

## 콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발도법과 초음파속도법의 최소시험횟수에 관한 연구

이문환<sup>1)\*</sup> · 채창우<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 건축연구부

(2004년 7월 10일 원고접수, 2004년 11월 30일 심사완료)

### A Study on the Minimum Number of Rebound Number Test and Pulse Velocity Method for Estimating Compressive Strength of Concrete

Mun-Hwan Lee<sup>1)\*</sup> and Chang-Woo Choi<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Building Research Division, KICT, 2311, Daehwa-dong, Ilsan-gu, Koyang, 411-712, Korea

(Received July 10, 2004, Accepted November 30, 2004)

#### ABSTRACT

Among non-destructive tests for compressive strength, rebound number test and pulse velocity test are the most widely used methods. However, the non-destructive tests mostly used in Korea was developed by foreign country. Therefore, it is unreasonable to directly apply them to concrete structures in Korea. In accordance with the suggestion of Institute of Architecture in Japan for rebound number test, a compressive strength is calculated by the mean value of 20 hit points without being considered standard deviation. Furthermore, there is no regulation on the number of measurements required for measuring compressive strength by pulse velocity test.

This study, therefore, reviewed the rebound number test and pulse velocity test by chi-square, and suggested the minimum number of each test. As a result, the minimum number that falls within range of reliability for rebound number test and pulse velocity test are 11 and 7, respectively.

If abnormal values are processed as missing and test groups are assumed to be arrayed in cross by considering changes in quality of actual concrete structures, 20 times and 9 times are appropriate for rebound number test and pulse velocity test, respectively.

**Keywords :** non-destructive test concrete, compressive strength, rebound number, pulse velocity, reliability

#### 1. 서 론

콘크리트 구조물의 시공관리와 기존 콘크리트 구조물의 내력관정을 위하여 구조물의 콘크리트 강도를 확인할 필요가 종종 발생한다. 특히, 기존 콘크리트 구조물의 경우, 사전에 제작해 둔 강도 시험용 콘크리트 공시체를 확보하지 못하고 있는 경우가 대부분이므로 구조체로부터 직접 채취한 콘크리트 코어 공시체를 이용하여 강도시험을 행하는 것이 일반적이다. 그러나 코어 채취가 가능한 부위는 슬래브나 벽 등 구조체의 극히 일부에 한정되고 또 채취개수에 한계가 있어, 비파괴 검사를 통해 압축강도를 추정하는 방법이 고려될 수 있으며, 실제로도 많이 이용되고 있다.

콘크리트 압축강도의 비파괴 검사법에 관한 연구는

1930년경부터 시작되어 지금까지 연구가 활발하게 이루어져 왔으며, 특히, 반발도 시험(슈미트 해머 시험)이나 초음파 속도 시험은 이미 많은 나라에서 이용되고 있으며 규격화되어 있다.

그러나 현재 국내에는 대부분 외국에서 개발된 시험방법을 적용함으로써 우리나라 콘크리트 구조물에 직접 적용하기에는 무리가 따른다고 할 수 있다. 특히, 반발도 시험의 경우, 표준편차를 고려하지 않은 채, 측정값에 대한 평균값만으로 콘크리트의 압축강도를 산정하고 있어 신뢰도에 대한 검증이 필요하다. 또한, 초음파 속도 시험에 대해서는 국내는 물론이고 외국에서도 시험의 적정횟수에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 카이검증을 이용하여 국내 여건에 맞는 콘크리트 구조물의 압축강도 추정을 위한 대표적 시험방법의 신뢰도를 검토하고 최소시험횟수를 제안하였다.

\* Corresponding author

Tel : 031-910-0366 Fax : 031-910-0713

E-mail : mhlee@kict.re.kr

## 2. 비파괴 검사법의 콘크리트 압축강도 추정 현황

### 2.1 반발도 시험

반발도 시험은 슈미트 해머(schmidt hammer) 등으로 콘크리트 면을 타격시 이에 따른 반발력과 콘크리트 압축강도 사이에 상관관계가 있다는 실험적 입증에 근거하고 있다. 슈미트 해머는 1948년 스위스의 E. Schmidt에 의해 고안된 것으로 스프링의 복귀력을 이용하여 콘크리트 표면에 충격을 주어 반발도를 측정하고, 이를 통해 경화 콘크리트의 압축강도를 추정하는 것이다.

따라서 반발도 시험법은 그 측정방법, 적용가능한 강도 범위, 판정식 및 판정의 평가방법에 대한 고려가 강도를 판정하는 과정에서 필요하다. 반발도는 탄성계수와 비례관계에 있고, 강도는 탄성계수와 관계가 있으므로 이에 의해 반발도와 압축강도의 관계식을 이용하여 압축강도를 추정할 수 있다. 압축강도의 추정은 반발도를 타격방향에 따라 보정한 기준 반발도와 압축강도의 상관관계식을 이용하여 압축강도를 추정한다. 다음의 식들은 현재 국내의 안전진단 전문기관에서 통상적으로 적용하는 반발도를 이용한 압축강도 추정식이다.

