



동해방지를 위한 초기재령 콘크리트의 최소 양생 시간 예측

배수원¹⁾ · 이성태²⁾ · 김진근^{3)*}

¹⁾GS건설(주) ²⁾충청대학 토목공학과 ³⁾한국과학기술원 건설및환경공학과

Minimum Curing Time Prediction of Early Age Concrete to Prevent Frost Damage

Su-Won Pae¹⁾, Seong-Tae Yi²⁾, and Jin-Keun Kim^{3)*}

¹⁾Civil Structure Team, GS Engineering & Construction, Seoul 135-985, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chung Cheong University, Cheongwon 363-792, Korea

³⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-338, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to propose a method to predict the minimum curing time of early age concrete required to prevent frost damage. Tests were performed to examine major factors, which affect the compressive strength of concrete frozen at early ages and investigate the source of frost damage at early age concrete. The results from the tests showed that the loss rate of compressive strength decreases as the beginning time of frost damage was delayed and water-cement ratio was lower. In addition, the test results also showed that concrete made with type III cement was less susceptible to frost damage than concrete made with ordinary Portland cement and frost damage occurred through the formation of ice lenses. When early age concrete is being damaged by frozen, a phase transition into ice of free water presented at the capillary pores of the concrete gives a reason for the decrease of compressive strength. Accordingly, the frost resistance of fresh concrete can be determined based on the saturation degree of the capillary pores. The method to predict the minimum curing time was suggested using the concept of critical saturation degree of the capillary pores.

Keywords min. curing time, frost damage, early age concrete

1. 서 론

콘크리트가 경화되기 전에 심한 기상작용을 받아 동해를 입는 경우 콘크리트의 강도, 수밀성 및 내구성 등이 저하된다. 강도의 감소율은 여러 조건에 따라 달라지지만, 동해를 입기 전에 콘크리트의 강도가 어느 정도 발현되어 있으면 콘크리트는 동해에 대한 저항성을 발휘하여 강도의 감소가 심하게 일어나지 않는다. 그러나, 현재까지도 콘크리트의 동해저항성을 발휘하는 시기를 정확하게 예측하는 것은 쉽지 않은 상황이다. 일반적으로, 최소 양생 시간과 최소의 소요 압축강도를 그 기준으로 삼고 있는데, 이는 동해를 입기 전에 최소 양생 시간 동안 충분히 양생되거나 최소의 소요 압축강도만 발현되면 콘크리트는 동해저항성을 충분히 발휘하여 초기동해로 인한 성능저하가 발생하지 않는다는 개념이다. 이 최소의 소요 압축강도는 실험을 통하여 결정된 규정으로, 참고할 수 있는 기준이지 절대적인 값이 아니다. 즉, 초기

동해에 대한 저항성은 외부환경이나 콘크리트 재료의 특성, 배합조건 등 여러 가지 요인에 따라 달라지므로, 최소 양생 시간과 최소의 소요 압축강도는 반드시 현장 실험을 통하여 결정해야 한다. 그러나, 현장 실험에서 모든 영향인자들을 고려해서 최소 양생 시간을 예측하는 것은 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라, 다양한 실험변수로 인해 예측 결과가 부정확하고 경제적 측면에서도 바람직하지 못한 방법이 될 수 없다.

따라서, 이 연구에서는 초기동해에 관한 이론적인 연구와 실험을 통해 콘크리트의 동해저항성에 가장 큰 영향을 미치는 영향인자를 찾아내고, 시멘트의 수화도를 이용한 최소 양생 기간의 예측법을 제시한 후, 예측 결과와 실험 결과를 비교하고자 한다.

2. 초기재령 콘크리트의 동해에 대한 이론

2.1 초기동해를 입은 콘크리트 압축강도의 감소 원인

초기재령에 콘크리트가 동해를 입어 성능이 저하되는 원인은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 콘크리트

*Corresponding author E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr
Received April 5, 2006, Accepted November 30, 2006
©2007 by Korea Concrete Institute

내에 생성된 얼음결정의 성장이다. 얼음결정은 골재표면에 모여 있는 블리딩수에 의해 형성되는데, 결정이 성장하기 위해서는 근처의 시멘트페이스트에서 물을 끌어낸다. 그 결과, 페이스트에는 공극이 생기며, 이로 인해 페이스트의 분리가 발생한다. 이 과정은 콘크리트를 다시 상온에서 양생해도 회복되지 않고, 형성된 얼음결정은 녹아서 골재입자와 주위의 모르타르 경계에 큰 공극을 남기게 된다. 둘째는 얼음결정의 부피팽창으로 인한 콘크리트내의 파괴응력의 발생이다. 경화되기 전 콘크리트에는 많은 양의 자유수가 존재하는데, 콘크리트가 동결되면 페이스트 내의 물이 상변화를 일으키면서 부피팽창을 일으켜 페이스트 내에 응력을 유발한다. 이 경우 발생하는 파괴응력을 저항할 수 있는 충분한 강도가 발현되지 않았다면, 콘크리트 내부조직이 파괴되어 압축강도의 감소와 같은 성능저하가 발생한다¹⁻³⁾.

2.2 초기동해를 입은 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향인자

초기재령에 동해를 입은 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 인자에는 동해기간, 동해온도, 동해시점, w/c, 시멘트의 종류, 공기량, 그리고 동해를 입기 전 양생온도 등이 있다. Bernhardt¹⁾는 동해기간, 동해온도, 동해시점 및 공기량을 주요변수로 하여 초기동해에 관한 실험을 수행하였는데, 초기재령에서 콘크리트의 동해저항성은 동해기간과 온도에 영향을 받지 않으며, 동해시점이 가장 큰 영향을 미친다고 하였다. 그 이유는 콘크리트 내부에 동결가능한 자유수의 양이 작아 얼음결정이 형성되는 시간이 오래 걸리지 않기 때문에 최소한의 동해기간만 확보되면 얼음결정이 형성되기 때문이며, 동해온도 역시 콘크리트 내의 자유수가 동결되는 온도이하로만 내려간다면 얼음결정이 형성되기 때문에 동해에 의한 성능저하는 동해온도와 상관이 없는 것이다. 공기량에 관한 연구도 수행되었는데, Bernhardt¹⁾와 Corr⁴⁾는 AE제의 경우, 초기재령 콘크리트의 동해에 의한 성능저하를 방지하는데 효과가 없다고 하였다. 그 이유는 콘크리트가 경화되기 전에 동해를 입으면, 콘크리트 내 공극벽의 낮은 강도와 공극벽 주변의 자유수들이 얼음결정을 형성하여 공극벽을 떨어냄으로서 공극의 모양은 제대로 형성되지 못하고, 제 기능도 발휘하지 못하기 때문이다. 따라서, 초기재령에서 동해를 입은 콘크리트의 압축강도에 직접적인 영향을 미치는 인자는 동해시점, w/c, 시멘트의 종류 그리고 동해를 입기 전 양생온도인 것으로 판단된다.

2.3 초기동해를 입은 콘크리트의 동해저항성

콘크리트는 초기동해에도 저항성을 발휘한다. 즉, 동해를 입기 전에 콘크리트의 수화반응이 어느 정도 발현이 되면 동해로 인한 콘크리트 성능저하가 일어나지 않는다. 앞에서 설명한 바와 같이, 콘크리트의 동해저항성에 미

치는 영향인자에는 여러 가지가 있고, 동해저항성 발현 시점을 정확히 예측하기도 어렵다. 그러나, 초기동해로 성능저하가 발생하는 원인이 콘크리트 내에 형성되는 얼음결정인 것을 감안하면, 동해저항성은 동해를 입기 전 얼음결정이 형성되기 위한 조건에 따라 달라질 것이다. 즉, 콘크리트에서 동해저항성이 발현되는 이유는 수화가 진행되면서 얼음결정의 팽창압력에 대한 페이스트의 저항성 발현과 배합수의 많은 부분이 시멘트와 결합하여 동결수량이 감소하고, 자유수의 대부분이 미세공극에 존재하게 되어 쉽게 얼지 않기 때문이다. 결국, 동해를 입기 전에 콘크리트 내에 존재하는 자유수 양이 동해저항성 발현의 유무를 판단할 수 있는 중요한 기준이 됨을 알 수 있다.

