

# 동결융해작용을 받는 콘크리트의 열화에측에 관한 연구

## Study on the Prediction of Concrete Deterioration Subjected to Cyclic Freezing and Thawing

고 경 태\*      이 종 식\*      이 장 화\*\*      조 명 석\*\*\*      송 영 철\*\*\*\*  
Koh, Kyung Taeg    Lee, Jong Suk    Lee, Jang Hwa    Cho, Myung Sug    Song, Young Chul

### ABSTRACT

Deterioration induced by the freezing and thawing in concrete often leads to the reduction in concrete durability by the cracking or surface spalling. In this paper, the deterioration prediction model for concrete structures subjected to the irregular freeze-thaw was proposed from the results of accelerated laboratory test using the constant temperature condition and acceleration factor from the in-situ weather data.

#### 1. 서론

콘크리트의 동결융해작용에 의한 열화는 콘크리트중의 수분이 동결융해작용을 반복적으로 받아 균열이 발생하거나 표층부가 박리함으로써 표면부분부터 파괴되어 점차적으로 콘크리트구조물의 내구성능이 저하되는 현상을 말한다. 우리 나라도 전국 대부분이 겨울철의 기온이 영하로 떨어지는 회수가 많기 때문에 콘크리트구조물은 매년 동결융해의 반복작용을 받는다고 말할 수 있다. 이런 동결융해작용에 의한 실 구조물의 열화예측이 가능하게 된다면, 보다 합리적인 배합설계, 내구성설계 및 유지관리가 가능하게 될 것이다.

기존의 동결융해의 수명저하모델로는 동결수량, 기포간극계수 및 세공량과 상대동탄성계수와의 관계식으로 표현되는 방법<sup>1), 2)</sup>이 있으나, 동결수량, 기포간극계수, 세공량을 측정하기 위해서는 특수장치가 필요하는 등 실용적인 면에서 문제가 있다. 成田 등은 콘크리트의 상대동탄성계수 저하를 예측하기 위해서 파괴확률 과정이론을 적용하여 물시멘트비, 세공재율, 공기량, 동결온도를 변수로 한 동해열화확률모델을 제안하였다.<sup>3)</sup> 또, Ghaffori는 ASTM C 666 A법에 준하여 동결융해시험을 실시한 결과를 토대로 하여 시멘트량, 밀도, 압축강도를 변수로 하는 중량감소율을 예측하는 식을 제안하였다.<sup>4)</sup> 이상의 成田, Ghaffori가 제안한 모델식들은 일정한 동결온도조건하에서 구성되어 있기 때문에 이런 모델로는 온도조건이 불규칙한 실제자연환경을 고려하는 것은 어렵다고 판단된다.

본 연구는 일정한 온도조건으로 동결융해작용을 받는 실내축진시험의 결과와 실제구조물이 위치한 기상데이터로부터 시험축진계수를 구하여, 불규칙하게 동결융해작용을 받는 실제구조물의 열화를 예측하는데 목적이 있다.

\* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

\*\*\* 정회원, 전력연구원 원자력연구실 선임연구원

\*\*\*\* 정회원, 전력연구원 원자력연구실 책임연구원

## 2. 수명저하 예측모델 구성

앞에서도 언급했지만, 기존의 동결융해의 수명저하 예측모델은 대부분 일정한 최저온도조건하에서 구성되어 있기 때문에, 불규칙하게 최저온도가 콘크리트에 작용하는 자연환경하의 실제구조물의 수명을 예측하는 것은 어렵다. 즉, 실내축진시험에서는 동결최저온도조건이 일정하게 작용하기 때문에 동결융해 1사이클에 해당하는 손상을 일으키는 힘은 동일하지만, 자연환경하에서는 1사이클마다 손상을 일으키는 힘은 동결최저온도조건이 일정하지 않기 때문에 불규칙한 크기로 콘크리트에 작용하게 된다. 따라서, 실제구조물의 동결융해작용에 의한 수명예측을 하기 위해서는 불규칙한 동결최저온도를 고려할 수 있는 모델식을 구성할 필요가 있다.