- ① 일본재료학회에서 발표한 강도 추정식
 
$$F_c = 13R_o - 184 (kgf/cm^2) \quad (1)$$
- ② 동경건축재료검사소에 의한 강도 추정식
 
$$F_c = 10R_o - 110 (kgf/cm^2) \quad (2)$$
- ③ 일본건축학회 공동결과에 의한 강도 추정식
 
$$F_c = 7.3R_o + 100 (kgf/cm^2) \quad (3)$$
- ④ U. S. Army 시험소식
 
$$F_c = -120.6 + 8.0R_o + 0.0932R_o^2 (kgf/cm^2) \quad (4)$$
- ⑤ 木村의 제안식
 
$$F_c = 9.37 \times (0.987)^t R_o + (1.3t - 109) (kgf/cm^2) \quad (5)$$

여기서,  $F_c$ : 콘크리트 압축강도( $kgf/cm^2$ )  
 $R_o$ : 타격방향에 따른 보정된 반발도  
 $t$ : 재령(년)

### 2.2 초음파 속도 시험

초음파를 이용한 비파괴 검사법은 압전소자 등을 이용한 발진자, 수신자를 콘크리트에 대고 발진자로부터 발진된 초음파를 수신자로 수신하는 파동을 근간으로 콘크리트의 강도, 균열심도, 내부결합 등을 탐사하는 것이다.

콘크리트의 압축강도는 취성재료(특히 콘크리트)의 시험에 가장 적합한 50~60kHz의 펄스(pulse)를 사용하여 대상물의 한쪽 면에 접촉된 발진자로부터 발진된 초음파가 콘크리트를 투과하여 반대편에 접촉된 수신자에 도달하는 시간 및 양단 자간의 거리를 측정하여 추정할 수 있다. 기존 연구자들에 의해 초음파 속도법으로 콘크리트 강도를 추정하기 위하여 제안된 강도 추정식들을 정리하면 다음과 같다.

- ① 일본건축학회식
 
$$F_c = 215V_p - 620 \quad (6)$$
- ② 일본재료학회식
 
$$F_c = 102V_p - 117 \quad (7)$$
- ③ J. Pysziak의 제안식
 
$$F_c = 92.5V_p^2 - 508V_p + 782 \quad (8)$$
- ④ 谷川의 제안식
 
$$F_c = 172.5V_p - 499.6 \quad (9)$$

여기서,  $F_c$ : 콘크리트 압축강도( $kgf/cm^2$ )  
 $V_p$ : 초음파 속도( $km/sec$ )

## 3. 최소시험횟수 산정을 위한 실험

### 3.1 실험개요

비파괴 검사법의 강도추정에 대한 신뢰도를 확보할 수 있는 최소시험횟수의 산정을 위해, 본 연구에서는 동일한 배합의 콘크리트 실험체를 강도시험용과 비파괴 검사용으로 구분 제작하여 재현성을 확보함은 물론, 대상 검사법의 지표 항목에 대하여 다수의 실증 데이터를 구할 수 있도록 하였다.

### 3.1 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 KS L 5201 규정에 적합한 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 굵은골재는 최대 치수 25mm의 쇄석골재를 잔골재는 비중이 2.4인 세척해사를 사용하였다. 철근은 D13mm의 이형철근으로 콘크리트 타설 직전에 녹, 불순물, 기름 성분, 산화철 피막 등이 제거되도록 철근 표면을 진동식 와이어 브러쉬 및 No. 1000 샌드페이퍼로 연마한 후, 아세톤으로 깨끗이 닦아 사용하였다.

### 3.2 콘크리트의 배합

실험에 사용된 콘크리트의 배합조건은 건축 구조물에 일반적으로 이용되는 설계기준강도 21MPa를 채택하였으

며, 실험의 실용성을 고려하여 D사의 현장플랜트 생산(레디믹스트) 콘크리트를 사용하여 제작하였다.

콘크리트의 목표 슬럼프는 18cm이며, 목표 공기량은 45%로 하였다. Table 1은 실험에 사용한 콘크리트의 배합비이다.

### 3.3 실험방법

#### 3.3.1 반발도 시험

스프링 작동시 테스트 해머를 사용하여 굳은 콘크리트의 반발도값을 구하는데 있어, 측정값의 신뢰도를 얻기 위해서는 실험 부재에 대해 10~20회의 측정값을 취하고 있다. ASTM C805에서는 시험영역으로부터 10개의 타격값을 구하여 그 평균값으로부터 편차가 큰 값을 버리고 7개 이상의 잔류값에 대한 평균을 시험결과로 채택하도록 되어 있다. 다만, 국내 안전진단 실태조사 결과, 대부분의 안전진단 전문기관에서는 일본건축학회 등의 제안에 따라 20개의 타격점을 표준으로 채택하고 있으며, 표준편차에 대한 개념을 두고 있지 않은 실정이다. 이는 20점의 타격값에 대한 평균을 취하는 경우 거의 만족할 만한 강도추정이 가능하다는데서 비롯된 것으로 추측된다.

본 실험에서는 원주형 공시체 및 코어 채취 시편의 강도를 기지의 값으로 하고, 타격횟수에 대한 빈도분포로부터 강도추정치의 신뢰도를 검증하며, 아울러 평균 타격값에 대한 이상치의 취급수준을 결정하는데 목적을 두었다.