2.4 동해방지를 위한 최소 양생 시간의 예측 이론

강도의 함수로 콘크리트의 동해저항성을 판단하는 것은 동해를 입었을 때 발생하는 내부의 파괴응력을 견딜 수 있을 만큼 시멘트페이스트가 충분한 강도발현을 한다는 것을 의미한다. 동해 과정에서 발생하는 응력의 크기 관점에서, 특정한 시간이 지나 동해에 대한 저항성이 발생한다는 것은 강도의 발현이 아니라 동해시 발생하는 파괴응력의 감소에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 파괴응력의 감소는 초기재령의 경화기간 동안 페이스트 내에 존재하는 모세공극의 포화도가 감소하였기 때문이다. 즉, 동결가능한 자유수의 양이 줄어들어 동해를 입더라도 얼음결정이 쉽게 성장하지 못해 공극의 크기가 작아지고, 팽창압력이 줄어드는 것이다. 모세공극의 포화도를 정확히 측정하기는 어렵지만, 타설 후에 외부와의 수분이동이 없고, 시멘트 경화체를 미수화시멘트, 공극, 및 시멘트 겔로 생각하면, 포화도는 수화도와 w/c로 나타낼 수 있다. Powers⁵⁾는 이러한 임계포화도의 개념으로 초기재령 콘크리트의 모세공극의 포화도를 계산하고, 기존의 연구 결과로부터 얻은 임계포화도(약 97%)를 이용하여 최소 양생 시간을 w/c의 함수로 다음과 같이 표현하였다.

$$\log t = 1.18 w/c + 0.53 \quad (1)$$

여기서, t 는 최소양생시간, w/c는 물-시멘트비이다. 이론과 실험에 근거한 이 식은 동해저항성의 발현을 위해 필요한 최소 양생 시간을 w/c의 함수로 나타내고 있다. 그러나, Powers⁵⁾는 초기재령 콘크리트의 숙성도를 log함수로 단순화시켰는데, 실제 초기재령에서 콘크리트의 숙성도는 여러 조건에 따라 달라지므로, 이에 대한 정확성은 여전히 부족하다고 할 수 있다. 실제 Powers⁵⁾가 제시한 최소 양생 시간 식의 결과는 다른 연구자들의 실험 결과와 많은 차이를 보이는데, 이것은 초기재령의 숙성도 차이에 따른 결과이다.

따라서, 본 논문에서 소개되는 최소 양생 시간의 예측법은 포화도의 감소에 따른 동해저항성의 발현 이론에 기

초하여, 단일온도상승 실험으로부터 구한 초기재령의 수화도를 이용하여 최소 양생 시간을 예측하는 것이다.

3. 콘크리트의 동해 실험

3.1 실험 개요

본 연구에서는 양생온도를 20°C로 일정하게 유지하고, 동해시점, w/c, 시멘트의 종류가 초기재령에 동해를 입은 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 구명하고자 실험을 수행하였다. 실험은 실험 1, 실험 2 및 실험 3으로 나누었다. 먼저 콘크리트 내부의 위치에 따른 성능저하 정도를 확인하고 동해기간과 동해시점의 결정을 위하여 실험 1과 실험 2를 실시하였다. 우리나라에서는 겨울철 최저온도가 -10°C이하로 내려가는 경우가 드물기 때문에 동해온도는 -10°C로 하였고, 동해기간은 한밤중에 심한 기상상태가 최대로 지속되어도 10시간 이하이므로 실험 1에서 6시간, 실험 2와 실험 3에서 12시간으로 하여 실험을 실시하였다. 동해시점에 따른 공시체의 이름은 타설 직후, 타설 후 6시간, 12시간, 1일, 그리고 3일에 각각 A, B, C, D, E로 하였고, 실험 1과 실험 2에서 w/c는 55%로 그리고 실험 3에서는 Table 1에 따른 실험을 실시하였다.

3.2 배합설계 및 실험 방법

실험에 사용된 냉동기기는 Fig. 1에서와 같이 -24~0°C 범위내의 설정온도를 일정하게 유지시킬 수 있는 용량 500l의 전기 냉동고이다. 이 실험에서 사용한 콘크리트

Table 1 Mixture proportions of concrete

w/c (%)	Unit weight (kg/m ³)				Ad ¹⁾ (%)
	W	C	S	G ²⁾	
30	175	583	591	999	1.0
50	175	350	752	1,031	0.3
55	185	342	729	1,030	0.3
60	175	292	849	1,030	-

¹⁾Superplasticizer, ratio of cement weight

²⁾Max. aggregate size of 19 mm

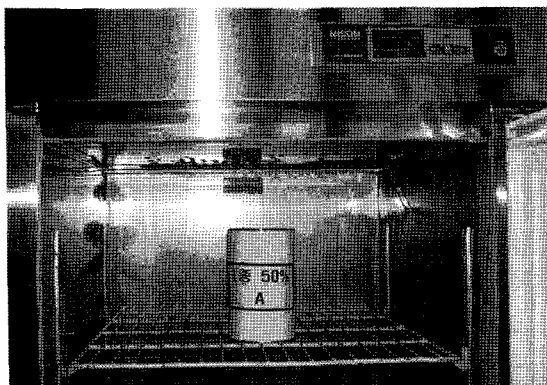


Fig. 1 Inside view of electric freezer

의 배합설계는 Table 1과 같다. 공시체로는 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주공시체를 사용하였고, 공시체의 온도이력을 조사하기 위해 공시체 내부에 열전대(thermocouple)를 설치하였으며, 그 위치는 Fig. 2와 같다. 타설 후에 동해를 입은 공시체를 제외한 모든 공시체를 온도 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 상대습도 60%의 항온항습실에 2일 동안 밀봉 양생한 후에 탈형했으며 압축강도실험 전까지 수중양생하였다.

3.3 동해 실험 1

실험 1에서 동해온도는 -10°C, 동해기간은 6시간으로 하였고 공시체에는 위치별로 3개의 열전대를 설치하였다. 동해시점에 따른 공시체의 구분은 Table 2에 나타나 있다.

3.4 동해 실험 1의 결과

Fig. 3은 동해를 입은 순간부터 12시간 동안 공시체 내부의 온도이력을 나타낸 것이며, 범례에서 숫자(1, 2, 및 3)는 각 열전대 번호를 의미한다. Fig. 3으로부터 알 수 있는 바와 같이, 공시체 내부 중앙에서 깊이에 따른 온도차는 거의 없고, 동해시점을 달리해도 깊이별 온도차는 발생하지 않는다. 한편, 온도하강속도와 같은 동결조건을 달리하면 온도차이가 있을 것이므로 이에 대해서는 추가적인 실험이 필요하다고 사료된다. Fig. 4의 재령에 따른 상대압축강도는 동해를 입지 않은 기준공시체와 동해를 입은 공시체에 대한 실험 결과 간의 비로 나타내었으며, 괄호안의 숫자는 동해시점과 중점을 나타낸다.

