

# 특 집

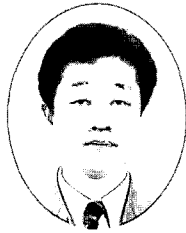
|| 온도조건 하의 콘크리트 기술 ||

## 극저온 환경 하의 콘크리트 특성 및 적용 기술

- Property and Applied Technology of Concrete at Very Low Temperature -



한상목\*  
Han, Sang Mook



송영철\*\*  
Song, Young Chul



이도현\*\*\*  
Lee, Do Heun



박계선\*\*\*\*  
Park, Kye Seon



三浦 尚\*\*\*\*\*  
Miura, Takashi

### 1. 서 론

에너지 자원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라에서는 에너지 자원의 저장은 중요한 과제의 하나로 여겨지고 있다. 또한 1차 에너지의 구성비 중에서 석유는 점진적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 석유 대체 에너지로서 기체물질의 에너지원 공급량 증가가 두드러지고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 기체상태의 물질은 체적이 큰 관계로 대량으로 저장하거나 운반하기가 매우 곤란하기 때문에 기체상태의 물질을 매우 낮은 온도로 냉각하여 액체상태로 변환하여 사용하고 있다. 액화가스의 비등점 및 체적감소율은 그 종류에 따라 큰 차이를 보이며 그 중에서 대표적인 액화가스의 성질을 <표 1><sup>2)</sup>에 나타낸다.

이들 액화가스 중에서 가장 많이 사용되는 LNG는 환경문제의 주범으로 인식되고 있는 아황산가스(SO<sub>2</sub>)를 거의 방출하지 않아 그동안 석유 사용으로 인한 지구 온난화 현상을 억제하기 위한 가장 현실적인 방법으로 여겨져 왔다. 국내에서도 1986년 인도네시아로부터 도시가스용으로 처음 도입된 이후 그 수요가 기하급수적으로 증가하여 이제는 주요 에너지원으로 확고한 위치를 점유하고 있다. 현재 전 세계적으로 LNG 등의 저장탱크에는 철근 콘크리트 구조물이 일반적으로 사용되고 있으며 극저온이라는 특별한 하중 및 특수한 성능이 설계에 반영되고 있다<sup>3)</sup>.

<그림 1>과 <그림 2>는 한국가스공사 인천기지에서 사용 및

건설중인 LNG 탱크의 전경과 지하탱크의 단면을 각각 나타낸다.

한편, 장래의 에너지 정책으로 추진되고 있는 초전도 기술, 즉 전기에너지를 자기에너지로 변환한 후 필요시 다시 전기에너지로 변환시켜 사용하는 초전도 자기에너지 저장장치(SMES : Super-conduction Magnetic Energy Storage)가 1911년 액체헬륨의 온도(-269℃)에서 발견된 이후 실용화를 위한 연구가 추진

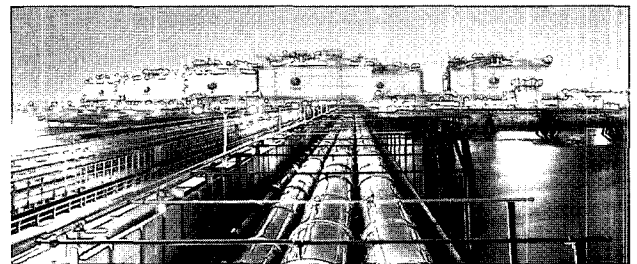


그림 1. LNG 탱크 인천기지 전경

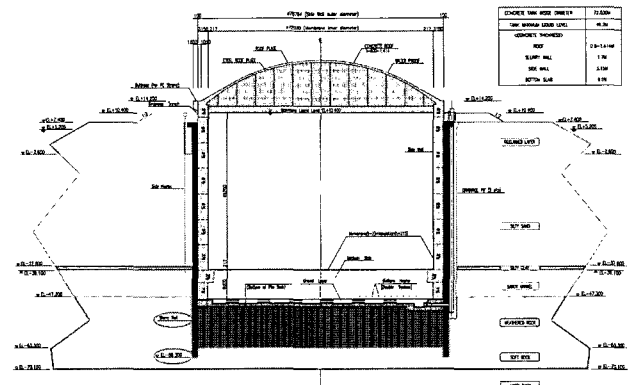


그림 2. LNG 지하탱크 단면도

\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원  
 \*\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 수석연구원  
 \*\*\* 정회원, 대한주택공사 주택도시연구원 연구위원  
 \*\*\*\* 정회원, 한국가스공사 인천기지건설 사무소장  
 \*\*\*\*\* 일본 Tohoku Univ. 토목공학과 명예교수

표 1. 각종 액화가스의 물리적 성질<sup>2)</sup>

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

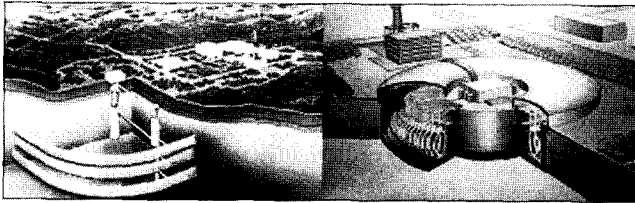


그림 3. 초전도 전력 저장 시설물 모식도<sup>4)</sup>

되고 있으며 현재 실험실수준에서 액체질소(-196°C)보다 높은 온도에서 초전도가 얻어질 수 있음이 보고 되고 있다. 초전도를 이용하여 전력을 저장하기 위해서는 초전도체로 만들어진 코일을 상기 온도에 설치하여야하므로, 이를 위하여 대형 저장 시설이 필요하다. 이미 미국, 일본 등의 선진국에서는 경제적, 성능적으로 적합한 콘크리트를 사용한 저장 시설물의 건설이 검토되고 있다. <그림 3><sup>4)</sup>은 일본에서 추진 중인 중인 전력 저장 시설물의 모식도를 나타낸 것으로 발전소 및 변전소 부지 지하 공간에 대형으로 건설하기 위한 것임을 알 수 있다.