Fig. 1은 반발도 측정을 위해 사용한 시험체의 형상을 나타낸 것이다. 그림의 우측 단부에서 20cm 떨어진 위치의 3곳에서 코어를 채취하였고, 타격점은 상호간 간격을 10cm로 하여 직교되는 곳으로 하였다.

#### 3.3.2 초음파 속도 시험

현실적으로 초음파를 이용한 압축강도 추정은 그 신뢰성이 문제가 되어 독자적으로 강도추정을 위해서 사용되는 경우가 매우 적다. 그러나 다른 비파괴 실험에 비해서 원리에 대한 인식이 뚜렷하면 강도추정이 정확해질 수 있는 방법이기도 하다. 초음파 속도법 역시 최소시험횟수의 산출을 위해서는 시험값이 정규분포에 따르고 있는지를 우선적으로 검토해보아야 하므로, 반발도법과 동일한 방식으로 측정군의 카이검증을 수행하였다.

한편, 실구조물에서는 대부분 많은 양의 철근이 배근되어 있으므로, 철근의 간섭으로 인한 펄스 속도가 크게되어 그에 따라 콘크리트 강도에 대한 재현성이 저하된다. 그러

므로 철근의 간섭을 전제로 한 시험이 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 초음파 속도 시험시 철근의 간섭이 무시될 수 없는 수준인 경우를 설정하고, 보정절차 등을 인용하여 철근에 의한 시험값의 변동정도와 실제로 가장 많이 이용되는 보정방법의 적합성을 검증하고자 하였다.

Fig. 2는 초음파와 속도 측정을 위한 시험체의 형상을 나타낸 것으로 실제 구조물과 같이 격자배근을 하여 철근의 간섭에 의한 영향을 검토하였다.

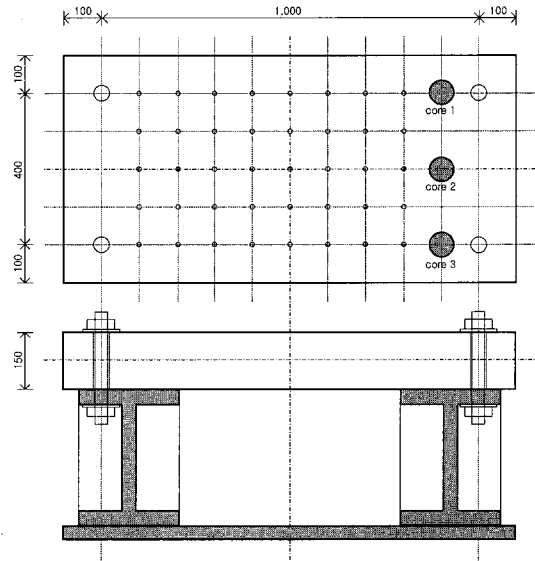


Fig. 1 Description of specimen for rebound number test

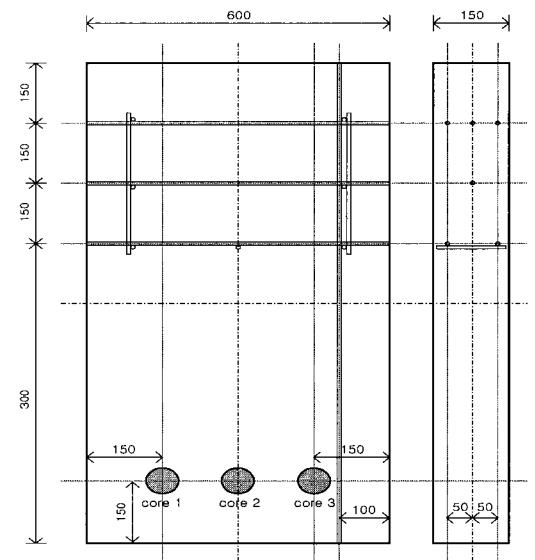


Fig. 2 Description of specimen for pulse velocity test

Table 1 Mixing proportions of concrete

$f_{ck}$ (MPa)	W/C (%)	s/a (%)	Slump (cm)	Volume mixing ( $l/m^3$ )				Weight mixing ( $kg/m^3$ )			
				Cement	Water	Sand	Gravel	Cement	Water	Sand	Gravel
21	53	45.4	15	102	170	313	376	321	170	792	985

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 콘크리트 실험체의 품질수준

- 1) 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 : 17.2 cm(목표 18 cm)
- 2) 굳지 않은 콘크리트의 공기량 : 4.0%(목표 4.5%)
- 3) 콘크리트의 28일 압축강도(설계기준강도 21 MPa)
  - 원주형 표준공시체 : 23.9 MPa
  - 실험체에서 채취한 코어 공시체 : 23.1 MPa

### 4.2 반발도 시험

#### 4.2.1 타격횟수의 신뢰도와 최소시험횟수의 결정

Fig. 3은 본 연구에서 행한 반발도 시험결과와 분포도와 변동성을 나타낸 것이다. 대부분의 반발도 시험값들은 평균값 부근에 집중적으로 분포하고 있으며, 카이검증 결과는 측정군의  $\chi^2$ 값이 자유도 15에서 유의수준 5%의  $\chi^2$  값 24.996보다 적은 값으로 나타나 반발도 시험의 측정치가 정규분포를 따른다고 가정할 수 있다.