Table 2 Plan of Test 1 specimens

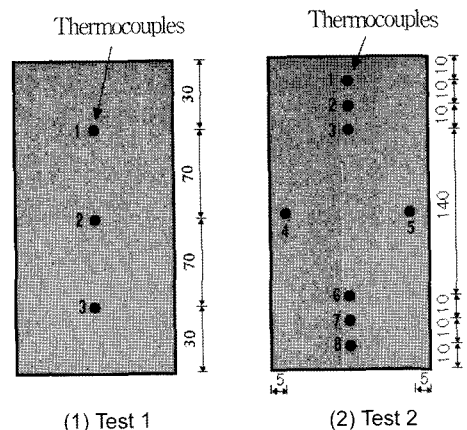
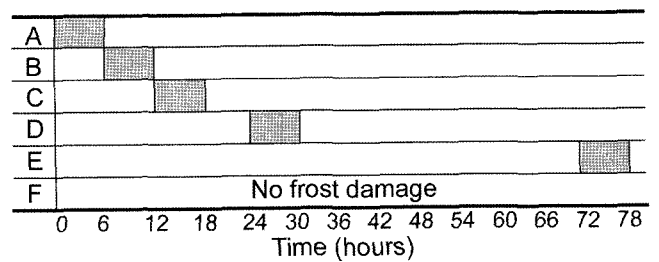


Fig. 2 Locations of thermocouples (unit : mm)

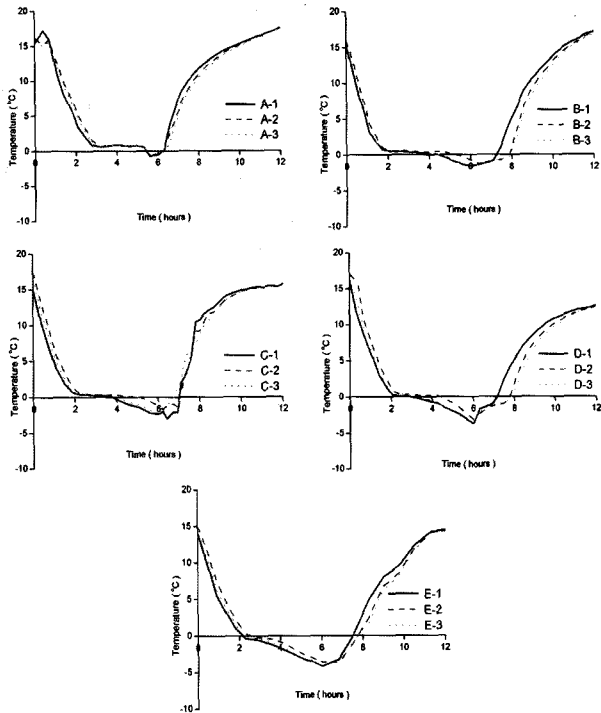


Fig. 3 Temperature histories with time of Test 1 specimens

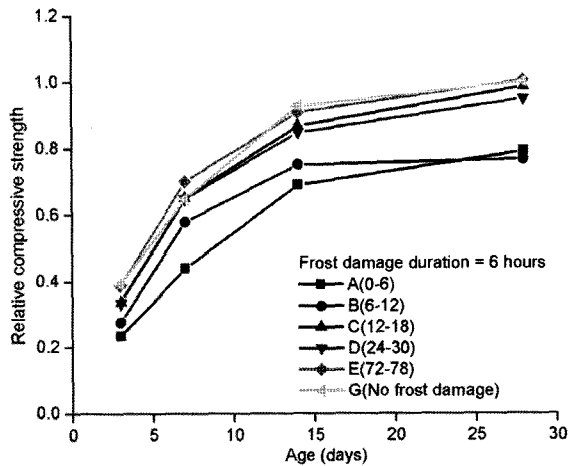


Fig. 4 Relative compressive strengths with age (Test 1)

타설 직후(A)와 6시간 후(B)에 동해를 입은 공시체를 제외한 나머지 공시체는 재령 28일에 강도를 회복하였다.

3.5 동해 실험 2

실험 2에서, 동해온도와 동해기간은 각각 -10°C 와 12시간으로 하였다. 동해시점에 따른 공시체의 구분은 Table 3에 나타나있다. 실험 1의 결과에서 공시체 중앙부에서의 깊이별 온도차가 발생하지 않았으므로, 실험 2에서는 실험 1에서보다 콘크리트의 표면에 가깝게 8개의 열전대를 설치하였다(Fig. 2). 실험 2의 결과가 실험 1과 거의 유사했으므로 이에 대한 비교/검토는 생략하고 다음과 같은 추가적인 실험을 실시하였다. 즉, 공시체를 타설 직후부터 약 20시간 동안은 -20°C 에 두고, 그 후 상

Table 3 Plan of Test 2 specimens

A	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	
B	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	
C	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	
D	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	
E	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	
F	No frost damage															
	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	

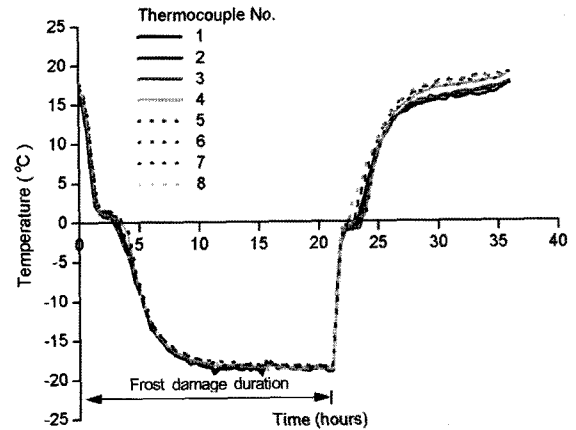


Fig. 5 Temperature histories with time of Test 2 specimens

온에서 16시간 동안 양생하면서, 총 36시간 동안 온도이력을 측정하였다. 온도이력 측정 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 또한 물과 콘크리트가 동결될 때의 온도이력을 얻기 위해 2개의 일회용 몰드에 물만 채워서 열전대를 설치하였다.

3.6 동해 실험 2의 결과

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 표면 가까이에서도 위치에 따른 온도차는 발생하지 않았다. 따라서, $\phi 100 \times 200$ mm 원주공시체가 동해를 입으면 공시체 내부 거의 모든 위치에서 성능저하의 정도가 유사함을 알 수 있다. 공시체의 온도이력곡선에서 확인할 수 있는 바와 같이 0°C 부근까지 온도가 하강하다가 잠시 멈추는 구간이 발생하는데 이 현상은 물의 상변화와 관계가 있다. Fig. 6은 콘크리트와 물의 온도이력을 비교한 결과이다. 물은 액체에서 고체로 변할 때 모든 열에너지가 상변화에 이용되므로 온도가 하강하다가 완전히 고체로 변할 때까지 온도는 일정한 상태로 유지되며, 이 상태의 유지기간은 물의 양에 따라 달라진다. 경화되기 전의 콘크리트에는 자유수가 많아 콘크리트 내의 온도이력도 물의 경우와 비슷하지만, 경화되기 시작하면 콘크리트 내의 물에는 다른 물질이 상대적으로 많이 존재하게 되고 물의 양이 적어지기 때문에 물보다 이 기간이 짧게 지속될 뿐만 아니라, 온도하강곡선의 기울기도 더 크다. 또한, 상온에서 다시 양생할 경우에도 콘크리트의 온도상승곡선의 기울기가 물보다 더 크게 나타나는데, 이는 콘

3.7 동해 실험 3

동해시점을 달리하여 수행한 실험 1과 실험 2의 결과로부터, 시간에 따른 콘크리트 내의 위치별 성능저하 정도는 거의 유사하다는 것과, 동해기간은 동해저항성에 큰 영향을 미치지 않으며, 보통강도의 콘크리트는 타설 후 12시간이 지나면 동해저항성을 어느 정도 발현한다는 사실을 알 수 있었다.

