

콘크리트의 촉진강도 시험방법

Accelerated Strength Testing Method of Concrete



전찬기*

1. 강도 촉진법의 연구 개황

강도촉진법은 콘크리트 강도나 콘크리트 중의 모르타 강도를 양생초기에 촉진시켜서 촉진된 강도로 28일 강도를 추정하는 방법이다. 이 방법은 시멘트의 수화반응을 촉진시켜서 촉진강도로 판정하기 때문에 콘크리트의 강도특성을 직접 측정하는 것이 되어 측정의 신뢰도는 당연히 높으나 측정하는 데 어느 정도의 시간이 소요된다.

촉진강도에 의해 강도를 조기에 추정하는 방법은 1927년 M.S.Gerend에 의해서 시작되었다. 즉 미국 개척국이 후버댐 공사에서 48시간의 증기양생에 의해 28일 강도를 추정한 것이 이 방법의 효시이다.

그러나 그 뒤 1950년대까지 중요한 연구의 진행이나 보고가 없었으며 1960년대에 들어서 캐나다의 연구자들이 이 분야의 연구를 재개하였다. 1968년 이후 미국, 캐나다, 영국 등에서 규준화가 진행되었으

며, 일본의 지전상치(池田尙治)는 1.5시간의 초조기(超早期) 강도로 판정하는 방법을 제안하였다. 1974년에는 Thomson의 연구결과가 발표되어 ASTM규격에 영향을 미치기도 하였다.

국내에서는 1983년부터 신현목, 전찬기 등에 의해 토목학회에 발표되기 시작하였으며, 초기에는 3일 또는 7일 강도와 28일 강도의 상관관계에 머물렀으나, 신현목, 전찬기, 이수철, 서광만, 남인 등이 촉진양생법을 계속 발표하였고, 1988년에는 전찬기에 의해 [55℃ 온수법(溫水法)], [70℃ 열수법(熱水法)], [100℃ 비등수법(沸騰水法)]으로 실험한 결과가 발표되었다. 이 실험방법중 일부는 김재규, 권성우 등에 의해 1986년에 수자원공사(당시 산업기지개발공사)와 농어촌진흥공사(당시 농업진흥공사)에서 현장 적용이 실시되었다.

그 뒤 1993년에 김규춘 등에 의해, 1994년에 오병환, 변근주 등에 의해 레미콘 협회에서 실험이 수행

* 정회원, 시립인천전문대학 토목과 부교수

되었으며, 1995년에는 김수만, 유종희 등이 온수양생법을 발표하였다.

2. 기본 양생 cycle과 상관관계식의 설정

2.1 기본 양생 cycle

촉진 양생 실험의 경우 실험의 기본 cycle은 그림 1과 같이 보통 3단계로 구분된다. 첫 단계로 전치시간(前置時間, pre-curing time, initial curing time, moisture curing time)이 있다. 이는 촉진 양생에 앞서 급작스런 양생 온도의 충격을 줄이고 항온항습조에서 일정 정도까지 자연 양생 시간을 확보하거나 실험 cycle의 조정을 위한 시간이다. 실험 방법에 따라서는 전치시간이 없이 곧바로 촉진양생을 시도하는 경우도 있다.

두번째 단계로 촉진양생시간(促進養生時間, accelerated curing time)은 외부나 내부의 열이나 급결제 등으로 강도를 촉진시키는 시간이다. 이 경우는 온도 충격을 줄이기 위해서 상온에서부터 일정한 온도가 될 때까지 서서히 온도를 상승시키는 방법도 있고,

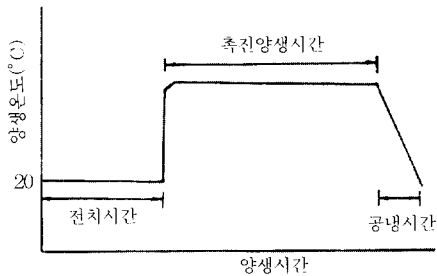


그림 1 기본 양생 cycle

일정한 양생온도로 곧바로 양생하는 경우도 있다.

세 번째로 후치시간(後置時間, post-curing time) 또는 공냉시간(空冷時間, cooling time)은 촉진 양생된 시험체 온도를 상온의 실험 상태로 될 때까지 양생온도를 내리거나 공기중에 방치 또는 특수양생장치에서 양생하는 시간이다. 이 경우도 온도 충격을 줄이기 위해 양생온도를 서서히 내리거나 항온항습조 등에서 보관하는 경우도 있고, 공기중이나 상온의 일반 수조에서 급랭시키는 경우도 있다.

2.2 상관 관계식의 설정

(1) 단회귀(單回歸)

두 변수들간의 관계를 나타내는 회귀식은 단회귀(單回歸, simple regression)와 중회귀(重回歸, multiple regression)가 있으며 단회귀의 경우 직선(直線)회귀와 비직선(非直線)회귀로 구분되며, 비직선회귀는 누승곡선(累乘曲線, power curve), 지수곡선(指數曲線, exponential curve), 대수곡선(對數曲線, logarithmic curve) 등 여러 가지 형태로 만들 수 있다.