반발도 시험값의 측정치가 정규분포  $N(\mu, \sigma^2)$ 에 따르는 경우,  $n$ 회의 측정에 의해 구한 비파괴 검사값에서 모평균의 최소불편추정량  $\mu_n = \bar{X}_n (= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i)$ 의 오차를 95%의 신뢰수준에서 2 이하가 되기 위한 최소필요측정횟수의 추정치  $m$ 은 다음의 식에 의하여  $m = \sigma_n^2$ 이 된다.

$$2 \cdot \frac{\sigma_n}{\sqrt{m}} = 2 \left( \sigma_n = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2}}{\frac{\sqrt{\frac{2}{(n-1)} \cdot \Gamma(\frac{n}{2})}}{\Gamma(\frac{n-1}{2})}} \right) \quad (10)$$

여기서,  $n$ 은 표본수(측정횟수),  $\mu$ 는 측정값의 모평균,  $\sigma^2$ 은 측정값의 모분산(측정값의 오차),  $X_i$ 는 측정값이며,  $\sigma_n^2$ 은  $n$ 개의 측정치에서 추정된  $\sigma^2$ 의 최소분산불편추정량이다.

상기 조건에 의해 각 측정횟수  $n$  ( $n=5, 6, 7, 8, 9, \dots$ )에 대해 추정측정횟수  $m$ 의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 이 경우,  $m=n$ 이 되는 교점(교점이 중복되는 경우에는 큰 값을 취함)에서의  $m$ 값이 최적의 최소측정횟수가 된다.

콘크리트의 강도평가에 있어서는 평균강도의 개념보다는 어느 정도의 요구되는 강도 특히, 설계강도 이하로 떨어지는 데이터의 수(시험횟수)가 얼마나 되느냐가 중요한 판정기준이 된다. 그러나 낮은 강도가 나타날 확률은 품질 관리가 아무리 잘 되었다 하더라도 언제든지 나타날 수 있기 때문에 최소강도의 개념으로 판정하는 것은 실용적이지 못하다. 따라서 평균강도에 근접하기 위한 경제적이고 신뢰적인 시험횟수의 설정이 중요하다.

실험결과에서와 같이 시험횟수를 증가시킬수록 측정값의 분산은 적어지며, 신뢰수준이 향상되게 된다. Fig. 4의 분석결과에서는 11회의 최소측정값이 산출되어 ASTM C805에서 규정하는 10회의 시험값 이상이 요구되는 것으로 분석되었다.

다만, 이상치에 대해서는 결측처리하도록 명기되어 있으나, 이는 현실적으로 주관적인 요인이 많이 개입되게 된다. 한편 Table 2는 구조물의 각 부위에 대하여 조사한 테스트 해머에 의한 강도 추정치의 신뢰도와 타격횟수와 의 관계를 나타낸 것이다. 이를 통해 각 측정부위에 각 20점의 타격횟수가 만족할 만한 강도추정의 값을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 현재의 국내 안전진단 실정을 감안해도 일본의 JCI 시안 등을 따라 20회의 시험빈도를 따르는 경우가 일반적이므로 일정수준의 표준편차에서 벗어나는 값을 버리도록 규정하면, 평균강도의 재현이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

### 4.3 초음파 속도 시험

초음파 속도법은 반발도 시험법에 비하여 그 변동폭이 적었다. 그 결과로 압축강도로 환산하였을 경우에도 가장 적은 편차를 나타내며, 평균값 부근에서 집중적으로 분포되고 있었다.

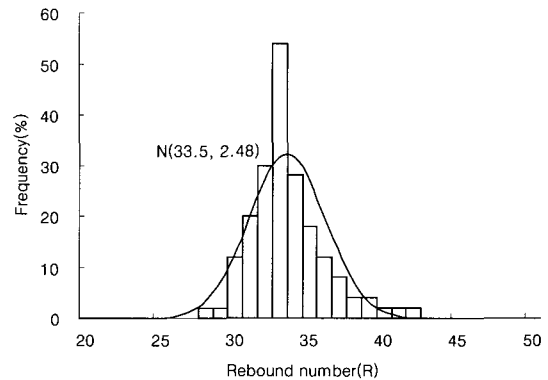


Fig. 3 Distribution curve in rebound number test

Table 2 Reliability of estimation of strength and hit times<sup>7)</sup>

Number of reading	5	10	15	20	
Rectangular column	A	25 %	95 %	99 %	-
	B	17 %	83 %	84 %	99 %
	C	20 %	40 %	60 %	99 %
	D	20 %	60 %	80 %	99 %
Circular column	A	1 %	33 %	-	-
	B	33 %	34 %	67 %	99 %
	C	1 %	33 %	99 %	-
	D	1 %	2 %	33 %	99 %

\* Symbol A, B, C, D indicates heights divided into 4 parts  
A : main (column) upper part, B : main upper intermediate part, C : main lower intermediate part, D : main lower part

