

수화열과 매스콘크리트의 강도에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Strength in Mass-Concrete and Heat of Hydration

백 민 수 [*]	정 근 호 ^{**}	김 종 락 ^{**}
Paik, Min Su	Jung, Kun Ho	Kim, Jong Rak
이 영 도 ^{***}	김 영 희 ^{****}	정 상 진 ^{*****}
Lee, Young Do	Kim, Young Hoi	Jung, Sang Jin

Abstract

This study describes examinations made for the purpose of obtaining data for strength control of mass concrete in the cold season.

The examination in outline of analysis of temperatures of mass concrete(corresponding to member thickness of 1m) and comparisons with water-cured specimens of various concrete specimens cured in sealed condition.

As a result, it was found that mass concrete placed in the cold season, if strength is controlled based on 28-day age, is seen to require a strength correction factor.

1. 서 론

최근에 규모가 크고 대형화된 원자력 발전소의 시설물, 공장 등과 같은 콘크리트 구조물들이 증가하는 추세에 있다. 이에 따라 부재들은 설계, 시공, 품질관리에서 매스콘크리트로 취급되어야 할 것이다. 매스콘크리트는 부재의 단면이 크기 때문에 시멘트의 수화열이 축적되어 콘크리트 내부의 온도가 상승한다. 그로 인하여 콘크리트의 강도발현에 지대한 영향을 미치고, 균열을 발생시키는 원인이 되기도 한다.

또한 콘크리트 내부의 온도 상승은 다른 조건이 동일하다면 부재의 치수가 큰 만큼 높게 된다. 지금까지 매스콘크리트의 강도 성상을 파악할 경우에는 콘크리트 단면내를 편의상 일정하게 가정하여 수증양생한 콘크리트 공시체의 강도를 채용하여 사용하고 있다. 그러나 시멘트의 수화열에 의한 온도 상승은 콘크리트 단면내의 위치, 시멘트의 종류에 따라 상이하게 되므로, 콘크리트 부재내부의 강도분

* 정회원, 단국대 대학원 박사과정
** 정회원, 단국대 대학원 석사과정
*** 정회원, 경동대 건설공학부 전임강사
**** 정회원, 인천전문대 건축공학과 교수
***** 정회원, 단국대 건축공학과 부교수, 공학박사

포를 크게 변화시킬 것으로 추측이 된다.

본 연구에서는, 저온기에 시공되고 있는 매스콘크리트의 수화열에 의한 온도이력을 예측하고, 그 온도이력의 조건하에서 공시체($\varnothing 10\text{cm} \times 20\text{cm}$)의 강도발현을 조사하여, 매스콘크리트의 강도관리에 필요한 기초 자료를 얻고자 한다.

2. 실험개요

본 실험의 개요는 다음과 같다.

- (1) 매스콘크리트의 온도이력을 슈미트(Schmidt)의 방법으로 해석하고, 수화열에 의한 온도이력을 구한다.
- (2) (1)에서 구한 온도이력의 조건하에서 양생한 공시체의 강도발현과 수중에서 양생한 공시체의 강도발현을 비교하여 검사한다.
- (3) 공시체의 강도발현과 적산온도와 관계로서 매스콘크리트의 강도관리에 대해서 검사한다.

2.1. 온도이력의 조건

슈미트의 방법으로 콘크리트 부재의 온도이력을 해석할 시에 가정한 조건은 다음과 같다.

- (1) 방열은 두 표면에서만 이루어진다.
- (2) 표면의 열전달을 고려하여, 실제의 표면으로부터 0.2m의층을 가상표면으로 한다.
- (3) 콘크리트의 열확산계수를 $0.08\text{m}^2/\text{day}$ 로 한다.
- (4) 시멘트 : 플라이애시 시멘트(Flyash cement) B종, 단위 시멘트량 $340\text{kg}/\text{m}^3$
- (5) 외기온도와 타설온도 : 20°C , 12.5°C , 5°C
- (6) 부재의 두께 : 1m

이상의 조건으로 구한 매스콘크리트의 중심온도이력을 표 1에서 시리즈 I로 표시하고 있다. 타설 온도를 6시간 유지 후 승온시켜 재령 3일에서 최고온도로 도달시킨 후, 재령 14일에 다시 타설온도까지 온도를 저하시켰다.