또한 최근에는 냉동식품의 급속한 확산으로 각 제조회사 및 유통기관에서 냉동 저장 시설의 증가가 두드러지고 있으며 이러한 시설의 대부분이 콘크리트 구조물로, 약 -40 ~ -50°C의 온도에 저장되고 있다.

이와 같은 특수한 환경에 콘크리트 구조물을 사용할 경우, 콘크리트 물성과 거동에 관한 사항을 충분히 파악하여야 한다. 본고에서는 일반적으로 콘크리트 구조물의 동해 대상 온도인 0°C에서 -20°C까지를 저온, -20°C 이하에서 액체질소 온도인 -196°C까지를 극저온으로 정의하기로 한다.

이러한 극저온 환경 하에서 콘크리트를 사용하는 경우, 일반 기상조건에서 사용되는 콘크리트의 성질과 상태와는 크게 달라지며, 특히 극저온까지의 반복적인 냉각가열 작용을 받는 경우, 콘크리트의 성능저하가 큰 문제로 나타난다. 따라서 본고에서는 콘크리트가 극저온 환경에 처하는 경우의 물성변화와 냉각가열의 반복작용에 의한 콘크리트의 열화에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 극저온 하에서의 콘크리트 특성

### 2.1 역학적 성질

#### 2.1.1 압축강도

온도 저하에 의한 콘크리트의 강도 변화는 콘크리트 내부에 존재하는 수분과 밀접한 관계가 있다. 이는 상온에서 강도를 가지고 있지 않던 공극수가 동결하여 강도를 가지는 얼음으로 변화하는 것이 가장 큰 원인이기 때문이다. 콘크리트 내부의 공극수는 온도가 저하함에 따라 큰 공극수로부터 동결하여 점차 작은 공극수까지 동결하므로 강도를 가지는 얼음의 비율이 증가하여 콘크리트 강도상승 효과가 있다. 극저온 하에서의 콘크리트의 압축관계를 종합해보면 온도의 저하에 대한 압축강도는 콘크리트 함수율과 밀접한 관계가 있으며 함수율이 높을수록 증가하는 것으로 나타났다. Goto<sup>5)</sup>는 이와 같은 온도저하에 의한 콘크리트의 압축강도를 식(1)로 표현하고 각 온도 T에 대한 콘크리트의 강도 증가량과 함수량의 관계를 <그림 4>에 나타낸다.

$$\sigma_{CL} = \Delta\sigma_C + \sigma_{C0} \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $\sigma_{CL}$  : 극저온에서의 압축강도(MPa)

$\Delta\sigma_C$  : 온도저하에 따른 압축강도 증가량(MPa)

$\sigma_{C0}$  : 상온에서의 압축강도(MPa)

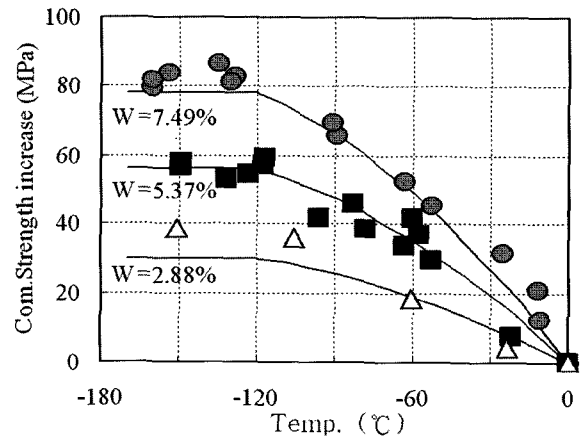


그림 4. 온도변화에 따른 압축강도 변화<sup>5,6)</sup>

또한 극저온 하에서 콘크리트의 함수율이 압축강도에 미치는 영향은 지배적이라는 실험결과를 토대로 식(2) 및 (3)의 관계가 있음을 규명하였다.

T > -120°C의 경우

$$\sigma_C = 9.8 \times 10^{-2} \left\{ 120 - \frac{1}{270} (T+180)^2 \right\} \cdot W \quad \text{식(2)}$$

T < -120°C의 경우

$$\Delta\sigma_C = 9.8 \times 10^{-2} \times 107 \cdot W \quad \text{식(3)}$$

여기서,  $\Delta\sigma_C$  : 압축강도 증가량(MPa)

T : 콘크리트 온도(°C)

W : 함수율(%)

### 2.1.2 인장강도

많은 연구자에 의해 압축강도와 동등한 방법으로 인장강도를 시험한 결과<sup>6,7,8)</sup> 극저온 하에서 인장강도도 압축강도와 동일하게 온도가 낮고 함수량이 높을수록 증가한다는 것이 알려져 있다. 그러나 압축강도는 -120°C까지 강도가 서서히 증가하는 데 비하여 인장강도는 약 -60°C까지 급격히 증가하지만 그 이하에서는 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다.