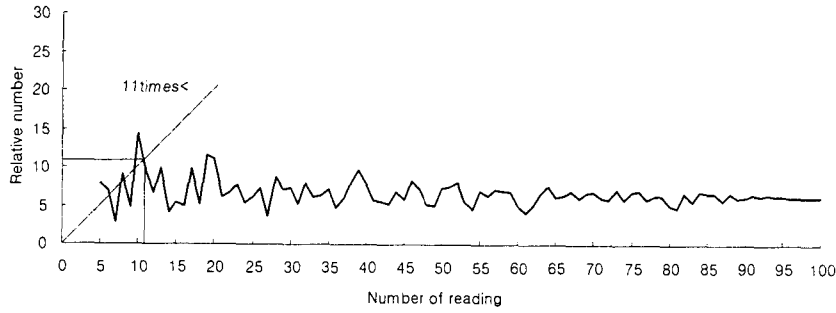


Fig. 4 Relative number of readings necessary for rebound number test

카이검증 결과, 관측군과 정규분포값간에는 자유도 8에서 유의수준 5%의  $\chi^2$ 값 15.507보다 적은 값으로 나타나 초음파 속도 측정치가 정규분포를 따른다고 분석할 수 있다. 초음파 속도 시험값의 측정치가 정규분포  $N(\mu, \sigma^2)$ 에 따르는 경우, 최소분산불편추정량을 이용하여 최소필요측정횟수를 추정할 수 있다. 이 경우 반발도법과는 달리 시험횟수가 20회로 비교적 적은 수이기 때문에 Table 2와 같은 방법으로 측정순서를 다양하게 변화시키고 각각의 최소필요측정횟수를 구하여 그 값의 평균을 취하였다.

Fig. 7은 초음파 속도법의 최소필요 측정 횟수를 분석한 것이다. 분석결과, 최소필요측정횟수의 평균값은 7회 정도로 산출되었다. 현재까지 초음파 속도 결과치를 이용하여 압축강도를 추정하는데 필요한 측정횟수의 규정은 없는 실정이다. 국내 안전진단 실태의 동향을 조사해 보아도 초음파 속도만을 이용하여 압축강도를 구한 사례는 극히 드물다.

ASTM C597 역시 압축강도 추정을 위한 규격이기보다는 국내의 KS F 2418(콘크리트 중의 펄스 속도 시험 방법)에 상응하는 규격에 가까우며, 비파괴 검사시의 시험횟수에 대한 언급이 없다. 한편, Bungey는 그의 저서에서 초음파 속도법의 시험횟수를 1회로 제한하였지만<sup>10)</sup>, 이는 해당 시험방법을 비교시험 목적으로 이용하는 경우이며, 시험의 신속성이 저해되기 때문에 결정된 값이지 콘크리트의 강도추정을 위한 적정횟수라 할 수 없다.

따라서 현재까지의 연구성과를 토대로 살펴볼 때, 7회 이상의 초음파 속도 시험이 압축강도 추정을 위해 필요하다고 판단된다. 다만, 실구조물의 품질변동을 고려하여 이상치의 결측처리와 시험군의 격자배열을 전제로 한다면 9회 정도로 시험횟수를 정하는 것이 바람직할 것이다.

한편, 파 경로와 직각으로 철근이 배근되어 실측된 초음파 속도가 철근의 간섭을 받는 경우, BS 1881 : Part 203의 제안방법에 따라 보정하는 것과 시험기기 매뉴얼에서 제시하는 방식에 따라 보정하는 검증결과를 Table 3에 나타내었다. 분석결과는 BS에서 제시하는 방식이 상대적으로 신뢰도가 높음을 알 수 있었다. 측정기기 메이커가 제시하는 방식은 콘크리트의 품질수준에 대한 정확한 지표가 없으며,  $L_s/L$ 가 작은 경우에 적용할 수 있는 방법이

어서 철근수가 2, 3인 경우는 보정계수의 산출이 불가하였다. 이상의 실험결과에서와 같이 초음파 속도는 철근의 간섭에 의한 영향이 크며, 그 영향 정도는 BS에서 제시하는 보정계수 산출방식을 적용하는 것이 타당한 것으로 검토되었다.

