

# 적산온도에 의한 콘크리트 압축강도 추정모델의 적용성 검토

Application on the Prediction Model of the Compressive Strength of Concrete by Maturity Method

길배수\*      권영진\*\*      남재현\*\*\*      김무한\*\*\*\*  
Khil, Bae-Su      Kwon, Young-Jin      Nam, Jae-Hyun      Kim, Moo-Han

## Abstract

The major object of this study is to investigate experimentally the experimental equation by the non-destructive testing methods of ultrasonic pulse velocity, rebound number, combined method of ultrasonic pulse velocity and rebound number, maturity which are applicable to the evaluation of compressive strength of concrete at early ages. Also test result of mix are statistically analyzed to infer the correlation coefficient between the maturity and the compressive strength of concrete. The results show good application of Logistic curve for estimating strength development under various curing temperature. The relation between ultrasonic pulse velocity, rebound number, combined method of ultrasonic pulse velocity and rebound number and compressive strength of concrete have low correlation coefficient, but maturity method show good correlation coefficient.

**Key words** : non-destructive testing method, maturity method

## 1. 서 론

비파괴시험은 콘크리트 공시체 및 구조체를 파괴하지 않고 이용하는 시험방법으로 콘크리트의 품질관리 및 구조체의 내력검사 등을 목적으로 주로 이용되어지고 있다. 특히 콘크리트는 타설 후 초기재령에 있어서 그 특성의 변화가 급격하

기 때문에, 초기재령에 있어서 강도를 비롯한 제반 역학적 특성을 평가하기 위해서 비파괴시험은 필요하다. 또한 거푸집 탈형시기를 결정하기 위한 강도추정에도 비파괴시험은 유용하다.

이러한 비파괴시험방법에는 다양한 방법이 존재하지만 그 중 반발도법, 초음파속도법, 복합법은 실험실 및 현장에서 쉽게 이용 될 수 있는 판

\* 정회원, 대전대학교 건축공학과 박사과정

\*\* 정회원, 쌍용엔지니어링, 건설부분 안전기술부장, 공박

\*\*\* 정회원, 대전대학교 건축공학과 교수, 공박

\*\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공박

● 본 논문에 대한 토의를 1999년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

게로 여러 연구자들에 의해 많은 연구·보고가 이루어지고 있다.<sup>1)</sup> 또한 적산온도방법도 콘크리트의 강도추정 및 강도관리를 목적으로 현장에 적용하려는 시도가 다양하게 이루어지고 있다.<sup>2)</sup> 따라서 본 연구에서는 콘크리트 초기재령의 강도추정 및 품질관리를 위해 반발도법, 초음파속도법, 복합법을 이용한 여러 가지 강도예측 제안식을 비교·평가하고, 또한 이것을 적산온도 방법을 이용한 기존의 4가지 압축강도 예측모델을 비교·평가하여 그 중 콘크리트의 압축강도 예측율이 가장 높은 Logistic curve에 의해 강도를 추정함으로써 콘크리트의 초기강도 예측을 위한 가장 합리적인 강도관리 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 실험방법

### 2.1 실험계획

본 실험에 사용된 실험계획 및 콘크리트 배합은 다음 Table 1과 같다.

### 2.2 사용재료

본 실험에 사용된 재료 및 그 특성은 Table 2, 3과 같다.

## 2.3 실험방법

공시체는 KS F 2403의 규정에 따라 반발도용 공시체  $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 와  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 실린더형 강제물드를 사용하여 재령별로 3개씩 제작하고, 각 양생온도별 소정의 재령까지 항온양생조에서 양생하였다. 또한 압축강도시험은 KS F 2405의 규정에 따라 200ton 규모의 만능재료시험기(U.T.M)를 사용하여 최대하중을 측정 후 압축강도를 산정하고 그 평균값을 구하였다.

### 2.3.1 적산온도법

적산온도법은 주로 타설콘크리트의 강도발현성을 조사하기 위하여 이용되는 방법으로 시멘트의 수화반응이 적산온도에 따라서 구해지는 것을 원리로 동일 적산온도에서는 동일한 강도를 갖는다는 이론이다. 즉 콘크리트의 온도변화를 관찰할 수 있다면 온도와 재령의 함수인 적산온도를 이용해 압축강도를 추정할 수 있다는 것이다.