따라서, 실험 3에서 동해온도는 -10°C , 동해기간은 12시간으로 일정하게 하고, 실험변수를 동해시점, w/c, 그리고 시멘트의 종류로 하여 실험을 실시하였다. 시멘트의 종류에 있어서는 최근 동절기 공사에서 3종 시멘트의 사용이 증가하고 있으므로 1종 시멘트와 3종 시멘트에 대한 실험을 수행하였다. 상세한 실험계획은 Table 4에 나타나 있다. 압축강도의 측정은 재령 1, 3, 7, 14, 28 및 60일에 실시하였고, 실험 결과는 Fig. 8에 나타내었다. Table 5는 재령 28일에 각 공시체별로 동해를 입지 않은 공시체의 압축강도에 대한 동해를 입은 공시체의 압축강도 비를 나타낸 것이다.

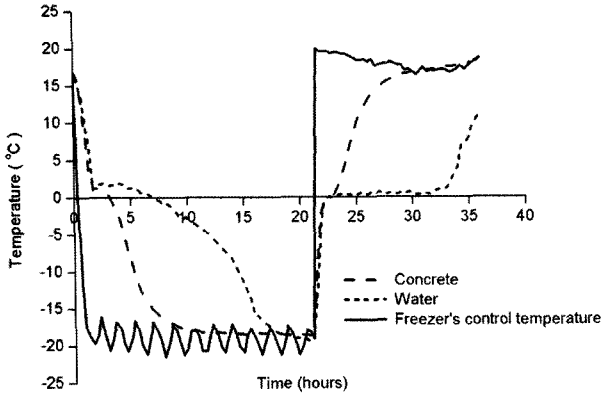


Fig. 6 Comparison between temperature histories of concrete and water

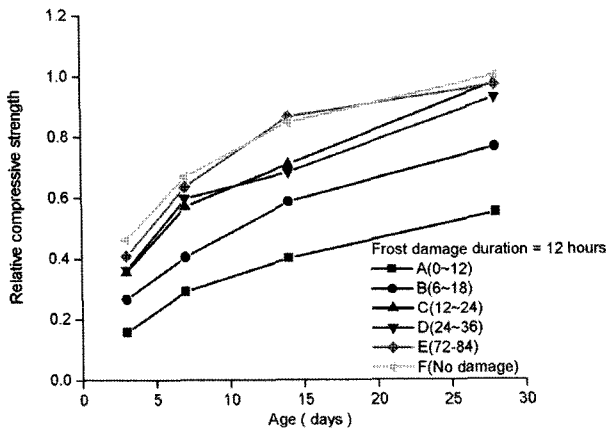


Fig. 7 Relative compressive strengths with age (Test 2)

크리트 내의 얼었던 자유수가 녹아서 시멘트와 수화반응을 일으켜 콘크리트 내부의 온도가 빠르게 상승하는 것이다. Fig. 7의 압축강도 실험 결과에서는 실험 1과 마찬가지로 (A)와 (B) 공시체를 제외하고는 28일에 모든 공시체가 강도를 회복하였다.

Table 4 Plan of Test 3 specimens

Specimen	0	6	12	18	24
A	No frost damage				
B	No frost damage				
C	No frost damage				
D	No frost damage				

(a) Beginning time and duration of frost damage

w/c	30%		50%		60%	
	I	III	I	III	I	III
Cement type	A	A	A	A	A	A
Freezing condition	B	B	B	B	B	B
	C	C	C	C	C	C

(b) Main test variables

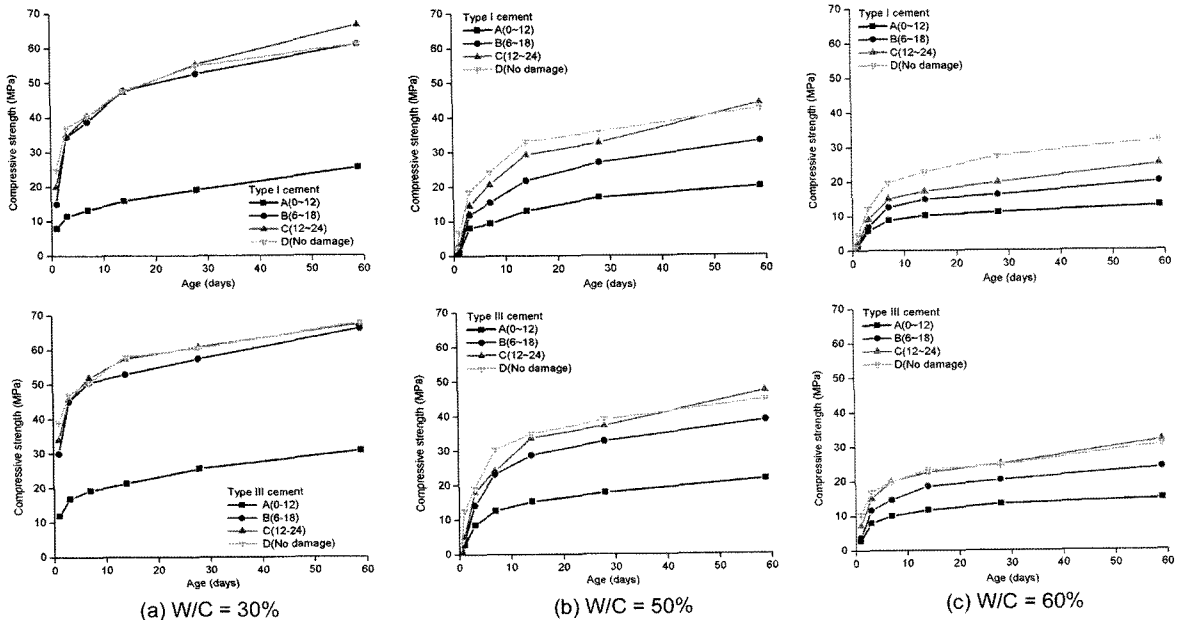


Fig. 8 Relative compressive strengths with age (Test 3)

Table 5 Relative compressive strengths at 28 days (Test 3)

Freezing condition	30%		50%		60%	
	I	III	I	III	I	III
A(0-12)	0.35	0.42	0.47	0.49	0.40	0.55
B(6-18)	0.96	0.96	0.67	0.90	0.59	0.83
C(12-24)	1.01	1.00	0.91	1.02	0.72	1.01
D(no damage)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

3.8 동해 실험 3의 결과

Fig. 9는 $w/c = 50\%$, 1종 시멘트 콘크리트 내부의 온도 이력을 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트가 -10°C 에서 12시간 동안 동해를 입었을 경우, 콘크리트의 내부온도는 -10°C 까지 내려가지 않고 약 $-8\sim-7^{\circ}\text{C}$ 까지 내려간다. 0°C 까지 온도가 내려가는데 걸리는 시간도 약 3시간이므로 실제 동해를 입은 시간은 약 9시간 정도로 생각할 수 있다.

Fig. 10은 동해 시점과 상대 압축강도의 관계를 나타내고 있다. 타설 직후에 동해를 입었을 경우, 모든 공시체는 50~70%의 영구적인 강도 손실을 입었다. 타설 후 6시간 양생을 한 공시체의 경우, I-60% 공시체가 약 50%, I-50% 공시체는 약 38%의 강도 손실을 보였다. 타설 후 12시간 양생을 한 공시체의 경우, I-50%와 I-60% 공시체를 제외하곤 강도 손실이 발생하지 않았다. 타설 직후에 동해를 입은 모든 공시체에서는 얼음결정의 흔적이 관찰되었는데, 영구적인 강도 손실의 원인은 바로 이 얼음결정의 형성인 것으로 판단된다. 타설 직후에는 콘크리트 내에 자유수가 많고 얼음결정의 성장을 막을 수 있는 강도의 시멘트페이스트가 충분치 않아 얼음결정이 잘 성장할 수 있다. 6시간 이후부터 동해에 의한 강도 손실이 줄어드는 이유는 이 때부터 콘크리트 내에 존재하는 자유수의 양이 많이 줄어들고, 수화반응이 진행되어 시멘트페이스트가 어느 정도의 강도 발현을 한 상태여서 얼음결정이 쉽게 성장하지 못할 뿐만 아니라, 얼음결정의 형성을 위한 물의 이동이 더욱 어려워지기 때문이다.