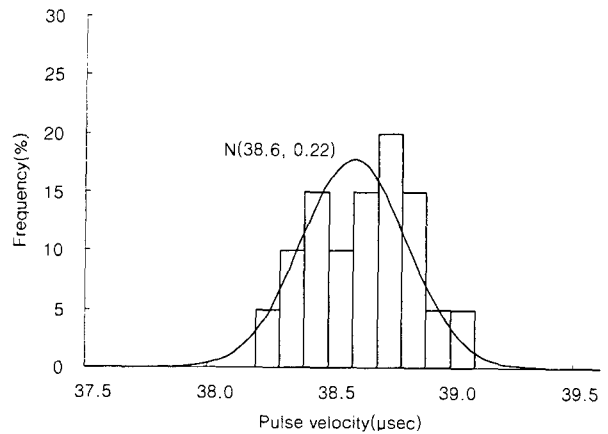


Fig. 5 Distribution curve in pulse velocity test

1) Patten 1	2) Patten 1	3) Patten 3																																																												
<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr> <tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr> <tr><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td></tr> <tr><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td></tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>8</td><td>7</td><td>6</td><td>5</td></tr> <tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr> <tr><td>16</td><td>15</td><td>14</td><td>13</td></tr> <tr><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td></tr> </table>	1	2	3	4	8	7	6	5	9	10	11	12	16	15	14	13	17	18	19	20	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>6</td><td>11</td><td>16</td></tr> <tr><td>2</td><td>7</td><td>12</td><td>17</td></tr> <tr><td>3</td><td>8</td><td>13</td><td>18</td></tr> <tr><td>4</td><td>9</td><td>14</td><td>19</td></tr> <tr><td>5</td><td>10</td><td>15</td><td>20</td></tr> </table>	1	6	11	16	2	7	12	17	3	8	13	18	4	9	14	19	5	10	15	20
1	2	3	4																																																											
5	6	7	8																																																											
9	10	11	12																																																											
13	14	15	16																																																											
17	18	19	20																																																											
1	2	3	4																																																											
8	7	6	5																																																											
9	10	11	12																																																											
16	15	14	13																																																											
17	18	19	20																																																											
1	6	11	16																																																											
2	7	12	17																																																											
3	8	13	18																																																											
4	9	14	19																																																											
5	10	15	20																																																											
4) Patten 4	5) Patten 5	6) Patten 6																																																												
<table border="1"> <tr><td>1</td><td>10</td><td>11</td><td>20</td></tr> <tr><td>2</td><td>9</td><td>12</td><td>19</td></tr> <tr><td>3</td><td>8</td><td>13</td><td>18</td></tr> <tr><td>4</td><td>7</td><td>14</td><td>17</td></tr> <tr><td>5</td><td>6</td><td>15</td><td>16</td></tr> </table>	1	10	11	20	2	9	12	19	3	8	13	18	4	7	14	17	5	6	15	16	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>5</td></tr> <tr><td>13</td><td>20</td><td>17</td><td>6</td></tr> <tr><td>12</td><td>19</td><td>18</td><td>7</td></tr> <tr><td>11</td><td>10</td><td>9</td><td>8</td></tr> </table>	1	2	3	4	14	15	16	5	13	20	17	6	12	19	18	7	11	10	9	8	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>6</td><td>7</td><td>2</td></tr> <tr><td>5</td><td>14</td><td>15</td><td>8</td></tr> <tr><td>13</td><td>19</td><td>20</td><td>16</td></tr> <tr><td>12</td><td>18</td><td>17</td><td>9</td></tr> <tr><td>4</td><td>11</td><td>10</td><td>3</td></tr> </table>	1	6	7	2	5	14	15	8	13	19	20	16	12	18	17	9	4	11	10	3
1	10	11	20																																																											
2	9	12	19																																																											
3	8	13	18																																																											
4	7	14	17																																																											
5	6	15	16																																																											
1	2	3	4																																																											
14	15	16	5																																																											
13	20	17	6																																																											
12	19	18	7																																																											
11	10	9	8																																																											
1	6	7	2																																																											
5	14	15	8																																																											
13	19	20	16																																																											
12	18	17	9																																																											
4	11	10	3																																																											

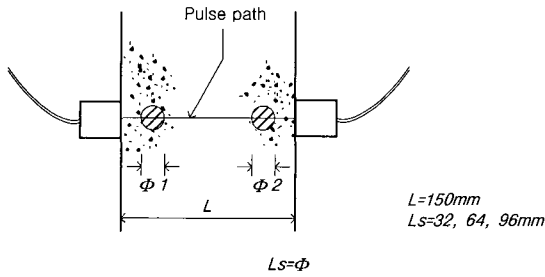
$$n = 5 \rightarrow \frac{20}{5} \quad 4/8/12/16/20$$

$$n = 6 \rightarrow \frac{20}{6} \quad 3/7/10/13/17/20$$

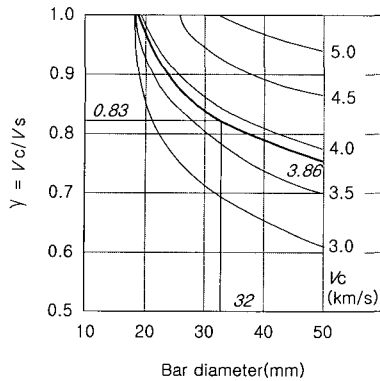
$$n = 7 \rightarrow \frac{20}{7} \quad 3/6/9/11/14/17/20$$

$$n = 8 \rightarrow \frac{20}{8} \quad 3/5/8/10/13/15/18/20$$

Fig. 6 Test patterns of pulse velocity test



a) Cross section of concrete with longitudinal reinforcement



b) Relation of bar diameter to velocity ratio

Fig. 8 Influence of steel reinforcement on pulse velocity : bars at right angles to path (BS 1881 : Part 203)

