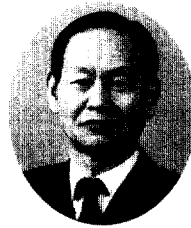


온도조건하의 콘크리트

극저온에서의 콘크리트의 거동

Behaviours of Concrete at Very Low Temperatures



김 생 빈*



이 도 현**

1. 개 요

현대과학의 급속한 발전과 함께 콘크리트 구조물은 여러 가지 악조건에서 사용되는 경우가 많아지고 있다. "극저온"도 그 중의 하나로서, 여기에서는 콘크리트의 동결융해시험 온도범위와 구별하여 -20°C 이하의 온도라고 정의하기로 한다. 콘크리트 구조물이 극저온에 처해지는 상황은 다음과 같이 크게 두가지로 구분할 수 있다.

① 극한지에서의 구조물

② 극저온 액체의 운반선, 저장탱크 및 2차 구조물
우선 대표적인 극한지로서는 북극, 남극, 시베리아, 알래스카, 캐나다 등을 들 수 있다. 이러한 극한지가 세계적인 관심의 대상이 된 것은 기존 자원의 고갈 및 특수한 자원의 확보가 국가의 장기적인 이익

에 매우 큰 영향을 미치게 되었기 때문이다. 따라서 미국, 러시아, 영국, 캐나다, 일본 등의 선진국을 중심으로 하여 세계 각국에서는 여러 가지 자원이 풍부하게 매장되어 있는 극한지의 개발에 많은 힘을 기울이고 있으며, 현재는 물론 향후에도 극한지 개발을 위한 육상 및 해상구조물이 많이 건설될 것으로 예상되고 있다.

한편, 현대의 고도산업사회에서는 여러 가지 기체가 대량으로 사용되고 있으나, 이러한 기체상태의 물질은 체적이 매우 크기 때문에 이를 대량으로 저장하거나 운반하기가 매우 곤란해진다. 따라서 기체상태의 체적을 대폭적으로 줄이기 위해서는 액체상태로 변화시킬 필요가 있으며, 이를 위하여 기체를 매우 낮은 온도로 냉각시켜야 된다. 이러한 액화가스의 비등점 및 체적감소율은 그 종류에 따라 큰 차이가 있

* 정회원, 동국대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 대한주택공사 주택연구소 선임연구원

표 1 각종 액화가스의 물리적 성질*

액화가스 종류	비등점 (°C)	체적감소율 (배)
Butane	- 11	1/240
Ammonia	- 33	1/950
Propane (LPG)	- 42	1/310
Ethane	- 89	1/430
Methane(LNG)	-162	1/620
Oxiten	-183	1/800
Nitrogen	-196	1/690

으며, 그 중에서 대표적인 액화가스의 물리적 성질을 나타내면 표 1과 같다.

이들 극저온 액체 중에서 가장 많이 사용되는 액화 천연가스(LNG : Liquefied Natural Gas)는 1970년대 초의 오일쇼크 이후 석유의 대체에너지로서 많이 사용되기 시작하였다. 또한 LNG는 환경문제의 주범으로 작용하고 있는 아황산가스(SO₂)를 거의 방출하지않아 그동안 석유의 사용으로 인한 지구 온난화 현상을 억제하기 위한 가장 현실적이며 좋은 방법으로 여겨져 왔다. 국내에서도 이미 1986년에 인도네시아로부터 도시가스용으로 처음 도입된 이후 그 수요가 기하급수적으로 증가되어 이제는 주요 에너지원으로 확고한 위치를 점유하고 있다.

한편, 1911년에 액체헬륨의 온도(-269°C)에서 수은의 전기저항이 제로가 된다는 것이 발견된 이후, 연구실내에서는 액체질소의 온도(-196°C)에서도 초전도가 얻어질 수 있음이 보고되어 있다. 초전도를 이용하여 전력을 저장하기 위해서는 초전도체로 만들어진 코일을 극저온 상태에 두어야 하므로, 이를 위하여 대형 저장탱크 등이 필요하게 되며, 이미 미국, 일본 등의 선진외국에서는 경제적 및 성질적으로 적합한 콘크리트를 사용한 저장탱크의 건설을 추진 중에 있다.

이와 같이 콘크리트는 극한지에서의 구조물이나 LNG를 비롯한 극저온 액체의 저장탱크 및 운반선 건조에 이용되며, 향후 액체질소를 저장할 대형 초전도 구조물에도 이용될 전망이다. 그러나 콘크리트가 이러한 극저온의 특수환경에 사용될 경우에는 일반 환경조건에서의 성질과는 크게 달라지므로, 극저온 구조물의 설계 및 시공을 위해서는 이러한 물성변화에 대하여 충분히 고려해야만 한다. 따라서, 여기에서는 콘크리트가 극저온 환경에 처하는 경우의 물성

변화에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

2. 온도저하에 의한 물성변화 메카니즘

2.1 융점강하 현상

콘크리트는 주로 골재, 시멘트, 물로 구성되는 재료로서, 온도변화에 의한 콘크리트의 물성변화는 화학적인 변화에 의한 것이 아니라, 이들 재료의 물리적 성질이 변화함에 기인한다. 극저온에서의 콘크리트의 물성변화에 대한 메카니즘은 아직 명확하게 규정되어 있지 않다. 그러나, 일반적으로 콘크리트 내부의 수분이 相變化함에 기인하며, 결함수는 거의 영향을 미치지 않고 자유수와 흡착수가 큰 영향을 미친다고 알려져 있다.

콘크리트의 온도가 빙점 이하로 저하되면 직경이 큰 공극속의 수분으로부터 점차 작은 공극의 수분까지 얼음으로 변하게 되는데, 이러한 얼음으로의 相變化에 의해 약 9%의 체적팽창이 일어나게 된다. 이와 같이 수분이 얼음으로 상변화하여 체적이 팽창하므로써, 하중을 받을 수 없었던 수분이 얼음으로 변하여 하중을 받을 수 있게 되며, 또한 순수한 공극의 체적도 감소하게 된다. 따라서, 콘크리트 내부조직은 동결작용에 의해 치밀해지며, 이러한 현상은 콘크리트의 강도를 증가시키는 직접적인 영향을 미친다.