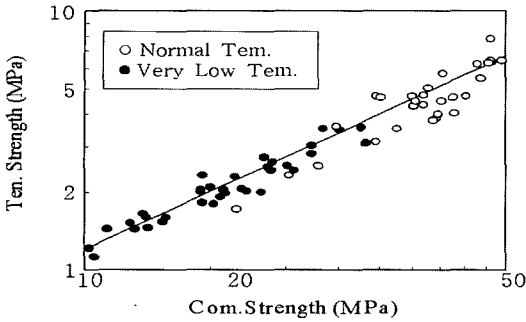


그림 5. 압축강도와 인장강도의 관계<sup>6)</sup>

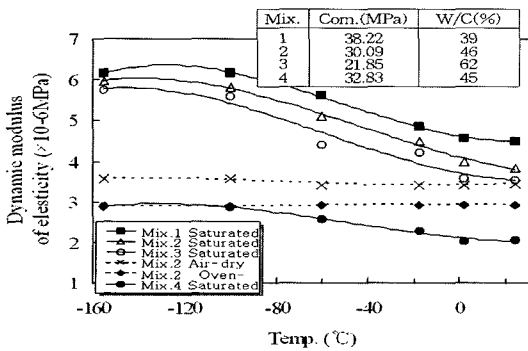


그림 6. 온도에 따른 동탄성계수 변화<sup>9)</sup>

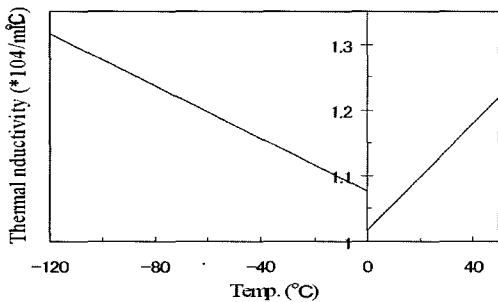


그림 7. 콘크리트 열전도율 변화<sup>12)</sup>

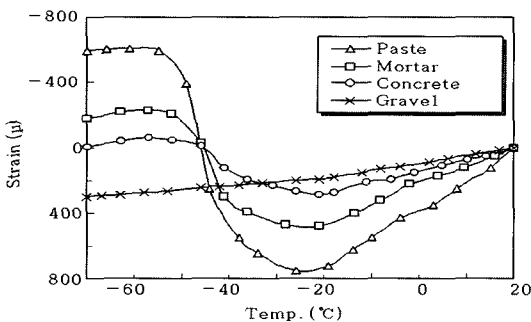


그림 8. 콘크리트 구성요소의 체적 변화<sup>14)</sup>

(그림 5)는 後藤<sup>6)</sup>가 실시한 압축강도와 인장강도의 관계를 나타내며, 콘크리트의 인장강도를 식(4)로, 압축강도와 인장강도의 관계식을 식(5)로 추정하였다.

$$\Delta\sigma_T = 0.627 W \quad \text{식(4)}$$

$$\sigma_T = 0.213 \sigma_C^{3/4} \quad \text{식(5)}$$

여기서  $\Delta\sigma_T$ : 인장강도 증가량(MPa)

$\sigma_T$ : 저온에서의 인장강도(MPa)

W: 함수율(%)

### 2.1.3 탄성계수

극저온에서 콘크리트의 탄성계수는 압축강도와 마찬가지로 온도가 저하할수록 커지는 경향이지만 그 증가율은 압축강도에 비하여 작은 것으로 나타났다.

Monifore<sup>9)</sup>는 (그림 6)에 나타낸바와 같이 습윤상태의 콘크리트 탄성계수는 상온의 경우와 비교하여 1.5배 정도 증가한다고 밝혔으며, 山根<sup>10)</sup>도 정탄성계수를 측정하여 증가비율이 거의 일치한다고 보고하였다. Miura<sup>11)</sup>는 정탄성계수의 증가비율이 Monifore의 결과와 비교하여 약간 큰 결과를 얻은 것으로 나타났다.

## 2.2 물리적 성질

### 2.2.1 열전도율

콘크리트의 열전도율은 (그림 7)에 나타낸바와 같이 온도에 의해 변화하며 온도가 빙점 이상의 경우에는 온도의 저하에 따라 감소하지만 빙점 이하에서는 0°C 부근에서 급격히 증가한 후 온도의 저하에 따라 서서히 증가한다<sup>12)</sup>. 이는 콘크리트 내부에 존재하는 물이 온도의 저하에 따라 얼음으로 변화하여 열전도율이 증가한 것이 원인으로 판단된다.

### 2.2.2 선팽창 계수

일반적인 재료는 온도 변화에 따라 체적이 변화하며 온도에 의한 체적의 변화는 재료의 선팽창계수에 의존하고 있다. 복합재료로 구성된 콘크리트는 선팽창계수가 서로 다른 구성요소로 형성되어 있으므로 온도 변화에 의해 각 복합요소간의 전단응력으로 열화가 발생한다<sup>13)</sup>. (그림 8)은 습윤상태의 콘크리트 구성요소에 대한 체적변화를 나타낸 것으로 -50°C에서 급격한 체적변화를 보이는 페스트의 선팽창계수는 -123 μ/°C로 콘크리트의 -25.7 μ/°C의 약 5배로 나타났다. 그러나 골재의 선팽창계수는 증가하는 것으로 나타나 골재 계면의 전단파괴가 일어날 가능성이 높은 것은 것으로 사료된다.

### 2.2.3 융점강하

극저온 하에서의 콘크리트 성질 변화는 수분의 동결에 의한 것

이 주된 원인으로 사료되며 콘크리트 세공에 존재하는 수분은 염분, 과냉각, 모세관 응축작용 등의 요인으로 응점강하라는 현상이 발생하여 0°C 이하에서 동결하는 것으로 알려져 있다.

### 1) 물 응점강하

물 응점강하는 세공 중에 용존되어 있는 알칼리염 등의 영향에 의해 응점이 강하하는 현상이다. 이러한 현상은 세공 중에 용존하고 있는 염의 종류에 따라 크게 달라지지만, 외부로부터 염분의 침투가 이루어지지 않는 한 세공중의 알칼리염의 농도는 0.7M 정도<sup>15)</sup>로 극저온까지의 냉각에 대한 응점강하는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.