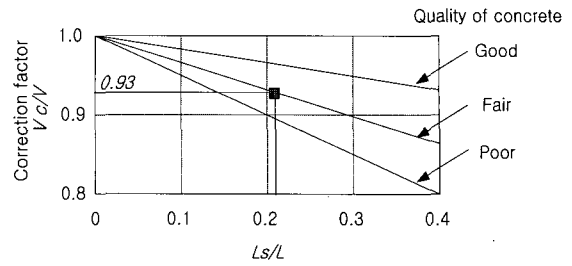


Fig. 9 Influence of steel reinforcement on pulse velocity : bars at right angles to path (given by PUNDIT manual)

### 5. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 압축강도 추정을 위한 비파괴 검사법 중 현재까지 다수의 연구가 수행되고, 외국 일부에서 이미 규격화되어 있는 반발도 시험, 초음파 속도 시험의 측정값에 대하여 그 신뢰도를 검토하고 적정시험횟수를 제안하였다. 각 비파괴 검사 항목에 대한 실험결과를 토대로 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구의 검증수단으로 채택한 최소분산불편추정 방법에 의해 실구조물의 최소필요 측정횟수를 사전에 조사함으로써 구조물의 품질변동수준을 파악하는데도 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

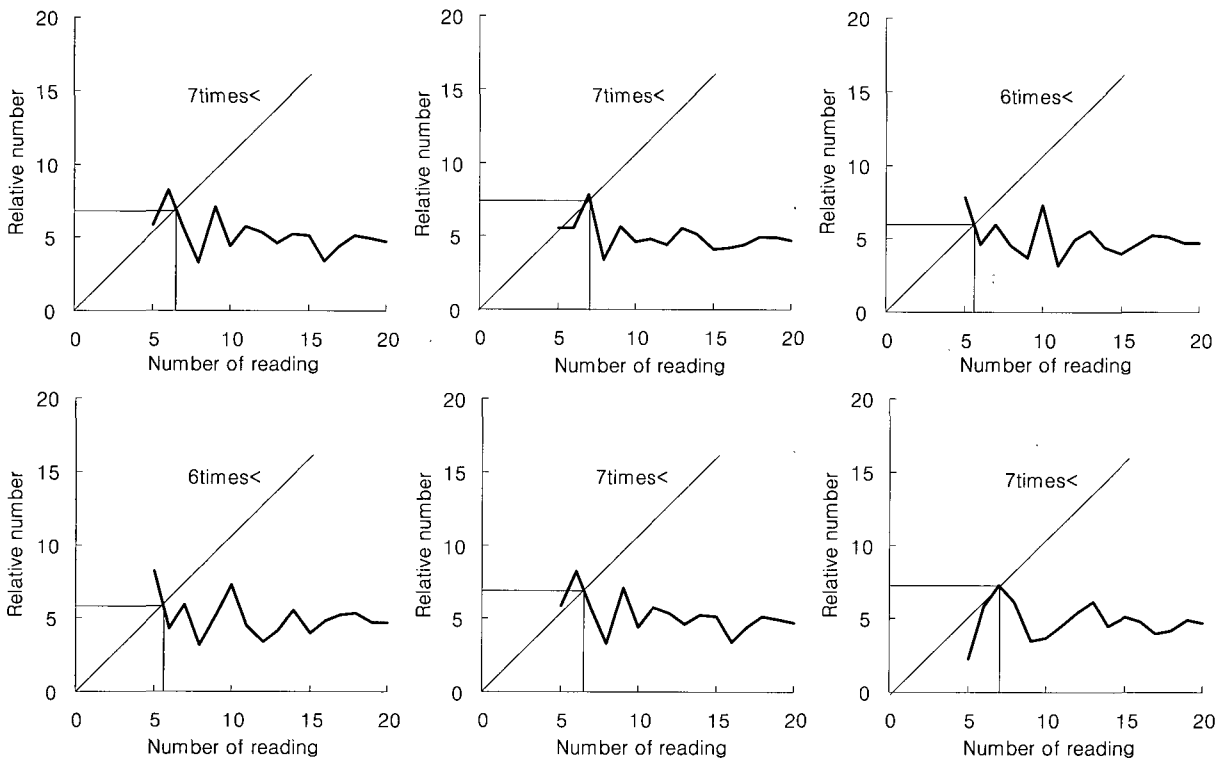


Fig. 7 Relative number of readings necessary for pulse velocity test

**Table 3** Effect of reinforcing bars according to axis of reinforcing bar perpendicular to direction of propagation

Number of steel reinforcement	Correction factor $k^{**}$		$V_c/k^{***}$		Measured apparent pulse velocity ( $V_m$ )	Deviation	
	A*	B*	A	B		A	B
1	0.96	0.93	4.02	4.15	3.94	-0.08	-0.21
2	0.93	not detect	4.15	-	4.05	-0.10	-
3	0.89	not detect	4.34	-	4.25	-0.09	-

\* A : BS 1881 part 203 method, B : PUNDIT manual method

\*\* where,  $k = 1 - \frac{L_s}{L} (1 - \gamma)$ ,  $L$  : length of thee direction path between transducers  
 $L_s$  : length of bar(bar diameter : 32mm)

$\gamma$  : pulse velocity in the concrete/pulse velocity in the steel bar(given by Fig. 8)

