

콘크리트 強度的 早期判定에 관한 研究

A Study on the Early Evaluation of Concrete Strength
by Hot Water Curing Method

申	鉉	默*
Shin,	Hyun	Mook
全	贊	基**
Jeon,	Chan	Ki
徐	光	萬***
Suh,	Kwang	Man

Abstract

Accelerated strength testing is a available method for quality control of concrete. This paper presents the improved hot water (70°C) methods and discusses how these methods can be adapted for predicting 28 day strength. The strength results have been analyzed by statistical techniques and correlation between early and 28 day strength are showed by prediction line.

The test results show that the methods proposed in this paper are usable to predict the potential quality of concrete with low variation and good relationship between two strengths.

要 旨

콘크리트의 品質判定基準은 材令 28 日의 壓縮強度이지만, 실질적인 品質管理를 위해서는 早期에 強度를 파악해야 한다. 콘크리트 強度를 早期判定하는 방법은 크게 「強度促進法」과 굳지 않은 콘크리트의 「分析法」이 있으나, 本 研究에서는 70°C의 熱水養生法으로 다양한 양생방법을 시도하여 기존의 外國規準보다 개선된 방법을 제시하였다. 실험자료의 分析에 있어서는 각 강도의 변동을 검토함은 물론, 합리적인 推定式을 제안하기 위하여 각 강도의 分布를 고려하고 確率의 關係 및 品質基準의 適合性을 검토하였다. 실험결과 促進強度의 변동은 비교적 작게 나타났으며, 本 연구에서 제안한 대부분의 방법이 좋은 相關性을 가지고 있어 유용한 早期判定方法으로 판명되었다.

* 正會員 · 成均館大學校 工科學 教授, 土木工學科

** 正會員 · 富川工業專門大學 助教授, 土木工學科

*** 正會員 · 東明技術公園

1. 序 論

콘크리트의 強度는 일반적으로 供試體의 材令 28日의 壓縮強度로 나타내고 있다. 따라서 콘크리트 打設後 28日 뒤에 品質檢査를 하게 되고 그 結果가 所要強度에 이르지 못할 때는 安全의 문제 뿐만 아니라 경제적·행정적인 문제까지 발생한다. 이와 반대로 檢査結果가 所要強度를 훨씬 上廻하면 非經濟的이 되는 것을 면치 못할 것이다.

이러한 문제를 해소하기 위해서 콘크리트의 品質이 早期에 判定되어야 하며, 더우기 각종 工事が 機械化·迅速化·大型化되어가는 最近의 추세에 비추어 볼 때 品質檢査 및 判定方法의 改善는 시급한 과제라 아니할 수 없다.

콘크리트 強度의 早期判定에 관한 研究와 實驗은 이미 1920년대부터 시작되었으며⁽¹⁾ 일부 국가에서는 몇가지 試驗方法을 規準化하고 또 실제로 工事現場의 品質管理 手段으로 이용하고 있는 實情이다^(2,3). 이러한 早期判定 方法은 적절한 시험방법을 택함으로써 標準化할 수 있어야 하며 또한 시험결과와 적절한 평가방법을 결정하는 것이 중요한 과제이다.

本 研究에서는 비교적 높은 強度가 發現되며 실용성이 있다고 평가되는^(4,5) 70°C 熱水養生法(hot water method)을 콘크리트의 強度促進手段으로 채택하고, ASTM이나 BS, JCI, CSA, IS 등의 規準을⁽⁶⁻¹⁰⁾ 참고하여 試驗의 過程(cycle)을 개선한 방법을 제안하였다.

시험결과를 평가하는데 있어서는 回歸式의 信賴下限線을 채택하거나 회귀식에서 적당한 값을 빼는 방법이 있으나 각각 필요 이상의 安全側이 되어 非經濟的이거나 適合確率을 고려하지 않은 단점이 있다. 결국 합리적인 방법은 推定式에 의한 결과와 실측강도의 차이를 작게 하는 것이다. 이를 위해서는 促進強度 및 28일強度의 分布와 評價基準의 適合確率을 고려하여 推定式을 결정해야 한다⁽¹¹⁻¹⁵⁾. 本 研究에서는 促進強度와 28日強度 사이의 相關關係와 變動特性을 검토하고, 아울러 두 強度 사이의 確率의 關係 및 品質基準의 適合性을 고찰한 새로운 推定式을 設定하고 早期判定試驗結果를 이 推定式으로 검

토하였다.

2. 實驗概要

2.1 實驗計劃

實驗은 크게 2가지로 구분하여 실시하였다. 하나는 促進養生한 早期強度가 標準養生한 強度에 비해서 어떠한 범위의 強度變動을 나타내는가를 알아보는 실험이다. 이는 促進強度를 콘크리트의 強度特性으로 볼 수 있을 것인가 또 28일강도와 相關시킬 수 있을 것인가를 결정하는 중요한 요인이 되기 때문이다. 즉 促進強度로 콘크리트의 品質管理를 할 수 있는지를 검토하는 기본사항인 것이다.

이를 위해 本 實驗에서는 같은 재료를 가지고 5종류의 배합을 각각 5배치씩 실시하여 배치間(batch-to-batch)變動과 배치內(within-batch)變動을 검토하였다. 이들 실험은 安山 新都市 建設現場의 레미콘과 합천현판장의 배치플랜트에서 콘크리트를 채취하여 실시하였다(이하 I 실험이라 한다).