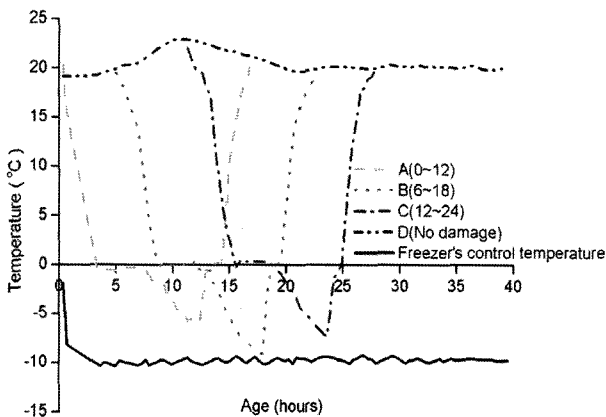


Fig. 9 Temperature histories with time of Test 3 specimens

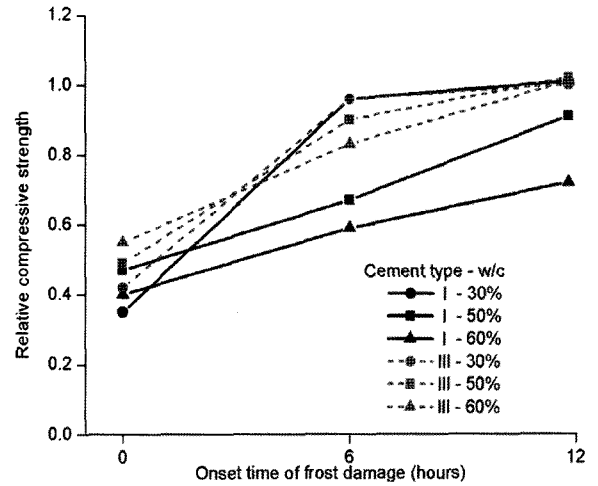


Fig. 10 Relative compressive strengths with onset time of frost damage

Fig. 11은 시멘트의 종류에 따른 상대 압축강도비를 나타내고 있다. 3종 시멘트 콘크리트는 1종 시멘트 콘크리트보다 강도감소율이 낮게 나타나는데, 이는 3종 시멘트의 경우 경화속도가 빨라 초기재령에서 페이스트 내의 자유수가 급속히 감소하여 얼음결정의 형성이 그 만큼 어려워지기 때문이다. Fig. 12는 동해 시점에 따른 w/c 와 상대 압축강도비를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, w/c 가 증가할수록 강도감소율이 증가한다. 즉, w/c 가 높을수록 콘크리트 내의 자유수가 많이 존재하여 얼음결정의 형성을 위한 조건이 좋아지는 것이다. Fig. 13은 타설 직후 동해를 입은 공시체와 동해를 입지 않은 공시체의 내부를 재령 28일에 SEM 현미경을 이용하여 촬영한 사진이다. Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이 동해를 입지 않은 공시체와 비교할 때, 동해를 입은 공시체 내부는 얼음결정의 성장으로 인해 큰 공극이 생겼고 내부 조직 자체가 많이 손상된 것을 확인할 수 있다.

4. 최소 양생 시간 예측법의 제안

4.1 개요

콘크리트의 동해저항성은 동해를 입기 전 콘크리트 내

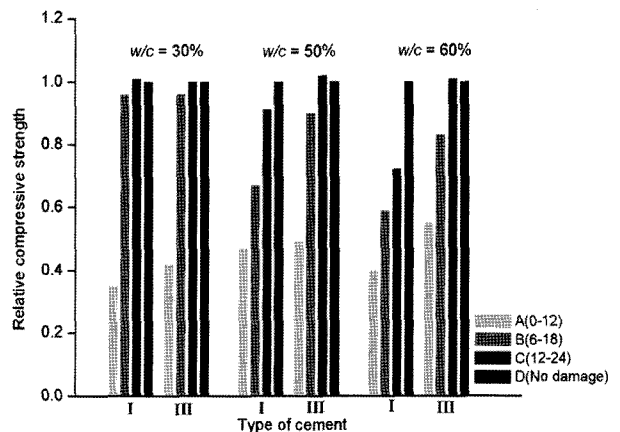


Fig. 11 Relative compressive strengths with cement type

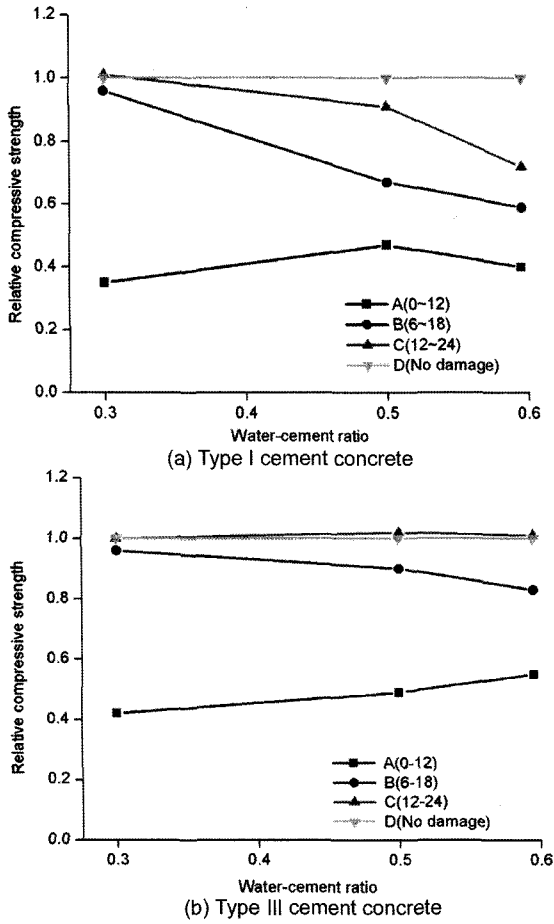
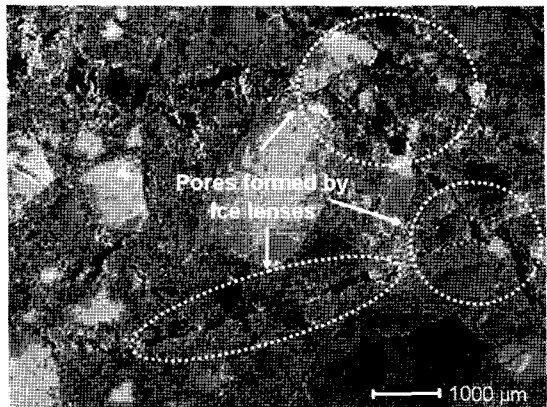
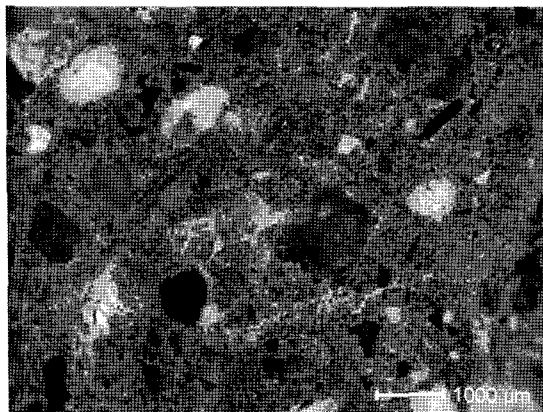


Fig. 12 Relative compressive strengths with w/c



(a) Specimen A (damaged by frost just after placement)



(b) Specimen D (No frost damage)