\*\*\* True pulse velocity in concrete  $V_c = 3.86$  km/s

- 2) 콘크리트의 압축강도를 반발도법에 의해 검사하는 경우, 시험대상 부위에서 테스트 해머의 타격회수는 11회 이상이 되어야 평균강도의 재현이 가능한 것으로 나타나 ASTM C865의 규정횟수 10회를 따르는 것은 무리가 있음을 알 수 있었다. 따라서 국내에서 통상적으로 적용되는 20회의 샘플링 수준으로 반발도 시험횟수를 확대하고, 표준편차를 벗어나는 값은 버리도록 처리하는 것이 바람직하다고 생각된다.
- 3) 초음파 속도법은 시험대상 부위에서 7회 이상의 시험값을 확보하는 것이 압축강도 추정을 위해 필요하며, 이상치의 결측처리와 시험군의 격자배열을 전제로 한다면 9회 정도로 시험횟수를 규정하는 것이 바람직하다고 판단된다.
- 4) 초음파 속도 시험을 불가피하게 철근이 배근된 부근에서 수행할 경우, 파 경로 부근에 위치한 철근의 영향을 보정해야 하는데, 본 연구에서의 검증결과 BS 1881 : Part 203 방식에 의해 보정계수를 산출하는 것이 유효한 방법임을 확인하였다.

### 참고문헌

1. 안형준, "콘크리트 구조물의 안전진단", 구미서관, 1999.
2. 표준과학연구원, "콘크리트 구조물의 비파괴시험법 개발(최종보고서)", 표준과학연구원, 1998.
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조물의 비파괴검사 및 안전진단", 한국콘크리트학회, 1993.
4. 한천구, "콘크리트강도의 조기추정에 관한 연구", 충남대학교 대학원 박사학위논문, 1989.
5. RILEM, NDT 1, "Testing of concrete by the ultrasonic pulse method," 1972.
6. RILEM, NDT 3, "Recommendations for testing concrete by hardness methods," 1984.
7. BSI, Part 201, "Guide to the use of non-destructive methods of test for hardened concrete," 1986.
8. ASTM C597, "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete", 1991.
9. ASTM C805, "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete", 1985.
10. J. H. Bungey, "The Testing of concrete in structures", Surrey University Press, 1989.
11. (社)日本非破壊検査協會編, "콘크리트構造물의非破壊試驗法", 養賢堂, 1994.
12. 小林一輔 他, "콘크리트構造물의耐久性診斷シリーズ 5 ; 콘크리트構造물의非破壊検査", 森北出版株式會社, 1996.
13. 笠井芳夫 他, "콘크리트의試驗方法 下", 技術書院, 1994.
14. 日本建築學會, "建築物の調査・劣化診断・修繕の考え方(案)・同解説", 日本建築學會, 1993.
15. 日本建築學會, "建築材料實驗用教材", 日本建築學會, 1986.
16. (社)日本콘크리트工學協會, "콘크리트의非破壊検査法 研究委員報告書", (社)日本콘크리트工學協會, 1992.
17. 日本非破壊検査協會編, "콘크리트構造물의非破壊検査法", 養賢堂, 1994.
18. 建設省 土木研究所, "콘크리트構造물의健全度診斷技術の開發に關する共同研究報告書", 建設省 土木研究所, 1994.
19. 岸谷考一 他, "耐久性シリーズ ; 凍害", 技報堂, 1986.
20. 和泉意登志 他, "耐久性シリーズ ; 中性化", 技報堂, 1986.
21. 日本建築學會, "建築學便覽 II, 構造-材料, 丸善", 日本建築學會, 1977.
22. 横山 滋 他, "硬化콘크리트中セメント量推定方法", 콘크리트工學年次論文報告書 14, 1992.

---

## 요 약

비파괴 검사에 의한 콘크리트 압축강도 시험법 중에서 반발도법과 초음파 속도법은 가장 널리 사용되는 방법이다. 그러나 국내에서 사용되고 있는 비파괴 강도 시험법은 대부분이 외국의 시험법을 적용하고 있어서 국내의 콘크리트 구조물에 직접 적용하는 데는 무리가 따른다고 할 수 있다. 반발도법의 경우, 일본건축학회 등의 제안에 따라 20개의 타격점을 표준으로 채택하고 있으나 표준편차에 대한 고려를 하지 않고 있는 실정이다. 또한, 초음파 속도법에 의한 시험은 압축강도를 추정하는데 필요한 측정횟수의 규정이 없다. 따라서 본 연구에서는 카이검증을 이용하여 비파괴 검사법에 의한 콘크리트 압축강도의 타격횟수의 신뢰도를 검토하고 최소시험 횟수를 제안하였다. 그 결과, 반발도법과 초음파 속도법으로 추정한 콘크리트 압축강도 값이 만족할 만한 신뢰범위에 들기 위한 최소시험 횟수는 각각 11회와 7회로 분석되었다. 다만, 실구조물의 품질변동을 고려하여 이상치의 결측처리와 시험군의 격자 배열을 전제로 한다면, 반발도법은 국내의 관행에 따라 20회로, 초음파 속도법은 9회로 규정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

**핵심용어** : 비파괴 검사, 콘크리트 압축강도, 반발도법, 초음파속도법, 신뢰도

---