다른 하나는 促進養生方法으로 선택한 70°C 熱水養生法(hot water method)을 다양한 養生條件下에서 실험하였다. 즉 前置時間(공시체의 제작 후부터 촉진양생을 실시하기 전까지 대기 중에 방치하는 시간)과 촉진양생시간을 변화시키고, 사용 몰드의 크기 및 促進養生方法을 변화시켰다. 이와 같은 변화의 시도는 最適의 方法을 고찰하고 標準化의 가능성 여부를 검토하기 위함이다. 이들 방법중에는 JCI에서 規準化된 方法을 비교 검토를 위하여 포함시켰다. 이들 실험은 모두 시험실에서 실시되었으며(이하 II 실험이라 한다), 5종류의 w/c 비로 13배치씩 총 65배치를 실시하여 강도추정식을 계산하였다. 65배치중에는 강도변동을 측정하기 위해 8종류의 배합으로 3배치씩 실시한 24배치가 포함되어 있다.

2.2 使用材料 및 器具

實驗에 사용된 시멘트는 3개 회사의 보통 포틀랜드 시멘트와 1개 회사의 중용열 포틀랜드 시멘트이다. 중용열 시멘트는 변동 계산을 위한 I 실험에서만 사용되었다. 각각의 物理的 性質 및 化學的 成分은 표-1 및 2와 같다.

표-1. 시멘트의 물리적 성질

재료 번호	시멘트 종류	제 조 회사	비 중	분말도 (브레인트) (cm ² /gr)	용 결 시 간		압 속 강 도 (kg/cm ²)		
					초 결 (min)	종 결 (hr.)	3일	7일	28일
1	보 포틀랜드 시멘트	A	3.15	3,180	180	5:30	220	305	380
2	보 포틀랜드 시멘트	B	3.15	3,190	275	8:00	158	232	293
3	보 포틀랜드 시멘트	D	3.15	3,218	264	6:34	—	—	365
4	중용 포틀랜드 시멘트	C	3.15	3,000	220	7:30	—	—	330

표-2. 시멘트의 화학적 성분

재료 번호	시멘트 종류	제 조 회사	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Ignition loss
1	보 포틀랜드 시멘트	A	20.95	5.41	61.88	3.80	2.50	2.17	1.59
2	보 포틀랜드 시멘트	B	22.0	6.50	59.90	2.90	3.60	2.0	—
3	보 포틀랜드 시멘트	D	21.80	5.60	—	3.40	3.30	2.4	1.20
4	중용 포틀랜드 시멘트	C	23.20	4.80	—	3.60	3.00	—	1.60

표-3. 잔골재의 물리적 성질

골재 번호	생 산 지	사 용 처	비 중	흡 수 율 (%)	조 립 율
S ₁	서울한강	시험실	2.58	—	3.31
S ₂	"	"	2.58	0.95	2.93
S ₃	"	"	2.58	1.65	3.26
S ₄	"	"	2.60	1.50	2.87
S ₅	경남황강	합천	2.58	0.99	2.86
S ₆	서울한강	안산	2.62	0.82	2.86

표-4. 굵은 골재의 물리적 성질

골재 번호	생 산 지	사 용 처	최대치수 (mm)	비 중	흡 수 율 (%)	조 립 율
G ₁	경기도부천	시험실	25	2.64	0.50	5.31
G ₂	한강	"	25	2.62	—	7.48
G ₃	한강	"	25	2.58	1.47	5.41
G ₄	경기도부천	"	25	2.64	0.51	5.34
G ₅	한강	"	25	2.62	1.03	4.37
G ₆	한강	"	25	2.59	1.18	4.67
G ₇	경기도부천	"	25	2.59	0.62	5.12
G ₈	경남황강	합천	150	2.63	1.19	—
G ₉	서울한강	안산	40~50	2.68	1.02	7.4

* G₁, G₄, G₇: 쇄석

잔골재 및 굵은골재는 漢江과 경남 황강 및 경기도 부천에서 생산된 것으로 각각의 物理的 性質은 표-3 및 4와 같다.

混和劑는 安山 現場에서 減水 分散劑인 Swiss Sika(國產)를 사용하였고, 합천댐에서는 포조리스 No. 5L을 사용하였다. 시험실에서는 일부 배합에서 포조리스 No. 84를 사용하였다.

모울드는 標準 모울드와 促進 모울드(각각 $\phi 15 \times 30\text{cm}$, $\phi 10 \times 20\text{cm}$)로 구분하여 사용하였다. 촉진 모울드는 공시체 제작 후 즉시 양생수조에 넣을 수 있도록 뚜껑을 부착시키고 側面을 조인 특수제작 모울드이다. 이들 모울드는 시험실의 경우 6mm 두께의 軟鐵製이고, 현장의 경우는 두께 3mm의 鐵板製이다.

促進養生을 위한 恒溫水槽는 水溫이 일정하게 유지되도록 自動溫度調節裝置를 부착하였다. 항온수조의 크기는 $0.6 \times 0.9 \times 0.45\text{m}$ (시험실) 및 $1 \times 1 \times 1\text{m}$ (현장)이고, 1회에 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 의 공시체를 모울드 째로 6~9개 양생할 수 있다. 恒溫恒濕槽는 시험실에서만 사용되었으며 100%의 습도에 일정한 온도를 유지할 수 있는 장치가 부착된 것이다.

2.3 實驗方法 및 配合

실험사이클은 前置時間과 促進養生時間 및 空冷時間(촉진양생 후 강도시험을 실시하기 전까

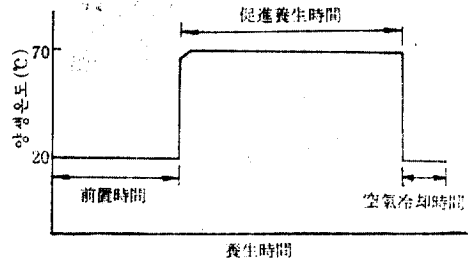


그림 1. 기본 양생사이클

지 冷却과 캠핑을 위하여 대기중에 방치하는 시간)으로 구성된다. 前置時間은 3가지로 구분하였다. 즉, 전치시간 없이 즉시 양생하는 경우, 3시간 및 24시간의 전치시간을 두는 경우로 하였다. 空冷時間은 시험실에서 30분, 현장에서는 1시간으로 하였다. 이들 실험 사이클의 기본은 그림-1과 같으며, 시험실에서 실시된 실험 사이클의 종류는 그림-2와 같다. 또한 양생시간의 표시는 (0+8), (3+21), (24+3) 등으로 했으며 앞의 숫자는 前置時間을, 뒤의 숫자는 促進養生時間을 의미한다.

