초기동해를 입은 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향인자에 관한 연구

A Study of Influencing Factors on Compressive Strength of Concrete Frozen at Early Ages

배 수 원* 김 진 근** 권 기 주*** 정 원 섭****
Pae, Su Won Kim, Jin-Keun Kwon, Ki Joo Joung, Won Seoup

ABSTRACT

When fresh concrete is exposed to sufficiently low temperature, the free water in the concrete is cooled below its freezing point and transforms into ice, which causes decrease in compressive strength of concrete. Of the many influencing factors on the loss of compressive strength, the age of concrete at the beginning of freezing, water-cement ratio, and cement-type are significantly important. The objective of this study is to examine how the these factors affect the compressive strength of concrete frozen at early ages. The results from the tests showed that as age at the beginning of freezing is delayed and water-cement ratio is low, the loss of compressive strength decreases . In addition, concrete made with high-early-strength cement is less susceptible to frost damage than concrete made with ordinary portland cement.

1. 서 론

콘크리트가 경화되기 전에 심한 기상작용을 받아 동해를 입는 경우 콘크리트의 압축강도는 저하된다. 압축강도의 감소율은 여러 가지 조건에 따라 달라지지만 동해를 입기 전에 콘크리트의 강도가 어느 정도 발현이 되면, 콘크리트는 동해저항성을 확보하여 동해에 의한 압축강도의 감소가 발생하지 않는다. 하지만, 콘크리트가 동해저항성을 확보하는 시기를 정확하게 예측하는 것은 어렵다. 일반적으로, 최소소요압축강도를 그 기준으로 삼고있는데, 동해를 입기 전에 최소소요압축강도만 발현되면 콘크리트는 동해저항성을 충분히 확보한다는 개념이다. 그 기준값은 지역의 기후조건에 따라 매우 다양하며(미국 35kgf/cm^2, 일본 59kgf/cm^2, 캐나다 69~103kgf/cm^2), 우리나라 콘크리트 표준시방서의 한중콘크리트에 대한 규정에도 초기동해에 의한 콘크리트의 성능저하를 방지하기 위해 최소보호양생기간(2~4일)과 최소소요압축강도(50kgf/cm^2)를 규정하고 있다. 하지만, 본 연구에 의하면 콘크리트표준시방서의 규정은 실험결과보다 다소 높게 정해져 있다고 판단된다.

* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 석사과정
** 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 교수
*** 정회원, 한국전력공사 전력연구원, 책임연구원
**** 정회원, 한국전력공사 전력연구원, 연구원

초기재령에서 동해를 입은 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 인자에는 동해기간, 동해온도, 동해시점, 물/시멘트비, 시멘트 종류, 공기량, 그리고 동해를 입기 전의 양생온도 등이 있다 . Bernhardt[1]는 초기재령에서 콘크리트의 동해저항성은 동해온도와 기간에는 영향을 받지 않으며, 동해시점이 가장 큰 영향을 미친다고 하였다. 또한, 그는 AE제 역시 동해저항성에 미치는 효과가 없다고 하였는데, 최근 Corr[2]의 연구결과에 의하면, 경화가 되기 전에 동해를 콘크리트내 공극벽의 낮은 강도와 공극벽 주변의 자유수들이 얼음결정을 형성하여 공극벽을 밀어냄으로서 공극의 모양은 제대로 형성되지 못하고, 제 기능도 발휘하지 못한다고 하였다.

따라서, 본 연구에서는 동해시점, 물/시멘트비, 시멘트종류가 동해저항성에 결정적인 영향을 미친다고 판단하여, 이 인자들이 초기재령에서 동해를 입은 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 구명해 보기로 하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료 및 배합설계

본 연구에서는 동해시점, 물/시멘트비, 시멘트 종류가 초기재령에서 동해를 입은 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 구명하고자 실험을 수행하였다. 본 실험의 사용재료로 시멘트는 국내산 1종, 3종 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 골재로서 잔골재는 강모래(비중 : 2.55, 조립률 : 2.63)를 사용하였으며, 굵은골재는 최대 치수 19 mm인 부순굵은골재(비중 : 2.58, 조립률 : 6.25)를 사용하였다. 다양한 배합의 콘크리트를 제작하기 위해 본 실험에서 수행한 타설 시의 배합들은 표 1과 같다.