(2) 중회귀(重回歸)

28일 강도를 촉진강도로 단회귀 시키기도 하지만 w/c, 단위수량, 골재의 성질 등과 연관시켜 중회귀를 할 수도 있다. 이 중에서 w/c비의 값은 콘크리트에 미치는 영향이 통상 큰 것으로 알려져 있으므로 w/c 비만을 추가하여 중회귀 시키는 경우를 예를 들어본

표 1 단회귀식의 형태 및 예시

	Eq. Type	Y = a + bx Type	Regression Eq.	Corr. Coe.	T-value
A	$Y = A + BX$		$Y = 22.7 + 1.625X$	0.9898	19.6416
B	$Y = \frac{B}{A + X}$	$\frac{1}{Y} = \frac{A}{B} + \frac{X}{B}$	$Y = \frac{-17731}{-212 - X}$	-0.9173	-6.5169
C	$Y = AB^X$	$\log_{10} Y = \log_{10} A + (\log_{10} B)X$	$Y = 69 \times 1.009^X$	0.9687	11.0451
D	$Y = A + B \log_{10} X$	$Y = A + B(\log_{10} X)$	$Y = -446 + 322 \log X$	0.9502	8.6228
E	$Y = AX^B$	$\log_{10} Y = \log_{10} A + B(\log_{10} X)$	$Y = 4.2444X^{0.33}$	0.9741	12.1862
F	$Y = \frac{X}{A + BX}$	$\frac{X}{Y} = A + BX$	$Y = \frac{X}{0.45 + 0.00008X}$	0.5689	1.9567
G	$Y = Ae^{kx}$	$\log_e Y = \log_e A + BX$	$Y = 69.0047e^{0.001X}$	0.9687	11.0451
H	$Y = A + \frac{B}{X}$	$Y = A + B(\frac{1}{X})$	$Y = 287 - \frac{8616}{X}$	-0.8357	-4.3046

다. 이때 w/c 대신에 c/w 를 대입하는 경우가 많은데 일반적으로 c/w 가 커짐에 따라 강도가 커지기 때문이며 $(c/w)^2$ 항을 추가하여 회귀시켜보면 약간의 2차 회귀 성향이 나타난다.

중회귀식을 예를 들어 나타내면 다음과 같다.

$$F_{28} = A + B \cdot Fa + C(c/w) + D(c/w)^2 \quad (1)$$

$$F_{28} = A + B \cdot Fa + C(c/w) + D(c/w)^2 \quad (2)$$

여기서 (c/w) : Cement-Water Ratio

$(c/w)^2$: Cement-Water Ratio의 제곱

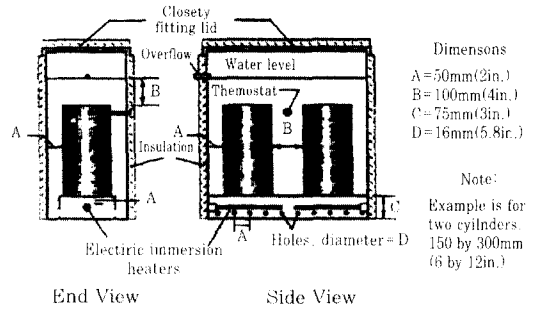


그림 2 항온수조 (ASTM C684-96, Procedure A,B)

3. 비등수법 (沸騰水法, Boiling Water Method)

3.1 원 리

이 방법은 100℃의 끓는 물에서 강도를 측정시키는 방법으로서 [자비법(煮沸法)] 또는 [끓는 물법]이라고도 한다. 콘크리트의 강도는 양생온도에 관계가 있고, 특히 양생 초기에는 양생 온도가 높을수록 시멘트 수화가 촉진되어 강도가 커지는 현상이 나타나기 때문에 강도를 측정시키는 가장 간단한 방법으로 많이 이용되고 있다.

[비등수법]은 다른 촉진양생법과 거의 마찬가지로 시험체가 응결과정을 거쳐 형태를 유지할 정도로 양생되기 전에 측정시키는 경우가 많기 때문에 [사진 1]과 같이 뚜껑이 달린 특수 모듈드에 콘크리트를 넣고 뚜껑으로 밀폐하여 모듈드 재료 양생수조에 넣는다. 이 모듈드는 시험체 제작후 즉시 양생이 가능하기 때문에 촉진 모듈드라고 부른다. 양생 수조는 그림 2와 같이 모듈드 재료 양생이 가능하도록 또 여러 개를 동시에 양생할 수 있도록 일정 규모 이상의 수조이어야 한다.

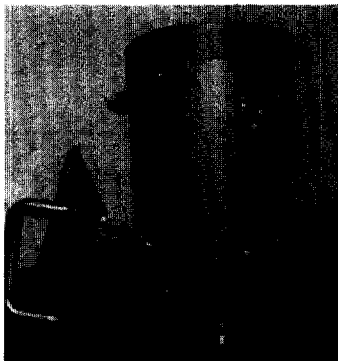


사진 1 촉진 모듈드

또한 열원(熱源, heat source)을 확보하기 위해 전기 Heater 장치를 하고, 열이 일정하게 전달될 수 있도록 시험체를 올려놓는 밀판에 일정한 규격과 간격으로 적절하게 구멍이 뚫려있어야 한다. 뚜껑은 온도 유지와 수분 증발을 방지하고 위험을 예방하기 위해 필요하다. 뚜껑 부위에는 온도 측정을 위한 구멍이 필요하고, 경우에 따라서는 시험체 내부 온도 측정을 위해서 열전대(熱電帶, thermocouple)가 유용하게 이용될 수 있다.

이 수조는 온도 제어 장치가 있고, 수조 내의 각 부분의 수온이 같은 온도가 될 수 있도록 물을 순환시켜주는 교반기(攪拌器)가 있어서 [온수법]이나 [열수법]의 수조로 동시에 사용할 수도 있다.

3.2 특 징

[비등수법]은 [온수법]이나 [열수법] 또는 [자체 수화열에 의한 방법]보다 같은 양생시간에 얻어지는 강도가 크다. 즉 같은 시간에 더 큰 강도를 얻을 수 있어 실험 cycle을 짧게 할 수 있는 장점이 있다.

