

극저온 하에서의 일정 온도유지가 콘크리트의 열화에 미치는 영향

The Influence of Storage at Very Low Temperatures on the Deterioration of Concrete

한 상 목* 조 명 석* 송 영 철**
Sang-Mook Han Myung-Sug Cho Young-Chul Song

ABSTRACT

Concrete cooled to very low temperature cyclically is deteriorated by ice formation in micro-pores. Although the factors to the deterioration are various, storage at very low temperature is mentioned as one of the factors. In practice, storage of cryogenic structure is kept at very low temperatures, and as such, it is important to take into consideration the influence of storage at such low temperature on the deterioration of concrete. Thus, in this study, the influence of storage on the deterioration of concrete at minimum temperatures taking into consideration the different W/C and air content.

1. 서론

콘크리트는 일반적으로 극저온 하에서 충분한 성능을 발휘할 수 있는 재료로 인식되면서 최근, 극저온관련구조물의 주요한 건설재료로서 이용되고 있다. 이러한 환경에 처해지는 구조물로는 한랭지에 건설되는 것이 거론되지만 한랭지 이외에도 그와 비슷한 환경에 처해지는 구조물이 수없이 많이 건설되고 있다.

그 대표적인 구조물로 LNG저장탱크를 예로 들 수 있다. LNG는 풍부한 매장량, 저공해의 이점으로 부터 석유 대체 에너지로서 주목을 받고 있음은 물론 이후 LNG저장 탱크 및 그 외 2차적 구조물의 건설이 증가하리라 여겨진다.

또한 장래 초전도 기술이 실용화되면 초전도를 응용한 전력저장 시스템의 관련시설 등에 경제적 및 내구성에 뛰어난 콘크리트가 사용될 가능성이 높다. 따라서 이러한 극저온 하에 처해지는 콘크리트의 물성 및 거동을 조사하는 것은 대단히 중요한 사항이다.

극저온에 있어서 콘크리트의 물성은 상온 시와 비교해서 상당히 달라지며 온도가 저하함에 따라 크게 변화한다. 이러한 변화는 주로 콘크리트 중의 수분의 동결에 의해 발생한다.

한편 콘크리트는 온도가 저하하면 수축 또는 팽창이라는 체적변화를 일으켜 상온과 극저온의 반복 작용을 받음으로 인해 내부의 수분 동결 시에 발생한 크랙에 의해 열화한다. 三浦¹⁾와 Rostasy²⁾의 연

* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

구결과에 의하면 콘크리트는 냉각과정에서 열화에 가장 관련된다고 여겨지는 커다란 팽창이 약-20℃에서 -60℃까지의 온도범위에서 가장 현저히 나타나고 -60℃이하에서는 온도의 저하에 따른 열화의 증가는 관측되지 않고 있다.^{1, 2, 3)}

본 연구에서는 냉각에 의한 콘크리트 열화의 영향이 현저히 나타날 것으로 예상되는 -40℃에서 일정시간 온도유지를 행하여 온도유지가 콘크리트의 열화에 미치는 영향을 조사하였다. 실험에 있어서는 W/C와 공기량을 변화시킨 여러 배합조건을 대상으로 온도유지의 영향을 조사하였다.

2. 실험 내용

2.1 공시체의 제작

본 실험에서 사용한 시멘트는 일본산 조강 포틀랜드 시멘트(밀도3.13g/cm³, 비표면적4,540cm²/g)이며 잔골재(밀도2.53g/cm³, 흡수율2.64%, 조립율2.71%)는 일본 宮城縣 大和町 鶴巢에서 생산되는 산모래를, 굵은 골재(밀도2.85g/cm³, 흡수율0.98%)는 宮城縣 丸森町에서 생산되는 부순 자갈을 사용하였다. 콘크리트의 배합은 표 1과 같다.

실험에 사용한 공시체의 치수는 10×10×40(cm)의 각주 공시체이다.