표 1 콘크리트 배합

Water -cement ratio(%)	Fine aggregate ratio(%)	Unit weight(kgf/m^3)				
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super plasticizer
30	37	175	583	591	999	1.0%
50	42	175	350	752	1031	0.3%
55	41	185	342	729	1030	0.3%

2.2 실험방법

본 실험에서는 ϕ100×200mm 일회용 원주형 몰드를 사용하였고, 공시체 내부의 온도이력을 조사하기 위해 공시체내에 온도센서(thermocouple)를 설치하였다. 타설 후 모든 공시체는 동해를 입는 기간을 제외하고는 20℃, 상대습도 60%의 항온 항습실에 2일동안 기건 양생한 후 탈형하여 압축강도 시험전까지 수중양생하였다. 동해실험에 사용된 기기는 0℃~-24℃범위내의 설정온도를 일정하게 유지시킬 수 있는 용량 500L의 전기 냉동고이다.

압축강도 시험은 KS F 2405에 따라 3개의 공시체를 기본으로 실시하였다. 시험에 사용된 기기는 250톤 용량의 Instron사의 Closed-Loop Dynamic Material Testing System이며, 압축강도 시험 전에 공시체는 연마기를 사용하여 표면처리를 하였다. 압축강도의 측정은 재령 3, 7, 14, 28일에 실시하였고, 실험결과는 각각 3개 공시체의 평균값으로 하였다.

2.3 예비실험

본 실험을 시작하기 전에 콘크리트 내부의 깊이별 성능저하 정도와 동해기간, 동해시점 결정을 위해 예비실험을 실시하였다. 우리나라의 기후특성상 겨울철 최저 온도가 -10℃이하로 내려가는 경우가 드물기 때문에 동해온도는 -10℃로 하였고, 동해기간은 한밤중에 심한 기상상태가 최대로 지속되더라도 10시간 전후 이므로 6시간, 12시간으로 나누어 예비실험을 실시하였다. 동해시점과 동해기간에 따른 공시체의 구분은 표 2와 3에 나타나있으며, 물/시멘트비는 55%로 하였다. 공시체 내부 온도이력을 측정하기 위해 공시체내에 온도센서를 설치하였고, 그 위치는 그림 1과 같다. 온도이력측정을 위한 공시체는 타설 후 20시간동안 -20℃의 냉동고내에 두고 총 3일 동안 온도를 측정하였다. 또한, 물과 콘크리트가 동결될때의 온도이력을 비교하기 위해 2개의 일회용 몰드에 물만 채워서 센서를 설치하였다. 압축강도 시험결과는 28일 재령에서 동해를 입지 않은 공시체의 압축강도를 기준으로 상대압축강도비로 나타내었다.

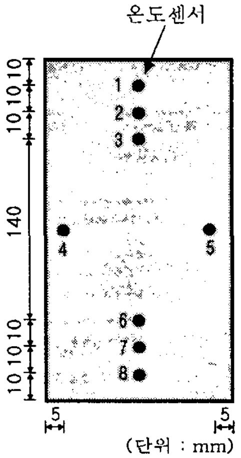


그림 1 온도센서의 위치

표 2 동해기간이 6시간인 경우

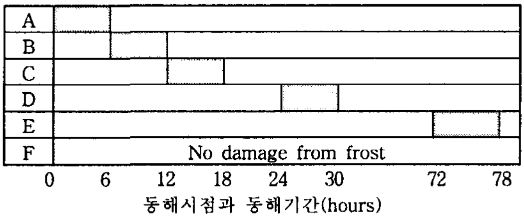
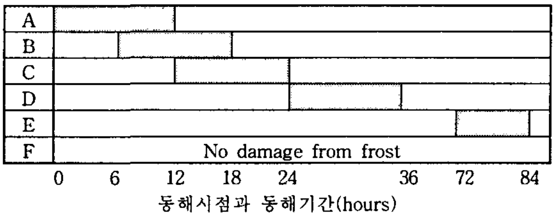