1) 온도와 시간에 대한 함수

$$M = \sum(\theta + A)\Delta t$$

여기에서, M: 적산온도( $^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ ),  
 $\theta$ : 일평균기온,  $\Delta t$ : 시간,  
 A: 정수로서  $10^{\circ}\text{C}$

Table 1. 실험계획 및 콘크리트 배합

물시멘트비 (%)	슬럼프 (cm)	양생 온도 (°C)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	절대용적 (ℓ/m <sup>3</sup> )			경화 콘크리트	
					C	S	G	측정항목	측정재령
60	18	30 20 10 5	43.5	201	107	297	385	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 적산온도</li> <li>· 압축강도</li> <li>· 초음파속도</li> <li>· 반발도</li> </ul>	

Table 2. 시멘트의 물리적 성질

종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	안정성	응결 (h-m)		압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
				초결	종결	3일	7일	28일
1종보통	3.15	3,240	양호	5-0	7-20	194	261	323

Table 3. 골재의 물리적 성질

종류	최대입경 (mm)	비중	조립율 (FM)	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위용량 (kg/ℓ)
잔골재	2.5	2.60	2.87	1.01	67.3	1,504
굵은골재	20	2.62	8.10	1.50	63.0	1,623

## 2) Logistic curve 도입<sup>3)</sup>

시멘트의 수화반응을 1차 단분자 촉진반응으로 가정한 반응속도식은 다음 식(1)과 같고 이것을 해석하여 Logistic curve의 기본식으로 나타내면 식(2)로 나타낼 수 있다. 또한 시간  $t$ 를 적산온도  $M$  ( $^{\circ}D \cdot D$ )의 대수로서 이 때의 압축강도를  $F_c$  ( $\text{kgf/cm}^2$ ), 종국최대 강도  $F_{\infty}$  ( $\text{kgf/cm}^2$ )로 한 강도증진곡선으로써 식(3)이 구해졌다.

$$dx/dt = k(x-a)x \quad (1)$$

$$x = \frac{a}{1 + \exp(-kt + m)} \quad (2)$$

$$F_c = \frac{F_{\infty}}{1 + \exp(-k \times \log M + m)} \quad (3)$$

여기에서,  $a$  : 총 반응량

$x$  : 시간  $t$ 에 따른 반응량

$k$  : 반응속도 정수

$m$  : 적분상수

Logistic curve는 통계학에서는 경향이 있는 계열변동을 나타내는 S자형 성장곡선으로 Fig 1에서와 같이 하한강도  $F_c=0$  ( $M=-\infty$ )와 상한강도  $F_c$  ( $M=+\infty$ )를 가지는 변곡점( $m/k, F_{\infty}/2$ )이 곡선에 나타난다. 이것은 鎌田에 의해 제시된 것이다.

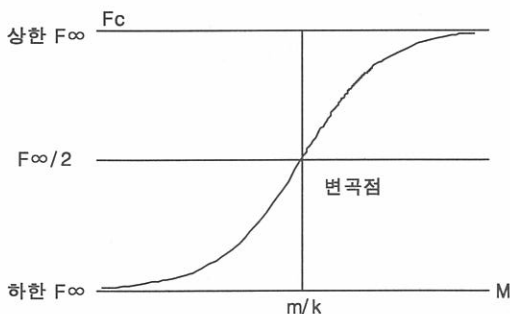


Fig. 1 로지스틱 곡선

## 2.3.2 초음파속도법

음속측정장치는 일본 Marui제를 사용하여 50KHz의 단자를 고정시킨 상태에서 계기의 수신호가 안정된 상태로 될 때 유효숫자를 읽어 그것을 전파시간( $\mu$  sec)으로 하였으며 측정시에는 측정대상 공시체면에 그리이스를 발라서 단자와 공시체면 사이에 공극이 생기지 않도록 하여, 각 재령별 3개의 원형물드를 길이 방향으로 측정하여 평균치로 하였고 전파속도의 환산은 다음 식으로 구하였다.