그러나, 콘크리트 내부의 공극수는 반드시 0°C에서 동결되는 것이 아니며, 과냉각 현상, 공극의 크기, 공극수에 포함되어 있는 염분 및 가용성 물질 등의 영향으로 인하여 동결온도가 낮아지는데, 이를 "융점강하현상"이라고 한다.

과냉각 현상이란, 수분이 빙점 이하의 온도에서도

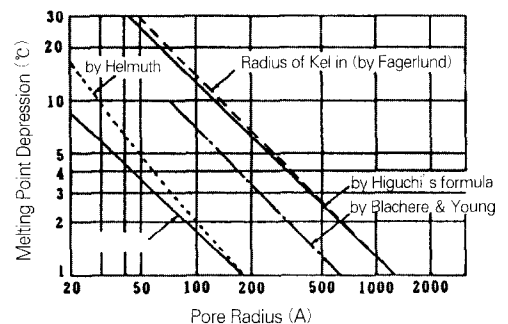


그림 1 공극의 크기와 융점에 관한 이론치의 비교³⁾

얼음의 핵이 형성되지 않고 액체상태로 냉각되는 현상으로서, 불연속의 미세공극에서 발생되기 쉬운데, 경화페이스트의 공극수의 동결은 과냉각 현상에 의하여 -10℃정도 낮아진다는 보고²⁾도 있다.

콘크리트에는 직경 1~2mm부터 약 15³의 겔공극까지 다양한 크기의 공극이 존재하며 이러한 공극속의 수분은 공극의 크기에 따라 응집이 달라진다. 공극의 크기와 응집의 관계는 그림 1과 같이 여러 연구자들에 의하여 이론적으로 규명되었지만, 콘크리트 내부의 공극수의 응집은 다른 영향도 복합적으로 작용하기 때문에 일치하지는 않는다.

공극수와 공극벽면에는 표면장력이 작용하며, 표면장력은 공극의 직경이 작을수록 크다. Boddoe and Setzer³⁾는 식 (1)과 같이 T₀에서 T로 강하하는 공극수의 응집을 공극의 직경에 대한 함수로 나타내었다.

$$\ln \frac{T}{T_0} = -2 \frac{\Delta\gamma \cdot V}{H \cdot R_{II}} \quad (1)$$

- 여기서, $\Delta\gamma$: 동결중의 표면에너지 변화량
- V : 얼음의 비체적
- H : 용해열
- R_{II} : 동수반경 ($R_{II} = V/A$)

또한, 콘크리트 내부의 공극수는 알칼리나 이와 유사한 가용성 물질을 포함하고 있으므로 화학적으로 순수하지 않다. 이것은 시멘트가 알칼리 성분을 함유하고 있으며, 해사나 제설제 등의 사용에 의하여 염분이 침투하기 때문으로서, 이러한 경우에 공극수의 염분농도가 높아져서 응집이 낮아지게 된다. 표 2는 얼음과 화학적으로 평형상태로 공존하는 각종 염분 용액의 최저온도를 나타낸다.

표 2 수용액이 액체로 존재하는 최저온도⁴⁾

염분용액의 종류	온도 (°C)
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (황산나트륨)	-8.2
NaCl · 2H ₂ O (염화나트륨)	-22.9
KCl (염화칼륨)	-36.3
MgCl ₂ · 8H ₂ O (염화마그네슘)	-43.2
MgCl ₂ · 12H ₂ O (")	-
CaCl ₂ · 6H ₂ O (염화칼슘)	-54.0

2.2 콘크리트의 물성변화 메카니즘

Wishers and Dahms⁵⁾에 의하면 극저온에서의 콘크리트의 물성변화의 주요원인은 공극수가 얼음으로 상변화하며, 또한 온도가 낮아질수록 얼음의 상도 변하기 때문에 그 영향정도가 달라진다고 하였다. 0℃에서 밀도가 0.92인 얼음은 0℃~-115℃에서는 육각형 구조를 가진 얼음 I의 상으로 존재하지만, -115℃~-155℃에서는 마름모꼴 구조를 가진 얼음 II의 상으로 존재하며 이때 체적이 급격히 작아져서 밀도가 1.158이 되는데, -155℃ 이하에서는 사각형 구조를 가진 얼음 III의 상으로 변화된다. 그러나 동일한 상의 얼음이라도 온도에 따라 물리적 성질이 다르며, 얼음 II 및 얼음 III의 물리적 성질은 아직 규명되어 있지 않다. 참고로 -4℃~-16℃의 범위에서의 얼음 I은 압축강도 20~60 kgf/cm², 인장강도 약 10 kgf/cm², 탄성계수 약 1.0×10⁵ kgf/cm², 포아송비 약 0.33 정도이다.

三浦⁶⁾도 극저온에서의 콘크리트의 물성변화는 콘크리트 내부의 수분에 의한 것으로 규정하고, 그중에서도 결함수는 거의 영향을 미치지 않으며 자유수와 흡착수가 영향을 미친다고 추정하였다.