### 2) 과냉각 현상

과냉각이란 액체를 응고점 이하로 냉각하여도 얼음의 핵이 형성되지 않고 액체상태로 존재하는 현상을 말하며 진동을 가한다든지 미세한 핵을 투입하는 등의 자극을 가함으로써 즉시 응고가 이루어지는 특성을 보인다<sup>16)</sup>. 세공 중의 수분 동결을 검토한 기존 연구에 의하면 이러한 과냉각 현상이 응점강하를 유발하는 중요한 원인으로 알려져 있으며, 경화 시멘트 페이스트를 이용한 실험을 실시한 결과 세공내의 수분동결은 과냉각현상으로 약 -10°C 정도 저하한다<sup>17,18)</sup>고 알려져 있다. 또한 시멘트페이스트 중의 수분의 동결을 시차열분석(DTA)법으로 조사한 바에 의하면 반경 0.14μ 이하의 세공수는 -30°C까지 동결하지 않는다고 보고되었다<sup>19)</sup>. 과냉각 현상의 일반적인 경향으로는 작은 세공의 수분일수록 응점강하의 경향이 크게 나타나는 것으로 알려져 있으며 과냉각에 의한 최대 응점강하는 -40°C 정도<sup>19)</sup>인 것으로 알려져 있으므로 극저온까지 냉각되는 콘크리트의 열화에 미치는 영향은 큰 것으로 판단된다.

### 3) 세공경의 영향

다공질인 콘크리트에 존재하는 공극은 강도, 탄성, 내구성 등의 재료 특성에 큰 영향을 미친다. 특히 공극 내에 존재하는 수분은 콘크리트의 물성을 크게 지배하기 때문에 온도저하에 따른 열화의 저항성을 향상시키는 중요한 포인트가 된다. 콘크리트 중의 공극은 일반적으로 갇힌공기(entrapped air), 연행공기(entrained air), 모세관공극(capillary pore), 겔공극(gel pore)의 4종류로 분류된다. 각각의 크기에 대해서는 연구자에 따라서 다소 다르지만 대략 (그림 9)<sup>9)</sup>과 같이 분류된다. 이 중에서 모세관공극과 겔공극은 동결 가능한 수분을 포함하고 있으며 겔공극 중의 수분은 극히 미세하기 때문에 일반 기상작용에서는 동결하지 않지만 극저온 하에서는 동결의 가능성이 있다<sup>20)</sup>. 따라서 극저온까지 냉각되는 콘크리트의 각종 성질을 파악하기 위해서는 상기 두 공극에 포함된 수분의 동결에 관한 정보가 필요하다. 이러한 세공 중에 포함된 수분은 세공의 크기에 따라 응점이 정해

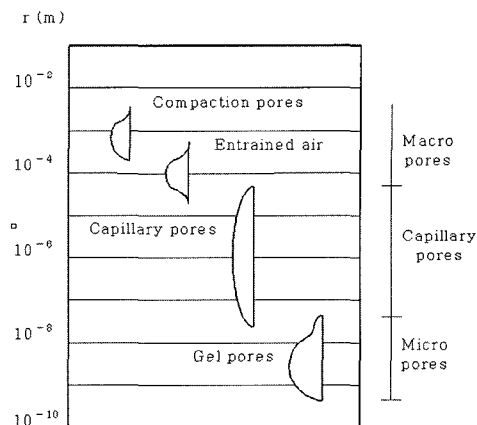


그림 9. 콘크리트 내부 세공분포<sup>9)</sup>

지며 직경이 작을수록 응점도 저하한다.<sup>21,22,23)</sup>

## 3. 냉각작용에 의한 콘크리트 열화 메커니즘

### 3.1 동상설

Collins<sup>24)</sup>는 콘크리트의 동해 메커니즘을 “흙의 동상이론”으로 설명하였으며 그 내용은 다음과 같다.

- ① 콘크리트 냉각은 표면에서 내부로 진행된다.
  - ② 내부 층에서 수분의 동결온도에 도달하였을 때 큰 공극 내부의 수분이 동결을 시작한다.
  - ③ 내부 층에서 동결이 이루어지는 동안 잠열에 의해 일정온도를 유지하며 미리 형성된 빙정은 보다 작은 공극의 물과 접촉하여 흡수하면서 커지고 1개의 층(ice lenses)을 형성한다.
  - ④ 콘크리트의 강도가 약한 경우 콘크리트의 열화는 동일 평면 상에서 형성되어 수분의 공급이 끝나면 열화는 보다 내부로 진행된다.
  - ⑤ 다음의 동결은 이전 동결의 영향이 없는 내부에서 발생한다.
- 상기 Collins의 이론에 의하면 콘크리트 열화는 층상으로 표면에서 내부로 진행된다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 수압설

Power<sup>25)</sup>는 “수압설”이라는 이론으로 콘크리트의 동결에 대한 열화를 설명하였다. 그 주요 메커니즘은 다음의 2개 현상으로 나타내고 있다.

#### 3.2.1 정수압에 의한 현상

콘크리트가 냉각되는 과정에서 표면부분이 먼저 동결온도에 도달하며 동결층은 차례로 내부로 진행하며, 이때 콘크리트 내부에서는 다음과 같은 현상이 발생한다고 예상하였다.

- ① 먼저 콘크리트 표면에 접한 수분이 동결하여 표면이 얼음으

로 덮인 상태가 된다.

- ② 표면에서 가까운 시멘트 경화체 중의 모세관공극 수분이 동결하여 수분에서 얼음으로 상변화(相變化)에 따른 체적팽창분에 상당하는 미동결 수분은 수분의 포화도가 낮고 동결하지 않은 공극 중으로 이동한다.
- ③ 상기 미동결수의 이동은 미세한 공극(capillary pores)에서 발생하기 때문에 이동시 점성저항에 의한 정수압(이동압)이 발생한다.
- ④ 상기 정수압이 콘크리트의 인장강도 한계치 이하인 경우 균열(동해)은 발생하지 않지만 통상의 냉각속도 범위내에서 시멘트 경화체의 조직을 파괴할 충분한 압력이 발생한다.