$$Vp = L/t$$

여기서  $Vp$  : 전파속도( $\text{km/sec}$ )

$L$  : 측정간 거리 ( $\text{km}$ )

$t$  : 전파시간( $\text{sec}$ )

## 2.3.3 반발도법

반발도는 N형 슈미트햄머를 사용하여 공시체에 3cm간격으로 표시한 다음 압축강도시험기에  $\sigma = 30\text{kg/cm}^2$ 로 고정하고 타격각도  $0^{\circ}$ 인 수평 타격으로 27회 측정 후 그 평균값으로 반발도를 구하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 실험결과

본 연구의 실험 결과표는 다음 Table 4와 같다.

### 3.2 반발도시험법에 의한 강도 예측

Table 4의 반발도시험 결과를 아래에 제시된 4가지 압축강도예측 제안식을 이용하여 추정된 결과를 Fig 2에 도시하였다. 그 결과 건축학회매뉴얼 및 일본건축학회 제안식(AIJ)은 실측강도 보다 높게 압축강도를 추정하고 있고, 일본재료학회 및 동경도건축재료검사소 제안식은 실측강도보다 낮게 압축강도를 추정하고 있어 안전측에 속하는 것으로 나타났다.

Table 4. 경화콘크리트의 압축강도 및 각 비파괴시험결과

W/C	양생 온도 (°C)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )								초음파속도(km/sec)						반발도(RN)					
		1d.	2d.	3d.	7d.	14d.	28d.	60d.	90d.	1d.	2d.	3d.	7d.	14d.	28d.	60d.	7d.	14d.	28d.	60d.	90d.
60	30	53	115	142	197	218	257	-	-	3.39	3.44	3.51	3.74	3.69	3.82	-	25	26	28	-	-
	20	33	-	129	188	210	238	240	-	3.09	-	3.18	3.76	3.64	3.77	3.84	27	31	33	34	-
	10	-	53	85	148	210	236	286	-	3.04	3.32	3.53	3.82	3.74	3.91	23	31	31	35	-	
	5	-	-	93	123	148	182	195	225	-	-	3.41	3.14	3.55	3.72	3.68	22	24	26	27	29

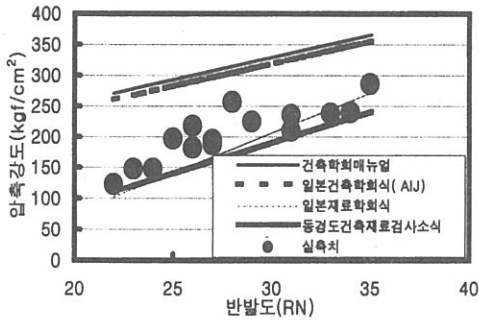


Fig. 2 반발도에 의한 압축강도 추정

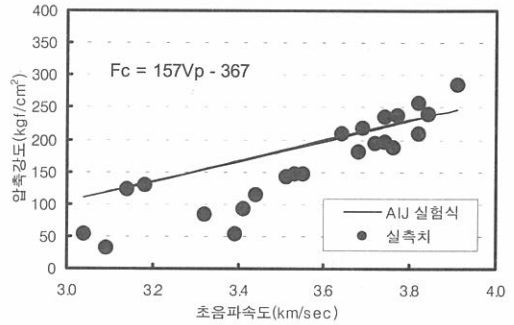


Fig. 3 초음파속도에 의한 압축강도 추정

본 실험결과 반발도에 의한 4가지 제안식중 동경도건축재료검사소식이 비교적 양호한 것으로 나타났다. 그러나 추정도는 4가지 제안식 모두 낮아 식을 적용하기 위해선 여러 가지 개선 방향에 대해서 고려해야 할 것으로 판단된다.

