

# 동결융해 작용을 받는 콘크리트 구조물의 내구성능 저하 예측 방법에 관한 연구

A Study on the Deterioration Prediction Method of  
Concrete Structures Subjected to Cyclic Freezing and Thawing

고 경 택\*      김 도 겸\*      조 명 석\*\*      송 영 철\*\*\*  
Koh, Kyung-Taeg      Kim, Do-Gyeum      Cho, Myung-Sung      Son, Young-Chul

## Abstract

In general, the deterioration induced by the freezing and thawing cyclic in concrete structures often leads to the reduction in concrete durability by the cracking or surface spalling. If it can prediction of concrete deterioration subjected to cyclic freezing and thawing, we can rationally do the design of mix proportion in view of concrete durability and the maintenance management of concrete structures. Therefore in this study a prediction method of deterioration for concrete structures subjected to the irregular freezing and thawing is proposed from the results of accelerated laboratory freezing and thawing test using the constant temperature condition and the in-situ weathering data. Furthermore, to accurately predict the concrete deterioration, a method of modification for the effect of hydration increasing during rapid freezing and thawing test is investigated.

**Keywords** : Cyclic freezing and thawing, in-situ weathering data, prediction of concrete deterioration, laboratory freezing and thawing test

## 1. 서 론

일반적으로 콘크리트 구조물은 비, 바람, 눈, 일조 등과 같은 여러 종류의 기상작용의 영향을 받고 있으며 이로 인하여 동결융해 작용, 온도 변화, 건조와 수분의 반복 침투 작용 등에 의한 수축팽창이 발생한다. 이 중에서 동결융해 작용은 매년 겨울이

되면 반복이 되기 때문에 장기간에 걸쳐 콘크리트의 내구성능을 저하시킨다. 콘크리트의 동결융해 작용에 의한 내구성능 저하는 콘크리트 내부의 수분이 동결융해 작용을 반복적으로 받아 균열이 발생하거나 표층부가 박리함으로써 표면부분부터 점차적으로 저하되어 콘크리트 구조물의 내구성능이 저하되는 현상<sup>(1)</sup>을 말한다.

\* 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

\*\* 전력연구원 원자력연구실 선임연구원

\*\*\* 전력연구원 원자력연구실 책임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2001년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

우리 나라는 겨울철에 전국 대부분의 기온이 영하로 떨어지는 회수가 많기 때문에 콘크리트 구조물은 매년 동결융해의 반복작용을 받는다<sup>(2)</sup>고 말할 수 있다. 이런 동결융해 작용에 의한 실제 구조물의 내구성능 저하 예측이 가능하게 된다면 보다 합리적인 배합설계, 내구성 설계 및 유지관리가 가능하게 될 것으로 판단된다.

현재, 콘크리트의 동결융해 저항성을 판단하는 방법으로는 전세계적으로 ASTM C 666법의 급속 동결융해 시험방법<sup>(3)</sup>을 많이 사용하고 있으며 우리나라에서도 이 방법에 근거를 두어 KS F 2456법(급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)<sup>(4)</sup>을 규정하여 사용하고 있다. 그러나 ASTM C 666법 및 KS F 2456법의 촉진 동결융해시험과 자연환경하의 동결융해와의 관계 규명에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

기존의 동결융해 수명 지하 예측 모델로는 동결수량, 기포간극계수 및 세공량과 상대동탄성계수와와의 관계로 표현되는 방법<sup>(5)~(10)</sup>이 있으나 동결수량, 기포간극계수, 세공량을 측정하기 위해서는 특수장치가 필요하는 등 실용적인 면에서 문제가 있다. Narita 등<sup>(11)</sup>은 콘크리트의 상대동탄성계수 저하를 예측하기 위해 파괴확률과정 이론을 적용하여 불-시멘트비, 잔골재율, 공기량, 동결온도를 변수로 한 동결융해 저항성 지하 확률 모델을 제안하였다. Ghaffori<sup>(12)</sup>는 ASTM C 666 A법에 준하여 동결융해시험을 실시한 결과를 토대로 하여 시멘트량, 콘크리트의 밀도 및 압축강도를 변수로 하여 질량 감소율을 예측하는 모델식을 제안하였다. 이상의 Narita<sup>(11)</sup>, Ghaffori<sup>(12)</sup>가 제안한 모델식들은 일정한 온도조건의 실내 동결융해 시험결과를 토대로 구성되어 있기 때문에 이런 모델로는 온도조건이 불규칙하게 작용하는 실제 자연환경을 고려하는 것은 어렵다고 판단된다. 즉, 자연환경을 고려한 가운데 실내 촉진동결융해 시험결과를 평가하여 콘크리트 구조물의 내구성과 관련시킬 필요가 있다.