### 2.1 수명저하 예측 기본모델식

본 연구에서는 동결융해의 수명저하 예측 기본모델로서 野本등이 제안한 모델식<sup>5)</sup>을 채용하고자 한다. 이 모델식은 실내축진시험의 결과로부터 최저온도, 물시멘트비를 변수로 하여 파괴사이클을 예측할 수 있는 식이다. 단, 이 모델식은 Non-AE 콘크리트에 대해서만 적용 가능하다.

$$N_f = 10^{(0.14 \ln(C/W) + 0.004)\theta + 3.15 \ln(C/W) + 1.43} \quad (1)$$

여기서,  $N_f$ 는 파괴 사이클수,  $\theta$ 는 최저온도,  $C/W$ 는 시멘트물비이다. 그림 1은 식(1)을 이용하여 임의의 시멘트물비와 최저온도에서의 파괴사이클수를 예측한 결과이다.

또한, 野本등은 물시멘트와 최저온도의 영향을 동시에 고려하기 위해서 기준이 되는 물시멘트비, 최저온도에 대해서 구하려고 하는 물시멘트비, 최저온도에서의 파괴사이클수의 비인 가중계수를 다음과 같이 정의하였다.

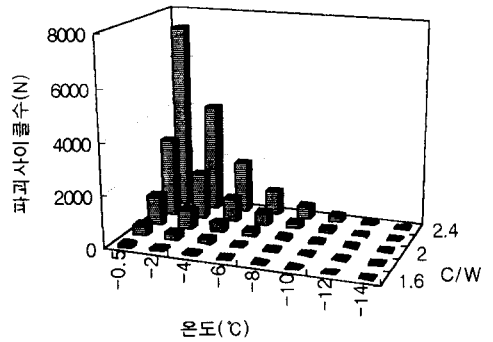


그림 1 최저온도 및 물시멘트비와 파괴 사이클수와의 관계

$$\phi = \frac{N_d[(C/W)_{st}, (\theta)_{st}]}{N_d[(C/W)_i, (\theta)_i]} \quad (2)$$

여기서,  $\phi$ 는 가중계수,  $N_d[(C/W)_i, (\theta)_i]$ 는 구하려

고 하는 콘크리트의 시멘트물비와 최저온도에 있어서 파괴사이클수,  $N_d[(C/W)_{st}, (\theta)_{st}]$ 는 기준으로 하는 콘크리트의 시멘트물비와 최저온도에 있어서 파괴사이클수이다.

### 2.2 자연환경하에 있어서의 동결융해사이클수 산출

자연환경하에서의 불규칙한 최저온도를 고려할 수 있는 동결융해사이클수를 다음과 같이 산출하였다.

#### (1) 연평균 동결융해사이클수( $N_{ave}$ )

기상데이터로부터 일정한 간격으로 동결최저온도의 동결빈도수 및 연평균 동결융해사이클수를 산출한다.

#### (2) 파괴사이클수와 가중계수

식(1)과 식(2)을 이용하여 동결최저온도마다의 파괴사이클수와 가중계수를 구한다.

#### (3) 누계 동결융해사이클수(N)

식(3)으로부터 자연환경하에서의 누계 동결융해사이클수를 산출한다.

$$N = \sum_{i=0}^n \{N_i\} = \frac{\{RN_i\}}{\{\phi_i\}} \quad (3)$$

여기서, N은 누계 동결융해사이클수,  $\{RN_i\}$ 는 동결최저온도 i에 대한 동결융해 회수,  $\{\phi_i\}$ 는 임의의 물시멘트비, 동결최저온도 i를 기준으로 했을 때의 파괴사이클수에 미치는 최저온도의 가중계수이다.