- 일본재료학회식  $F_c = 13R_o - 184$
- 일본건축학회식(AIJ)  $F_c = 7.3R_o + 100$
- 동경도건축재료검사소식  $F_c = 10R_o - 110$
- 건축학회매뉴얼  $F_c = 7.3R_o + 110$

여기에서,  $F_c$  : 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>),

$$R_o = R + \Delta R$$

$R_o$  : 기준경도

$R$  : 측정경도

$\Delta R$  : 보정값

### 3.3 초음파속도법에 의한 강도 예측

Table 4의 초음파속도시험 결과를 아래에 제

시된 일본건축학회 재료·시공 위원회「コンクリートの非破壊試験法研究小委員会」(AIJ)의 제안식<sup>4)</sup>을 이용하여 추정한 결과를 Fig 3에 도시하였다. 그 결과 결정계수값이 0.4765로 추정도가 상당히 낮게 나타나 초음파속도 단독으로 콘크리트의 압축강도를 추정하는 것은 어려운 것으로 판단된다.

$$F_c = 157V_p - 367$$

여기에서,  $F_c$  : 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>),

$V_p$  : 초음파속도값

### 3.4 복합법에 의한 강도 예측

Fig 4는 루마니아 및 RILEM등에서 표준으로 제정되어 이용되고 있는 반발경도와 초음파의 복합법에 의한 압축강도 추정을 일본건축학회 재료·시공 위원회「コンクリートの非破壊試験法研究小委員会」(AIJ)의 제안식 및 이를 수정제안

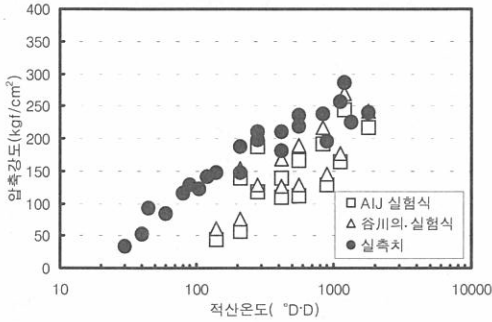


Fig. 4 복합법에 의한 압축강도 추정

한 谷川<sup>5)</sup>의 식을 이용하여 추정된 결과를 도시한 것이다. 그 결과 실측강도보다 낮게 압축강도를 추정하고 있어 안전측에 속하는 것으로 나타났으나 강도추정율은 낮게 나타나고 있고 특히 초기 재령에서의 추정도는 더 낮게 나타나고 있어 수정·보안해야 할 것으로 판단된다.

일본건축학회 재료·시공 위원회식(AIJ)

$$F_c = 8.2R_o + 269V_p - 1.094$$

谷川の 식

$$F_c = 10.2(kR_o) + 223V_p - 960$$

여기에서,  $R_o$  : 반발도

$V_p$  : 초음파속도값

$K$  : 재령에 의한 보정계수

재령 13주 이내,  $K=1.0$

재령 13~26주,  $K=1.0\sim 0.9$  사이  
직선보간

재령 26주 이상,  $K=0.9$

### 3.5 적산온도법에 의한 강도 예측

Table 4의 적산온도에 따른 압축강도 실측치를 4가지 강도 예측모델로 Table 5 및 Fig. 5(a), (b)에서 비교해 본 결과 Plowman curve<sup>6)</sup>는 다른 모델에 비해 비교적 모델이 간편하나 결정계수 값이 0.9404로 나타나 다른 예측식에 비해 추정도가 떨어지는 것으로 나타나 기존의 연구보고에서 보고한 “적산온도가 증가할수록 압