그러나 양생 시간이 어느 정도 이상 길어지면 오히려 강도 증진 속도가 둔화되는 현상이 나타나기 때문에 사전 실험에 의해 적절한 양생시간을 정할 필요가 있다. 또한 양생온도와 강도증진의 효과에 대한 검증과 연구가 필요하다.

특히 고온에 의한 온도충격(temperature shock)이나 열팽창의 영향을 검토해야 하며, 이 경우 강도의 변동계수도 면밀하게 분석하여 신뢰성을 확보해야 한다. 이를 위해 촉진양생시간 뿐만 아니라 전치시간, 후치시간을 조정하거나 온도 상승이나 하강 속도 등도 검토해야 한다.

[비등수법]의 또다른 특징은 끓는 물이 100℃를

넘지 않으므로 열원(熱源)에 의해 끓는 물 상태를 유지시켜 주기만 하면 별도의 온도관리 즉 정온(定溫) 관리가 필요 없다. 따라서 정온 관리를 위한 장치가 불필요하고 온도관리가 쉽기 때문에 다른 실험에 비해 장비를 간단하게 제작할 수 있다. 그러나 끓는 물에 의해 화상을 입을 염려가 있기 때문에 취급에 주의해야 한다.

3.3 각국의 연구 결과

[비등수법]에 의한 콘크리트 강도의 조기 측정은 미국의 O.G. Patch에 의해서 1933년에 Hoover Dam 공사에 적용한 것이 최초의 기록이다. 물론 이 방법은 완전한 비등수법이 아닌 90℃의 물에 시험체를 침수시키면서 열원(熱源)을 끓는 상태로 7시간 양생을 하여 80℃ 정도의 상태에서 양생을 끝내는 방법이다.

그 뒤 폴란드의 B. Bukowski가 1936년에 [증기와 비등수에 의한 방법]을 발표하였고, 영국의 T. N. W. Akroyd가 1956년에 [5시간 비등수법]을 발표하였고, 1961년에는 초기온도를 60℃로 낮춘 [개량된 비등수법]과 [전치시간이 24시간인 비등수법]을 발표하였다.

1956년에는 오스트리아의 J. S. Cornwell이 [24시간 양생 cycle의 비등수법]을, 1963년에는 캐나다의 P. Smith가 역시 [24시간 양생 cycle의 비등수법]을, 그리고 1964년에는 캐나다의 V. M. Malhotra가 [24시간의 전치시간과 3시간의 촉진양생시간을 갖는 양생방법]을 발표하였다.

이러한 장기간의 연구와 실험을 바탕으로 세계 각국에서 국가규격 또는 단체규격을 제정하였으나 국제규격은 아직 제정되지 않고 있다. 그 중 1974년에는 Malhotra의 양생법(21℃에서 23.5hr 전치양생하고, 100℃로 3.5hr 촉진양생하는 방법)이 ASTM C684-74T와 CSA A23.2.26으로 표준화되었다.

그 뒤 ASTM은 몇 번의 수정보완을 거쳐 표 2와 같이 현재는 [온수법], [비등수법], [자기수화열법], [고온고압법] 등 4개의 방법이 ASTM C684-96으로 되어있고, CSA는 [비등수법]과 [자기수화열법]의 2가지 방법만 CSA A23.2-10C-1994로 되어있다. 그러나 CSA규준은 ASTM과 거의 같아 [비등수법]의 경우 전치시간이 23hr±15min, 촉진양생시간이 3.5hr±15min, 후치시간이 1hr으로 ASTM과

표 2 ASTM C-684-96의 촉진양생법

양생방법	사 용 모울드	강 도 촉진방법	촉 진 양생온도	촉진양생 시작시기	촉 진 양생시간	강 도 시험시기
Procedure A 온수법 (warm water meth.)	반복사용 또는 1회 용 모울드	수화열	35°C	공시체 제작후 즉시	28.5h ±30min	24hr ±15min
Procedure B 비등수법 (boiling water meth.)	반복사용 또는 1회 용 모울드	끓는 물	끓는 온도	제작후 23hr± 30min	3.5hr± 5min	23.5hr ±15min
Procedure C 자기수화열법 (autogenous meth.)	1회용 모울드	수화열	수화열로 증 진된 초기 콘 크리트 온도	제작후 즉시	48hr± 15min	49hr± 15min
Procedure D 고온 고압법 (high temp & press. meth.)	반복사용 모울드	외부열 및 압력	150°C	제작후 즉시	5hr± 30min	5.25hr ±5min

약간 다를 뿐 전체 양생시간은 28hr±15min으로 ASTM과 같다.

한편 ACI 214 위원회에서는 1975년에 촉진시험에 대한 연구 지원을 시작하였으며, 28일 강도에 의한 품질관리의 불합리성을 인식하고 새로운 방법을 모색하였다. 1976년에는 동위원회에서 촉진강도시험에 대한 국제 심포지엄을 개최하였다. 이 때 미국,