#### (4) 시험 축진계수(K)

실내동결융해시험의 결과를 실제 구조물에 적용하기 위해 시험 촉진계수를 다음과 같이 산출한다.

$$K = \frac{N}{N_{ave}} \quad (4)$$

(5) 자연환경하에 있어서의 동결융해사이클수(cycles)

실내시험의 동결융해사이클수( $N_r$ )에 대응하는 실제자연환경하에 있어서의 동결융해사이클수를 다음과 같이 산출한다.

$$cycles = K \times N_r \quad (5)$$

### 3. 예측모델식의 적용례

그림 2에 0°C에서 동결·융해가 발생한다고 가정하여 1986년부터 1998년까지 13년동안 서울지역의 기상데이터로부터 동결융해 빈도수를 동결최저온도 0.5°C마다 구한 결과를 나타내었다. 서울지역에서는 연평균 90사이클 정도의 동결융해작용을 받고 있으며, 동결최저온도의 연평균기온은 약 -5.1°C 정도이다. 즉, 서울지역의 콘크리트구조물은 동해의 영향을 받을 우려가 있으며, 내동해성에 대한 내구성설계가 필요하다고 판단된다. 그림 3은 물시멘트비 35%, 50%의 AE콘크리트 (공기량: 4.5±0.5%)를 대상으로 ASTM C 666 A법인 수중동결수중융해시험(콘크리트의 중심온도: -18°C ~ +5°C)을 실시한 결과이다.<sup>6)</sup> 그림 4는 그림 2에 나타난 서울지역의 기상데이터로부터 최저온도 -0.5°C마다 동결최저온도의 평균빈도수를 구한 결과와 그림 3의 결과를 토대로 본 연구에서 구성한 모델식을 적용하여 자연환경하에서의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와와의 관계를 구한 결과이다. 그리고 표 1에 상대동탄성계수가 60%되는 시점을 콘크리트가 파괴되는 수명종결상태라고 하였을 때의 동결융해사이클수와 수명년수를 추정한 결과를 나타내었다.

실내시험에서는 물시멘트비 35%경우는 약 1,700사이클, 물시멘트비 50%경우에는 약 850사이클에서 상대동탄성계수가 60%이하가 된다. 실제 자연환경하에서 물시멘트비 35% 콘크리트의 경우는 약 1,000, 000사이클에서 물시멘트비 50%의 경우는 약 7,250사이클에서 수명종결상태가 된다. 즉, 서울지역에서 연평균 90사이클의 동결융해작용을 받고 있으므로, 물시멘트비 35%경우는 11,100년정도, 물시멘트비 50%경우는 81년 정도의 수명을 가진다고 추정할 수 있다.

또, AE콘크리트와 물시멘트비가 동일한 Non-AE콘크리트에 대해서 적용해보면 물시멘트비 35%경우는 70년정도, 물시멘트비 50%경우는 약 10년정도의 수명을 가진다고 추정된다.

이상으로, 본 연구에서 구성한 수명저하 예측모델식은 동결최저온도가 불규칙한 자연환경하에 있어서도 동결최저온도의 영향을 고려할 수 있으며, 임의의 최저온도하에 있어서의 열화곡선을 추정 가능하게 되었다.

