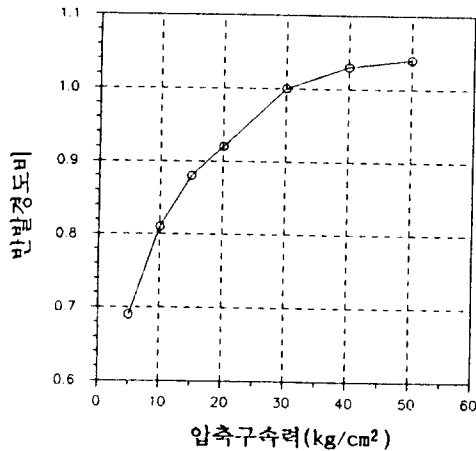


그림 3. 압축구속력별 반발경도비

그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이, 압축구속력이 30kg/cm²이상되면 압축구속력 변화에 대한 반발경도값의 변화는 미소하다는 것을 알 수 있다. 이는 반발경도가 일정하게 되는 압축구속력의 범위가 25-60 kg/cm²라는 문헌상의 결과와도 일치한다[5].

4.2 압축강도추정식의 산정

압축구속응력이 30kg/cm² 이상이 되면 반발경도 값의 변화가 미소하므로, 만능시험기로 공시체에 30kg/cm²의 구속응력을 재하하고 측면에서 반발경도를 측정하였다. 반발경도 측정후 만능

시험기로 공시체의 실측압축강도를 측정하였다. 실측 압축강도와 슈미트햄머의 반발경도와와의 관계는 그림 4와 같으며, 상관식은 식(3)과 같다.

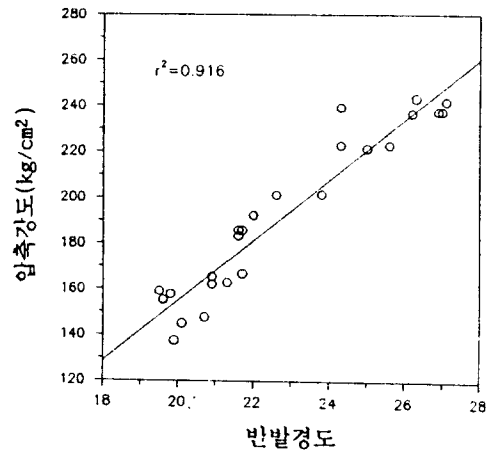


그림 4. 실측 압축강도와 반발경도의 관계

$$\sigma_s = 13.15R - 108 \quad (3)$$

여기서, σ_s : 추정압축강도(kg/cm²)

R: 반발경도

4.3 재령보정계수의 산정

일반적으로 슈미트햄머의 반발경도 측정에 의한 압축강도의 추정은 주로 콘크리트 표면의 경도에 의하게 된다. 그러나 시공후 시간경과에 따라 건조상태로 보호된 콘크리트의 표면경도의 증가는 실재 압축강도의 증가보다 크게 되므로, 재령이 오래 경과된 콘크리트 구조물의 강도측정을 위해서는 적절한 재령보정계수를 산정하여 이를 적용하여야 된다[6].

4.3.1 시험방법

표 1의 시험용 공시체를 28일간 수중양생시킨 후 기건양생시키면서, 재령 30, 50, 100, 150, 200 및 330 일에 반발경도를 측정하였다. 슈미트햄머의 반발경도 측정시 압축구속력은 30 kg/cm²으로 하였다.

4.3.2 시험결과

재령보정계수는 실측강도의 식 (3)에 의한 추정강도에 대한 비로 나타낸다. 본 시험에 의한 재령보정계수는 그림 5와 같다.

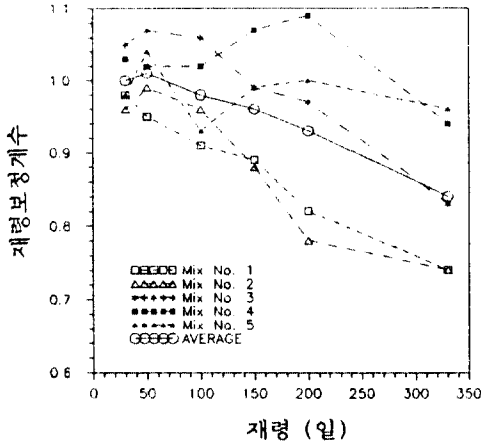


그림 5. 재령보정계수(반발경도법)

5. 조합법에 의한 강도추정식

슈미트햄머의 반발경도 및 초음파 속도측정에 의하여 강도를 추정할 경우, 전자는 표면경도의 영향을 받고, 후자는 강도증가에 비해 초음파속도의 변화가 민감하지 않은 등의 단점이 있으나, 이 두가지 방법을 조합하면 각 방법이 갖는 단점을 보완할 수 있기 때문에 강도예측의 정도를 향상시킬 수 있다[7]. 따라서 본 연구에서는 재령의 영향을 고려한 조합법을 산정하여 효과적인 압축강도예측이 가능하도록 하였다. 조합법에 의한 강도추정식은 식(4)와 같다.

$$\sigma_c = K_1 R + K_2 V - K_3 \quad (4)$$

여기서, R : 슈미트햄머의 반발경도

V : 초음파속도(km/sec)

K : 재령에 따른 보정계수

$$K_1 = -0.88 \log A + 8.03$$

$$K_2 = 20.45 \log A + 41.68$$

$$K_3 = 48.98 \log A + 181.42$$

A : 재령(일) (30일이상)

재령30일에서의 상관계수는 0.924로 슈미트햄머에 의한 0.916과 초음파속도에 의한 강도추정의 상관계수인 0.856보다 비교적 높다.