그림-2의 실험 사이클의 선정은 여러가지 고려 사항 중에서 현장 작업시간을 우선하였다. (3+5), (0+8)은 오전에 타설한 콘크리트의 강

실험 번호	공시체 크기	양생 매 체	양 생 과 정					특 성		
			0	3	8	24	27		32	48
T-1	$\phi 15 \times 30\text{cm}$	항 온 수 조	70°C							촉진 모울드 사용 실험기간 2일 0시간
T-2	"	"	20°C							촉진 모울드 사용 실험기간 2일 0시간
T-3	"	"								촉진 모울드 사용
T-4	"	"								표준 모울드 사용
T-5	"	항 온 항 습 조								표준 모울드 사용
T-6	$\phi 10 \times 20\text{cm}$	"								촉진 모울드 사용
T-7	"	항 온 수 조								표준 모울드 사용
T-8	"	항 온 항 습 조								표준 모울드 사용
T-9	"	항 온 수 조								표준 모울드 사용 실험기간 2일 0시간
T-10	"	항 온 항 습 조								표준 모울드 사용 실험기간 2일 0시간
T-11	"	항 온 수 조								표준 모울드 사용 실험기간 3일 0시간 (18+6) (24+1)

그림 2. 양생사이클과 특성

표-5. 배합표

실험 번호	양생 온도 (°C)	w/c (%)	재료 번호			슬럼프 (cm)	공기량 (%)	골재의 크기 (mm)	잔골재율 (%)	단위량(kg/cm³)			
			시멘트	잔골재	합골재					물	시멘트	잔골재	합골재
S-1+	70	70.2	3	"	"	4	3	150	26	106	151	154	1,575
2+	"	59.9	3	"	"	4	3	150	26	106	177	585	1,560
3++	"	49.1	4	S ₅	G ₅	8	4	40	37	159	324	696	1,213
4++	"	54.9	4	"	"	8	4	50	38	158	289	727	1,213
5++	"	68	3	S ₅	G ₅	8	4	50	46	170	250	900	1,068
A-1	70	40	2	S ₅	G ₅	6.5	1.6	25	41	175	438	696	1,018
2	"	50	"	"	"	6	1	"	"	"	350	725	1,016
3	"	55	"	"	"	9	2.2	"	"	"	318	736	1,076
4	"	60	"	"	"	6	16	"	"	"	292	745	1,089
5	"	70	"	"	"	12.5	1.1	"	"	"	250	759	1,111

+ Pozzolith No. 5L 혼화제 사용(150cc/시멘트 100kg)
 ++ 국산 Swiss Sika 혼화제 사용(250cc/시멘트 100kg)

도를 當일에 추정하기 위한 것이고, (3+21)은 오후에 타설한 경우 다음 날 추정하기 위한 방법이다. (24+T)는 현장 부근에 실험 장비가 없는 경우 24시간 현장에서 양생한 후 시험실로 운반하여 실험할 수 있다. 이 때 (24+3)은 오후 타설일 경우이고, (24+8)은 오전 타설일 경우에 적용할 수 있다. (24+24)는 JCI 방법이기도 하지만 좀 더 높은 신뢰도가 필요할 때 사용할 수 있을 것이다.

배합은 현장의 경우 5가지 w/c 비로 배합설계를 하여 각각 5배치씩 만들었으며 $\phi 10 \times 20\text{cm}$

공시체는 25mm 체로 wet screen 하였고 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 공시체는 40mm 체로 wet screen 하여 제작하였다. 또한 시험실의 경우는 5가지의 w/c 비로 示方配合를 하여 각각 13배치씩 만들었다. 각 배합중에서 대표적인 것을 표-5에 나타내었다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 壓縮強度의 變動性

현장에서 실시한 강도시험의 변동계수(V)의 범위는 표-6과 같다. 표-6의 배치內에서의 평

표-6. 양생방법별 변동계수 I(현장)

사용 모우드	양생 시간	변동계수 V (%)												
		배치內 (within-batch)							배치間 (batch-to-batch)					
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	평균	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	평균	
$\phi 15 \times 30\text{cm}$	3+3hr	9.4	7.9	9.3	14.9	9.7	10.2	9.6	5.5	5.7	7.6	11.2	7.9	
	3+5hr	6.1	4.2	9.8	10.1	15.6	9.2	10.5	3.7	6	9.2	12	8.3	
	3+21hr	7.2	4.8	6.7	8.3	3.2	6	2.7	6.3	5.4	10	1.4	5.2	
	7day	3.5	3.5	5.9	4.9	5	4.6	3.4	3.9	6	4.2	5.4	5	
	28day	4.4	3	2.5	5.1	3.5	3.7	2.9	2.3	2.8	4.4	4.2	3.3	
	91day	—	—	—	2.7	2.4	2.6	—	—	—	3.3	3.4	3.4	
$\phi 10 \times 20\text{cm}$	3+3hr	11	10.3	10.8	16	10.2	11.7	9.1	14.2	10.9	7.9	6.8	9.3	
	3+5hr	3.8	6.9	7	6.2	5.5	5.9	5.6	8.3	4.9	2.5	10.8	8.4	
	3+21hr	3.2	5.7	5	8.3	9.9	6.4	3.4	3.8	5.8	3.3	2.8	3.8	
	7day	4.7	5.2	3.1	5.3	—	4.7	2.4	1.4	4.3	6.5	—	4.2	
	28day	2.5	3.1	2.6	3.9	—	3.2	2.2	2.5	1.4	2.2	—	2.1	
	91day	—	—	—	3.3	—	3.3	—	—	—	2.7	—	2.7	

균은, 각 배치에서의 3개 공시체에 대한 변동계수를 평균한 것이다. 배치間에서의 평균은 각 배치에서 실시한 3개 공시체의 강도를 평균한 뒤 5 배치에 대한 변동계수를 구한 것이다.