표 3 동해기간이 12시간인 경우



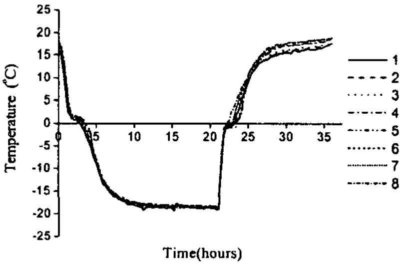


그림 2 공시체내부 위치별 온도이력

2.4 예비실험의 결과

그림 2는 공시체내의 위치에 따른 온도이력을 나타내고 있다. 8개의 온도센서는 시간에 따라 거의 같은 온도이력을 나타내고 있으며, 이는 ϕ100×200mm 원주형 공시체가 동해를 입으면 공시체 전체의 성능저하 정도가 동일하다는 것이다. 또한, 0℃근처에서 온도가 하강하다가 잠시 멈추는 구간이 발생하는데, 이 현상은 물의 상변화와 관계가 깊다. 그림 3은 콘크리트와 물의 온도이력을 비교한 것이다. 물은 액체에서 고체로 변할 때 모든 열에너지가 상변화에 이용되므로 온도가 하강하다가 완전히 고체로 변할 때까지 온도는 일정한 상태로 유지되며, 이 기간은 물의 양에 따라 달라진다. 경화되기 전의 콘크리트에는 자유수가 많아 콘크리트내 온도이력도 물의 경우와 비슷하지만, 콘크리트내의 물은 다른 물질이 많이 포함되어있고 물의 양이 매우 적기 때문에 물보다 이 기간이 짧게 지속되는 것이다.

그림 4는 동해기간을 달리하여 압축강도를 시험한 결과이다. 동해기간이 달라 압축강도 발현과정이 차이가 나지만, 28일 압축강도를 기준으로 보면 두시험 모두 A와 B공시체만 동해에 의한 강도손실을 보였다.

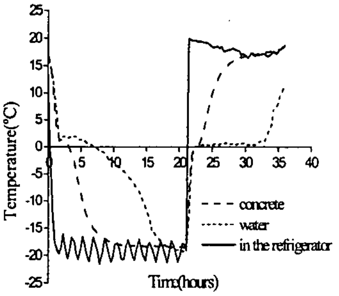


그림 3 콘크리트와 물의 온도이력

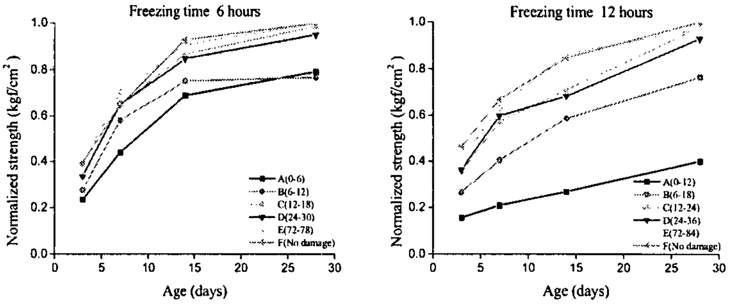


그림 4 압축강도 시험결과(괄호안의 숫자는 동해시점과 동해기간임)

2.5 본 실험

예비실험으로부터, 콘크리트내 동해로 인한 위치별 성능저하 정도는 모두 동일하다는 것과, 동해기간은 동해저항성에 큰 영향을 미치지 않으며, 보통강도의 콘크리트는 타설후 12시간이 지나면 동해에 대한 저항성을 어느정도 발현한다는 사실을 알게 되었다.

따라서, 본 실험에서는 동해온도는 -10℃, 동해기간은 12시간으로 일정하게 두고, 실험변수를 동해시점, 물/시멘트비, 그리고 시멘트종류로 정하여 실험을 실시하였으며, 구체적인 실험계획은 표 4에 나타나 있다. 압축강도 시험결과는 28일 재령에서 동해를 입지 않은 공시체의 압축강도를 기준으로 상대압축강도비로 나타내었으며, 그 결과는 표 5에 나타나 있다.