Tognon⁷⁾은 열량계를 사용해서 -4℃에서 -90℃까지의 엔탈피의 변화를 측정할 결과, 경화시멘트페이스트 내부의 증발가능한 수분(자유수)이 온도저하에 따라 서서히 동결하고, 자유수가 동결된 얼음도 온도저하에 따라 수축하며, 얼음의 수축계수는 경화시멘트페이스트나 골재의 수축계수보다 크므로(-70℃에서의 얼음의 수축계수는 53×10⁻⁶, 콘크리트는 10×10⁻⁶), 공극속의 얼음이 경화시멘트페이스트 내부에

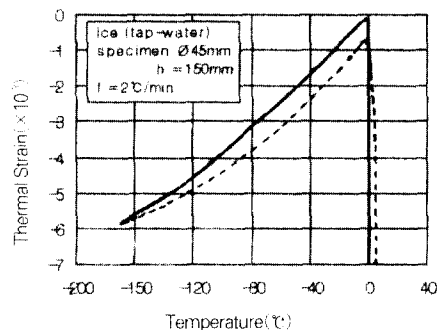


그림 2 온도변화에 따른 얼음의 변형거동⁸⁾

서 PC강선과 같은 작용(Internal prestressing)을 하여 콘크리트의 강도가 증대한다고 추정하였다. 그림 2는 온도변화에 의한 얼음의 변형거동을 나타낸다.

3. 극저온에서의 콘크리트의 역학적 거동

3.1 압축강도

온도저하에 의한 콘크리트의 물성변화는 강도를 가지고 있지 않던 공극수가 동결하여 강도를 가지는 얼음으로 相변화하기 때문이다. 콘크리트 내부의 공극수는 온도가 저하됨에 따라서 큰 공극수로부터 점차 작은 공극수까지 동결하므로, 얼음의 량이 증가하는 반면에 공극량은 감소하게 된다. 이것은 콘크리트의 내부조직이 밀실하게 된다는 의미가 되며, 따라서 콘크리트의 강도상승효과를 가져오게 된다.

극저온에서의 콘크리트의 압축강도에 관한 연구결과를 종합해 보면 조건에 따라서는 상온에서의 압축강도에 비하여 약 3배 이상 향상되기도 한다. 後藤·三浦는 이와 같은 온도저하에 의한 콘크리트의 압축강도를 식 (2)로 표현하고, 그 증가경향을 그림 3과 같이 모식적으로 나타내었다.

$$\sigma_{CL} = \Delta\sigma_c + \sigma_{CO} \quad (2)$$

여기서, σ_{CL} : 저온에서의 압축강도 (kgf/cm²)
 $\Delta\sigma_c$: 압축강도증가량 (kgf/cm²)
 σ_{CO} : 상온에서의 압축강도 (kgf/cm²)

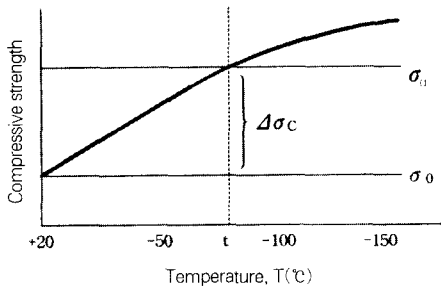


그림 3 압축강도와 온도의 관계¹⁰⁾

이러한 온도저하에 의한 압축강도증가량은 각종 요인의 영향에 따라 달라질 수 있으며 연구자에 따라 이견이 많지만, 일반적으로 사용재료(시멘트, 골재,

혼화제 등)의 종류나 콘크리트의 배합, 물시멘트비, 공기량 및 양생방법 등에 의한 영향은 없으며, 콘크리트의 재령이나 초기강도에 대해서는 영향을 미친다는 일부 연구자들의 보고도 있다. 그러나, 콘크리트의 함수량이 압축강도증가량에 지배적인 영향을 미친다는 점에 대해서는 이견이 없다.

後藤·三浦는 극저온에서의 콘크리트의 함수량이 압축강도증가량에 미치는 영향을 종합적으로 실험검토한 결과, 식 (3), 식 (4) 및 그림 4와 같은 관계가 있음을 규명하였다. 즉, 콘크리트의 압축강도증가량은 함수량이 클수록 크고, 또한 온도가 낮아질수록 크게 증가하지만 -120°C 이하의 온도에서는 편차가 커지고 증가량도 작아진다. 이러한 이유에 대해서는 -120°C 부근의 온도에서 콘크리트 내부의 얼음의 相이 변화(결정구조가 변하여 체적이 급격히 작아짐)되기 때문이라고 추정하였다.

[T > -120°C의 경우]

$$\Delta\sigma_c = \left\{ 120 - \frac{1}{270}(T+180)^2 \right\} \cdot w \quad (3)$$

[T < -120°C의 경우]

$$\Delta\sigma_c \leq 107 \cdot w \quad (4)$$

여기서, $\Delta\sigma_c$: 압축강도증가량 (kgf/cm²)
T : 콘크리트의 온도(°C)
W : 콘크리트의 함수량(%)

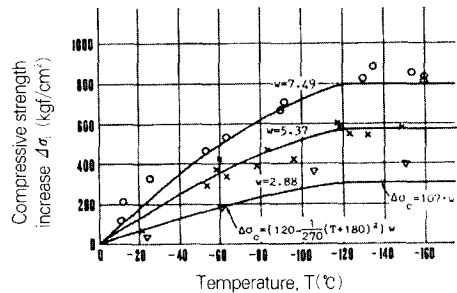


그림 4 온도변화에 따른 압축강도 변화¹⁰⁾

3.2 인장강도

극저온에서의 콘크리트의 인장강도는 압축강도와 유사한 경향을 나타낸다. 즉, 그림 5 및 그림 6에서와

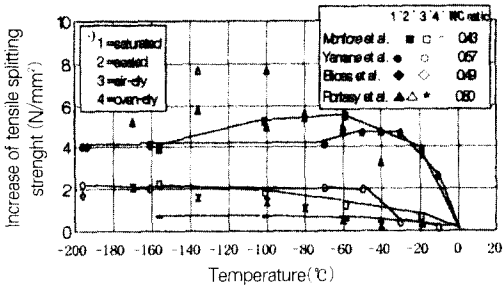


그림 5 온도변화에 따른 인장강도 변화³⁾

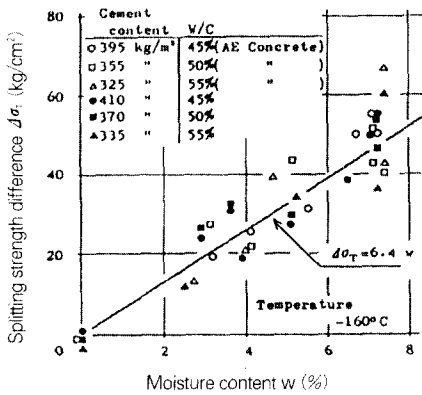


그림 6 함수량과 인장강도증가량의 관계⁷⁾ (온도 : -160°C)