Fig. 13 SEM photographs of specimens A and D

에 존재하는 자유수의 양에 따라 결정된다. 그러나, 실제 이 자유수의 양을 정확하게 예측하는 것은 거의 불가능하므로, 모세공극의 포화도를 그 기준으로 사용한다. 시멘트 경화체를 단순하게 시멘트 겔, 공극 및 미수화 시멘트로 나눈다면, 동결가능한 물은 모두 공극에 존재한다. 공극에는 겔공극과 모세공극이 있는데, 겔공극의 물은 물리적 결합력이 강해 일반적인 대기습도 상태에서 이동하지 않을 뿐만 아니라, 빙점이 약 -78°C 에 이르기 때문에 동해를 입어도 동결팽창과는 무관하다. 따라서, 자유수는 모두 모세공극 내에 존재하게 된다. 콘크리트 내의 이 자유수의 양은 모세공극의 포화도(S_c)로 나타낼 수 있으며, 콘크리트 타설 후 외부와의 수분 이동이 없다면, 모세공극의 포화도는 w/c와 수화도의 함수로 나타낼 수 있다. 수화도는 재령의 함수이므로 모세공극의 포화도가 임계포화도에 도달했을 때, 그 때의 재령이 바로 초기 동해 방지를 위한 최소 양생 시간이 되는 것이다. 본 장에서는 위의 내용을 기본으로 새로운 최소 양생 시간 예측법을 제안하고자 한다.

4.2 최소 양생 시간의 예측에 영향을 미치는 인자

4.2.1 콘크리트 내의 모세공극의 포화도

콘크리트 타설 후에 외부와의 수분이동이 없다면, 모세공극의 포화도는 수화생성물의 부피변화를 통해 구할 수 있다. 계산의 편의를 위해 시멘트 경화체의 구성을 시멘트 겔, 미수화 시멘트, 및 공극으로 단순화하여 단위시멘트량(1g)을 기준으로 모세공극의 포화도를 계산하기로 한다^{3,6)}.

콘크리트 내에 존재하는 물의 양은 두 가지 형태(즉, 증발수량과 미증발수량)로 나눌 수 있다. 증발수량은 모세공극과 겔공극 내의 물이며, 미증발수량은 수화생성물에 결합되어 600°C 이상의 고온에서만 증발되는 흡착수량이다. 이 미증발수량(w_n)은 시멘트 중량의 약 23%에 α 를 곱하여 식 (2)로 나타낼 수 있다³⁾.

$$w_n = 0.23 \alpha \quad (2)$$

여기서, α 는 시멘트의 수화도이다. 이 식에서 $\alpha = 1.0$ 이면 모든 시멘트가 수화되어 시멘트 1g에 0.23g의 물이 수화생성물과 결합한다는 의미이다. 다음으로, 수화반응에 의해 생성되는 시멘트 겔의 부피는 아래의 수식으로 표현할 수 있다³⁾.

$$V_{cg} = \frac{\alpha}{\rho_c} + \frac{w_n}{\rho_w}(1 - 0.254) \quad (3)$$

여기서, V_{cg} 는 시멘트 겔의 부피, ρ_c 는 시멘트의 비중, 그리고 ρ_w 는 물의 비중이다. 시멘트 겔은 전체 부피의 약 28%가 물이므로 시멘트 겔에서의 증발수량은 다음과 같이 구할 수 있다³⁾.

$$\frac{w_g}{V_{cg} + w_g} = 0.28 \rightarrow w_g = 0.389 V_{cg} \quad (4)$$

여기서, w_g 는 시멘트 겔에서의 증발수량이다. 따라서, 식 (2)와 식 (4)로부터 시멘트 겔에 사용된 물의 총량을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_t = w_n + w_g = 0.23\alpha + 0.389V_{cg} \quad (5)$$

여기서, w_t 는 시멘트 겔에 사용된 물의 총량이다. 그리고, 시멘트 겔의 총부피는 수화반응에 의해 생성되는 시멘트 겔의 부피와 시멘트 겔 증발수의 부피의 합으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$V_{cg, t} = V_{cg} + w_g = 1.389V_{cg} \quad (6)$$

여기서, $V_{cg, t}$ 는 시멘트 겔의 총 부피이다. 모세공극의 부피(물로 채워진 것 + 공기로 채워진 것)는 초기 상태의 전체부피(시멘트 + 물)에서 수화반응으로 생성된 시멘트 겔의 총 부피를 제외한 나머지 부피이므로,

$$V_{cp} = \left\{ \frac{w/c}{\rho_w} + \frac{\alpha}{\rho_c} \right\} - V_{cg, t} \quad (7)$$

여기서, V_{cp} 는 모세공극의 부피이다. 마지막으로, 모세공극에 존재하는 물의 양 역시 초기상태 물의 양에서 시멘트 겔에 사용된 물의 총량을 빼주면 된다. 따라서, 모세공극에 존재하는 물의 양을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_c = w/c - w_t \quad (8)$$

여기서, w_c 는 모세공극 내에 존재하는 물의 양이다. 따라서, 식 (7)과 식 (8)로부터 콘크리트 모세공극의 포화도는 다음과 같이 w/c 와 α 의 함수로 표현할 수 있다.

$$S_c = \frac{w_c}{V_{cp}} = \frac{w/c - w_t}{\left\{ \frac{w/c}{\rho_w} + \frac{\alpha}{\rho_c} \right\} - V_{cg, t}} \quad (9)$$

4.2.2 초기재령에서 시멘트의 수화도

초기재령에서의 시멘트 수화도 이론으로는 과거 여러 연구자들⁷⁻⁹⁾이 제안한 숙성도 개념의 지수함수와 포물선 함수 등이 있다. 하지만, 기존의 강도식 및 숙성도 개념의 수화도는 모두 장기재령의 강도를 표현할 목적으로 제안되었으므로, 본 연구에서 다루는 소성상태의 수화도를 정확하게 모사하지 못한다. 또한, 소성상태의 수화도는 w/c , 시멘트의 종류, 타설온도와 단위시멘트량 등 여러 조건에 따라 달라지므로, 일반적인 수식으로 나타내는 것은 어려우며, 보다 정확한 해석을 위해 단열온도상승 실험을 통해 수화도 곡선을 구해야 한다^{9,10)}. 따라서, 본 연구에서는 소성상태의 수화도를 정확하게 모사하기 위해 단열온도상승 곡선을 이용하여 수화도 곡선을 구하였다. 즉, 각기 다른 배합의 시멘트 수화도를 각각의 단열온도상승 실험을 통하여 구하는 것이다. 수화도는 단열온도상승 곡선에서 시간에 따른 수화발열량의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{\max Q} \quad (10)$$

여기서, $Q(t)$ 는 시간에 따른 수화 발열량이고, $\max Q$ 는 최고 발열량이다. Fig. 14는 단열온도상승 곡선을 나타낸 것이고, Fig. 15는 Fig. 14로부터 구한 수화도를 초기재령 구간만 확대하여 나타낸 것이다.