SANCHEZ TREJO AND FLORES-CASTRO

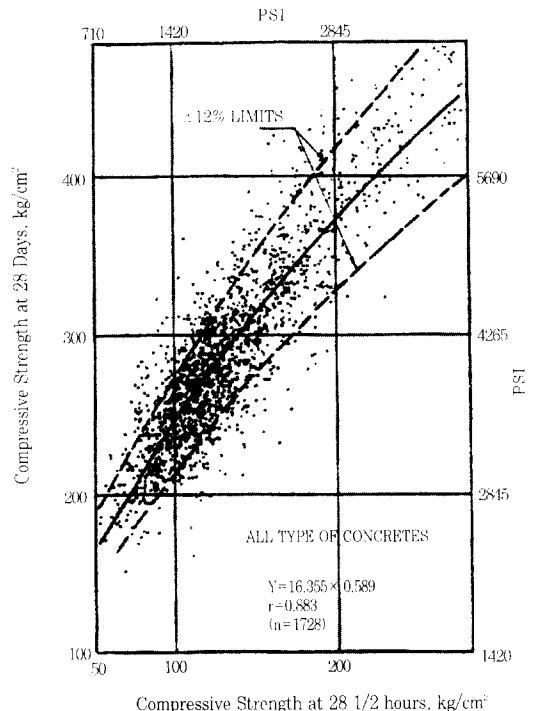


그림 3 촉진강도와 28일 강도의 상관관계 예

No.	연구자 國名 (年代)	0	5	10	15	20	25	30	材令(時間)
①	M.S.Gerend 美國 (1927)						(160)		飽和水蒸氣 6-7kg/cm ²
②	O.G.Patch 美國 Hoover Dam (1933)	90	沸騰水	80					* 浸水와 同時에 熱源을 隔는다.
③	B.Bukowski 폴란드 (1936)						蒸氣+沸騰水		
④	J.W.H.King 英國 (1955) (1957)	85	電氣爐						
⑤	T.N.W.Akroyd 英國 (1956)		沸騰水						* 最初의 水溫은 손을 넣을 수 있는 程度
⑥	J.S.Cornwell 오스트라리아 (1956)		沸騰水						
⑦	T.B.Nicol 오스트라리아 (1957)	75	溫水						
⑧	N.N.B.Ordman 英國 (1958)					85	電氣爐		
⑨	A.F.L.FALK CO. 이태리 (1958)		80			蒸氣			
⑩	坂村 昆木 日本 (1959)	(9)	水外線爐						
⑪	J.Vuorinen 핀란드 (1961)	80	電氣爐 또는 溫水						
⑫	T.N.W.Akroyd 英國 (1961)	(6)	沸騰水						
⑬	同上							沸騰水	
⑭	M.S.Thomson 英國 (1962)	35		溫水					
⑮	P.Smith 캐나다 (1963)					沸騰水			콘크리트가 어느 일정한 溫度에 도달하고 부터 20분 후에 양생 개시
⑯	V.M.Malhotra 캐나다 (1964)							沸騰水	
⑰	C.A.P.Boundy 오스트라리아 (1964)	88	蒸氣						압축試驗值 대신에 Test hammer로 測定
⑱	J.W.H.King 英國 BS 1881:3 (1970)			溫水					
⑲	Smitlf CSA, ASTM (1974)					차기수회열			46hr
⑳	Thomson ASTM C684-74 (1974)	35							23.5 ± 0.5hr 온수(축진물드시용)
㉑	Malhotra ASTM C684-74, CSA (1974)	21			23.5 ± 0.25hr		100	3.5hr	
㉒	신현목, 전찬기 한국 (1983)	20							100 분의 물
㉓	신현목, 전찬기 한국 (1983)	21							(9) 황윤형습조
㉔	신현목, 전찬기 한국 (1983)	21				50			온수 24hr
㉕	JCI-SE4 H 本 (1985)	21			18 ± 6hr	70			24 ± 1hr
㉖	JCI-SE14 H 本 (1985)	21	35						(축진물드시용)

그림 4 각국에서 발표된 조기판정방법(1985년 이전)

캐나다, 브라질, 벨기에, 인도, 멕시코 등에서 연구된 19편의 논문이 발표되었으며 그 결과가 [ACI SP-56]으로 간행되었다. 그 중 많은 논문이 비등수법에 의한 것이며, 대규모 공사 현장에서 품질관리 수단으로 수행된 연구 결과이다. 이 중에서 한 예로 멕시코시의 Deep Drainage System Project로 수행된 [비등수법]의 실험결과를 그림 3에 나타내었다.

이와 더불어 ACI 214위원회에서는 1981년과 1986년에 ASTM C684 규준의 3가지 시험법을 사용함에 있어서 실험방법의 개요를 설명하고, 몇 가지 예를 통해 실험결과의 해석을 위한 지표표를 제안하였다.

한편 1974년에는 일본 콘크리트공학 협회에서 [콘크리트 품질관리시험에 관한 심포지엄]을 개최한 바 있고, 일본 토목학회에서는 일찍부터 초기강도에 의하여 품질을 관리하도록 콘크리트 표준 시방서에 반영하고 있으며, [콘크리트의 품질관리 시험방법]을 간행한 바 있다. 또한 일본 건축학회에서는 1975년에 [콘크리트의 간이 시험방법에 관한 보고서(안)]을 간행하였다.

또한 일본에서는 1977년 JCI에서 [콘크리트 품질의 초기 판정에 관한 연구위원회]를 설치하였다. 또 일본의 JCI에서 [콘크리트 품질의 초기 판정을 위한 심포지엄]을 1979년과 1985년에 개최하여, 27편의 연구 논문과 JCI지침에 대한 토의 및 현장 적용의 경우를 발표하였다. 이 지침은 1985년 [콘크리트 품질의 초기 판정 지침, JCI R2]로 간행되었다. 그러나 이들 지침에는 비등수법이 채택되지 않았고 [55℃, 70℃의 온수법]과 각종 분석법이 제안되었다. 그 뒤 1994년에 JIS A 1805-1994에 [40℃ 온수양생법]이 규준화되었다.