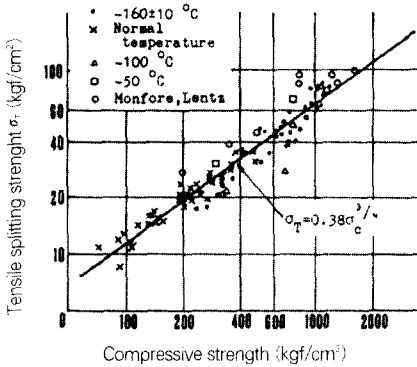


그림 7 압축강도와 인장강도의 관계⁷⁾

같이 증가경향도 온도가 낮아질수록 증가하고, 함수량이 높을수록 증가하는 지배적인 요인으로 작용하며, 인장강도에 미치는 영향요인도 거의 동일하다.

그러나 온도저하에 따른 인장강도의 증가경향이 압축강도와 뚜렷하게 다른 점은 인장강도가 최고점에 도달하는 온도범위가 다소 낮다는 것이다. 압축강

도는 -120°C 정도까지 서서히 증가하는데 반하여, 인장강도는 약 -60°C까지는 급격히 증가하지만, 그 이하로 온도가 저하되어도 증가하지 않는다. 인장강도가 더 이상 증가하지 않는 온도범위에 대해서 일부의 연구자들은 -30°C ~ -50°C 정도라고 말하기도 하며¹⁾, 각 연구자들에 따라 차이가 있지만, 대략 -50°C 전후라고 여겨진다. 그러나, 콘크리트는 이러한 온도저하에 따라서 매우 취성적으로 변하며(그림 7 참조), 시험편차가 매우 크기 때문에 인장강도의 증가경향을 한마디로 규정하기는 어려운 면이 있다. 온도저하에 따른 인장강도를 추정하기 위한 여러 연구자들의 실험에 의한 대표적인 제안식은 식 (5)~(9)와 같다.

(1) Goto/Miura⁷⁾

$$\sigma_t = 0.38\sigma_c^{0.34} \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_t = 6.4 w \quad (-160^\circ\text{C의 경우}) \quad (6)$$

(2) Rostasy/Scheuermann¹²⁾

$$\sigma_t = 0.56\sigma_c^{0.23} \quad (\text{수중 또는 밀봉양생}) \quad (7)$$

No.	Concrete	Cement (kg/m³)	W/C (%)
1	Normal	390	39
2	Normal	307	46
3	Normal	223	62
4	Light weight	335	45

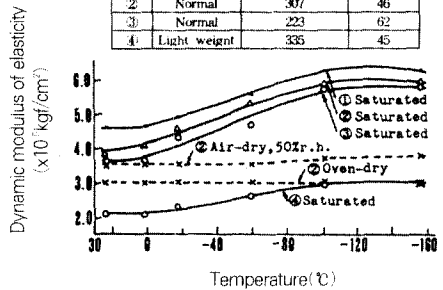


그림 8 온도변화에 따른 동탄성계수 변화¹⁾

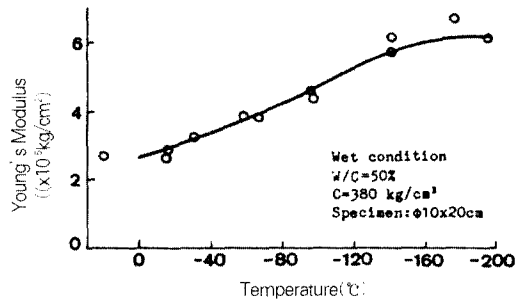


그림 9 온도변화에 따른 정탄성계수 변화¹⁾

$$\alpha_c = 0.30\alpha_c^{2/3} \quad (\text{기건양생}) \quad (8)$$

(3) Okada/Iguro¹³⁾

$$\alpha_c = 0.56\alpha_c^{2/3} \quad (\text{적용범위 : } -10^\circ\text{C} \sim -100^\circ\text{C}) \quad (9)$$

3.3 탄성계수

극저온에서의 콘크리트의 탄성계수는 압축강도와 마찬가지로 온도가 낮아질수록 높아지는 경향이지만 그 증가율은 작다. 예를들어 상온에서의 값에 비하여 -160°C 에서의 습윤콘크리트의 압축강도는 3배정도 증가하지만, 탄성계수는 1.5~2배 이상 증가되지는 않는다. 그러나, 탄성계수의 증가량은 습윤상태 콘크리트, 기건상태 콘크리트, 절건상태 콘크리트의 순으로 크므로, 함수량이 클수록 증가량이 커지며, 이것은 양생조건에 따라 탄성계수증가량이 달라진다는 것을 의미한다. 그림 8 및 그림 9는 온도저하에 따른 콘크리트의 동탄성계수 및 정탄성계수의 변화에 대한 일부 연구자들의 실험결과를 나타낸다.