III. 현장콘크리트구조물의 강도추정에 적용

1. 대상구조물 및 측정위치

측정대상구조는 아파트건물구조로 총 5 개소에서 실시하였으며, 강도측정위치는 슬래브 및 벽체에서 실시하였다.

2. 측정방법

측정 항목은 슈미트햄머의 반발경도, 초음파속도 및 코아시편에 의한 실측 압축강도의 측정이고, 비파괴 추정강도와 코아강도를 비교하였다.

2.1 슈미트햄머의 반발경도측정

코아채취하기전, 코아채취 지점에서 20~25회 슈미트햄머의 반발경도를 측정후, 심한 편차값은 제외시키고 평균을 구하였다. 슬래브에 대해서는 울퉁불퉁한 면을 그라인더로 먼저 갈아 매끈하게 한 뒤 측정하였으며, 측정후 각도보정을 실시하였다.

2.2 초음파속도의 측정

코아채취후 코아채취 주위에서 3회 실시한뒤, 평균값을 취하였다. 이때 철근이 초음파속도 전달선상에 놓이게 되면 측정값에 오차를 가져오므로 철근이 없는 지점에서 실시하였다[8].

2.3 코아 채취에 의한 압축강도

코아채취는 철근위치탐지기로 먼저 철근의 위치를 찾아내어 철근이 없는 부위에서 실시하였다. 코아의 직경은 10cm로 하였으며, 채취된 코아는 KS F 2422 (콘크리트에서 절취한 코아 및 보의 강도시험방법) 및 KS F 2403 (시험실에서 콘크리트의 압축 및 휨강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법)에 따라 케핑한 뒤, KS F 2405 (콘크리트의 압축강도시험방법)에 따라 만능시험기를 이용하여 압축강도를 측정하였다. 공시체의 높이가 직경의 2배보다 작은 경우에는 표 3의 보정계수에 의한 강도보정을 하였다.

표 3. 코아압축강도의 보정계수

높이/지름의 비	보정계수
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.89

3. 측정결과 및 분석

각 구조물별 측정결과는 표 4와 같고, 슈미트 햄머의 반발경도를 이용한 추정압축강도, 초음파속도에 의한 추정압축강도와 코아에 의한 실측압축강도와의 관계는 그림 6, 7 및 8과 같다.

표 4. 현장 구조물에 대한 적용결과

(단위: kg/cm²)

현장	재령(일)	σ_s^*	σ_v^*	σ_c^*	σ_m^*
A	36	155.0	-	-	163.4
	36	157.6	-	-	165.4
	182	202.6	181.6	192.0	172.3
B	44	135.3	144.9	138.1	148.0
	45	205.0	-	-	200.5
	45	191.8	-	-	205.5
	45	176.0	-	-	163.0
	59	205.0	199.6	198.6	186.2
C	135	211.6	-	-	213.1
	53	182.6	191.5	182.9	184.2
	53	185.2	172.4	175.0	183.2
	53	195.8	180.4	184.1	207.8
	62	176.0	133.7	152.5	174.6
	62	164.2	161.0	160.0	162.7
	62	240.5	180.3	207.1	185.4
D	90	169.9	147.5	160.0	145.9
	90	164.8	134.4	150.9	137.4
	63	199.7	194.8	194.4	137.1
	92	221.5	245.6	235.0	224.9
E	92	207.3	-	-	214.2
	113	249.8	261.4	257.1	277.1
	113	237.0	263.1	251.5	261.9
	35	208.9	185.1	202.6	247.3
E	60	256.3	-	-	283.2
	70	227.7	-	-	230.9
	137	238.4	-	-	222.9

* σ_s : 슈미트햄머반발경도에 의한 추정강도

σ_v : 초음파속도에 의한 추정강도

σ_c : 조합법에 의한 추정강도

σ_m : 코아시편의 실측압축강도

* 비파괴시험 측정에 의한 추정압축강도는 본 연구의 재령보정계수를 곱한 값이다.