표 4 실험계획

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

(a) 동해시점과 동해기간(hours)

물/시멘트비	0.3		0.5	
시멘트종류	1종	3종	1종	3종
동해시점	A	A	A	A
	B	B	B	B
	C	C	C	C

(b) 실험변수

표 5 재령 28일의 압축강도와 동해를 입지 않은 공시체에 대한 압축강도의 상대비

동해시점	시멘트종류	
	1종	3종
A(0-12)	0.35	0.42
B(6-18)	0.96	0.96
C(12-24)	1.01	1.00
D(No damage)	1.00	1.00

(a) 물/시멘트비 0.3인 경우

Series	시멘트종류	
	1종	3종
A(0-12)	0.47	0.49
B(6-18)	0.67	0.90
C(12-24)	0.91	1.02
D(No damage)	1.00	1.00

(b) 물/시멘트비 0.5인 경우

3. 실험 결과 및 분석

3.1 동해시점의 영향

그림 5는 동해시점에 따른 압축강도의 상대비를 나타내고 있다. A의 경우 다른 조건에 상관없이 모든 공시체는 50~70%의 영구적인 강도손실을 보였다. B의 경우는 I-0.5(1종시멘트-물/시멘트비 0.3)가 약33%, III-0.5는 약10%의 강도손실을 보였다. C의 경우는 I-0.5의 경우만 약9%의 강도손실을 보이고 있다. 실제로 모든 경우의 A공시체에는 얼음결정흔적이 선명하게 관찰되었는데, 영구적인 강도감소원인은 얼음결정형성으로 판단된다. 얼음결정은 골재표면에 모여있는 블리

덩수에 의해 형성되는데, 결정이 성장하기 위해 근처의 시멘트 페이스트에서 물을 끌어낸다. 페이스트에는 얼음결정을 위한 공극이 생기며 이로인해 페이스트의 분리가 발생한다. 이러한 결과는 콘크리트를 다시 상온에서 양생해도 회복되지 않고, 형성된 얼음은 녹아서 골재와 페이스트 경계에 공극을 남기게 된다. 타설 직후에는 콘크리트내 자유수가 많고 얼음결정의 성장을 막을 수 있는 충분한 강도의 시멘트 페이스트가 충분치 않아 얼음결정이 잘 성장할 수 있다. 6시간 이후로 동해에 의한 강도손실이 줄어드는 이유는, 이 시점에선 콘크리트내의 자유수의 양이 많이 줄었고, 수화반응이 진행되어 시멘트 페이스트가 어느정도 강도발현을 한 상태이어서 얼음결정이 쉽게 성장하지 못할 뿐만아니라, 얼음결정 형성을 위한 물의 이동이 더욱 어려워졌기 때문이다.

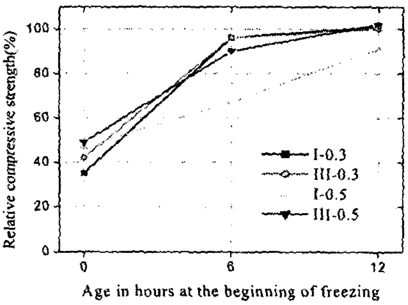


그림 5 동해시점에 따른 압축강도의 상대비

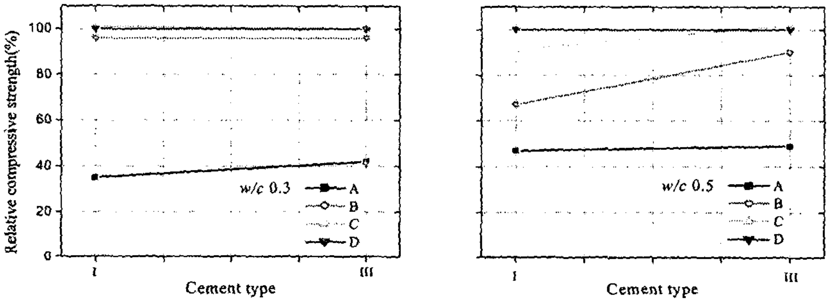


그림 6 물/시멘트비에 따른 압축강도의 상대비

3.2 물/시멘트비의 영향

그림 6은 물/시멘트비에 따른 압축강도의 상대비를 나타내고 있는데, 물/시멘트비가 0.3인 경우는 A를 제외하고 동해에 의한 강도손실이 거의 없으며, 물/시멘트비가 0.5인 경우는 1종 시멘트 모두 강도감소를 보인다. 이는 물/시멘트비가 높을 수록 초기동해에 의한 강도손실율이 증가하는 것을 의미한다. 즉, 물/시멘트비가 높을 수록 콘크리트내의 자유수가 많이 존재하여 얼음결정형성을 위한 좋은 조건이 이루어 지는 것이다.