표-6에 의하면 촉진양생시간이 짧을수록 28일 표준양생의 경우보다 큰 변동계수를 나타내지만, 양생시간이 (3+21)의 경우는 28일 표준양생의 변동계수와 거의 같음을 알 수 있다.

이들 결과를 ASTM의 規準⁽⁶⁾인 같은 날 배합에서의 3.6% 및 여러 날 배합의 8.7%와 비교해 보면, 배치內의 경우는 약간 크지만 배치間의 경우는 비교적 작음을 알 수 있다.

또 다양한 배합으로 실시한 시험실의 결과도 표-7에 보인 바와 같이 매우 작은 변동계수를 나타내고 있다. 이러한 결과는 촉진양생한 콘크리트로 28日強度를 판정할 수 있는 중요한 뒷받침이 된다. 즉 촉진강도로 28日강도를 推定할 수 있으며, 또한 촉진강도를 28日강도 대신에 콘크리트 강도의 특성값으로 사용할 수도 있다는 것을 시사해 주는 것이다.

표-7. 양생방법별 변동계수 2(시험실)

사용 모울드	양생시간	양생방법	표준편차	변동계수 (%)
φ15×30cm	3+5hr	H. W	3.3	6.4
	24+3hr	H. W	5.3	4.4
	24+3hr	S. C	4.3	4.6
	3+21hr	H. W	5.4	4.3
	7day	S. W	7.3	4.2
	28day	S. W	10.2	4.1
φ10×20cm	24+3hr	H. W	6.4	9.2
	24+3hr	S. C	7.1	8.6
	24+24hr	H. W	8.8	5.4
	7day	S. W	9.1	4.9
	28day	S. W	14.2	5.7

* 표준편차와 변동계수는 모두 배치內에 대한 값이다.

* 양생방법의 H.W는 Hot Water(70°C), S.C는 Steam Curing(70°C), S.W는 Standard Water (23±2°C)이다.

3.2 促進強도와 28日強도의 相關性

促進強도 및 3日, 7日의 早期強도와 28日強도의 相關性을 검토하기 위하여 回歸分析을 실시하였으며 그 결과를 표-8에 나타내었다. 회귀분석에서 사용한 회귀식은 식(3-1)과 같이 線

形回歸式이다.

$$F_{28} = a \cdot F_a + b \quad (3-1)$$

식(3-1)의 F_{28} 은 추정 28日강도이고, F_a 는 촉진강도 또는 조기강도이며, a 와 b 는 회귀계수로 각각 기울기와 절편을 의미한다. 회귀식의 형태는 선형 이외에 여러 형태가 있으나 본 실험결과에는 선형회귀식의 상관성이 좋게 나타났으며, 다른 형태의 회귀식도 線形으로 置換이 가능하기 때문에 선형회귀식을 사용하였다.

표-8에 의하면 測定값이 회귀식 주위에 어느 정도 밀접해 있는가를 나타내는 相關係數가 모두 0.8 이상이어서 촉진강도와 28日강도의 상관성이 좋다는 것을 알 수 있다. 또 표준편차와 변동계수가 촉진양생이나 표준양생에 관계없이 작은 값을 보여주고 있다. 이는 촉진양생으로 강도를 증진시켜도 강도에 큰 변동이 생기지 않음을 의미한다.

28日 표준양생한 강도와 촉진양생한 조기강도의 標準偏差比 $\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a}$ 은 대략 回歸式의 기울기 a 에 가까울수록 좋다. 만약 $\sigma_a > \sigma_{28}$ 이고 $\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a}$ 이 지나치게 작다면, 두 강도값을 변동시키는 要因 사이에 非共通的인 回子が 있고 兩者間의 物理的인 關係가 적다는 것을 의미한다. 따라서 이런 경우는 早期判定方法으로서 有效하다고 볼 수 없다. 本 實驗에서는 각각의 $\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a}$ 이 1 이상이고 대체로 회귀식의 기울기와 같은 것으로 나타나 有效한 방법이라고 판단된다.

촉진강도와 28日강도의 比率인 有效率 $\frac{F_a}{F_{28}}$ 는 100%에 가까울수록 좋은 것이다. 이런 관점에서 보면 양생시간이 짧을수록 불리하며 특히 T-1의 경우는 30%보다도 작기 때문에 실험방법으로의 채택에 신중을 기하여야 할 것이다. 반면 전체 양생시간이 같은 8시간이라도 T-2, T-6의 경우는 T-1보다도 크며, 특히 (24+3)형태인 T-4, T-5, T-7, T-8보다도 크다. 이는 前置時間을 길게 하는 것보다 촉진양생시간을 되도록 길게 하는 것이 더욱 유용하다는 것을 의미한다. 이와 같은 有效율은 회귀계수의 기울기 a 와도 밀접한 關係가 있다. 즉 a 가 1에 가까울수록 有效율이 높아지며 28日강도값에 접근하게 된다. 또한 회귀계수의 절편도 작을수록 28日강도와 좋은 상관을 나타내는 것이며 이는