상기 메커니즘에 의한 열화를 방지하기 위해서는 공기로 채워진 공극이 필요하며 공극이 많고 기포간극계수가 적을수록 미동결수의 이동에 의한 압력이 완충되기 때문에 시멘트 경화체의 조직파괴가 줄어든다. 연행공기가 동해 방지의 유효한 이유는 상기 이론에서 설명 가능하다.

### 3.2.2 침투압에 의한 현상

콘크리트 내부의 모세관공극 중에 형성된 빙정은 보다 작은 공극의 미동결수를 흡착한다. 이렇게 빙정은 성장을 계속하며 비대해진 빙정은 침투압의 발생에 의해 콘크리트 조직을 파괴하게 된다. 이러한 침투압은 물-시멘트비가 낮은 경우의 주요 동해 메커니즘으로 인식하였다.

Power는 “수압설”을 제안함에 있어서 Collins의 이론을 상세히 검토한 결과, Collins의 이론은 경화가 진행된 콘크리트에서는 성립되지 않으며, 굳지 않은 콘크리트의 초기동해와 깊은 관계가 있는 것으로 판단하였다.

### 3.3 열역학 모델

Seter<sup>26)</sup>는 열역학 모델을 제안하여 콘크리트 열화 메커니즘을 설명하였으며 그 내용은 다음과 같다.

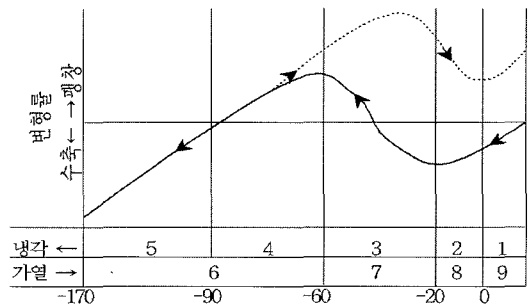
콘크리트 내부의 수분동결은 보다 큰 세공에서 시작하며, 빙정의 성장은 미동결수로 채워진 작은 세공으로 확산된다. 작은 세공은 과냉각 상태이며 열역학적으로는 동결한 세공에 존재하는 빙정과 비교하여 불안정한 상태이므로 미동결 수분은 빙정으로 확산 이동하여 동결한다. 따라서 빙정의 표면과 세공벽 사이에서는 새로이 형성된 흡착수의 표면력이 증가하며 이러한 표면력의 증가는 콘크리트 내부의 세공조직을 파괴하여 마이크로 크랙을 유발하여 콘크리트는 열화 한다.

### 3.4 Wiedemann 이론

Wiedemann<sup>27)</sup>은 습윤 콘크리트를 냉각·가열시에 발생하는 변형률을 <그림 10>과 같이 9개의 온도 범위로 나누어서 콘크리

트의 조직 변화와 성질을 다음과 같이 설명하였다.

- ① 세공은 수분으로 채워져 있으며 냉각 중에 수축만 발생한다.
- ② 큰 세공부터 얼기 시작하며 빙정이 형성되면 주위의 수분을 흡착하여 성장한다. 세공크기 이상 성장하면 여분의 수분은 수분으로 채워지지 않은 주위의 세공으로 이동한다. 얼음의 팽창보다도 수분과 시멘트 매트릭스의 수축량이 크므로 콘크리트는 수축한다. 큰 세공 중의 수분은 얼음으로 변환하여 강도를 가지므로 압축강도와 중극변형률은 크게 증가한다.
- ③ 큰 세공 및 작은 세공 모두 얼음으로 채워지며 응력의 발생이 시멘트 매트릭스에 작용하여 균열발생과 함께 콘크리트는 팽창한다. 또한 내부균열이 증가하는 것으로부터 압축강도 증가율도 감소한다.
- ④ 온도의 저하와 함께 시멘트 매트릭스보다 얼음의 수축률이 높기 때문에 콘크리트는 수축하며 공극 내의 응력은 거의 발생하지 않는다. 따라서 압축강도의 증가율은 다시 증가한다.
- ⑤ 얼음의 체적은 온도의 저하에 따라 세공 체적보다도 수축한다.
- ⑥ 콘크리트는 냉각시와 동일한 거동으로 팽창한다. 얼음의 온도 상승에 따른 부피 팽창은 콘크리트보다 크기에 세공은 다시 얼음으로 채워진다.
- ⑦ 냉각과정(②)에서 작은 세공의 수분이 큰 세공으로 이동해서 동결하였기 때문에 가열 중의 얼음의 체적이 세공 중의 체적을 상회한다. 따라서 냉각과정보다도 가열과정에서 콘



| 온도(°C) 및 모델 번호 |    |    |    |
|----------------|----|----|----|
| 번호             | 모델 | 번호 | 모델 |
| ①              | 수분 | ⑥  |    |
| ②              | 얼음 | ⑦  |    |
| ③              |    | ⑧  |    |
| ④              |    | ⑨  |    |
| ⑤              |    | -  | -  |

그림 10. 극저온 하의 콘크리트 세공 모델

크리트가 팽창하는 원인으로 나타난다.

- ⑧ 콘크리트 세공 중의 얼음이 융해함으로써 콘크리트는 수축한다.
- ⑨ 콘크리트가 극저온의 온도이력을 거쳐 상온에 돌아온 후에는 잔류소성변형이 발생하며 이는 콘크리트의 열화와 밀접한 관계를 가진다.

#### 4. 극저온 하에서 콘크리트 열화

콘크리트는 내부에 수분을 포함하고 있으므로 온도가 빙점이하가 되었을 때의 물성은 수분동결에 의한 영향을 크게 받는다. 앞에서 살펴본 바와 같이 극저온 하에서는 응점강하에 의해 콘크리트 내부의 수분은 온도저하에 따라 서서히 동결하며 특정 온도범위에서 팽창을 나타내기도 한다. 여기서 콘크리트를 시멘트 경화체, 즉 매트릭스와 수분 그리고 골재로 이루어진 복합재료임을 고려한다면 온도의 저하에 따라 팽창하는 것은 액체에서 고체로 상변화하는 수분뿐이다.