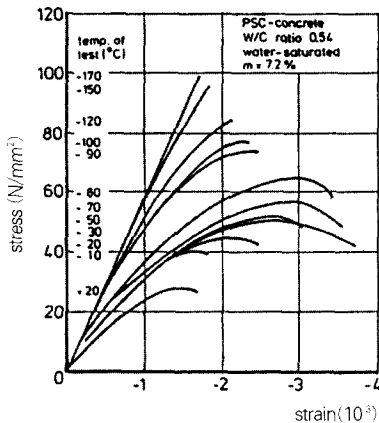


그림 10 온도에 따른 응력-변형 곡선의 차이¹⁴⁾

온도저하에 의하여 탄성계수가 변화함과 동시에 응력-변형 곡선도 달라지게 된다. 그림 10은 온도차이에 따른 습윤콘크리트의 응력-변형 곡선을 나타내는 것으로서, 온도가 낮을수록 콘크리트의 응력-변형 곡선이 선형적으로 변하여 콘크리트가 취성적으로 파괴됨을 알 수 있다. 다시 말하면 $+20^\circ\text{C} \sim -70^\circ\text{C}$ 의 범위에서는 응력-변형 곡선이 비선형으로 되어 콘크리트는 연성파괴되며, 극한변형률은 온도가 낮아질

수록 증가하여 약 $-50^\circ\text{C} \sim -70^\circ\text{C}$ 의 범위에서 최대로 된다. 그러나, 콘크리트의 온도가 그 이하로 저하되면, 응력-변형 곡선이 선형적으로 변하고, 극한변형률도 점차 작아지는 경향을 나타내므로, 콘크리트의 취성이 크게 증가하게 된다.

3.4 기타 성질

1) 휨강도

극저온에서의 모든 실험결과와 마찬가지로 휨강도에 대해서도 각 연구자에 따라 다소 차이가 있지만, 일반적으로 압축강도 또는 인장강도와 유사한 경향을 나타낸다. 일례로 Yamane¹¹⁾의 실험결과에 의하면, 온도와 휨강도의 관계는 인장강도와 동일한 경향을 나타내어 $-30^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$ 의 범위에서 최대로 되며, 이 때의 최대값은 상온에서의 휨강도보다 2.1~3.0배 정도 크다.

2) 부착강도

극저온에서의 부착강도는 온도저하에 따라 크게 증가하지만, 원형철근과 이형철근의 부착강도증가율은 크게 다르다. 습윤콘크리트에 매설된 -70°C 에서의 원형철근의 부착강도는 상온에서의 값보다 약 3~4배 정도 크지만, 이형철근의 경우에는 약 2배 정도 이므로 압축강도증가율보다는 작다고 평가된다. 또한 부착강도는 양생조건에 영향을 크며, -196°C 에서의 원형철근의 부착강도를 상온에서의 값과 비교하면, 습윤콘크리트는 약 5.8배 증가하지만, 기건양생 콘크리트는 약 40% 증가에 불과하다는 보고¹²⁾도 있다.

3) 포아송비 및 크리프

콘크리트의 포아송비는 온도가 낮아져도 변화하지 않는다는 주장도 있으며, 40~50% 정도 증가한다는 주장도 있으나, 각 연구결과를 종합해 보면 -150°C 에서는 상온에서보다 약 10~20% 정도 증가하는 것으로 판단된다.

극저온에서의 콘크리트의 크리프는 실험상의 어려움 등으로 인하여 관련연구자료가 극히 적은 편이지만, 온도가 낮을수록 크리프가 매우 작아진다는 데 이의를 제기하는 사람은 없다. 일례로, -70°C 의 경우에는 상온에서보다 60% 정도 감소하며, -10°C 이하

에서의 크리프는 대부분 1주일 이내에 발생되어, 그 이후에는 거의 진행되지 않는다¹⁰⁾.

4. 온도반복작용에 의한 콘크리트의 거동

4.1 콘크리트의 체적변형

콘크리트 구조물이 극저온이라는 특수 환경에서 사용되는 경우에는 전술한 강도특성 이외에도 체적 변형에 관련된 특징을 충분히 고려하여 대상 구조물을 설계해야 함은 당연하다.

철근콘크리트의 특징 중의 하나는 일반 사용환경에서의 철근과 콘크리트의 선팅장계수가 매우 유사하다는 것이다. 그러나 그림 11에서와 같이 -20°C 이하의 극저온으로 온도가 낮아지면 철근은 선형적·可逆的인 거동을 하지만 내부에 많은 수분을 포함한 콘크리트는 비선형·非可逆的 거동을 하므로, 콘크리트의 균열발생 원인으로 작용한다. 콘크리트 내부 균열의 발생가능성은 철근과 콘크리트의 선팅장계수의 차이에 의한 것 이외에도, 그림 12와 같은 콘크리

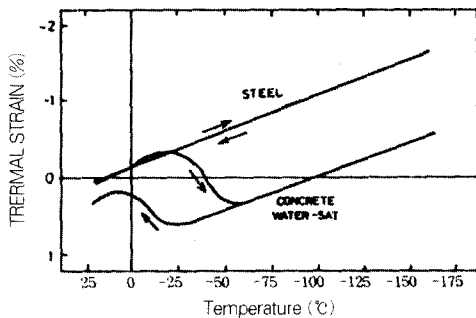


그림 11 온도변화에 따른 콘크리트의 변형거동¹⁵⁾

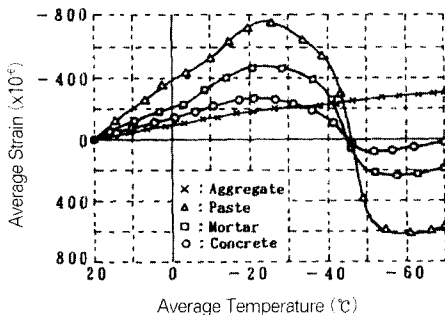


그림 12 온도저하시의 구성요소별 변형거동¹⁶⁾

트 구성요소간의 선팅장계수의 차이에 의해서도 발생될 수 있다. 즉, 일반적으로 양질의 치밀한 골재는 온도저하에 따라 거의 선형적 수축을 하지만, 습윤상태의 페이스트나 모르타르 및 콘크리트는 비선형적으로 수축하므로 골재와 페이스트의 계면과파괴를 일으키게 된다. 특히, $-40^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ 에서는 급격한 체적 변화가 일어나므로 매우 우려되는 온도범위라고 할 수 있다.