표-8(a) 양생방법별 회귀분석 결과(I 실험)

실험 번호	사 용 모 울 드	양 생 방 법	양 생 시 간	실험 회 수	회 귀 계 수		상 계 관 수 r	표 준 오차 S_e	표 준 편차 σ	변 동 계 수 $V(\%)$	표 준 편차비 $\frac{\sigma_{23}}{\sigma_s}$	유효율 F_{23}/F_{28} (%)
					a	b						
C	$\phi 15 \times 30 \text{cm}$	H. W	3+3hr	25	2.6	138	0.6426	33.5	1.3	7.9	5.6	10
"	"	H. W	3+5hr	25	1.5	130	0.6835	32	2.6	8.3	2.7	19
"	"	H. W	3+21hr	25	1.8	29	0.9424	14.6	3.6	5.2	2.2	44
"	"	S. W	7day	25	1.2	33	0.9852	10.2	5.6	3.3	1.0	71
"	"	S. W	28day	25	—	—	—	—	5.8	3.4	—	—

註 1) 표준오차는 추정값에 대한 것이다.
 2) 표준편차, 변동계수, 표준편차비는 각 w/c 별의 계산값을 평균한 것이다.

표-8(b) 양생방법별 회귀분석 결과(II 실험)

실험 번호	사 용 ¹⁾ 모 울 드	양 생 방 법	양 생 ²⁾ 시 간	실험 회 수	회 귀 계 수		상 계 관 수 r	표 준 오차 S_e	표 준 편차 σ	변 동 계 수 $V(\%)$	표 준 편차비 $\frac{\sigma_{23}}{\sigma_s}$	유효율 F_{23}/F_{28} (%)
					a	b						
T-1	A $\phi 15 \times 30 \text{cm}$	H. W	3+5hr	23	2.2	118	0.8362	42.3	3.3	6.4	2.3	26
T-2	A "	H. W	0+8hr	40	1.3	116	0.8865	24.9	2.5	3.6	3.0	37
T-3	A "	H. W	3+21hr	64	1.1	93	0.8664	39.6	4.9	3.9	1.6	56
T-4	S "	H. W	24+3hr	24	1.5	127	0.8694	27.9	5.3	4.4	1.4	31
T-5	S "	S. C	24+3hr	24	1.5	125	0.8848	35.9	4.3	4.8	1.8	33
S-1	S "	S. W	7day	24	1.1	70	0.9439	26.8	6.8	4	1.1	69
S-2 ³⁾	S "	S. W	28day	64	—	—	—	—	7.6	3.2	—	—
T-6	S $\phi 10 \times 20 \text{cm}$	S. C	0+8hr	39	1.3	107	0.8203	22	2.4	3.5	4.3	35
T-7	S "	H. W	24+3	24	1.7	108	0.9262	30.7	6.4	9.2	1.6	32
T-8	S "	S. C	24+3	24	1.6	113	0.8593	34.3	7.1	8.6	1.5	33
T-9	S "	H. W	24+8	40	1.2	87	0.9070	25.9	3.7	3.9	2.8	47
T-10	S "	S. C	24+8	40	1.1	99	0.8334	20.1	4.8	4.7	2.2	46
T-11	S "	H. W	24+24	64	1.1	72	0.8844	31.4	6.7	4.5	1.5	63
S-3	S "	S. W	3day	40	1.3	85	0.9095	28.8	4.5	4.2	2.3	50
S-4	S "	S. W	7day	64	0.99	77	0.8716	25	6.6	4	1.6	71
S-5 ³⁾	S "	S. W	28day	64	—	—	—	—	10.	4.4	—	—

註 1) 사용 모울드의 A는 촉진 모울드(Accelerated Mold), S는 표준 모울드(Standard Mold)이다.
 2) 양생시간의 앞 숫자는 전치시간, 뒷 숫자는 촉진양생시간을 나타낸다.
 3) S-2, S-5의 표준편차는 각각 실험회수 N 별의 표준편차이다.
 4) 표준편차와 변동계수는 배치內에서의 값이다.

T-3, T-9, T-10, T-11에서도 알 수 있다.

같은 양생사이클에서 사용 모듈드가 다른 경우(T-2와 T-6, T-4와 T-5, T-7과 T-8)를 보면, 회귀계수가 약간의 차이를 보이고 있으나 일정한 경향은 없으며 대체로 유사한 결과가 나타남을 알 수 있다. 또 양생사이클과 사용 모듈드는 같으나 강도를 촉진시키는 방법이 다른 경우를 보면, 뜨거운 물(hot water)을 사용한 恒溫水槽養生法과 常壓蒸氣를 사용한 恒溫恒濕槽養生法の 결과가 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 즉 T-4와 T-5의 결과, T-7과 T-8의 결과 및 T-9와 T-10의 결과가 거의 유사하다.

이런 현상은 사용 모듈드나 양생방법에 의해서 촉진강도의 특성이 크게 변하지 않음을 의미하며 촉진강도를 발현시키는 방법의 선정에 큰 제약이 없음을 시사하는 것이다.

양생시간을 결정하는 문제는 현장의 환경과 작업시간 및 實驗要員의 확보 등을 고려해서 결정해야 한다. 따라서 당일에 강도값을 추정하려면 전체 양생시간이 8시간을 넘으면 곤란하다. 또한 콘크리트를 打設한 다음날에 강도값을 추정하려면 (24+8)시간 이내가 유리하다. 높은 강도값이 요구되고 공사진행에 지장이 없다면 (24+24)의 방법도 고려될 수 있을 것이다.