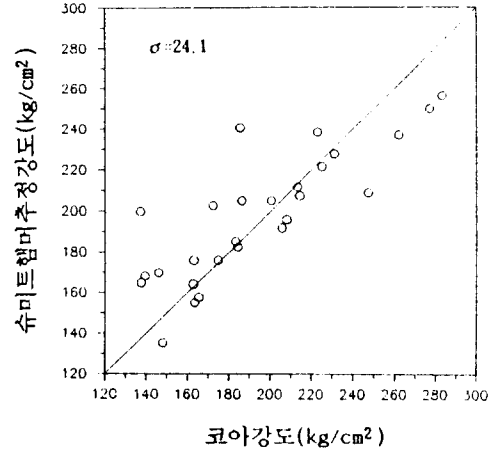


그림 6 코아강도와 슈미트햄머추정강도의 관계

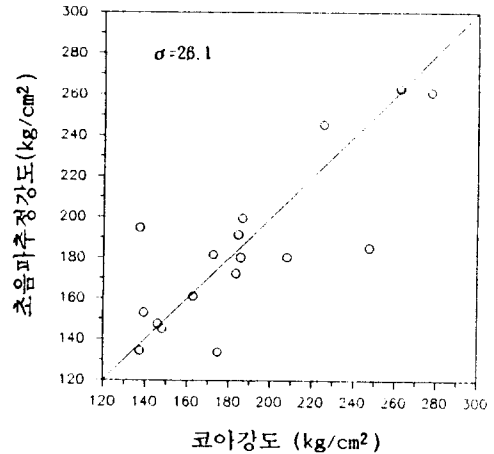


그림 7 코아강도와 초음파추정강도의 관계

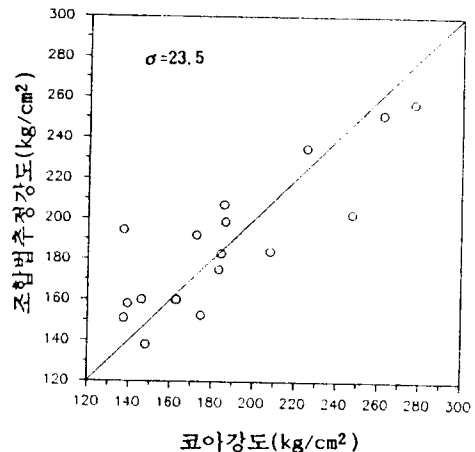


그림 8 코아강도와 조합법 추정강도의 관계

그림 6, 7 및 8에서 볼 수 있는 바와 같이 실내실험을 통하여 도출된 강도추정식 (2), (3) 및 (4)를 현장적용한 결과, 그 적용성 및 타당성을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구의 범위내에서 산정된 각 방법의 표준편차를 비교한 결과 슈미트햄머법에 의한 경우가 24.1, 초음파속도법에 의한 경우가 26.1 그리고 조합법의 경우가 23.5로서, 두 방법에 비하여 다소 개선된 결과를 주는 것을 알 수 있다.

III. 결 론

이상의 실내시험결과와 그 현장적용을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구의 실내시험을 통하여 슈미트햄머법, 초음파속도법 및 조합법에 의한 강도추정식을 산정하였으며, 이를 현장 구조물의 측정결과와 비교하여 적용성 및 타당성을 확인하였다.

2) 재령이 슈미트햄머의 반발경도 및 초음파속도에 미치는 영향을 고려할 수 있는 재령보정계수를 도출하여, 재령에 따른 합리적인 강도추정이 가능하도록 하였다.

3) 슈미트햄머에 의해 측정된 반발경도는 압축구속력에 따라 많은 변화가 발생할 수 있으므로 적절한 구속력을 준 뒤 측정해야 하는데, 본 시험에 의하면 30kg/cm² 이상의 압축구속력하에서는 반발경도의 변화가 크지 않은 것으로 구명되었다.

4) 비파괴시험법의 현장적용시, 정확한 압축강도에측을 위해서는 코아의 실측 압축강도시험을 국부적으로 실시하여 비파괴강도추정식을 검증할 필요성이 있다.

5) 비파괴 강도추정식의 정도를 높이기 위해서는 현장콘크리트 배합과 동일한 품질에 대하여, 비파괴시험에 미치는 영향인자에 대한 실내시험이 선행된 뒤 행해져야 한다.

참 고 문 헌

1. Davis, A.G., "Use of Nondestructive Testing in Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings," *ACI Spring Convention*,

1992.

2. 尼崎省二, "콘크리트의非破壞試驗方法 - 콘크리트強度, 彈性係數," *콘크리트工學*, Vol.27, No.3., 1989, pp.31-36.

3. Bungey, J.H., *The Testing of Concrete in Structures*, Surrey University Press, 1982, pp.31-36.

4. Malhotra, V. M., "Nondestructive Methods for Testing Concrete," *Mines Branch Monograph No.875*, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1968, P.66.

5. 明石外世樹, "콘크리트의非破壞試驗方法의概要," *콘크리트의非破壞試驗法*, 技報堂, 1980, pp.22-23.

6. 侯野, "經年콘크리트의슈ミットハンマにする推定強度とコア強度との關係," 第5回 콘크리트工學年次講演會論文集, 1983, pp.93-96.

7. Tanigawa, Y., Baba, K. and Mori, H., "Estimation of Concrete Strength by Combined Nondestructive Testing Method," *In-situ/Non-destructive Testing of concrete*, ACI, 1984, pp.57-76.

8. Malhotra, V. M., "Testing Hardened Concrete," *Monograph No.9*, ACI, 1976, P.188.