콘크리트가 극저온까지 냉각 가열작용을 받았을 때 열화에 영향을 미치는 요인에 대해서 많은 연구가 수행되어 왔으며, 이러한 실험조건으로는 물-시멘트비, 공기량, 콘크리트 함수비 등의 내적요인과 반복 횟수, 온도 범위, 냉각 속도 등의 외적요인으로 나뉘어져 실시되어 왔다. 이번 절에서는 이러한 연구 보고를 참고로 열화를 유발하는 각 요인별로 정리하여 설명하도록 한다.

##### 4.1 내적요인

###### 4.1.1 물-시멘트비와 공기량

극저온까지 냉각되는 콘크리트의 열화는 콘크리트 내부에 존재하는 수분의 동결량 차이로 발생한다고 알려져 있다. 콘크리트 내부의 수분은 세공수로서 다양한 크기의 공극에 존재하고 있으며, 동결온도가 세공의 크기에 영향을 받는다고 본다면, 세공 분포가 서로 다른 콘크리트는 열화의 정도도 달리 나타날리라 예상된다. 물-시멘트비와 공기량이 다른 콘크리트는 각각 고유의 세공 분포를 가지며 극저온까지 냉각되는 경우 열화 현상도 달리 나타날 것으로 판단된다.

佐藤<sup>28,29)</sup>는 다양한 배합의 콘크리트를 극저온까지 반복 냉각 가열작용을 가하고 물-시멘트비와 공기량이 열화에 미치는 영향을 조사하였다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 극저온까지 반복 작용을 받는 콘크리트의 열화를 억제하기 위해서는 공기의 연행은 유효하다.
- ② 물-시멘트비가 감소함으로써 페스트강도는 증가하며 페스트 내부에 존재하는 동결가능 수분을 포함하는 세공도 감소한다. 따라서 물-시멘트비의 감소는 극저온의 반복 작용에 대한 저항성을 향상시킨다.
- ③ 일반 콘크리트의 경우 -70°C 이하에서는 열화가 더 이상 진행하지 않지만 고강도 콘크리트의 경우 -70°C 이하에서

온도의 저하와 함께 열화도 저하하는 것으로 나타났다.

###### 4.1.2 함수량

콘크리트의 열화는 수분동결이 원인이므로 세공체적에서 수분이 차지하는 비율이 높은 영향을 미칠 것으로 판단된다.

三浦<sup>30)</sup>는 콘크리트 내부에 포함된 수분의 정도, 즉 함수량을 변화하여 -196°C까지 반복 작용을 가한 후 상대동탄성계수를 측정하였으며 그 결과를 <그림 11>에 나타낸다. 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. 극저온까지 반복 작용을 받는 콘크리트의 열화는 함수량이 중요한 요인으로 작용하며 함수량이 많을수록 열화가 크게 발생하며, 내구적인 구조물을 제작하기 위해서는 함수량을 적게 하여야 한다.

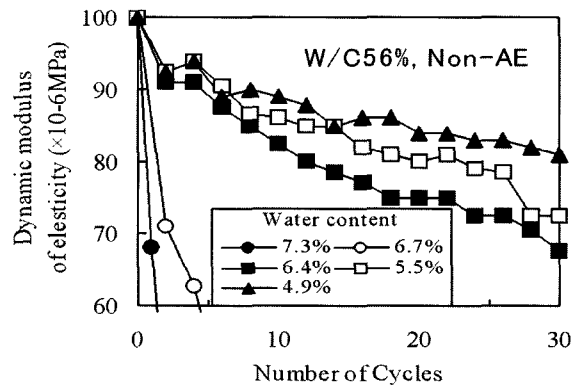


그림 11. 함수량과 상대동탄성계수의 관계

##### 4.2 외적요인

###### 4.2.1 온도범위

콘크리트가 극저온의 반복 작용을 받을 경우 통상의 동해에 의한 열화보다도 매우 크게 발생한다고 알려져 있다. 이러한 원인은 콘크리트가 냉각과정에서 수축과 팽창을 반복하여 잔류소성변형이 발생하기 때문이다. 三浦<sup>31)</sup>는 극저온 하에서의 온도 범위가 콘크리트의 열화에 미치는 영향을 조사하였으며 그 내용은 다음과 같다.

콘크리트가 상온에서 극저온까지 반복 작용을 받을 경우 <그림 12>와 같은 거동을 나타낸다. 반복 작용 후 상온에서 잔류소성변형이 발생하며, 냉각과정에서 -20°C와 -50°C 사이에 발생한 팽창이 잔류소성변형에 큰 영향을 미친 것으로 확인되었다. 각 최저온도까지 반복 작용을 실시한 결과, -50°C까지는 온도의 저하와 함께 콘크리트의 열화는 증가하나 그 이하의 온도에서는 열화가 진행되지 않는다는 것이 확인되었다. 또한 가열과정에서는 융해온도의 차이에 의해 콘크리트 내부 얼음이 완전히 녹지 않은 0°C에서 -10°C 사이에서도 열화는 증가하는 현상을 확인하였다. 이러한 관계를 <그림 13>에 나타낸다. 여기서 x는 열화가 가장 많이 발생하는 경우, △는 최저·최고온도 구간의 영향을 많이 받는 경우, ○는 열화가 거의 발생하지 않는 경우를 나타낸다.

#### 4.2.2 냉각 및 가열 속도

콘크리트가 냉각되는 과정에서 내부의 수분이 단계적으로 동결하여 콘크리트 내부에 수분의 이동에 따른 수압이 발생한다. 냉각 속도가 빠를수록 얼음의 형성에 따른 수분이동 속도도 커져서 수압이 증가하게 되며 콘크리트의 열화도 증가할 것으로 판단된다.