공시체는 동탄성계수 측정용, 온도 측정용, 변형률 측정용의 3종류로 제작하였다. 이중 온도 측정용 공시체에는 콘크리트 타설 시에 중심부와 표면부에 각각 열전대를 매설하였다. 공시체는 채령1일에 탈형한 후, 채령28일까지 표준 수중양생을 하였다. 그 후 스트레인 게지를 공시체 표면에 접촉해서 스트레인 게지에 방습효과를 겸한 외부로부터의 단열처리를 가하였다. 스트레인 게지의 측정값에는 온도변화에 의한 콘크리트의 변형률이외에 스트레인 게지 자체의 온도에 의한 변화량도 포함되어있다. 따라서 선펡계수를 미리 알고 있는 인성, 내부식성에 뛰어난 인칭동에 스트레인 게지를 부착, 온도변화에 따른 변형률을 측정후, 그 영향을 보정하였다.

2.2 냉각가열조건 및 측정방법

냉각가열은 극저온항온습기를 이용해서 그림 1에 나타낸 것과 같이 공시체를 상온에서 등속으로 냉각, 냉각최저온도인 -40℃에 도달하면 소정의 기간 온도를 일정하게 유지한 후 상온으로 가열하였다. 이 과정을 1사이클로, 40사이클까지 반복적으로 냉각가열을 가하였다.

냉각가열속도는 본 실험장치에서 얻을 수 있는 최대냉각속도0.33℃/min 및 가열속도0.52℃/min으로

표 1 콘크리트 배합

Max. Size (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	단위량 (kg/m ³)				혼화제 (g/m ³)	
					W	C	S	G	AE감수제	공기량조정제
25	11±1	2±0.5	46	38	180	391	654	1194	978	-
		4±0.5			171	372	670	1185	930	26.04
		2±0.5	56	40	180	321	711	1194	803	-
		4±0.5			171	305	705	1181	763	21.35
		6±0.5			160	286	697	1179	286	45.76
		2±0.5			66	45	180	273	818	1116
	4±0.5	171	259	810			1106	518	12.95	
	6±0.5	160	242	800			1100	363	24.20	

일정하게 유지하였다. 온도는 타설 시에 온도측정용 공시체에 매설한 열전대를 계측장치에 접속해서 공시체의 평균온도로서 관리하였다. 측정의 결과 공시체 표면과 중심의 온도차는 최대 3℃ 정도로, 이 온도차가 콘크리트의 열화에 미치는 영향은 다른 요인에 의한 영향에 비해 충분히 적은 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용한 극저온항온습기는 기중동결 기중융해 장치로서 융해과정에서 기내의 온도가 0℃ 이상에 도달하면 습도를 98%로 설정해서 공시체 표면에 서리를 발생시킨 후, 융해과정에서 서리가 녹아 공시체에 수분을 공급하는 형태를 취하고 있다. 이러한 방법과 수중에서의 동결융해시험을 비교해본 결과 양자는 동일한 열화 성상을 나타내다는 것으로 확인되었다.

열화를 나타내는 지표로서는 1차 공명진동에서 산출한 상대동탄성계수의 값을 사용하였다. 측정은 5사이클별로 40사이클까지 수행하였으며 변형률 측정용 공시체에 의한 초기 5사이클까지 변형률을 측정, 얻어진 결과를 바탕으로 열화 메커니즘을 구명하였다.

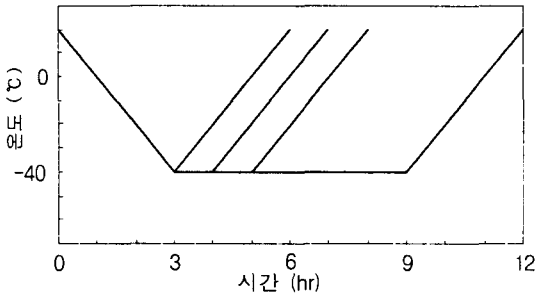


그림 1 냉각가열 조건별 온도이력

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상대동탄성계수에 의한 평가

극저온 하에서의 온도유지가 콘크리트의 열화에 미치는 영향에 대해 기본적인 특성과 문제점을 파악하기 위해 W/C 및 공기량이 서로 다른 여러 배합을 대상으로 검토하였다.