4.3 최소 양생 시간의 예측

Powers⁵⁾는 모세공극의 포화도가 약 97% 이하로 떨어지면, 콘크리트는 동해저항성을 발현하기 시작한다고 하였다. 따라서, 본 연구에서도 임계포화도를 97%로 하고 최소 양생 시간을 예측하였다. 식 (9)를 이용하여 포화도가 임계포화도(97%)에 도달할 때, 1종 시멘트 콘크리트(비중 3.15) 수화도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_c &= \frac{w_c}{V_{cp}} = \frac{w/c - w_t}{\left\{ \frac{w/c}{\rho_w} + \frac{\alpha}{\rho_c} \right\} - V_{cg, t}} \\ &= \frac{w/c - 0.42\alpha}{w/c - 0.36\alpha} \rightarrow S_{cr} = 0.97 \\ &\Rightarrow \alpha = 0.42wc \end{aligned} \quad (11)$$

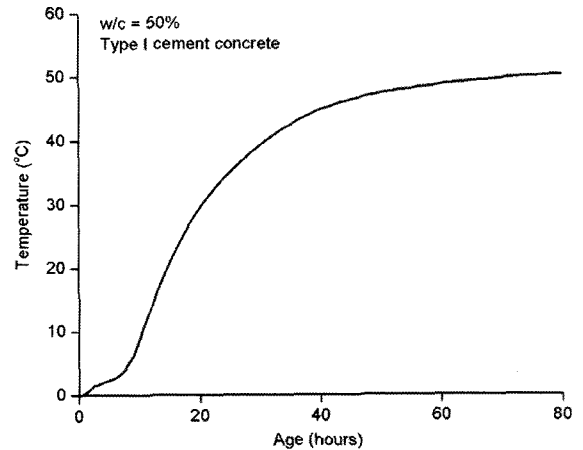


Fig. 14 Adiabatic temperature rise curve

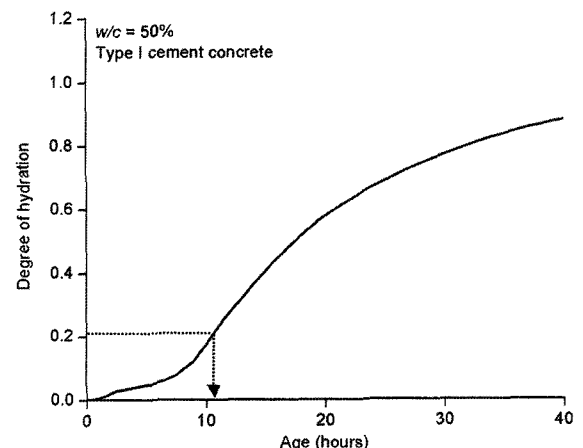


Fig. 15 Degree of hydration with age

여기서, S_{cr} 은 임계포화도이다. 식 (11)에서 알 수 있는바와 같이, 모세공극의 포화도가 약 97%일 때, 수화도가 w/c 의 약 0.42배에 도달하면 콘크리트는 동해저항성을 확보한다는 것이다. 한편, 초기동해를 입지 않기 위해서는 기본적으로 어느 정도의 강도가 발현되어야 한다. 따라서, w/c 가 작은 경우에는 동해에 대한 저항 가능한 강도가 수화도가 작은 시점에서 발현되므로 최소 양생 기간이 짧아지게 된다.

Fig. 14의 단열온도상승 곡선은 $w/c = 50\%$ 에 대한 실험이므로, 식 (11)을 이용하여 동해저항성을 확보하는 재령에서의 수화도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = 0.42w/c = 0.42 \times 0.5 = 0.21$$

따라서, Fig. 15에서 수화도가 0.21일 때의 재령을 구하면 타설 후 약 11시간이 지난 시점이 된다. 즉, Fig. 14의 단열온도상승 실험에 사용된 콘크리트는 초기동해에 대한 성능 저하를 방지하기 위해 동해를 입기 전 최소한 11시간 동안 보호 양생을 해야 한다는 것이다.

4.4 최소 양생 시간에 대한 실험 결과와 해석 결과의 비교

앞의 3장에서 수행한 재령 28일에서의 압축강도 실험 결과(Fig. 8)로부터 콘크리트의 동해저항성이 발휘되기 위한 최소 양생 시간은 Table 6과 같음을 알 수 있다.

3장의 실험에서 사용된 콘크리트의 수화도 곡선을 구해야 하므로, 3장에서와 같은 배합으로 단열온도상승 실험을 수행하였다. 각 배합별 단열온도상승 실험의 결과와 수화도 곡선은 Figs. 16 및 17과 같다. Table 7은 식 (11)을 이용하여 구한 동해저항성이 발현되는 시점에서의 수화도를 나타내고 있다. Fig. 17과 Table 7의 결과를 이용하여 최소 양생 시간을 Table 8과 같이 예측할 수 있다. Fig. 18은 본 연구에서 수행한 최소 양생 시간의 실험 결과와 예측 결과 및 기존의 실험(RILEM¹²)과 모델 식으로부터의 결과(Powers⁵)를 비교하고 있다. 기존의 연구 결과와 본 연구의 결과를 비교해 보면 오차가 발생하는데, 이는 과거와 현재의 시멘트 품질과 골재의 특성, 그리고 실험 조건 등 여러 조건이 달라졌기 때문으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 초기동해를 입은 콘크리트의 압축강도

Table 6 Test results of min. curing time

Cement type	w/c (%)	Min. curing time (hours)
I	30	6
	50	12
	60	More than 12
III	30	6
	50	12
	60	12