李<sup>32)</sup>는 냉각 속도를 변화하여 변형률과 상대둔탄성계수를 측정하여 콘크리트의 열화에 미치는 영향을 조사하였다. <그림 14>는 냉각 속도별 콘크리트 변형률을 나타낸 것으로 냉각 속도가 클수록 잔류소성변형도 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 4.2.3 일정 온도 유지

극저온 물질의 저장을 목적으로 하는 구조물은 극저온 하의 특

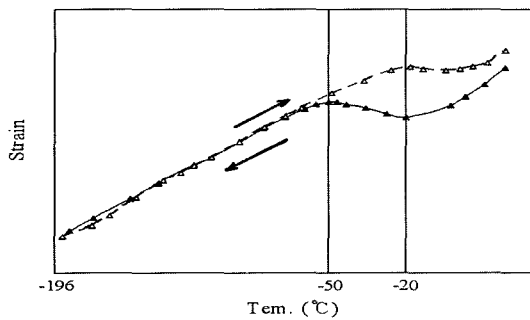
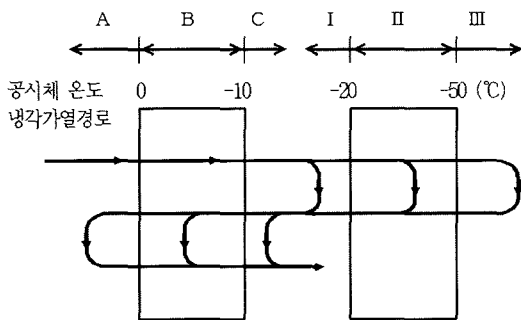


그림 12. 콘크리트 거동변화



| 냉각온도 \ 가열온도    | I (-20°C 이상) | II (-20 ~ -50°C) | III (-50°C 이하) |
|----------------|--------------|------------------|----------------|
| A(0°C 이상)      | ○            | △                | ×              |
| B(0°C ~ -10°C) | ○            | △                | △              |
| C(-10°C 이하)    | ○            | ○                | △              |

그림 13. 콘크리트 온도범위와 열화 관계<sup>31)</sup>

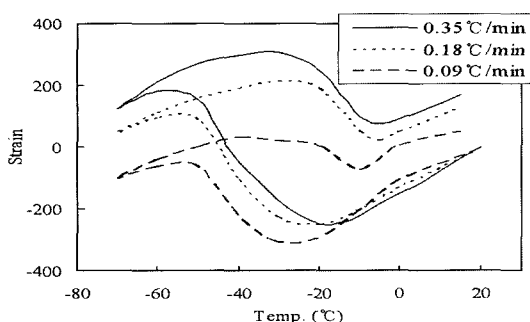


그림 14. 냉각속도의 상이와 콘크리트 변형<sup>32)</sup>

정 온도에서 일정기간 온도 유지가 이루어지며 콘크리트 열화에 영향을 미치는 중요한 요인의 하나로 볼 수 있다.

韓<sup>33)</sup>은 물-시멘트비와 공기량이 서로 다른 각 종 배합을 대상으로 -20°C ~ -60°C의 온도 범위에서 온도 유지 시간 및 냉각 속도를 변화하여 콘크리트의 열화에 미치는 영향을 조사하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 상기 온도 범위에서 온도 유지를 실시한 결과 콘크리트의 열화는 증가하였다.
- ② 물-시멘트비가 높고 공기량이 적은 콘크리트일수록 온도에 의한 콘크리트의 열화는 증가하는 것으로 나타났다.
- ③ 온도유지에 의한 콘크리트의 열화는 -40°C 부근에서 최대로 나타났으며, -40°C의 전후 온도인 -30°C와 -50°C에서는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 온도 유지 기간 중에 미동결수의 이동에 의한 빙정의 성장이 -40°C 부근에서 최대로 나타났기 때문으로 사료된다.
- ④ 일정 기간 이상 온도 유지를 실시하여도 콘크리트의 열화는 증가하지 않는 것으로 나타났다.
- ⑤ 온도 유지에 의한 콘크리트의 열화는 냉각 속도가 빠를수록 크게 나타났다. 이러한 원인은 냉각 속도가 빠를수록 미동결수가 증가하며, 증가한 미동결수가 온도 유지 기간 중에 동결하여 팽창하기 때문인 것으로 판단된다.

상기에서 살펴본 바와 같이 극저온 하에서 콘크리트의 열화에 미치는 영향은 수분의 동결에 따른 팽창압의 발생이 주요한 원인이며, 각 열화요인이 상호밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 향후 극저온 하에서 콘크리트 열화현상을 규명하기 위해서는 미동결수가 어떠한 거동을 나타내는지 상세히 조사할 필요가 있다. 구체적으로 극저온 하에서 미동결수의 동결과 이동에 의해 콘크리트의 열화에 미치는 영향이 정량적으로 평가가능하다면 각종 요인에 의한 열화 메커니즘이 밝혀지며 각종 사용조건에 적합한 열화모델의 구축이 실현가능하리라 예상된다.