콘크리트의 배합은 표1에 나타난 것과 같이 동결융해작용을 받는 실제 콘크리트구조물을 상정한 W/C46%, 동결융해작용에 의한 열화의 영향이 조기에 나타나리라 예상되는 W/C56% 및 66%의 3종류에 공기량을 2%에서 6%까지 변화시킨 8종류를 사용하였다.

냉각최저온도를 -40℃로 정한 이유는 기존의 연구에 의해 -70℃까지 냉각된 콘크리트의 변형률을 살펴본 결과¹⁾ -40℃부근에서 팽창이 현저하게 나타나는 것과 동결수량이 -40℃부근에서 급격히 증가한다는 연구결과⁴⁾에 의해서이다.

실험에 사용한 8종류의 배합에 대해 -40℃에서 온도유지를 수행한 경우의 상대동탄성계수의 변화를 그림 2에 나타낸다. 그림으로부터 사이클의 반복에 따라 전체적으로 상대동탄성계수가 저하하고 있다. 이러한 상대동탄성계수의 저하는 콘크리트의 강성의 저하, 즉 열화가 진행되고 있다는 것을 나타낸다. 그리고 그림상의 한점은 공시체 3개 혹은 5개의 평균치이다.

그림에서 상대동탄성계수는 W/C가 높고 공기량이 적을수록 저하하는 것으로 나타났다. 또한 온도유지를 행하지 않은 경우(범례의 0hr)에 비하여 온도유지를 행하면(1, 2, 6hrs) 상대동탄성계수의 저하가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 상대동탄성계수가 크게 저하한 공시체 표면을 냉각가열이 종료한 후 관찰해본 결과 육안으로 관찰되는 균열은 거의 발생하지 않았다. 따라서 이러한 상대동탄성계수의 저하는 공시체 내부에 미세한 균열의 발생에 의한 조직의 이완 때문으로 사료된다. 이러한 콘크리트의 열화현상은 기중에서 동결한 경우에 나타나는 열화현상의 특징이라고 알려져 있다⁵⁾.

W/C46%와 공기량6%의 배합의 경우 상대동탄성계수의 저하가 작고 온도유지의 유무에 관계없이 거의 동일한 값을 나타내는데 반해, W/C56%의 공기량2%와 W/C66%의 공기량 2%, 4%의 콘크리트는 온도유지를 행함으로써 온도유지를 행하지 않은 경우에 비해 상대동탄성계수가 크게 저하하는 것으로 나타났다. 다시 말해 온도유지에 의한 콘크리트의 열화는 W/C가 크고 공기량이 적을수록 현저히 발생하는 것으로 판단된다.