또한 온도이력의 양생공시체와 비교하기 위해서, 초기의 수화열에 의한 온도이력이 없는 수중양생의 관리용을 표 1에서 시리즈 II로 설정제시하고 있다.

표 1. 콘크리트의 양생온도이력

	시리즈 번호		타설온도 ($^\circ\text{C}$)	전치시간 (h)	최고온도 도달재령	양생최고온도 ($^\circ\text{C}$)	양생온도 ($^\circ\text{C}$)
	매스콘크리트의 양생용공시체	I	A 1	20	6 h	3일	47.5
B 1			12.5	6 h	3일	35	12.5
C 1			5	6 h	3일	22.5	5
관리용 공시체	II	a 1	20	-	-	-	20
		b 1	12.5	-	-	-	20
		b 2	12.5	-	-	-	12.5
		c 1	5	-	-	-	20
		c 2	5	-	-	-	5

2.2. 사용재료

시멘트는 플라이애시시멘트 B종 (기호, F), 보통 포틀랜드시멘트(기호, N), 중용열 포틀랜드 시멘트

(기호, M)로 하였다. 골재는 굵은 골재로써 경질의 쇄석(F.M 7.55, 비중 2.64)과 잔골재로서 경질의 쇄사와 강사를 혼합한 것(F.M 2.55, 비중 2.64)을 사용하였다. 혼화제는 포졸리스(Pozzolith)산의 지연형 감수제 No.8과 공기연행 조절용의 No.303A의 AE제를 사용하였다.

2.3. 실험방법

본 실험은 매스콘크리트를 대상으로 하고 있기 때문에 굳은 비빔으로 한 콘크리트 배합을 표 2에 나타낸다.

표 2. 콘크리트배합

기호	시멘트	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	물시멘트비 (%)	세골재율 (%)	단위량(kg/m ³)							
						물	시멘트	쇄석 25mm	쇄석 10mm	쇄사	강사	포졸리스	A E 제
F55	플라이애시 시멘트B종	4±1	10±1	55	43	170	309	724	311	517	234	618	34.0
F50				50	43	170	310	744	306	538	231	680	37.4
F40				40	42	176	440	686	294	497	213	880	60.5
N50	보통포틀 랜드시멘트			50	44	170	340	701	300	550	236	680	18.7
M50	중용열포틀 랜드시멘트			50	11	170	340	701	300	530	236	680	18.7

또한 아직 굳지 않은 콘크리트의 성질은 표3에 표시하고 있다.

표 3. 굳지않은 콘크리트의 성질

항목	슬럼프(cm)			공기량(%)			단위용적중량		
	20	12.5	5	20	12.5	5	20	12.5	5
F55	10.5	13.3	13.9	5.0	4.8	4.9	2,325	2,331	2,337
F50	9.5	13.1	14.7	4.7	5.0	4.3	2,322	2,328	2,349
F40	10.7	12.5	15.2	4.5	4.0	4.6	2,334	2,350	2,337
N50	9.1	12.5	14.0	4.2	4.8	4.7	2,346	2,334	2,353
M50	10.7	13.3	15.2	4.1	4.9	4.0	2,358	2,337	2,379

공시체는 $\varnothing 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 크기로 하여 몰드(Mould)에서 성형한 즉시 비닐로 포장하여 프로그램 컨트롤(Program Control) 장치가 부착된 온도·습도가변형의 항온항습기에 저장하고, 시리즈 I의 온도 이력으로 7일간 양생하였다.

그 이후는 수분방지를 위하여 동으로 제작한 원형관에 공시체(매스콘크리트의 양생용 공시체)를 넣어서 전술한 항온항습기에서 소정의 재령까지 양생을 계속하였다. 또한 관리용을 개핑(Capping), 탈형하여 소정의 재령까지 수중에서 공시체(관리용 공시체)를 양생하였다.

실험은 콘크리트의 강도발현이라는 관점에서 압축을 주강도로 채택하였으며, 결과는 3개의 평균치로 표시하였다.

또한 비교용으로 구한 정탄성계수는 콤프레소미터(Compresso-meter)로 측정하였다.