한편 국내에서는 1983년에 신현묵, 전찬기에 의해 [24시간 양생 cycle의 비등수법]이 처음으로 발표된 이래, 1988년에 전찬기에 의해 [8hr 양생 cycle법]과 [24+8hr 양생 cycle법]이 제안되었다. 제안된 양생 cycle은 양생온도, 사용 모올드 크기, 전치시간, 촉진양생시간, 양생매체 등 각종 양생조건을 고려하여 시험한 결과이다. 이들 양생 방법에 의해 제안된 28일 강도 추정식은 다음과 같다.

$$\bullet \text{양생시간 [0 + 8hr]의 경우} \\ : F_{28} = 1.86F_a + 87 \quad (3)$$

$$\bullet \text{양생시간 [24 + 8hr]의 경우} \\ : F_{28} = 1.60F_a + 69 \quad (4)$$

여기서, F_{28} : 28일 압축강도 (kg/cm^2)
 F_a : 촉진양생강도 (kg/cm^2)

국내 시방서에서는 1996년판 [콘크리트 표준시방서]의 시공편 2.2 및 13.3.1.2에서 초기 판정에 의한 콘크리트의 품질관리를 언급하고 있다.

각국의 양생 cycle의 개요는 온수 양생법과 열수 양생법과 더불어 그림 4에 나타내었다.

4. 온수(溫水) 및 열수법(熱水法)

[온수 및 열수법]은 일반적으로 35-80℃ 정도의 양생온도로 강도를 촉진시키는 방법으로서, 50℃ 부근의 따뜻한 온도에 의한 것을 [온수법(warm water method)], 70℃ 부근의 뜨거운 온도에 의한 것을 [열수법(hot water method)]이라 한다.

4.1 원리

이 방법들의 원리는 [비등수법]과 마찬가지로 가열된 물이나 증기 또는 전기, 적외선 등등에 의해 강도를 촉진시키는 것이므로 사용 모올드나 사용 수조는 [비등수법]에서 사용하는 것과 같다. 단지 시험에 사용된 열원으로는 물이 주종을 이루고 있으나 증기가 사용되기도 하고 전기로나 적외선 등이 사용되기도 한다.

4.2 특징

이 방법들의 특징은 비교적 온도 충격이 작기 때문에 전치시간(前置時間)을 줄일 수 있으며 분산이나 변동계수도 작다. 또한 50℃ 정도의 [온수법]은 화상의 위험이 없으며, 70℃ 정도의 [열수법]은 1일 정도의 양생시간에서는 100℃에서보다 큰 강도발현이 되는 장점이 있다. 그러나 이들 방법은 온도 제어 장치 및 관리가 필요하고 양생시간이 길게 되는 단점이 있다.

4.3 각국의 연구 결과

이들 방법에 대한 각국의 연구는 [비등수법]에서 언급했듯이 미국의 O.G Patch에 의해서 1933년에 Hoover Dam공사에 적용한 것이 최초의 기록이다.

표 3 BS 1881 : Part 112 -1983의 촉진양생법

양생온도	전치시간	촉진양생시간	후치시간	전체양생시간
35±2°C		입수후 15min. 이내에 35°C 유지	꺼낸 뒤 가능한 한 신속히	24hr±15min.
55±2°C	20±5°C로 1hr	입수후 15min. 이내에 55°C 유지	꺼낸 뒤 1~2hr 이내	19hr±50min. (최대 20hr±10min.)
82±2°C	20±5°C로 1hr	입수후 2hr ±15min. 이내에 82±2°C 유지	5min. 이내에 물을 빼고 시험	17hr±20min.

즉 90°C의 물에 시험체를 침수시키면서 열원을 끊은 상태로 7시간을 양생하여 약 80°C의 상태에서 양생을 끝내는 방법이다. 그 뒤 1955년에 영국의 J. W. H. King이 열원으로 전기로를 사용하여 [85°C로 6시간 정도를 양생한 방법]을 발표하였다. 1957년에는 오스트레일리아의 T. B. Nicol이 [75°C로 24시간 양생하는 방법]을 발표한 것을 비롯하여 다양한 양생온도와 양생시간을 갖는 조기관정방법을 발표하였다.

한편 온수법에 의한 규준은 표 3에 나타난 바와 같이 ASTM 및 BS, IS, JCI, JIS 등이 있으나 그 중 ASTM의 [35°C법]은 너무 낮은 온도이기 때문에 강도촉진의 효과가 거의 없다. 영국에서는 1970년에 [온수법]을 이용한 콘크리트 강도의 조기추정법을 BS 1881로 규준화하였고, 그 뒤 표 2~4과 같이 BS 1881 : Part 112 : 1983에 3가지 방법을 규준화하였고, 1978년에 인도에서도 촉진양생에 의한 콘크리트 강도의 조기추정법을 IS 9013-1978로 규준화 하였다.

한편 일본의 JCI에서는 오랜 연구와 세미나 등을 통하여 1985년에 [콘크리트 품질의 조기관정 지침, JCI R2]를 단체 규준으로 제정하였으며, 이 규준안에는 비등수법이 없으며, [55°C, 70°C의 온수법]과 [각종 분석법]이 제안되었다. 그 뒤 1994년에는 JIS A 1805-1994로 [40°C 온수 양생법]을 규준화하였으며 이들 규준을 정리한 것이 표 4이다.

그러나 BS, IS, JCI의 [55°C법]은 촉진 모울드만 사용하게 되어 있으며 시험기간이 2일 이상 소요되는 단점이 있다. 또한 JCI의 [70°C법]은 시험에 소요되는 시간이 3일이 되어 조기관정법으로 의미가 거의 없는 편이다.