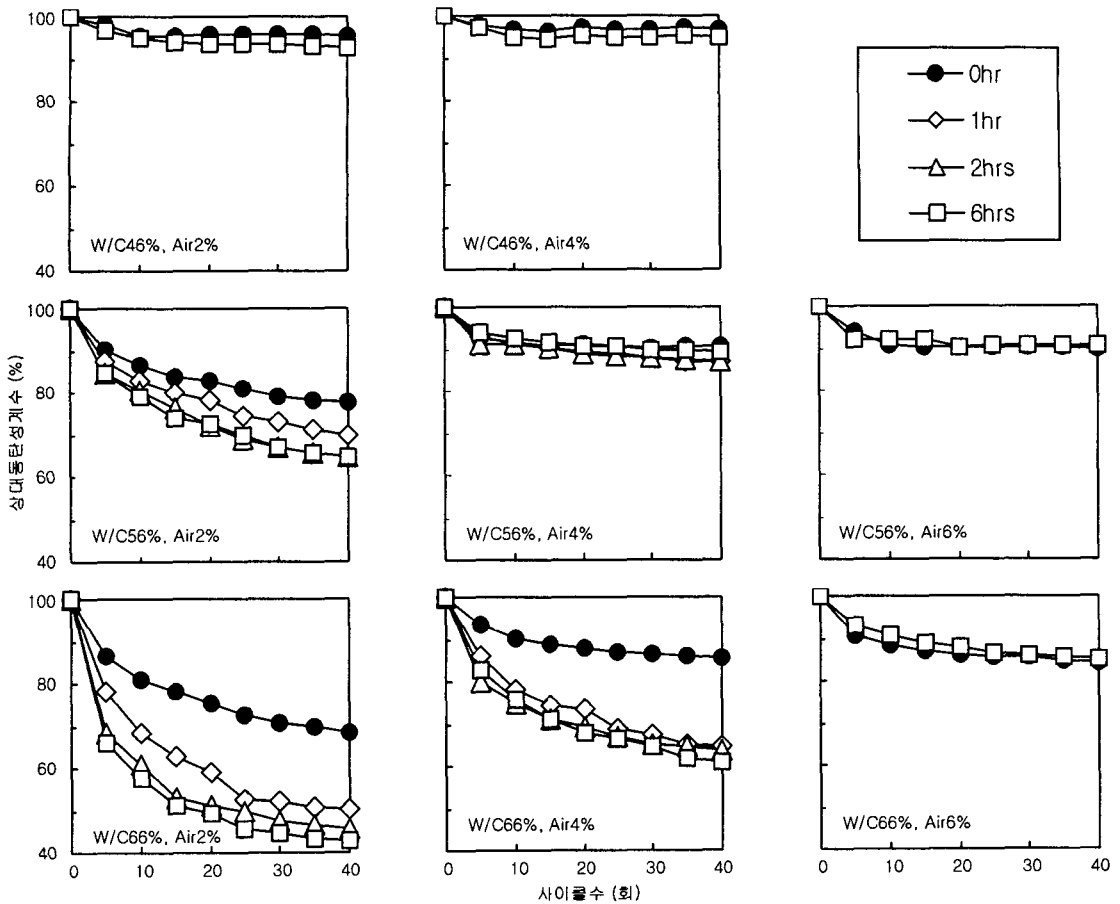


그림 2 각 배합에서의 상대동탄성계수의 변화

온도를 유지하는 시간의 변화에 따른 열화를 비교하기 위해서 가로축을 온도유지시간, 세로축을 40 사이클 종료 시의 상대동탄성계수의 값으로 나타낸 것이 그림 3이다. 이 그림에서 주목할 점은 W/C56%의 공기량2% 및 W/C66%의 공기량2%, 4%의 배합에 대해서 온도유지를 행함으로써 상대동탄성계수의 저하가 매우 크고 단 1시간의 온도유지로도 그 영향이 명확하게 나타난다는 점이다. 더욱이 그 저하는 2시간까지 지속되지만 그 이상 온도유지를 행하여도 상대동탄성계수의 저하는 2시간 유지한 경우와 거의 동일한 값으로 나타났다. 따라서 본 실험조건범위 내에 있어서 -40℃에서의 온도유지에 의한 열화의 증가량은 2시간 정도에서 최대값에 수렴하는 것으로 판단된다.

이 결과와는 달리 W/C56%의 공기량 4%, 6% 및 W/C66%의 6%의 경우는 온도유지의 유무에 상관없이 상대동탄성계수가 거의 동등한 값을 나타내고 있다. 따라서 상기 배합에서는 온도유지의 영향은 무시 가능하다고 할 수 있다. 더구나 이러한 배합에서는 상대동탄성계수가 85%를 상회하는 높은 값을 나타내고 있다. 또한 본 연구범위 내에서 W/C가 가장 낮은 46%의 경우는 공기량에 상관없이 상대동탄성계수가 90%를 상회하는 매우 높은 내구성을 나타내며 6시간 온도유지를 행함에도 불구하고 온도유지를 행하지 않은 경우와 비교해서 상대동탄성계수의 저하는 관찰되지 않았다. 따라서 본 실험조건

하의 W/C46%의 배합에 관해서는 온도유지의 영향이 충분히 작다고 여겨지기에 6시간이외의 온도유지의 영향은 조사하지 않았다.

W/C46%와 공기량6%의 경우에 온도유지의 영향이 거의 관찰되지 않은 이유로 W/C46%의 경우는 콘크리트중의 자유수량이 매우 적어져서 온도유지기간 중에 동결수량이 감소했기 때문이고, 공기량6%의 경우는 미세한 기포(entrained air)가 충분히 연행되어 온도유지 중에 수분동결에 의해 발생하는 팽창압이 완화되었기 때문이라고 사료된다.