이상과 같은 온도저하시의 콘크리트 변형거동은 다음과 같이 3단계의 온도범위로 구분할 수 있다.

〈범위 C-I : 상온 $\sim -20^{\circ}\text{C}$ 〉

온도저하에 따라 콘크리트가 선형적으로 수축한다. 직경이 큰 공극속의 물은 동결·팽창하지만, 미세한 공극속의 수분은 융점강화현상에 의해 동결하지 않는다. 따라서, 일부의 동결·팽창압은 불로 포화되지 않은 공극으로 흡수되어 전체적인 체적팽창으로 나타나지 않게 된다.

〈범위 C-II : $-20^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$ 〉

콘크리트의 급격한 체적팽창이 일어나는 “천이범위”이다. 공극수의 내부분이 동결·팽창하여 내부압력이 증가하므로 미세균열이 발생한다. 경화페이스트에 대한 실험결과, -22°C 및 -43°C 부근에서 엔탈피가 크게 변화된다.

〈범위 C-III : -60°C 이하〉

콘크리트는 다시 선형적으로 수축한다. 이것은 이미 콘크리트 내부의 공극수가 거의 동결한 상태여서 팽창요인이 없어졌기 때문이다. 단, Stockhausen¹⁷⁾ 등에 의하면 직경 30A 이하의 극히 작은 공극수는 -165°C 에서도 동결하지 않는다.

한편, 그림 13은 상온 $\sim -70^{\circ}\text{C}$ 의 온도반복작용을

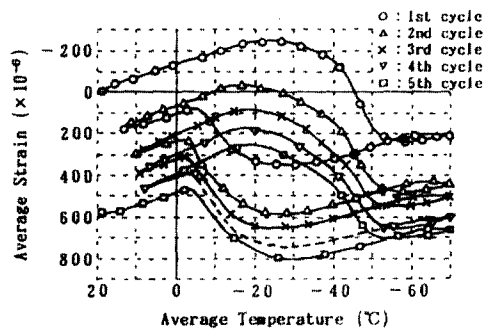


그림 13 온도반복작용에 의한 콘크리트의 변형거동¹⁶⁾

받은 습윤콘크리트의 변형거동에 대한 일례이다. 여기에서 알 수 있듯이 온도상승시의 콘크리트의 변형거동은 온도저하시와 크게 다르며, 다음과 같이 3단계의 온도범위로 구분할 수 있다.

〈범위 H-I : -20℃ 이하〉

온도상승에 따라 콘크리트가 선형적으로 팽창한다. -60℃ 이상에서의 변형거동이 온도저하시와 다른 것은 온도저하시와 온도상승시의 동일 온도에서의 동결수량이 다르다는 것을 의미한다.

〈범위 H-II : -20℃~0℃〉

이 온도범위에서는 작은 공극내의 얼음까지 모두 녹아버리므로 온도상승에 따라 콘크리트의 급격한 수축현상이 일어난다.

〈범위 H-III : 0℃~상온〉

공극 내부의 얼음이 모두 용해된 상태이므로 콘크리트는 온도상승에 따라 선형적으로 팽창한다. 그러나 콘크리트의 온도가 반복작용을 받기 이전의 상온으로 환원되어도 콘크리트는 팽창소성변형량이 잔류하게 되며, 이것은 콘크리트의 내부에 미세균열이 발생하여 조적이 이완되었다는 것을 의미한다.

4.2 콘크리트의 성능저하

상온에서부터 극저온까지의 온도반복작용은 일종의 동결융해작용이지만, 온도범위의 차이로 인하여 영향정도는 전혀 다르다. ASTM이나 KS에 규정되어 있는 일반적인 동결융해시험의 최저온도는 -20℃ 정도이므로 용이하게 생각할 수 있지만, 실험실내에서 극저온의 반복작용을 부여하기 위해서는 약 -80℃까지 냉각시킬 수 있는 특수한 냉동시험장치를 이

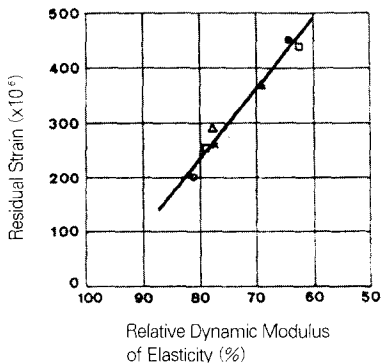


그림 14 잔류소성변형량과 상대동탄성계수의 관계¹⁶⁾

용해야 하며, -80℃ 이하로 냉각할 경우에는 통상 액체질소를 사용해야 하므로 시험비용이 과다하게 소요된다.

콘크리트의 압축강도를 비롯한 성능이 극저온의 반복작용에 의하여 저하되었다는 것은 미세균열이 발생되어 내부조적이 이완되었음을 의미한다. 이러한 내부조적의 이완현상은 잔류소성변형량으로 나타나게 되므로, 그림 14의 잔류소성변형량과 비파괴시험에 의한 상대동탄성계수의 관계와 같이 잔류소성변형량은 성능저하와 깊은 관계가 있다.

그러나, 콘크리트가 선형적으로 수축·팽창한다면 극저온의 반복작용을 받더라도 콘크리트의 성능은 유지되어 진다. 다시 말하면, 전술한 바와 같이 온도반복작용에 의한 콘크리트 변형거동의 선형 또는 비선형성은 온도범위로 규정지을 수 있으므로, 비선형거동을 하는 온도범위내에서의 동결 및 용해온도의 차이에 따라서 콘크리트의 성능저하도가 크게 달라지게 된다. 그림 15는 상온에서부터 -70℃의 범위에서 동결온도를 변화시켜 각각의 반복온도범위의 차이에 따른 동탄성계수의 차이를 나타낸 것으로서, 동결온도가 낮을수록 성능저하가 심하지만, 동결온도가 온도저하시에 콘크리트의 선형거동범위인 약 -60℃ 이하가 되더라도 성능저하도가 증가하지는 않음을 알 수 있다. 한편, 그림 16은 동결온도가 -70℃인 경우의 용해온도의 차이에 의한 동탄성계수의 차이를 나타낸것으로서, 용해온도가 높을수록 성능저하가 심함은 물론 콘크리트 내부의 얼음이 완전히 녹지 않더라도 성능저하가 발생됨을 알 수 있다. 이것은 예를들어 반복온도범위가 -3℃~-70℃이더라도 온도반복횟수가 증가할수록 잔류소성변형량이 증가한다는 현상에 의해서도 재증명된다.