3. 실험결과와 검사

3.1. 관리용 공시체의 강도발현

콘크리트타설후 초기의 수화열에 의한 온도상승이 없는 시리즈 II에 있어서 관리용 공시체의 강도발현은 다음과 같다.

3.1.1. 타설온도와 강도와의 관계

타설후의 콘크리트 양생온도가 20℃인 경우에 타설온도가 강도에 미치는 영향을 표 4에 나타내고 있다.

표 4에서 알 수 있는 바와 같이, 실험에서 사용한 소형의 공시체 범위에서는 타설온도가 강도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이 결과를 토대로 하여 이하에서 기술하는 실험결과와 검사는 타설온도 20℃, 양생온도 20℃의 관리용 공시체를 기준으로 하였다.

표 4. 타설온도가 강도에 미치는 영향

재령(일)	7			14			28			91		
	온도(℃)	20	12.5	5	20	12.5	5	20	12.5	5	20	12.5
F55	191	185	198	221	212	233	283	285	307	404	376	373
F50	241	233	239	298	291	282	356	355	357	472	460	438
F40	324	303	316	371	366	379	438	446	462	574	568	558
N50	301	282	314	379	360	351	434	428	423	496	470	479
M50	236	236	237	303	312	320	397	400	406	520	542	518

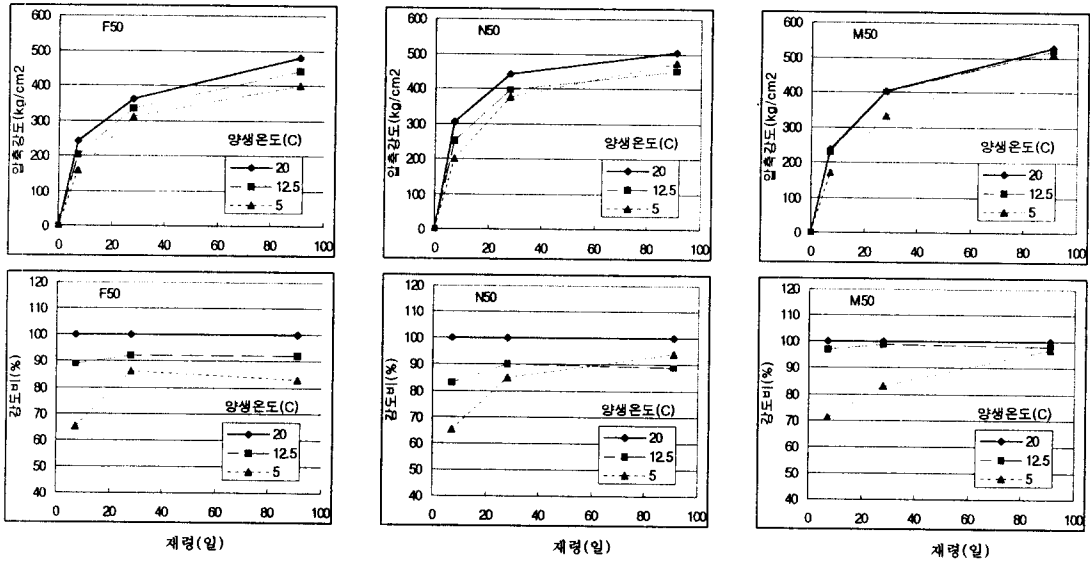


그림 1. 양생온도에 의한 압축강도와 강도비

3.1.2. 양생온도와 강도와의 관계

타설온도와 양생온도가 동일한 경우의 강도발현을 그림 1에 나타낸다.

그림 1에 따르면 시멘트종류에 상관없이 양생온도가 낮은 만큼 강도발현이 늦지만, 재령의 경과에 따라 이러한 경향이 적어짐을 알 수 있다.

또한 재령의 경과에 따른 강도증가는 저온도인 만큼 현저하여 5℃의 경우는 다른 온도보다 높은 비율을 보여주고 있다. 이것으로 높은 양생온도가 장기강도의 발현에 유리한 요인이 아님을 알 수가 있다.