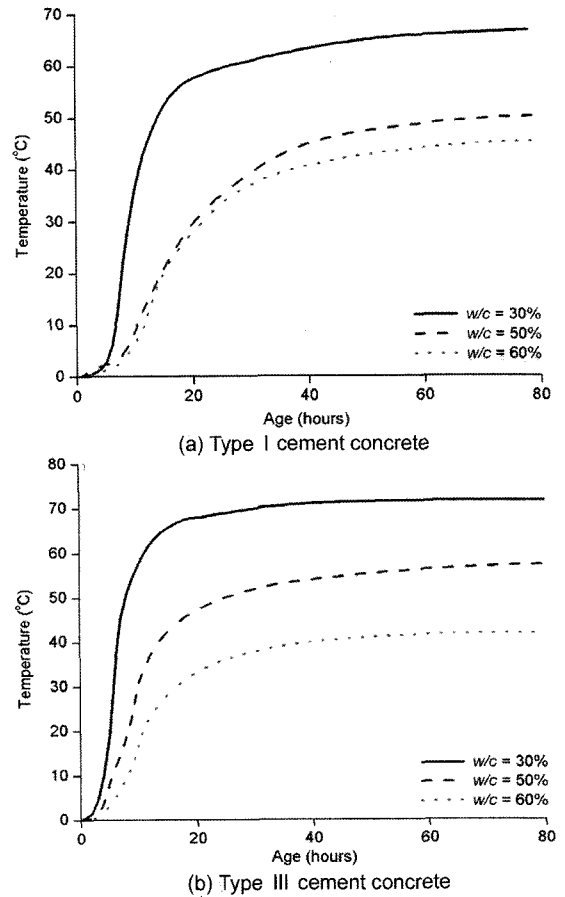


Fig. 16 Results of adiabatic temperature rise test

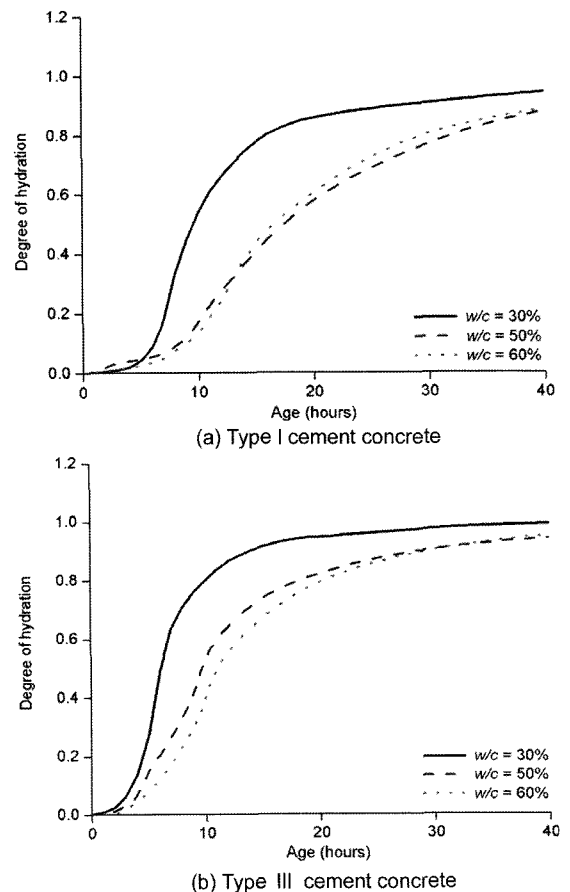


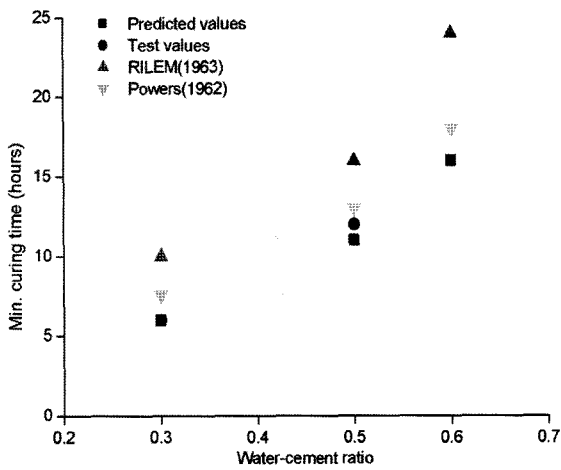
Fig. 17 Degree of hydration curve with age

Table 7 Degree of hydration at the beginning age of frost resistance

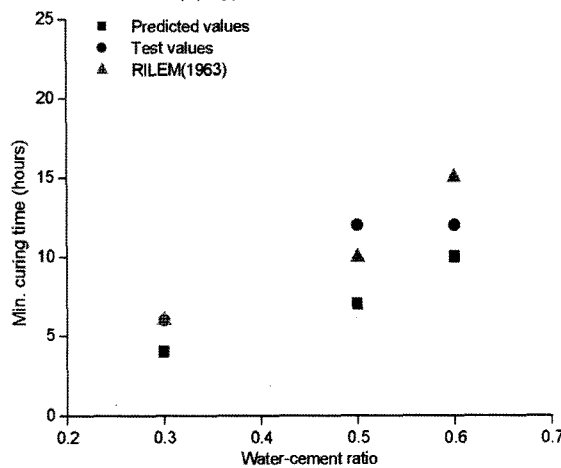
Cement type	w/c (%)	Degree of hydration
I, III	30	0.13
	50	0.21
	60	0.25

Table 8 Predicted values of min. curing time

Cement type	w/c (%)	Min. curing time (hours)
I	30	6
	50	11
	60	16
III	30	4
	50	7
	60	10



(a) Type I cement concrete



(b) Type III cement concrete

Fig. 18 Comparison between test and predicted values

감소에 영향을 미치는 인자인 동해시점, w/c 및 시멘트의 종류에 관한 실험을 수행한 후, 이를 이용하여 수화도에 근거한 최소양생시간 예측법을 제시하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 동해 시점이 빠를수록, w/c가 높을수록 초기 동해

에 의한 압축강도의 감소율이 높아지며, 3종 시멘트보다 1종 시멘트를 사용한 콘크리트가 동해에 의한 압축강도 감소율이 더 높은 것으로 나타났다.

- 2) 동해시점, w/c 및 시멘트의 종류에 관계없이 타설 직후에 동해를 입은 콘크리트는 영구적으로 강도를 회복하지 못하였다.
- 3) 동해를 입은 시간의 직전과 직후에 압축강도를 측정한 결과, 동해를 입는 동안에는 수화반응이 완전히 멈추어 강도의 증가가 나타나지 않았다. 그 후 다시 상온에서 양생한 결과, 압축강도는 회복하는 경향을 보였다. 한편, 압축강도의 회복률은 초기 양생 시간이 길어질수록 증가하였다.
- 4) 초기동해에 의해 압축강도가 감소하는 이유는 콘크리트 내에 얼음결정의 성장으로 인한 공극이 형성되었기 때문이며, 이 얼음결정이 더 성장하기 위해서는 콘크리트 내에 존재하는 자유수의 양이 충분히 남아있어야 한다. 따라서, 동해를 입기 전 자유수 양이 콘크리트의 동해저항성을 결정한다고 판단된다.
- 5) 이 연구에서는 콘크리트 내에 존재하는 자유수의 양을 수화도와 w/c의 함수인 모세공극의 포화도로 나타내었고, 수화도는 각 배합에 대한 단일온도상승 실험으로부터 직접 구했기 때문에 제안된 예측법은 다양한 배합조건에 적용될 수 있을 것이다. 이 논문에서 제시한 예측법은 검증자료의 부족으로 아직은 실무에 적용하기 이른 단계이나, 이 분야에 대한 지속적인 연구를 통해 신뢰성을 높인다면 실제 동절기 공사에서 거푸집 탈형시기를 예측할 수 있는 등 시공 시 상당한 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부(MOCT)의 사회기반시설물 평가중점연구단(ISARC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bernhardt, C. J., "Damage Due to Freezing of Fresh Concrete", *Journal of American Concrete Institute*, Vol.52, No.1, 1956, pp.573~580.
2. George, C. H. and Alan, D. B., "Considerations in the Prevention of Damage to Concrete Frozen at Early Ages", *Journal of American Concrete Institute*, Vol.80, No.5, 1983, pp.371~376.
3. Neville, A. M., *Properties of concrete*, Longman, Malaysia, 1996, 844pp.
4. Corr, D. J., Monteiro, P. J. M., and Bastacky, J., "Microscopic Characterization of Ice Morphology in Entrained Air Voids", *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.2, 2002,

- pp.190~195.
5. Powers, T. C., "Prevention of Frost Damage to Green Concrete", *RILEM Bulletin*, No.14, 1962, pp.120~124.
 6. Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D., *Concrete*, Prentice Hall, USA, 1996, 644pp.
 7. Saul, A. G. A., "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure," *Magazine of Concrete Research*, Vol.2, No.6, 1951, pp.127~140.
 8. Plowman, J. M., "Maturity and the Strength of Concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol.8, No.22, 1956, pp.13~22.
 9. Carino, N. J., "Maturity Functions for Concrete", Proceedings, RILEM International Conference on Concrete Early-Ages, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris*, Vol.1, 1982, pp.123~128.
 10. Gutch, A. W., "Properties of Early Age Concrete-Experiments and Modeling", *Materials and Structures*, Vol.35, 2002, pp.76~79.
 11. 차수원, "콘크리트의 수화도 및 단열온도상승량 예측모델 개발", *콘크리트학회지*, 14권, 1호, 2002, pp.118~125.
 12. RILEM Winter Construction Committee, "Recommendations pour le betonnage en hiver", *Supplement aux Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*, No.190, *Beton*, *Beton Arme* No.72, 1963, pp.1012~1037.

요 약 이 연구의 목적은 초기재령 콘크리트가 동해를 입을 경우가 예상될 때, 동해저항성을 확보하는데 필요한 최소 양생 시간의 예측법을 제안하는 것이다. 먼저, 실험을 통하여 동해시점이 지연될수록, w/c 가 낮을수록, 그리고 1종 시멘트보다 3종 시멘트를 사용한 콘크리트가 동해에 의한 압축강도 감소율이 낮으며 동해는 얼음결정의 형성과 성장을 통해 발생됨을 확인하였다. 초기재령 콘크리트가 동해를 입었을 경우, 콘크리트 내에 존재하는 모세공극의 자유수가 얼음으로 상변화를 일으키면서 압축강도의 감소를 유발하므로 동해저항성은 모세공극의 포화도에 따라 결정된다. 따라서, 모세공극의 임계포화도 개념을 근거로 초기동해의 방지를 위한 최소양생시간의 예측법을 제안하였다.

핵심용어 : 최소 양생 시간, 동해방지, 초기재령 콘크리트