4.3 온도변형거동에 미치는 영향요인

지금까지 극저온의 반복작용에 의한 콘크리트의 체적변형 및 성능저하에 대하여 전형적인 예를 들어 기술하였으나, 이러한 거동을 방지하거나 최소화하기 위해서는 그들에 미치는 영향요인에 대하여 고찰할 필요가 있다. 여기에서는 각종 요인들의 체적변형 및 성능저하에 미치는 영향이 동일하므로 성능저하로 통일하여 기술토록 한다.

콘크리트의 성능저하에 미치는 영향요인은 크게

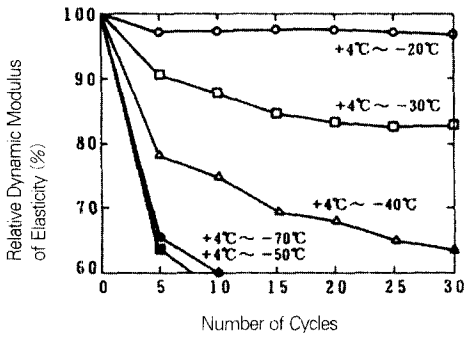


그림 15 동결온도의 차이에 의한 성능저하¹⁵⁾

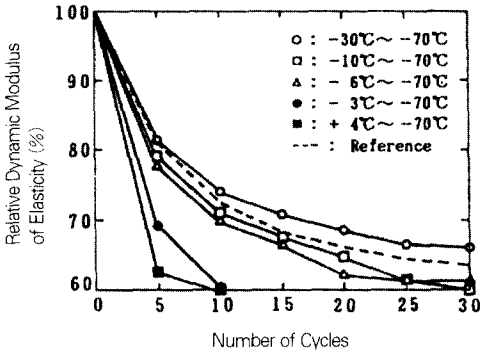


그림 16 용해온도의 차이에 의한 성능저하¹⁶⁾

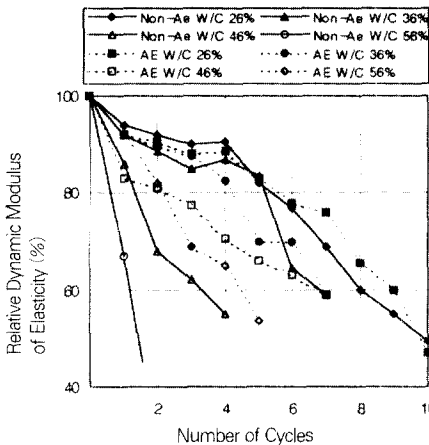


그림 17 배합조건에 따른 콘크리트의 성능저하²⁰⁾

내적요인과 외적요인으로 구분할 수 있다.

내적요인이란 콘크리트 자체의 성질에 관한 것으로서, 물시멘트비, 공기량, 함수량 등이 주요인자이

다. 우선 콘크리트의 공기량은 공극수의 동결·팽창압을 완화시키는 작용을 하므로 적절한 공기량의 확보가 중요하다. 물시멘트비는 콘크리트의 총공극량 및 모세관 공극량 등의 내부조직 결정에 가장 큰 영향을 미치므로, 물시멘트비를 낮게 설정하여 치밀한 조직의 콘크리트를 제조해야 한다. 이를 위하여 FIP 기준(안)¹⁸⁾에서는 공기량을 5% 이상, 물시멘트비를 50% 이하로 할 것을 제안하고 있다. 그림 17은 상온 ~ -196°C까지의 온도반복작용을 받은 콘크리트의 상대동탄성계수를 측정된 결과로서, 물시멘트비가 낮은 AE콘크리트일수록 성능저하가 완만함을 나타낸다. 또한, 극저온구조물을 축조한 후 콘크리트를 다소 건조시켜 함수량을 습윤상태에서보다 낮추면, 건조된 공극이 동결·팽창압을 완화시키게 되므로 성능저하 방지에 큰 효과가 있다. Rostásy and Wiedemann¹⁹⁾은 콘크리트의 성능저하 방지를 위한 함수량의 한계가 상대습도 86%에 상당하는 함수량이라고 보고하였다. 이 밖에 시멘트, 골재 등의 사용 재료의 품질도 중요요인이며, 양생조건 등의 영향도 무시할 수 없다.

외적요인으로는 반복온도범위, 냉각속도, 재하상태 및 외부로부터의 수분공급 유무 등을 들 수 있다. 그중에서 우선적으로 동결 및 용해온도 범위의 영향이 가장 기본이 되므로, 이미 앞에서 별도로 언급한 바 있다. 냉각속도의 영향에 대해서는 일반적인 동결용해작용에 대하여 Powers²¹⁾가 지적한 것과 마찬가지로 냉각속도가 빠를수록 성능저하가 심하다. 이것은 냉각속도가 빠를수록 동결·팽창압의 완화능력이 저하되어 상대적으로 동결팽창압이 커지고 잔류소성변형량도 증대하기 때문으로 여겨진다. 한편, 실제의 구조물은 어떠한 형태로든 하중을 받고 있으며, 이러한 재하상태에서는 하중의 크기에 의해 성능저하도가 달라진다. 三尚²²⁾ 등의 보고에 의하면, 콘크리트 압축강도에 대한 재하하중비가 40% 이하인 경우에는 재하하지 않은 경우보다 성능저하가 완만하며, 20%의 경우가 가장 유리하다고 하였다. 한편, 구조물이 극저온의 온도반복작용을 경우에 외부로부터 콘크리트의 내부로 수분이 계속적으로 공급이 된다 면 동결수량이 많아지고 수분의 포화상태가 지속되게 되므로 성능저하속도가 빨라지게 된다.