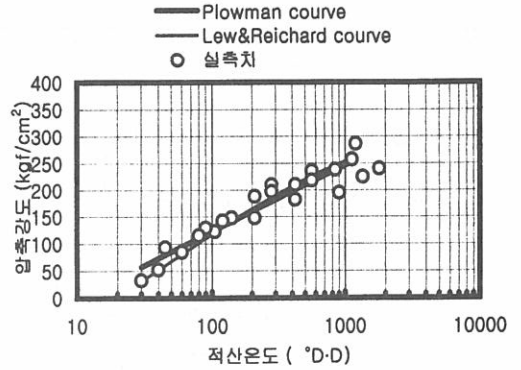


Fig. 5(a) 적산온도에 의한 압축강도 추정

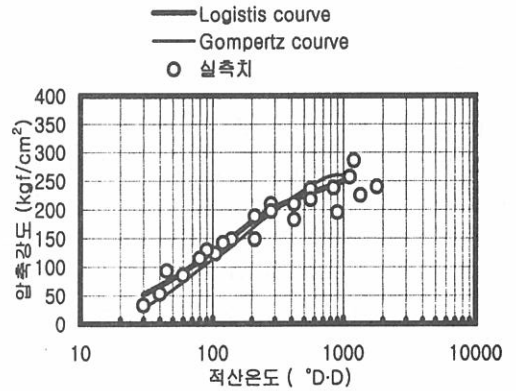


Fig. 5(b) 적산온도에 의한 압축강도 추정

축강도가 계속 증가하는 형태의 모델이기 때문에 적용가능한 적산온도범위를 정해야한다”는 보고와 비슷한 경향을 나타냈다. 또한 Lew & Reichard curve<sup>7)</sup>는 쌍곡선 형태의 모델로 결정계수 값이 0.9509로 높게 나타났다. S자를 그리는 성장곡선인 Logistic, Gompertz curve<sup>8)</sup>는 콘크리트의 압축강도 발현특성을 잘 나타내주면서 결정계수 값이 높게 나타나고 있어 콘크리트의 압축강도를 예측하는데 Plowman, Lew & Reichard curve에 비해 더 유효할것으로 판단된다. 본 실험 결과 4가지 강도 예측모델중 Logistic curve가 Table 5에서 처럼 결정계수 값이 다른 모델에 비해 가장 높나 적용성이 가장 양호한 것으로 나타났고, 특히 초기재령시 그 추정도는 상당히 높은 것으로 나타났다.

Table 5. 각 모델식에 의한 계수도출결과 및 결정계수

적용식	모델식	상수	
Plowman curve	$S = a + b \log(M)$	$a : -298.63$ $b : 152.88$ $R : 0.9404$	
Lew & Reichard curve	$S = \frac{k}{1 + D[\log(M - 16.7)]^b}$	$k : 3638.4$ $D : 323.39$ $b : -1.67$ $R : 0.9509$	
鎌田	Logistic curve	$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-K \log M + m)}$	$F_\infty : 977.86$ $k : 0.7524$ $m : 3.9152$ $R : 0.9767$
	Gompertz curve	$F_c = F_\infty \cdot (\exp(-a(1/M)^b))$	$F_\infty : 1232.3$ $a : 7.7502$ $b : 0.4097$ $R : 0.9565$

### 3.6 종합비교

Fig 6은 실측강도를 반발도 추정식(동경도건축재료검사소식), 초음파추정식(AIJ실험식), 복합법의한 추정식(일본건축학회 재료·시공 위원회식), 적산온도에 의한 추정식(Logistic curve)에 의한 강도추정결과를 도시한 것이다. 그 결과 반발도는 0.4525, 초음파속도는 0.4765, 복합법은 0.4105, 적산온도법은 0.9767로 결정계수값이 나타나 적산온도 방법에 의한 압축강도 추정식이 가장 높은 신뢰성을 보이고 있어 콘크리트의 초기강도 판리는 적산온도법에 의해 이루어지는 것이 합리적인 것으로 나타났다.

### 4. 결 론

반발도법, 초음파속도법, 복합법, 적산온도법에 의해 콘크리트의 압축강도를 추정해 본 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 반발도, 초음파속도법, 복합법에 의해 기존의 제안식으로 초기재령시 콘크리트의 압축강도를 추정해본 결과 추정도가 낮게 나타나 제안식을 적용하기 위해선 여러 가지 개선 방향에 대해서 고려해야 할 것으로 판단된다.