3.1.3. 시멘트종류와 강도와와의 관계

보통 포틀랜드시멘트를 100으로 하였을 경우 각종 시멘트의 강도비를 표 5에 나타내고 있다.

표 5. 보통 포틀랜드시멘트를 100으로한 경우의 강도비

양생 양생온도	수 중 양 생								
	20			12.5			5		
재령(일)	7	28	91	7	28	91	7	28	91
N50	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F50	80	82	95	76	84	93	84	87	93
M50	78	91	105	83	99	108	84	88	112

표 5에 의하면, 양생온도가 낮을 경우에 중용열 포틀랜드시멘트는 약간 증가하고, 플라이애시시멘트는 조금 저하하는 경향을 알 수가 있다. 초기 재령에는 다른 2종류의 시멘트가 보통 포틀랜드시멘트보다 강도발현이 작으며, 장기재령에서는 플라이애시시멘트가 작고, 중용열 포틀랜드시멘트가 증가됨을 알 수 있다.

재령 28일 강도를 100으로 한 경우의 강도비를 표 6에 나타낸다.

표 6. 재령28일 강도를 100으로 한 경우의 강도비

양생 양생온도	수 중 양 생								
	20			12.5			5		
재령(일)	7	28	91	7	28	91	7	28	91
F55	67	100	143	63	100	133	50	100	133
F50	67	100	133	61	100	132	51	100	129
F40	74	100	131	64	100	127	60	100	132
N50	69	100	114	67	100	120	53	100	127
M40	59	100	131	58	100	130	51	100	154

표 6 의하면, 재령의 경과에 따른 강도증가율은 커다란 차이를 나타내지 않지만, 타설온도 5℃에서 중용열 포틀랜드시멘트가 큰 경향을 보여주고 있다.

3.2. 매스콘크리트의 양생용 공시체의 강도발현

매스콘크리트의 양생용공시체의 시험결과와 관리용 공시체의 시험결과와의 비교로부터 다음과 같은 경향을 나타내고 있다.

3.2.1. 타설온도와 강도와와의 관계

플라이애시시멘트를 사용한 콘크리트의 타설온도와 재령 2주 이후의 온도가 동일한 경우에 있어서 20℃ 수중양생을 100으로 하여UT을 때의 강도비를 그림 2에 나타낸다.

그림 2에서 타설온도가 낮은 만큼 재령 7일의 강도비가 적음을 알 수 있다. 그러나 재령이 경과함에 따라 온도이력 차이의 영향이 적어짐을 볼 수 있다. 물시멘트비는 초기재령에는 강도비에 영향을