5. 맺음말

국내에서도 극저온 환경에 처해지는 콘크리트 구조물이 점점 증대되고 있으나, 아직 극저온에 의한 콘크리트의 성질변화에 대한 지식이 미흡한 실정이다. 본고에서는 이러한 현상 상황에서 비추어 각 연구자들에 의해 발표된 연구자료를 정리하여 기술하였다.

일반적으로 콘크리트가 극저온에 처하게 되면 압축강도 등의 강도특성이 향상되는 좋은 결과를 초래하기도 한다. 그러나 온도저하에 따라 취성이 급격히 증대하거나 체적변화가 크게 발생될 수 있으며, 또한 온도반복에 의하여 콘크리트의 성능이 급격히 저하될 가능성도 있다는 등의 심각한 문제점도 있다. 따라서 극저온 구조물을 설계할 경우에는 이상과 같은 콘크리트의 성질변화에 대하여 적절하게 대응해야 할 것이며, 또한 본고에서는 언급되지 않았으나 철근과 같은 강재도 극저온에서는 상온에서와 전혀 다른 거동을 하게 되므로 이에 대한 충분한 고려가 요망된다.

참고 문헌

- 1) Turner, F.H. : Concrete and cryogenic. Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 100PP, 1979.
- 2) Helmuth, R.A. : Capillary size restrictions on ice formation in hardened portland cement pastes. Proc. of the 4th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, W-S2, Washington, 1960, pp.855~869
- 3) Kamada, E., Koh, T. and Tanaka, M. : Frost damage of concrete from the view point of pore structures of hardened cement paste. Workshop on Low Temperature Effects on Concrete, Hokkaido, Japan, 1988 pp.92~114
- 4) Boddoo, R.E. and Setzer, M.J. : A low temperature DSC investigation of hardened cement paste subjected to chloride action. Cement and Concrete Research, Vol.18, No.2, 1988 pp.249~256
- 5) Veen, Ir.C.v.d. : Properties of concrete at very low temperatures, Delft Univ., 123pp, 1987.
- 6) Wishers, G. and Dahms, J. : Das verhalten des betons bei sehr inedrigen temperaturen. Beton, No.4, 1970 pp.135~139
- 7) 三浦 尚 : 極低溫下のコンクリートの物性, 콘크리트工學, Vol.22, No.3, 1984 pp.21~28
- 8) Tognon, G. : Behaviour of mortars and concretes in the temperature range from +20°C to -196°C, Proc. of the 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, III-24, Tokyo, 1968 pp.229~249
- 9) Wiedemann, G. : Zum einfluss tiefer temperaturen auf festigkeit und verformung von beton. Dissertation Technische Univ. Braunschweig, 1982, 149pp
- 10) 後藤幸正 · 三浦尚 : 極低溫下における鐵筋コンクリート部材の性質に關する研究, 土木學會論文集, 第285号, 1979 pp.121~134
- 11) Kasami, H., Tanaka, Y., Kishima, Y. and Yamane, S. : Properties of concrete at very low temperatures. Proc. of the 1st Int. Conf. on Cryogenic Concrete, Newcastle upon Tyne, 1981 pp.198~211
- 12) Rostá sy, F.S. and Scheurermann, I. : Verbund und innerer zwanf von einbetoniertem bewehrungsstahl bei tiefer temperatur. Forschungsbericht Technische Univ. Braunschweig, 1984, 92pp
- 13) Okada, T. and Iguro, M. : Bending behaviour of prestressed concrete beams under low temperature. Journal of Japan Presterssed Concrete Engineering Association, Special Issue for 8th FIP Congress, 20, 1978.
- 14) Rostá sy, F.S. and Wiedemann, G. : Stress-strain behaviour of concrete at extremely low temperatures, Cement and Concrete Research, Vol.10, No.4, 1980, pp.565~572
- 15) Planas, J., Corres, H., Elices, M. and Chueca : Thermal deformation of loaded concrete during thermal cycles form 20°C to -165°C. Cement and Concrete Research, Vol.14, No.5, 1984, pp.639~644
- 16) 三浦尚 · 李道憲 : 低溫下におけるコンクリートのひずみ舉動と劣化, 土木學會論文集, Vol.420, No.13, pp.191~200, 1990.
- 17) Stockhausen, N., Dorner, H., Zech, B. and Setzer, M.J. : Untersuchung von gefrierv-

- org?ngen in zementstein mit hilfe der DTA. Cement and Concrete Research, Vol.9, No.6, 1979, pp.783~794
- 18) FIP -Guide to Good Practice- : Preliminary recommendations for the design of prestressed concrete containment structure for storage of refrigerated liquefied gases(RLG), Wexham Springs, 1982.
- 19) Rostásy, F.S. and Wiedemann, G. : Strength, deformation and thermal strain of concrete at cryogenic conditions, Proc. of the 1st Int. Conf. on Cryogenic Concrete, Newcastle upon Tyne, 1981, pp.198~211
- 20) 三浦尙・後藤幸正・小島宏 : 極低温の繰返しを受けたコンクリートの劣化に関する研究, 第1回コンクリート工學年次講演會講演論文集, 12-1, 1979, pp.29~32
- 21) Powers, T.C. : A working hypothesis for further studies of frost resisiance of concrete, Journal of the ACI, Vol16, No.4, 1945, pp.245~272
- 22) 三浦尙・Kovács Ferenc・李道憲・小野雅毅 : 載荷時に-70℃まで繰返し冷却されたコンクリートのひずみ挙動と劣化に関する研究, コンクリート工學年次論文報告集, 12-1, 1990, pp.703~708 