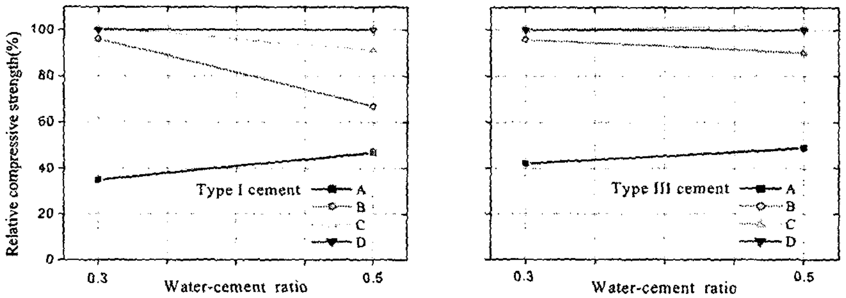


그림 7 시멘트종류에 따른 압축강도의 상대비

3.3 시멘트종류의 영향

그림 7은 시멘트종류에 따른 압축강도의 상대비를 나타내고 있다. 3종 시멘트는 A를 제외하고 강도손실이 거의 없으나, 1종 시멘트의 경우 물/시멘트비 0.5인 공시체들은 모두 강도감소를 보이고 있다. 이는 3종 시멘트의 경우 경화속도가 빨라 초기재령에서 페이스트내의 자유수가 급속히 감소하여 얼음결

정형성이 그만큼 어려워지기 때문이다.

따라서, 동해저항성이 발현되는 이유는 수화가 진행되면서 얼음결정팽창압력에 대한 페이스트의 저항성 발현과 배합수의 많은 부분이 시멘트와 결합하여 동결수량이 감소하고, 자유수의 대부분이 미세공극에 존재하게 되어 쉽게 얼지 않기 때문이다. 결국엔, 동해를 입기전 콘크리트내 자유수의 양이 동해저항성 발현 유무를 판단할 수 있는 중요한 기준이 될 것이다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 초기재령에서 동해에 의한 콘크리트 압축강도의 감소는 얼음결정형성이 원인이며, 콘크리트내 얼음결정형성에 필요한 자유수의 양이 동해에 의한 강도손실율을 판단하는데 중요한 기준이 된다.

(2) 초기동해를 입은 콘크리트의 압축강도는 동해시점에 따라 크게 달라지는데, 타설 직후에는 약 50~70%, 6시간 후에는 약10~30%, 12시간이 지나면 압축강도 감소율은 급격히 감소한다.

(3) 타설 직후 동해를 입은 콘크리트는 영구적으로 강도회복을 하지 못한다.

(4) 물/시멘트비가 증가할수록 동해에 의한 압축강도 손실율은 증가하며, 동해저항성을 확보하기 위한 최소양생기간은 물/시멘트비가 0.5일 경우 12시간, 0.3일 경우는 6시간으로 나타났다.

(5) 1종 시멘트 보다 3종 시멘트를 사용한 콘크리트의 초기동해로 인한 압축강도 감소율이 낮다.

참고문헌

1. C.J. Bernhardt, "Damage Due to Freezing of Fresh Concrete, *Proc. ACI*, Vol. 52, pp.573~581.
2. D.J. Corr, P.J.M. Monteiro, J. Bastacky, "Microscopic characterization of ice morphology in entrained air voids", *ACI Materials Journal*. Vol.99(2)(2002), pp.190-195.
3. Power,T.C., "Prevention of Frost Damage to Green Concrete," RILEM *Bulletin*(Paris), New series No. 14, Mar. 1962, pp.120-124.
4. George C. Hoff, Alan D. Buck, Sept.-Oct. 1983, "Considerations in the prevention of damage to concrete frozen at early ages," ACI Journal, Proceedings V.80, No.5, pp. 371-376.
5. Neville, *Properties of concrete*, *Longman*, 1996, pp. 401-405.
6. ACI Committee 306, "Cold Weather Concreting," (ACI 306R-78), ACI, Detroit, 1978, 23pp. Also, *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 2.
7. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서", 건설교통부,2003.