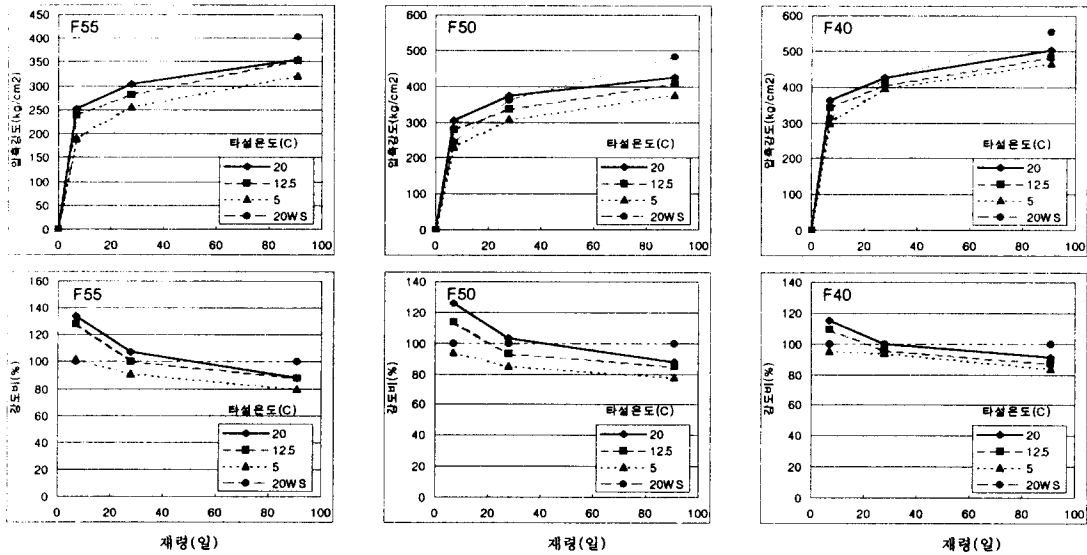


그림 3. 타설온도에 의한 압축강도와 강도비

주지만 재령이 경과함에 따라 적어지는 경향을 보여주고 있다. 전술한 경향들은 보통 포틀랜드시멘트나 중용열 포틀랜드시멘트에서도 동일하게 나타나고 있다. 또한 타설온도 20℃의 강도비는 재령이 경과함에 따라 낮은 타설온도의 강도비와 거의 동일한 값이 되고 있다.

3.2.2. 양생온도와 강도와의 관계

재령 28일 강도를 100으로 한 경우의 강도비를 표 7에 나타낸다.

표 7에 의하면, 보통 포틀랜드시멘트, 플라이애시시멘트, 중용열 포틀랜드시멘트의 순서로 재령이 경과함에 따라 증가율이 커지고 있다. 또한, 양생온도가 낮은 만큼 강도비의 증가율이 커짐을 보여주고 있다.

표 7. 재령 28일 강도를 100으로한 경우의 강도비

온도(℃)	20				12.5				5			
재령(일)	7	14	28	91	7	14	28	91	7	14	28	91
F55	83	91	100	117	85	92	100	125	74	92	100	125
F50	82	90	100	114	83	89	100	122	75	90	100	123
F40	85	94	100	118	84	93	100	119	75	93	100	117
N50	85	97	100	107	82	86	100	111	77	90	100	116
M50	78	87	100	124	71	87	100	122	65	89	100	131

3.2.3. 시멘트종류와 강도와의 관계

보통 포틀랜드시멘트를 100으로 하였을 경우에 있어서 각종 시멘트의 강도비를 표 8에 나타낸다.

표 8로부터 재령 7일에 있어서 각종 시멘트의 강도발현은 보통 포틀랜드시멘트, 플라이애시시멘트, 중용열 포틀랜드시멘트의 순서로 작아짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 양생온도가 낮은 만큼 현저하게 나타나고 있다. 재령 28일의 경우에도 다른 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트보다 저하하여서 플라이애시

시멘트 7%~14%, 중용열 포틀랜드시멘트 5%~7%정도의 감소를 보여주고 있다. 재령 91일의 강도발현에서 플라이애시시멘트는 보통 포틀랜드시멘트보다 작은데 비하여, 중용열 포틀랜드시멘트는 오히려 커지고 있다. 이러한 경향은 관리용 공시체의 경우와 거의 동일하다.

표 8. 보통 포틀랜드시멘트를 100으로한 경우의 강도비

온도(℃)	20				12.5				5			
	7	14	28	91	7	14	28	91	7	14	28	91
N50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F50	90	86	93	99	85	89	86	93	85	89	88	93
M50	85	84	93	107	83	95	93	104	79	94	95	107

3.2.4. 정탄성계수와 압축강도와의 관계

압축강도와 정탄성계수와의 관계를 그림4에 나타낸다.

정탄성계수는 압축강도의 1/3 응력점에 있어서 세컨트 모듈러스(Secant Modulus)로 표시한 것으로서, 시멘트 종류에 상관없이 압축강도에 의해서 결정된다고 볼 수 있다. 여기서, 실험에 이용한 공시체는 수분의 증발이 없는 조건이었다. 이러한 경향은 관리용 공시체의 경우에도 거의 동일하게 나타나고 있다.

3.3. 적산온도

본 실험에서 채택한 적산온도의 적산식은 $M = \sum(\theta d + 10)(\theta D \cdot D)$ (여기서, 시간의 단위 day, θd 는 공시체의 양생온도로서 콘크리트의 중심온도)에 의하여 구한 적산온도를 표 9에 나타낸다.