한편 JIS A 1805-1994의 규준은 전체 양생시간이 재령 7일까지로 되어 있어 비교적 높은 강도가 나타날 수가 있고 변동계수도 작아져서 신뢰할만한 시험결과를 얻을 수 있으나, 양생기간이 너무 길어 강

표 4 JIS 규격 및 JCI 규준안

구 분	양생온도	전치시간	촉진양생시간	후치시간	전체양생시간
JIS A 1805-1994	40°C	5~30°C	40±1°C, 7days		7day
JCI R2	55°C	3±1/2hr	20.5±1/3hr	1hr	24hr
JCI R2	70°C	20°C 18±6hr	24±1hr	2~3hr	43~58hr

도의 조기관정방법이라기보다 조기재령강도의 의미가 강하다. 이 규격을 적용하고, 일본에서 생산된 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 촉진 시험 결과는 아래의 식과 같다.

$$F_{35} = 1.15 Fa + 20(\text{kg/cm}^2) \quad (5)$$

한편 국내에서는 그림 4에 나타난 것과 같이 1983년에 신현묵, 전찬기에 의해 [90°C 항온항습조 양생법]과 [50°C 온수법]을 발표한 이래, 1988년에 전찬기에 의해 각종 양생조건을 고려한 대규모 실험을 통하여 적절한 양생온도로 55°C와 70°C를 선택하였고, 전치시간과 촉진양생시간으로 [55°C에서 24+24hr 양생하는 방법]과 [70°C에서 3+21hr 양생하는 방법]을 발표하였다. 이들 방법에 의해 제안된 28일 강도 추정식은 다음과 같다.

70°C 양생으로 [3+21hr]의 경우

$$F_{35} = 1.07Fa + 93 \quad (6)$$

55°C 양생으로 [24 + 24hr]의 경우

$$F_{35} = 1.16Fa + 81 \quad (7)$$

이러한 연구 결과 이외에도 1980년대에 이수철, 서광만, 남인 등이 촉진양생법에 관한 연구를 수행하였고, 김재규, 권성우 등은 현장 적용을 시도하였다. 그 뒤 1993년에 김규준 등에 의해, 1994년에는 오병환, 변근주 등에 의해 실험이 수행되었고, 1995년에는 김수만, 유종희 등이 온수양생법의 연구 결과를 발표하였다.

6. 자체수화열법(自體水和熱法, Auto-genous Method)

6.1 원리

이 방법은 시멘트의 자체(自體 또는 自己) 수화열

을 이용해서 공시체를 축진 양생시키는 방법이다.

즉 양생장치로서 단열성이 좋은 용기가 있으면 콘크리트 자체가 열원(熱源)이 되는 방법이다. 이 용기의 대표적인 것으로는 그림 5와 같이 ASTM C 684-96 [Procedure C]에서 추천된 것이 있다. 이 때 수화열은 단열면이 큰 매스콘크리트의 경우와 계절적으로는 하절기에 높게 나타나며 경우에 따라 70℃ 이상인 경우도 많다. 특히 밀폐된 용기 안에서는 더 크게 상승할 수 있어 양생을 축진시킬 수 있는 열원으로 이용되는 것이다. 일반적으로 사용되는 용기는 수화열을 유지할 수 있도록 단열재로 만들어지며 이 때 봉인이 가능한 것이 필요하다.

6.2 특징

이 방법은 고가의 양생장치가 필요하지 않으며 온도관리의 필요가 없어 실험이 단순해진다. 또한 성형에서 시험까지 복잡한 순서가 없고 중앙 시험소로 운반하는 경우도 그 시간이 양생기간으로 된다. 그러나 단열이 확실한 용기가 필요하며, 강도에 영향을 미치는 인자가 많으면 강도의 분산이 심하게 된다. 또한 수화열이 그다지 높지 않고 첨단온도의 유지시간이 짧고 또한 빠른 속도로 하강하기 때문에 강도증진이

작은 것이 큰 단점이다.

6.3 각국의 연구 결과

이 방법에 의한 연구는 그 원리가 간단하여 손쉽게 적용할 수 있기 때문에 축진 양생수단으로 일찍이 검토되어 왔었다. 그러나 peak온도의 유지시간이 짧아 양생이 효과적이지 못하고 확실한 단열이 보장되지 않으면 강도 값의 분산이 심하게 되는 단점이 있어서 다양한 연구가 진행되지 못하였으며 일부 연구와 실험을 통하여 현재 ASTM과 CSA에서 표준화하고 있는 정도이다.

7. 급속경화방법

[급속경화방법]은 굳지 않은 콘크리트 중의 모르타에 급결제를 가하여 2시간 정도의 고온양생을 실시한 축진강도로 28일 강도를 추정하는 방법이다. 이 방법은 급결제와 고온양생과의 조합에 의한 상승효과로 인해서 시멘트의 수화반응이 단시간에 현저하게 축진되는 장점이 있으나, 사용재료나 배합에 따라 변동이 커질 위험이 있다.

7.1 원리

일본의 지전상치(池田尙治) 등의 연구로서 굳지 않은 콘크리트를 5mm체로 친 모르타에 알루미늄산소오다를 주성분으로 하는 급결제를 일정량 첨가 혼합하여 공시체를 성형하고, 70℃로 고온 양생한 다음 재령 1~3시간의 모르타 강도로부터 재령 28일의 콘크리트 강도를 추정하는 방법인데, 급속경화 모르타의 압축강도가 시료 콘크리트의 물-시멘트비와 아주 높은 상관관계가 있는 것으로부터 유도되어진 원리이다.