촉진실험결과와 3일 및 7일의 早期強度結果를 비교해 보면, (24+8)의 강도와 3일강도의 회귀결과가 대체로 유사하다. 또 JCI 방법인 (24+24)의 강도와 7일강도의 결과가 유사하고, 다른 실험사이클보다 절편이 작으며 기울기가 1에 가깝기 때문에 安定性이 높다고 볼 수 있다. 그러나 되도록 짧은 사이클이 필요한 조기판정의 근본목적을 생각하면 너무 긴 단점이 있다.

이상과 같이 각 방법을 여러 조건에서 고려해 보면 T-2, T-3, T-6, T-9, T-10, T-11 등의 방법이 다른 방법에 비해 대체로 유용함을 알 수 있다. 특히 콘크리트 打設 當일에 강도를 추정하기 위해서는 T-2, T-7의 방법이 가장 유용하며, 이 때는 촉진 모듈드의 사용이 필수적이다. 이와 같은 고찰은 콘크리트 강도의 早期判定方法의 標準化를 위하여 유익한 자료가 될 것으로 생각한다.

3.3 確率概念을 고려한 28日強度 推定

回歸分析을 실시하여 계산된 回歸式은 실험으로 얻어진 誤差의 범위에서 28日強度를 推定할 수 있으나, 실제로 推定值를 下廻할 確率이 50%이므로 不合格으로 해야 할 것을 合格으로 평가할 위험이 매우 크다.

이런 위험 때문에 強度分布의 下限線을 推定式으로 하는 방법이 있으나, 이 때는 추정치를 下廻할 확률이 거의 없으므로 필요 이상의 安全側이 되어 非經濟的이다.

下限線의 채택과 유사한 것으로 回歸式에서 적당한 값을 빼는 방법이 있다. 예를 들어 早期強度와 28日強度의 관계에서 90%의 信賴限界일 때 회귀식의 절편에서 1.28σ를 빼서 사용하는 경우이다. 그러나 이런 방법은 조기강도에 대응한 28일강도의 약 90% 정도가 이 추정치 이상이 될 것이라고 기대되는 것에 지나지 않는다.

따라서 추정치에 의해서 얻어진 결과와 실제 측정된 결과가 많은 차이를 나타내지 않도록 하는 방법이 필요하다. 이를 위해서는 촉진강도의 분포에 대하여 28일강도의 분포를 고려하고, 評價基準의 適合確率을 적용한 推定式을 결정해야 한다.

28일강도의 분포가 正規分布 $N(m_{23}, \sigma_{23}^2)$ 이

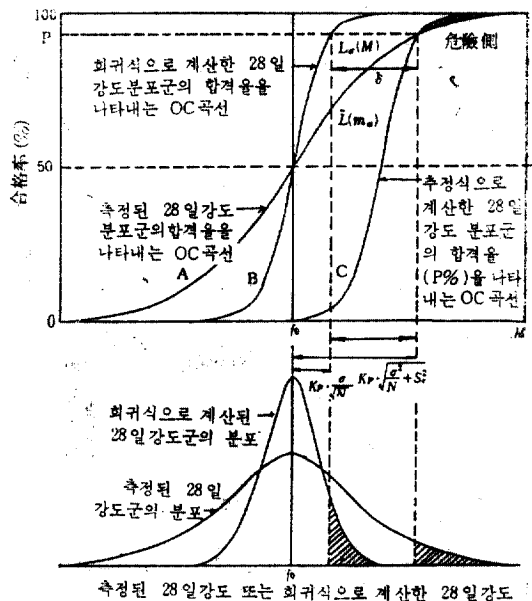


그림 3. OC 곡선과 강도분포

라면 28일강도 分布群의 平均의인 合格率은 그림-3 과 같이 OC 曲線(Operating Characteristic Curve, 檢査特性曲線)⁽¹⁰⁾으로 표시된다. 그림-3 에서 A線은 측정된 28일강도-분포군의 平均의인 合格率을 나타내는 OC 곡선이다. B線은 回歸式으로 계산한 28일강도의 N개 平均이 평가 기준에 적합하는 확률(합격율)을 나타내는 OC 곡선이며 이 때의 합격율은 50%이다. 따라서 합격율 P에서 두 OC 곡선을 교차시키기 위해서는 B의 OC 곡선을 δ 만큼 평행이동시켜 C의 OC 곡선으로 해야 한다.

OC 곡선 A, B와 평행이동시켜야 할 거리 δ 는 콘크리트 강도의 品質基準과 合格判定規準에 따라 다르다. 品質基準은 최소값과 평균값에 대한 조건이 있으나 일반적으로 평균값 조건에 만족으로 결정된다.⁽¹²⁾ 따라서 선형회귀를 하고 측정강도와 28일강도가 정규분포이며 $\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a} \geq a$ 인 경우에는, OC 곡선 A, B와 평행이동시켜야 할 거리 δ 는 다음과 같이 나타내진다.⁽⁸⁾

$$L(m_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{S_s^2 + \frac{\sigma^2}{N}}} \int_{-\infty}^M e^{-\frac{(x-f_0)^2}{2(S_s^2 + \frac{\sigma^2}{N})}} dx \quad (3-2)$$

$$L_s(M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}} \int_{-\infty}^M e^{-\frac{(x-f_0)^2}{2(\frac{\sigma}{\sqrt{N}})^2}} dx \quad (3-3)$$

$$\delta = K_P \left(\sqrt{\frac{\sigma_{28}^2}{N} + S_s^2} - \frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N}} \right) = K_P \cdot S_s (\sqrt{P_N^2 + 1} - P_N) \quad (3-4)$$

여기서 $P_N = \frac{\sigma_{28}}{\sqrt{NS_s}}$

K_P : 正規偏差로서 합격율 80, 90, 95, 98, 99%에 대하여 각각 0.842, 1.282, 1.645, 2.054, 2.326 이다.