2) Logistic curve에 의해 적산온도방법으로 강도를 추정해본 결과 결정계수 값이 0.9767로

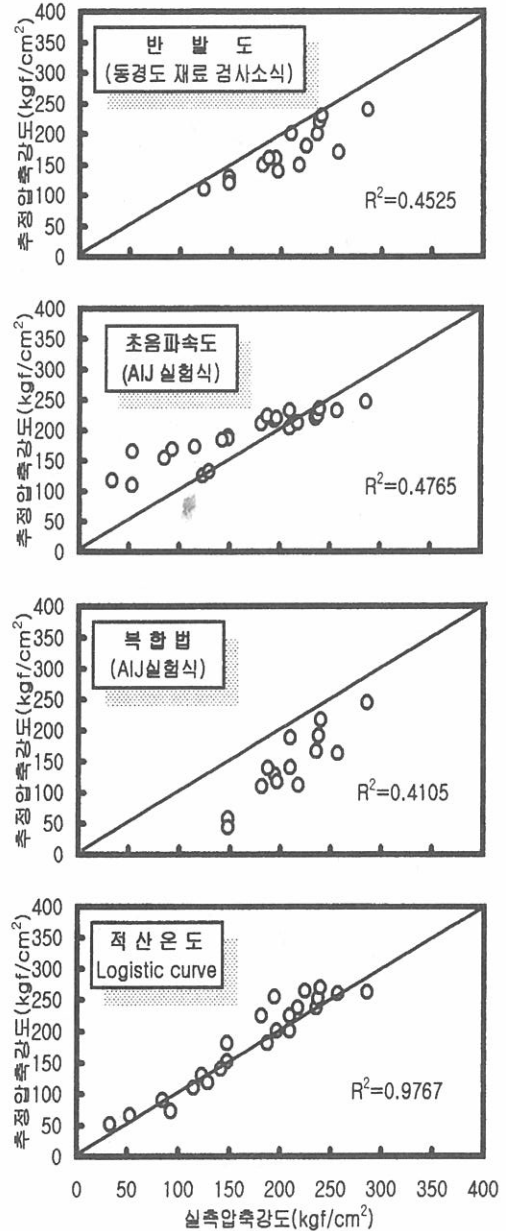


Fig. 6 각 추정식에 대한 종합비교

나타나 반발도법, 초음파속도법, 복합법에 비해 추정도가 높고 특히 초기재령시 그 추정도는 상당히 높게 나타났다.

3) 초기재령시 콘크리트의 강도추정은 반발도,

초음파속도법, 복합법에 의한 것보다 적산온도방법에 의해 이루어지는 것이 가장 합리적인 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 김무한 외, 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식에 관한 연구, 한국구조물진단학회, 제1권 1호, 1997. 6, pp 97~105
2. 남재현, 길배수, 적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 위한 예측모델의 적용성 검토, 대한건축학회논문집, 13권 7호, pp.197~207, 1997.
3. 洪外, ロジスティック曲線を応用したコンクリート強度推定式の提案, 日本建築學會構造系論文報告, 第367號, 昭和 61年, 9月, pp.1~6
4. 實大モデルによる超音波法および複合法の検討, 日本建築學會構造系論文報告(AIJ), No.428, 1991. 10, pp25~33
5. 韓國콘크리트學會 編 : 콘크리트構調物の 非破壞檢査 및 安全診斷, 1995
6. Plowman, J. M., "Maturity and the Strength of Concrete," Magazine of Concrete Research (London), Vol. 8, No.22, pp.13~22, 1956
7. Lew H. S., & Richard T. W., "Mechanical properties of Concrete at Early Ages," ACI Journal, Vol. 80, No. 10, pp.533~542, 1978.
8. 鎌田外, 高温域を含む 各種養生温度での コンクリートの 強度増進性狀, セメント・コンクリート論文集, No. 45, pp.370~375. 1991
9. 日本建築學會 : 寒中コンクリート施工指針・同解説, 1989
10. Verbeck G. J., & Helmuth R. A., "Structures and physical properties of cement paste", Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Tokyo, Part III, pp.1~32, 1968.
11. Klieger P., "Effect of mixing and curing temperature on concrete strength", ACI Journal, proceedings Vol. 47, June pp.1063~81, 1958

(접수일자 : 1999. 3. 10)