7.2 특징

본 방법은 급결제와 고온양생과의 조합에 의한 상승효과에 의하여 포틀랜드 시멘트의 수화반응이 단시간에 축진되어 나타난다는 것과, 안정된 조기강도가 얻어지도록 조합되어진 전용 급결제가 개발되어진 것 등에 의하여 가능하게 되었는데, 일본의 레미콘 실제실험에서 1.5시간 후에 얻어진 결과로는 변동계수 8% 정도로 양호한 결과를 나타낸 바도 있다.

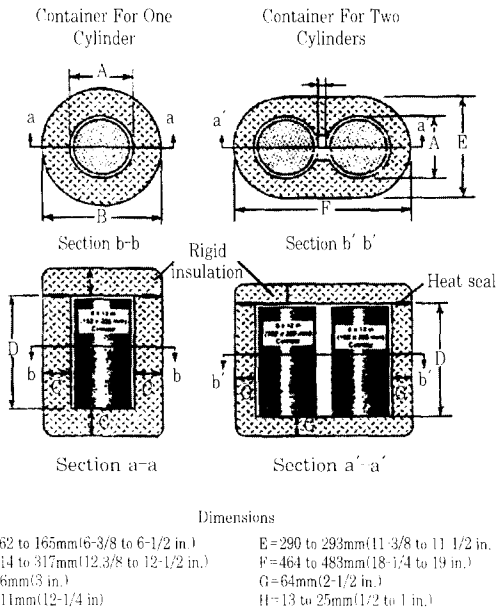


그림 5 자체수화열법 실험용기(ASTM C684-96, Procedure C)

그러나 본 방법은 모르터를 이용하는 것으로 굵은골재의 영향 및 잔골재율 등 일부 배합적인 측면에서의 문제점은 존재할 수 밖에 없다.

7.3 각국의 연구 결과

이 방법은 주로 일본에서 많이 연구되어 왔으며, 국내에서도 청주대학교 건축재료 및 시공연구회와 연세대학교 등에서 꾸준히 연구하여 그 결과를 한국 콘크리트학회논문집 등을 통하여 발표해오고 있다.

8. 압력과 열에 의한 방법

8.1 원리

[압력과 열에 의한 방법]은 Nasser에 의해 고안된 방법으로, 1976년에 ACI의 촉진강도 심포지움에서 처음으로 발표되었다. 그 뒤 ASTM C684-95.96에서 시험방법(Procedure) D로 표준화되었다.

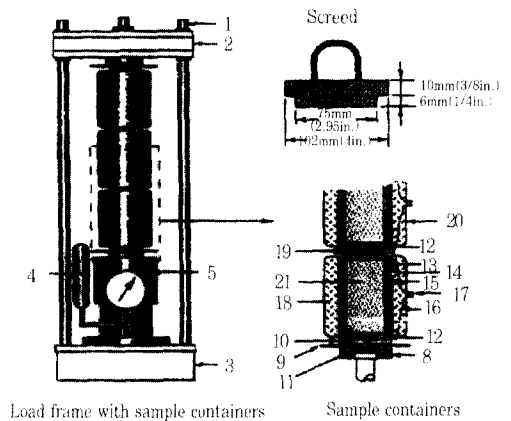
이 시험법의 원리는 그림 6과 같이 시료용기를 3단으로 쌓고, 각각의 사이에 3.18cm두께의 칸막이를 넣어 압력을 105.5 kg/cm²가 되도록 가하고, 100W의 히터로 3시간 가열한 다음 2시간 냉각하여 압축강도를 구함으로써 조기에 강도를 추정하는 것인데, 즉 압력과 열을 복합함으로써 촉진양생을 더욱 가속화한 원리이다.

이 기구를 자세히 설명하면 3개의 실린더는 스테인레스 스틸로 제작되었고, 각각 내경이 7.62cm이다. 가열 수단은 25gauge 니크롬선으로 실린더 주위를 감싸고 있으며 100W 용량이다.

실린더 둘레의 전기 가열 장치는 두께가 3.81cm이며, 직경 15.24cm이고 길이 16.51cm인 금속제 jacket에 의해 절연 상태로 둘러져 있다. 상하면의 조립 장치는 2.23cm 두께의 단부 덮개(end closure)와 두께 2.54cm, 직경 10.16cm인 지지판(bearing plate) 및 덮개와 지지판 사이에 있는 두께 1.27cm의 석면판(asbestos plate)으로 되어 있다. 상하면 덮개(closure)의 조립은 덮개와 지지판 사이에 ball bearing이 포함되어 있다.

8.2 특징

5시간에 150℃에 도달할 정도의 고열과 압력까지 가해지기 때문에 콘크리트의 촉진양생 시험방법중



Dimensions		
1. Connecting rods	8. Head bearing disc	15. Wire insulation
2. Head member	9. Heat shield	16. Heating wire
3. Base	10. Cap and piston	17. Electrical Connector
4. Accumulator	11. Ball bears	18. Glass wool insulation
5. Hydraulic jack	12. O-liner	19. Piston
6. Pressure gauge	13. Plastic liner	20. Container Covering
7. Sample container	14. Cylinder mold	21. Concrete specimen

그림 6 압력과 열에 의한 실험기(ASTM C 684-96 Procedure D)

제일 짧은 시간에 강도의 추정이 가능한 것으로 유용성이 있다. 또한 촉진강도 35~239 kg/cm²의 범위 내에서 28일 재령 강도 추정의 정도는 ±15%이고 배합의 여러 가지 변화에도 그다지 영향이 미치지 않는다고 보고되고는 있으나 단, 강도시험시 화상에 대비하여 장갑을 착용하여야만 하는 점과 아직 많은 연구가 없음으로 재료 및 배합적인 측면에서 고열에 따르는 콘크리트 변화 등에 대하여는 계속 검토되어야 할 것이다.