x : 측정된 28일강도

f_0 : 呼稱強度 또는 所要強度

S_s : 標準誤差

σ : 같은 재료, 같은 배합에서의 標準偏差

N : 공시체의 시험회수

M : 회귀식에 의해 계산된 28일강도의 평균($M = a \cdot m_a + b$)

m_a : 측정강도 또는 초기강도의 평균

식(3-2)와 식(3-3)은 결국 標準偏差를 각각 $\sqrt{S_s^2 + \frac{\sigma^2}{N}}$, $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ 로 하는 正規分布函數의 OC 곡선이다. 또 δ 는 두 OC 곡선의 標準偏差의 差와 합격율에 따른 正規偏差 K_P 를 곱한 값이다. 따라서 強度分布를 고려하고 확률개념을 적용한 推定式은 식(3-5)와 같이 直線回歸式에서 δ 를 뺀 것으로 나타낼 수 있다.

$$F_{28} = a \cdot F_a + b - \delta \quad (3-5)$$

식(3-5)를 이용하면 회귀식을 합격율 P에서의 推定式으로 만들 수 있으며, T-1의 경우를 계산하면 다음과 같다.

$$P_N = \frac{\sigma_{28}}{\sqrt{NS_s}} = \frac{7.6}{\sqrt{3} \times 42.3} = 0.10373$$

$$K_P \cdot S_s (\sqrt{P_N^2 + 1} - P_N) = K_P \times 42.3 (\sqrt{0.10373^2 + 1} - 0.10373) = 38.13 K_P$$

$K_P = 1.282$ (합격율 P=90%일 때)이므로

$$F_{28} = 2.15 F_a + 118 - 38.13 K_P = 2.15 F_a + 69$$

결국 각 실험방법에 대한 회귀식은 위와 같은 계산을 실시하여 추정식으로 만들어서 사용해야 하며, 합격율별 계산결과를 표-9에 나타내었다.

本 研究에서 설정한 추정식과 기존의 신뢰구간 방법을 비교하기 위하여 T-3의 경우를 나타

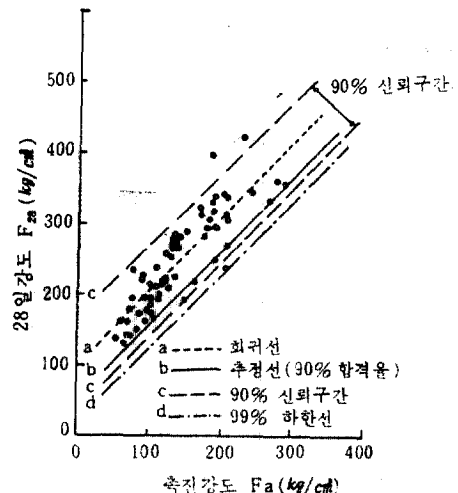


그림 4. 회귀선과 추정선(T-3)

표-9. 합격율별 추정식 계산 결과

실험 번호	양 생 시 간	회귀계수		σ_{28}	Se	$P_N =$ $\frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N}Se}$	Se $(\frac{\sqrt{P_N^2 + 1}}{1 - P_N})$	추정식의 계 수 b	합 격 율 별 b 값					b'
		a	b						30%	90%	95%	98%	99%	
T-1	3+5hr	2.2	118	13.4	42.3	0.18	35.27	118-35.27K _p	88	73	60	46	36	60
T-2	0+8hr	1.3	116	12.4	24.9	0.29	18.75	116-18.75K _p	100	92	85	77	72	85
T-3	3+21hr	1.1	93	9.3	39.6	0.14	34.59	93-34.59K _p	64	49	36	22	12	36
T-4	24+3hr	1.5	127	11	27.9	0.23	24.56	127-24.56K _p	106	96	87	77	70	87
T-5	24+3hr	1.5	125	11	35.9	0.18	30.11	125-30.11K _p	100	86	75	63	55	75
S-1	7day	1.1	70	18.8	26.8	0.41	18.06	70-18.06K _p	55	47	40	33	28	40
T-6	0+8hr	1.3	107	12.4	22	0.33	15.98	107-15.98K _p	94	97	81	74	70	81
T-7	24+3hr	1.7	108	11	30.7	0.19	25.00	108-25.0K _p	87	76	67	57	50	67
T-8	24+3hr	1.6	113	11	34.3	0.19	28.53	113-28.53K _p	89	76	66	54	47	66
T-9	24+8hr	1.2	87	9.4	25.9	0.21	21.04	87-21.04K _p	69	60	52	44	38	52
T-10	24+8hr	1.1	99	9.4	20.1	0.27	15.89	99-15.89K _p	86	79	74	67	63	74
T-11	24+24hr	0.09	72	5.0	31.4	0.09	28.65	72-28.65K _p	48	35	25	13	5	25
S-3	3day	1.3	85	13.2	28.8	0.26	22.17	85-22.17K _p	66	57	49	39	33	49
S-4	7day	0.99	77	18.8	25.0	0.43	16.40	77-16.40K _p	63	56	50	43	39	50

註: b'는 회귀식에서 일정한 값을 때의 방법의 일례로서, 합격율 90%에서 Z 값이 1.645 이므로 회귀계수 b에서 1.645 값을 뺀 값이다.

낸 것이 그림-4이다. 이들 관계에서 합격율과 신뢰구간이 같은 90%이지만 本 研究의 추정선이 회귀선에 더 근접하고 있어 경제적인 判定이 되는 것을 알 수 있다.