이상의 결과로부터 본 실험에 사용한 배합을 대상으로 -40℃에서 온도유지에 의한 영향이 명확히 관찰된 것으로는 W/C56%의 공기량2% 및 W/C66%의 공기량2%, 4%의 배합으로 나타났다. 그리고 온도유지와 열화와의 관계는 온도를 유지하는 시간이 약 2시간까지는 열화가 진척되지만 그 이상 유지시간에 있어서는 열화의 증가량은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

3.2 변형률에 의한 평가

상대동탄성계수의 측정결과로부터 온도유지에 의한 콘크리트의 열화가 크게 일어난 W/C66%에 대해서 온도유지를 행하지 않은 경우와 6시간 온도유지를 행한 경우의 1사이클과 5사이클의 콘크리트 온도와 변형률의 관계를 나타낸 것이 그림 4이다. 이 그림에서 1사이클 시의 온도유지를 행하지 않은 경우와 6시간 온도유지를 행한 경우의 변형률을 비교해본 결과, 온도유지의 유무에 상관없이 -40℃까지 냉각에 따라 공시체는 수축, 가열에 따라 팽창으로 전환하고 있다. 또한 온도유지를 행한 경우 처음 1시간까지는 팽창이 관측되지만 그 후의 유지시간에서는 변형률의 변화가 보이지 않는다. 공기량의 차에 의한 영향을 살펴보면 -40℃까지의 냉각에 따라 공기량이 적은수록 수축량이 작게 나타나는 경향을 보인다. 이것은 공기량이 적을수록 냉각에 따른 수분의 동결에 의한 팽창작용을 받음으로서 결과적으로 수축량의 감소로 이어졌다고 판단된다.

이어서 5사이클에서의 공기량2%의 배합에 의하면 온도유지를 행하지 않은 경우 1사이클과 유사한 변형률의 거동을 나타내는데 비해, 온도유지를 행함으로써 보다 높은 온도(약-20℃)에서 수축으로부터 팽창으로 전환하고 있다. 또

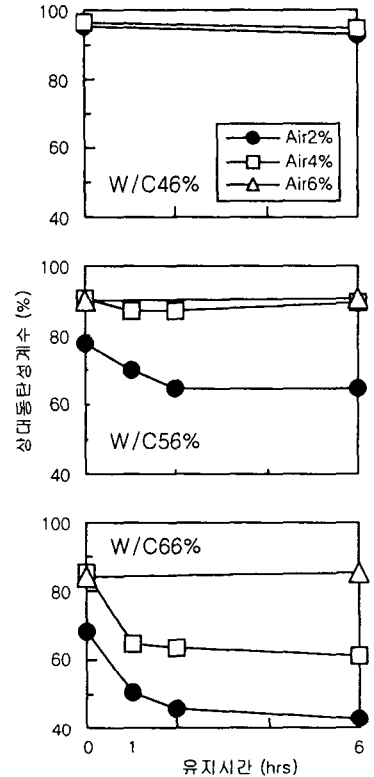


그림 3 각 배합에서의 상대동탄성계수와 온도유지의 관계

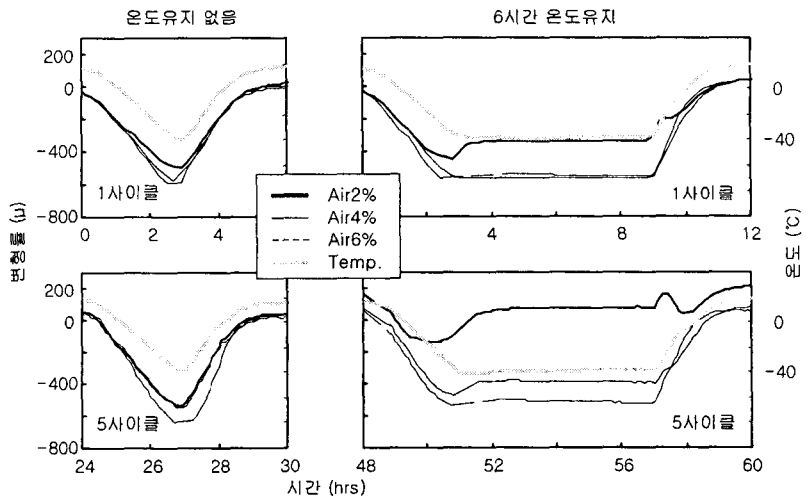


그림 4 시간의 경과에 따른 변형률 거동의 변화

한 온도유지에 의한 팽창량도 크게 증가함을 알 수 있다.