9. 증기 양생법

[증기양생법]은 상압증기로 양생하는 항온항습조 방법과 고압증기로 양생하는 Autoclave방법이 있다. 항온항습조는 100%의 상대습도로 100℃까지 양생이 가능하며, 고압 증기양생조는 100℃이상 가능하나, 그러나 온도관리가 쉽지 않고 수분증발을 보충하는 주수(注水) 때문에 장시간 양생이 어려운 단점이 있다.

10. 맺음말

콘크리트 강도를 조기에 판정하는 방법은 아직도

연구가 진행되고 있지만, 궁극적으로는 배합 후 최단 시간내에 콘크리트 강도를 추정해야 하는 과제를 만족시키지 못하고 있다. 또한 현장 적용의 적합성과 편리성, 추정의 신뢰성 확보를 위한 시험법의 객관적 평가, 콘크리트 물성 파악에 대한 심층적 연구로 과학적이고 정량적인 평가법 개발 등 향후 연구 과제가 많이 남아 있다.

그러나 추정법에 대한 연구를 계속하는 것과 병행하여 기존의 연구 결과나 제안 방법을 실제 현장에 적용하려는 적극적 노력이 있어야 할 것이다. 이러한 노력이 콘크리트 품질관리를 향상시켜 건설 시공에 대한 불신을 해소시키고 안전한 구조물을 경제적으로 만드는데 기여할 것이며, 이 분야 연구의 활성화를 위한 좋은 계기가 될 것이다.

참고문헌

- (1) M.S. Gerend, Steam-cured Cylinders Give 28day Concrete Strength in 48hours, Engineering News Record, Vol. 98, 1927.
- (2) Accelerated Strength Testing, Publication SP-56, ACI, Detroit, 1978.
- (3) 콘크리트 品質의 早期判定に 關するシッポジウム 發表論文集, 日本콘크리트工學協會, 1979.
- (4) ASTM C684-96, Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens, ASTM Book of Standard, Part 14, 1996.
- (5) BS 1881 : Part 112, Methods of Accelerated Curing of Test Cubes, 1983.
- (6) CSA A23.2-10C-94, Accelerating the Cure of Concrete Cylinders and Determining Their Compressive Strength, 1994.
- (7) IS : 9013-1978, Method of Making, Curing and Determining Compressive Strength of Accelerated-Cured Concrete Test Specimens, Indian Standards Institution, 1978.
- (8) JCI-R2, 콘크리트 品質의 早期判定指針, 日本 콘크리트工學協會, 1985.
- (9) JIS A 1805-1994, 콘크리트生産工學管理用 試驗方法 - 콘크리트強度의 早期判定試驗方法- 溫水養生法, 1994.
- (10) 전찬기, 콘크리트 품질의 조기 판정에 관한 연구 (I),(II),(III), 부천공업전문대학 논문집, 제2,3,4집, 1982, 1983, 1984.
- (11) 신현목, 전찬기, 이수철, 콘크리트 품질의 조기 판정에 관한 연구(I),(II), 대한토목학회 학술발표회 개요집, 대한토목학회, 1983, 1984.
- (12) 신현목, 김재규, 전찬기, 서광만, 남인, 온수양생을 이용한 콘크리트 품질의 조기 판정에 관한 연구, 동, 1986.
- (13) 신현목, 전찬기, 남인, 가열양생 콘크리트의 수화 및 강도에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제7권, 제3호, 1987, 9.
- (14) 신현목, 전찬기, 서광만, 콘크리트 강도의 조기 판정에 관한 연구, 동 제7권, 제4호, 1987, 12.
- (15) 서광만, 온수양생에 의한 콘크리트 강도의 조기 판정에 관한 실험적 연구, 성균관대학교대학원 석사학위논문, 성균관대학교 대학원, 1986.
- (16) 남인, 양생조건이 콘크리트의 수화 및 강도에 미치는 영향에 관한 연구, 동, 1986.
- (17) 신현목, 콘크리트 품질의 조기 판정에 관한 연구, 서봉문화재단, 1986.
- (18) 김재규, 온수양생을 이용한 콘크리트 품질의 조기 판정에 관한 연구, 산업기지개발공사 시험 연구소, 1986.
- (19) 권성우, 콘크리트 조기강도 예측에 관한 연구, 공사용 재료 연구보고서, 농업진흥공사 농업토목시험연구소, 1986, 12, pp.59-82.
- (20) 전찬기, 콘크리트 품질의 조기판정에 관한 연구, 성균관대학교 대학원 박사학위논문, 성균관대학교 대학원, 1988, 2.
- (21) 한천구, 콘크리트 강도의 조기추정에 관한 연구, 충남대학교 대학원 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 1988, 12.
- (22) 전찬기, 콘크리트 강도의 조기판정에 관한 연구 (I),(II),(III), 레미콘지, 17, 18, 19호, 1988, 9, 12, 1989, 3.
- (23) 콘크리트 강도 조기판정방법조사 (55℃ 온수양생법에 의한 콘크리트 강도시험), 건설부 국립건설시험소, 1993, 12.
- (24) 변근주, 오병환, 콘크리트의 조기강도추정, 한국레미콘공업협회, 1994, 12
- (25) 김수만, 유종희, 온수양생법을 이용한 콘크리트 강도의 조기판정에 관한 연구, 콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권 2호, 1995, 11, 