### 5. 맺음말

현대과학의 급속한 발전과 함께 콘크리트는 각종 악조건에 사용되는 경우가 증가하고 있으며 국내에서도 LNG 탱크는 물론, 향후 남극대륙, 러시아 등의 극한지에 석유 탐사 개발과 같은 사업에 적극적으로 참여하고 있어 극저온 콘크리트의 적용이 크게 증가할 것으로 예상되지만 아직 극저온에 의한 콘크리트의 성질 변화와 열화에 대한 인식이 부족하며 체계적으로 정리된 연구결과도 미흡한 실정이다. 따라서 본고에서는 이러한 현실을 반영하여 현재까지 수행된 각종 연구결과를 정리하여 기술하였다. 일반적으로 극저온 하에서는 콘크리트 내부의 수분에 의해 각종 성질이 지배적으로 결정되며 온도변화의 반복 작용에 의해 콘크리트의 성능이 급격히 저하하므로 구조물의 설계시 충분히 반영하여야 할 것이다. 또한 콘크리트 이외의 철근과 같은 강재의 경우도

극저온 하에서 상온에서와는 상이한 거동을 나타내는 것으로 보고 되어 있으므로 충분한 검토가 요망된다. □

참고문헌

1. 에너지-廳監修, "90에너지-資源年鑑", 1989, pp.269~270.
2. Turner, F. H., "Concrete and cryogenic," Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1979.
3. 賴千元, "鐵筋콘크리트의歷史·에너지-施設(가스)", 日本土木學會論文集, Vol.15, No.433, 1991, pp.19~25.
4. 三浦尙, "極低溫下におけるコンクリート", 翠巒, (財)青葉山工學振興會, 2000, pp.53~57.
5. Goto, Y., Miura, T., "Experimental studies on properties of concrete cooled to about -160 °C," Technology Reports, Tohoku University, Vol.44, No.2, 1979, pp.359~381.
6. 後藤幸正, 三浦尙, 阿部善則, "極低溫下におけるコンクリートの性質について", 土木學會年次學術講演概要集, Vol.5, 1975, pp.165~166.
7. Boddoe, R. E., 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.
8. Kasami, H., Tanaka, Y., Kishima, y. and Yamane, S., "Properties of concrete at very low temperature," Proc. of the 1st Int. Conf. on Cryogenic Concrete, Newcastle upon Tyne, 1981, pp.198~211.
9. Monifore, G., Lentz, A. E., "Physical properties of concrete at very low temperatures," Journal of the PCA, Research and Development Laboratories, 1962, pp.33~39.
10. 山根昭, 蒿英雄, 奥野享, "極低溫の諸性質について", セメント技術年報30, 1962, pp.305~308.
11. Miura, T., "Deterioration of concrete cooled to very low temperatures," Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.4, 1982, pp.57~64.
12. Eakin, B. E., Bair, W. G., "Below Ground Storage of Liquefied Natural Gas in Prestressed Concrete Tanks," American Gas Association Inc., 1963.
13. Rostásy, F. S., Schneider, U. and Wiedemann, G., "Behavior of mortar and concrete at extremely low temperature," Cement and Concrete Research, Vol.9, No.3, 1979, pp.365~376.
14. 李道憲, "極低溫下におけるコンクリートの劣化に関する研究", 東北大學博士論文, 1991.
15. 大門正機 譯, "セメントの化學", 内田老鶴圃, pp.72~74.
16. マイクロソフト/小學館, "Bookshelf Basic", マルチメディア綜合辭典, 1998.
17. Helmuth, R. A., "Capillary size restrictions on ice formation in hardened portland cement pastes,"

- Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, VI-S2, Washington, 1960, pp.855~869.
18. Stockhausen, N., Dorner, H., Zech, B. and Setzer, M. J., "Untersuchung von gefriervorgängen in zementstein mit hilfe der DTA," Cement and Concrete Research, Vol.9, No.6, 1979, pp.783~794.
19. Fletcher, N. H., "氷の化學物理(前野紀一譯)", 共立出版社, 1974.
20. 小林正凡, "コンクリートの凍結融解作用による劣化に関する2, 3の考察", コンクリートジャーナル, Vol.7, No.9, 1969, pp.13~20.
21. Wittman, F. H., "Interaction of harden cement paste and water," Journal of the American Ceramic Society, Vol.56, No.8, 1973, pp.409~415.
22. Zech, B., Setzer, M. J., "The dynamic modulus of hardened cement paste. Part2: Ice formation, Drying and pore size distribution," Materials and Structures, Vol.22, 1989 pp.125~132.
23. Boddoe, R. E., Setzer, M. J., "Phase transformations of water in hardened cement paste a low-temperature DSC investigation," Cement and Concrete Research, Vol.20, 1990, pp.236~242.
24. Collins, A. R., "The destruction of concrete by frost," Institution of Civil Engineers, 1944.
25. Powers, T. C., "A Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete," Journal of the ACI, Vol.16, No.4, 1945, pp.245~272.
26. Seter, M. J., "Eirfluss des wassergelhaltes auf die eigenschaften des erhärteten Betons," Deutscher ausschuss fur stahlbeton, 280, 1977, p.103.
27. Wiedemann, G., "Zum Einflubtiefer Temperaturen auf Festigkeit und Ferformung von Beton," Dissertation Technische Universitat Braunschweig, 1982, p.149.
28. 佐藤誠, 三浦尙, "極低溫下におけるコンクリートの耐久性と空氣量との關係", 土木學會年次學術講演概要集, No.5, 1992, pp.364~365.
29. 佐藤誠, 三浦尙, "コンクリートの極低溫劣化に及ぼす空氣量と冷却最低溫度の影響", 土木學會年次學術講演概要集, No.5, 1993, pp.492~493.
30. 三浦尙, 小島宏, 渡辺直人, "繰返し極低溫にさらされたコンクリートの劣化に関する研究," セメント技術年報, 1978, pp.369~372.
31. 三浦尙, 李道憲, "低溫下におけるコンクリートのひずみ挙動と劣化," 土木學會論文集, Vol.13, No.420, 1990, pp.191~200.
32. 李道憲, 三浦尙, 兒玉浩一, "繰返し冷却されたコンクリートの劣化に及ぼす冷却速度の影響", 土木學會東北支部技術研究發表會, 1990, pp.456~457.
33. 韓相默, 岩城一郎, 三浦尙, "極低溫の溫度保持がコンクリートの劣化に与える影響," 土木學會論文集, Vol.55, No.704, 2002, pp.13~25. □