6시간 온도유지를 행한 5사이클의 변형률 거동에서 상대동탄성계수의 저하가 보이지 않은 공기량 6%의 경우, -40°C 까지 온도의 저하에 따라서 거의 선형적으로 수축하는 경향을 나타내고 있다. 또한 온도유지의 기간 중에는 팽창으로 전환하지 않고 가열과 함께 팽창으로 전환, 사이클 종료 시에는 원래의 변형률로 돌아감으로서 잔류 변형이 발생하지 않고 있다. 이와는 반대로 열화가 크게 나타난 공기량 2%의 경우는 -10°C 이하의 냉각기간 중에 수축경향이 완만해져서 온도유지기간 중에는 큰 팽창을 나타내고 있다. 또한 상온으로 돌아온 후에는 변형률이 원래의 위치로 돌아가지 않고 현저한 잔류 변형이 발생함을 알 수 있다. 이상으로부터 온도유지기간 중의 팽창과 사이클 종료 시의 잔류 변형은 W/C가 높고 공기량이 적을수록 보다 크게 나타난다는 것으로 확인되었다.

그림 3에서 -40°C 에서 온도유지시간에 의한 상대동탄성계수의 저하가 2시간까지 지속해서 발생한다고 설명한 것을 그림 4의 변형률 거동과 관련해서 설명한다면 -40°C 에서 각 온도유지단계로부터 약 1시간까지 큰 팽창을 나타내고 그 이상의 온도유지시간에 있어서는 팽창이 거의 관찰되지 않고 있다. 따라서 본 실험조건하에서는 온도유지에 의한 수분의 동결에 따른 콘크리트의 팽창은 약 1시간 전후에서 종료한다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구의 범위 내에서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 극저온 하에서 온도유지를 행한 경우, 온도유지를 행하지 않은 경우와 비교해서 콘크리트는 보다 열화하는 경향을 나타낸다.
- 2) 열화에 미치는 온도유지의 영향은 W/C가 크고 공기량이 적은 콘크리트일수록 보다 현저히 나타났다. 그 이유로는 W/C가 큰 경우는 콘크리트 중의 자유수량이 많아져 온도유지기간 중에 동결 가능한 수분이 증가했기 때문이고, 공기량이 적은 경우는 미세한 기포(entrained air)의 연행이 적음으로 인해 온도유지 중의 수분동결에 의해 발생하는 팽창압이 완화되어지지 않고 세공벽에 작용했기 때문으로 사료된다.
- 3) 온도유지에 의해 큰 열화가 발생한 공시체의 변형률을 측정된 결과, 온도유지 중에 큰 팽창이 발생하고 이러한 팽창은 상온으로 돌아간 후에도 잔류 변형으로 축적된다는 것이 확인되었다.

참고문헌

1. 三浦尙, 李道憲, “極低溫下におけるコンクリートのひずみ挙動と劣化,” 日本土木學會論文集, 第420号, V-13, pp.191-200, 1990.
2. Rostasy, F. S., Scheneider, U., and Widemann, G., “Behaviour of mortar and concrete at extremely low temperatures,” Cement and Concrete Research, Vol. 9, No.3, pp.365-376, 1979.
3. 川島惠介, 三浦尙, 韓相默, “極低溫下における冷却過程と劣化との關係,” 日本土木學會東北支部技術研究發表會, V-26, pp.566-567, 1996.
4. 鎌田英治, 名和豊春, 藤井弘司, 洪悅郎, “硬化セメントペースとの凍結水量と凍結挙動の測定,” 日本セメント技術年報33, pp.298-301, 1979.
5. Pigeon, M., Prevost, J., Simard, J.M., “Freeze-Thaw durability versus freezing rate,” *ACI Journal*, Vol.82, No.61, pp.684-692, 1985.