표 9. 적산온도

재령(일)				7	14	28	91
		A	1	324	566	986	2,876
온도 이력	매스콘크리트의 양생 공시체 I	B	1	280	480	795	2,213
		C	1	201	375	621	1,566
		a	1	210	420	840	2,740
	b						
	c						
	관리용 공시체 II	b	2	158	315	630	2,047
		c	2	105	210	420	1,365

각종 시멘트의 적산온도와 강도비(매스콘크리트의 양생용 공시체의 압축강도/재령 28일의 관리용 공시체의 압축강도)와의 관계를 그림5에 나타낸다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 적산온도와 강도비와의 관계는 직선관계로 표시할 수 있으므로 적산온도를 구함에 따라 매스콘크리트부재의 강도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다. 물시멘트비에 의한 적산온도와 압축강도와의 관계를 그림 3에 나타낸다.

물 시멘트비가 적은 만큼 적산온도의 영향이 커지는 것을 볼 수 있다.

그림 3에 의해서 다음의 회귀식을 얻을 수 있었다.

$$F55 : Y = 130\log X + 90 \quad (r=0.982)$$

$$F50 : Y = 147\log X + 85 \quad (r=0.987)$$

$$F40 : Y = 151\log X + 27 \quad (r=0.971)$$

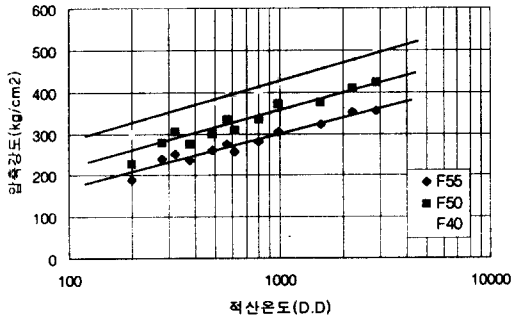


그림 3. 적산온도와 압축강도비

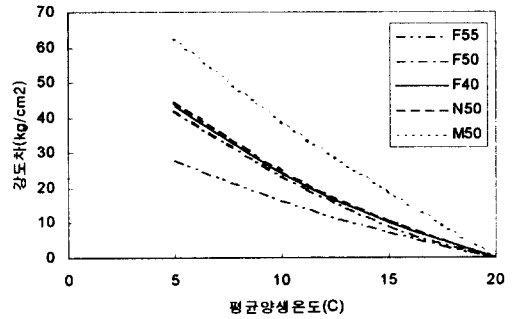


그림 4. 평균양생온도와 강도차

3.4. 평균양생온도

재령 28일까지 매스콘크리트의 양생용 공시체의 온도를 양생기간으로 평균한 경우에 있어서의 평균양생온도와 강도차와의 관계를 그림 4에 나타낸다.

이것은 그림3에서 표시한 회귀식으로 구한 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 재령 28일에서 강도관리를 할 경우에는 그림 4에서 표시한 정도의 강도보정이 필요하다고 추정할 수 있다.

4.결과

매스콘크리트의 강도관리에 필요한 자료를 얻기 위하여, 매스 콘크리트의 온도이력의 조건으로 양생한 공시체와 수중양생한 공시체의 강도발현을 비교검토한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 매스콘크리트의 온도이력으로 양생한 콘크리트 공시체의 강도는 수중양생한 공시체의 강도보다 초기에는 증가하고, 장기에는 저하한다.
- (2) 수분조건이 동일하다면 정탄성계수는 압축강도에 의해서 결정된다.
- (3) 매스콘크리트에서도 적산온도와 압축강도, 정탄성계수 사이에는 직선관계에 있다.
- (4) 저온기에 시공되고 있는 매스콘크리트는 강도를 보정할 필요성이 있고, 강도를 보정할시에는 적산온도를 이용할 수 있다.

참고 문헌

1. J. C. Saemann, "Variation of Mortar and Concrete Properties with Temperature", Journal of ACI No.54, 1957.
2. 地濃茂雄, "콘크리트의 凝結硬化及びに強度發現性狀に及ぼす溫度履歷條件の影響", 東京工業大學 博士學位論文 1982.
3. 高橋久雄, "마스콘크리트의品質管理上の問題點の檢討", セメントコンクリート, 1982. 5.
4. 閑田 澈志의 2人, 「水和熱に起因する高温履歷を受ける超高強度コンクリートの強度性狀」, 「日本建築學會講演梗概集」, 日本建築學會, 1991.