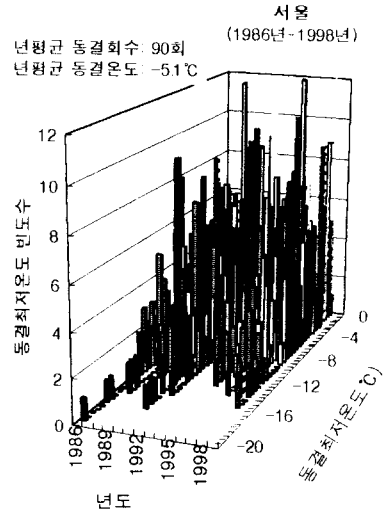


그림 2 서울지역의 동결최저기온의 기상데이터

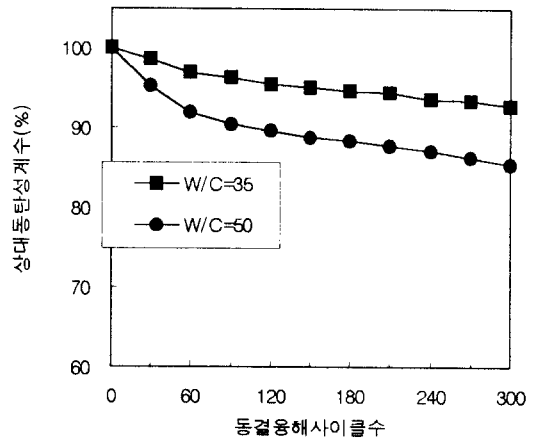


그림 3 물시멘트비가 내동해성에 미치는 영향<sup>6)</sup>

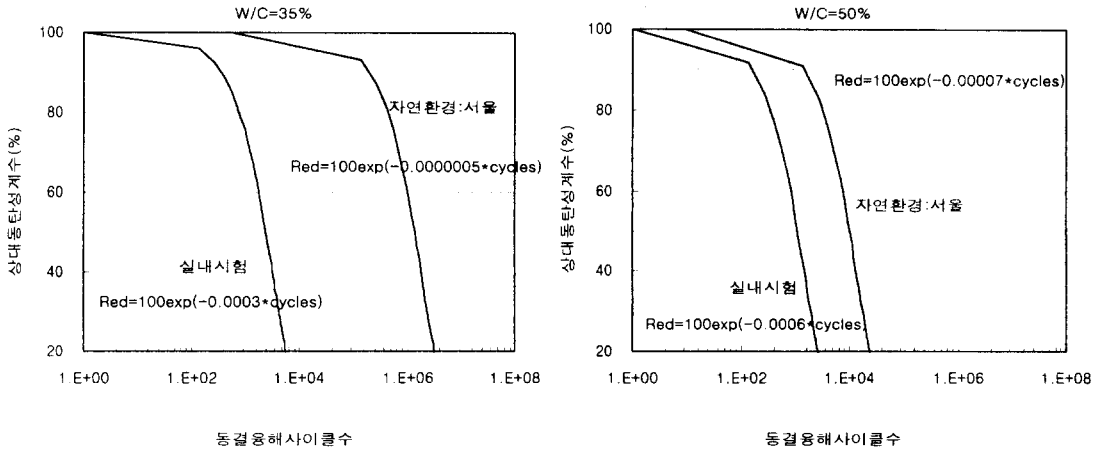


그림 4 자연환경하에서의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와의 관계

#### 4. 결론

본 연구에서는 기상데이터와 실내시험의 결과를 토대로 동결최저온도가 불규칙하게 작용하는 자연환경하에 있어서 동결융해작용에 의한 수명저하 예측모델을 구성하였으며, 이 예측모델식을 이용하면 임의의 물시멘트비와 최저온도를 고려할 수 있는 열화곡선의 추정이 가능하다.

향후의 과제로서, 동결융해 저항성은 콘크리트의 수분상태에 따라서 크게 달라지므로 실내 동결융해시험을 실제구조물의 수분상태를 고려하여 실시하여, 그 결과를 토대로 수명예측을 할 필요가 있다.

표 1 수명종결상태 (상대동탄성계수가 60%)의 시점

W/C (%)	실내시험 (-18℃)		자연환경 (서울)		Non-AE (-5.1℃)	
	사이클 수	수명 (년)	사이클 수	수명 (년)	사이클 수	수명 (년)
50	850	10	7,250	81	848	10
35	1,700	19	1,000,000	11,100	6,340	70

#### 참고문헌

- 1) 山下, 村上, “凍結融解を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究”, 콘크리트工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, 1992
- 2) Kamada, E. and Senbu, O., “Statistical investigation concerning the effects of pore structure on the frost resistance of concrete”, Journal of Structure and Construction Engineering, AIJ, No. 487, 1996
- 3) 成田, 三橋, 平井, “凍害劣化確率モデルの構成要素に及ぼす影響要因の考察”, 日本建築学会構造系論文集, No. 455, 1994
- 4) Ghaffori, N. and Mathis, R., “Prediction of freezing and thawing durability of concrete paving blocks”, Journal of materials in civil engineering, No. 45, 1998
- 5) 野本, 江川頭, 野口, 山下, “最低温度が凍結融解作用下のコンクリートの劣化に及ぼす影響について”, 콘크리트工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, 1992
- 6) 高京澤, 三浦尚, “初期凍害を受けた各種コンクリートの品質低下とその対策”, セメント・コンクリート論文集, No. 52, 1998