또한 측정된 28일강도와 추정된 28일강도의 관계는 T-4의 경우에 그림-5와 같이 나타낼 수 있다. 그림-5에 의하면 측정강도가 추정강도를 下廻하는 경우를 쉽게 알 수 있으나, 측정강도의 대부분이 추정강도보다 크며, 작은 경우도 그 차이가 거의 없다. 따라서 本 研究의 추정선이 경제적이며 안정적인 判定이 됨을 알 수 있다.

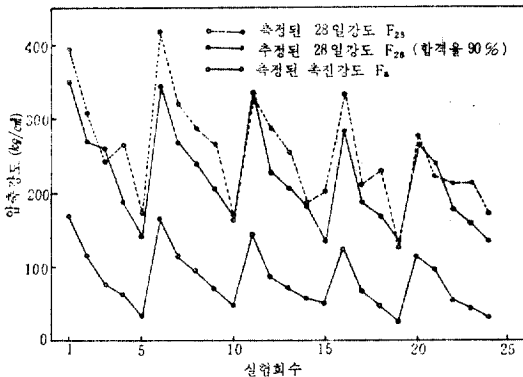


그림 5. 측정강도와 추정강도의 비교(T-4)

5. 結 論

本 研究에서 실시한 콘크리트 강도의 早期判定을 위한 實驗과 그 자료의 분포를 고려한 確率論的 統計處理 결과를 종합하면, 본 실험의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 本 研究에서 실시한 촉진양생실험의 결과는 28일강도와 대체로 양호한 相關性을 보여주었으며, 특히 T-2, T-3, T-6, T-9, T-10, T-11 등의 방법이 더욱 유효한 것으로 판명되었다.

(2) 콘크리트 강도의 發現은 주로 促進養生時間에 좌우된다. 따라서 早期判定이라는 목적과 상관관계의 안정성을 위해서는 前置時間은 되도록 짧게하고 촉진양생시간을 길게하는 것이 좋다.

(3) 촉진양생강도의 변동은 표준양생에 의한 것에 비하여 그다지 크지 않은 것으로 판명되었다. 이는 촉진강도로 28일강도를 추정할 수 있는 중요한 조건이 된다. 또한 콘크리트의 품질 관리에서 촉진강도 자체를 콘크리트의 특성값으로 사용할 수도 있다는 것을 시사해 주는 것이다.

(4) 28일강도와 촉진강도의 標準偏差比 $\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a}$ 의 값은 1 이상이고 회귀식의 기울기 a에 가까

운 것으로 나타났다. 이는 두 강도 사이에 공통적 因子가 있고 物理的 關係가 크다는 것을 의미한다.

(5) 같은 양생온도에서는 恒溫水槽養生의 결과와 恒溫恒濕槽養生의 결과가 거의 같다. 이는 강도의 축진이 양생매체에 관계 없이 양생온도 자체에 좌우되는 것을 의미한다.

(6) 같은 양생사이클에서 사용 모델드가 다른 경우는 약간의 차이를 보이고 있으나 일정한 경향은 나타나지 않았다.

(7) 본 研究에서 설정한 推定式은 強度分布와 確率概念을 고려하였기 때문에, 기존의 방법들에 비하여 정해진 합격율에 따라 안전을 확보하면서 경제성을 개선하는 이점이 있다.

감사의 말

本 研究는 瑞峰文化財團의 學術研究費 支援에 의한 것이며 이에 同財團에 深甚한 謝意를 표하는 바이다. 또한 現場實驗을 적극 協力해 주신 產業基地開發公社의 金在奎 과장께도 감사할 드린다.

參 考 文 獻

1. M.S. Gerend, Steam-cured Cylinders Give 28-day Concrete Strength in 48 hours, *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에 關する シンポジウム 發表論文集, 日本콘크리트工學協會, 1979.
4. 申鉉默, 全贊基, 李壽喆, 콘크리트 品質의 早期判定에 關한 연구, 1983 년도 대한토목학회 학술발표개요집, 1983.
5. 申鉉默, 金在奎, 全贊基, 徐光萬, 南仁, 溫水養生

- 을 이용한 콘크리트 品質이 早期判定에 關한 研究, 1986 년도 대한토목학회 학술발표회 개요집, 1986.
6. ASTM C 684~74, Standard Method of Making, Accelerated Curing, and Testing of Concrete Compression Test Specimens, *ASTM Book of Standard*, Part 14, 1976, pp.405~412.
7. *B.S. 1881, Part 3*, Methods of Testing Concrete-Methods of Making and Curing Test Specimens.
8. JCI-R2, 콘크리트 品質의 早期判定指針, 日本콘크리트工學協會, 1985.
9. *CSA A23.2.26*, Method of Making, Accelerated Curing and Determining the Compressive Strength of Accelerated Cured Concrete Test Specimens in the Field.
10. *I.S.: 9013~1978*, Method of Making, Curing and Determining Compressive Strength of Accelerated-cured Concrete Test Specimens. Indian Standards Institution, 1978.
11. 仕入豊和, 榊田佳寛, 콘크리트 品質의 早期判定에 關한 強度判定式의 一提案, 日本建築學會論文報告集, 298 號, 1980.12.
12. 仕入豊和, 榊田佳寛, 콘크리트 強度의 早期判定のための 一般式(一般의 合格判定規準에 適用する場合, 日本建築學會論文報告集, 303 號, 1981.5.
13. C.B. Shon, Estimation of Compressive Strength from Accelerated Strength Tests, *Indian Concrete Journal*, 1986.3.
14. Recommended Practice for Evaluation of Strength Results of Concrete, *ACI Standard 214~77*, ACI, Detroit, 1977.
15. W.C. Stone, C.P. Reeve, A New Statistical Method for Prediction of Concrete Strength from In-Place Tests, *Cement Concrete and Aggregate*, 1986.
16. 金正年, 統計學, 經文社, 1986.

(接受: 1987. 8. 24)