따라서 본 연구는 일정한 온도조건으로 동결융해 작용을 받는 실내 촉진시험의 결과와 실제 구조물이 위치한 기상 데이터로부터 대응계수를 산출하는 방

법을 검토하여 불규칙한 온도조건으로 동결융해 작용을 받는 실제 콘크리트 구조물의 내구성능 저하를 예측하는 기법을 개발하는 데 목적이 있다.

## 2. 수명 지하 예측 모델 구성

앞에서도 언급했지만, 기존의 동결융해 수명 지하 예측 모델은 대부분 일정한 온도조건으로 구성되어 있으므로 온도조건이 불규칙하게 작용하는 자연환경하의 실제 콘크리트 구조물의 동결융해 수명 지하를 예측하는 것은 매우 어렵다. 즉, 실내 촉진동결융해 시험에서는 동결 최저온도조건이 일정하게 작용하기 때문에 동결융해 1사이클로 인한 손상을 일으키는 힘은 동일하지만, 자연환경 하에서는 동결 최저온도가 일정하지 않으므로 1사이클마다 손상을 일으키는 힘은 불규칙한 크기로 콘크리트에 작용하게 된다. 따라서 실제 구조물의 동결융해 작용에 의한 내구성능 지하를 예측하기 위해서는 불규칙한 동결 최저온도를 고려할 수 있는 모델을 구성할 필요가 있다.

동결융해 작용에 의한 내구성능 저하에 미치는 온도요인으로는 동결 최저온도, 동결속도, 융해온도, 동결 최저온도의 지속시간 등이 있으나 본 연구에서는 온도요인 중에서 가장 영향이 클 것으로 판단되는 동결 최저온도만을 고려하였다. 동결속도, 융해온도 및 동결 최저온도의 지속시간의 온도요인은 일반적인 자연환경 하의 온도범위에서는 동결융해 저항성에 별다른 영향을 주지 않는다고 판단되었기 때문이다.<sup>(13)~(15)</sup> 그리고 동결융해에 의한 내구성능 저하를 평가하는 방법으로는 강성 변화, 길이 변화, 질량 변화 등이 있으나, 본 연구에서는 콘크리트의 강성 변화에 주목하여 동결융해시험에서 콘크리트의 내구성능 저하 과성을 나타내는 지표로서 일반적으로 사용되는 상대동탄성계수를 이용했다.

### 2.1 동결융해 저항성 지하 예측 기본 모델식

본 연구에서는 동결융해 저항성 지하 예측 기본 모델식으로는山下<sup>(5)</sup> 등이 제안한 모델식을 채용하

고자 한다. 이 모델식은 Non-AE 콘크리트의 배합으로 ASTM C 666 A법의 급속 수중동결 수중융해 시험을 실시한 결과로부터 동결 최저온도와 물-시멘트비를 변수로 하여 파괴 사이클을 예측하는 식이다. 여기서 파괴 사이클의 정의는 상대동탄성계수가 60% 이하가 되는 사이클 수를 말한다.

$$F_n = 10^{((0.14 \ln(C/W) + 0.004)\theta) + (3.15 \ln(C/W) + 13)} \quad (1)$$

여기서,  $F_n$  : 파괴 사이클수  
 $\theta$  : 동결 최저온도  
 $C/W$  : 시멘트-물비

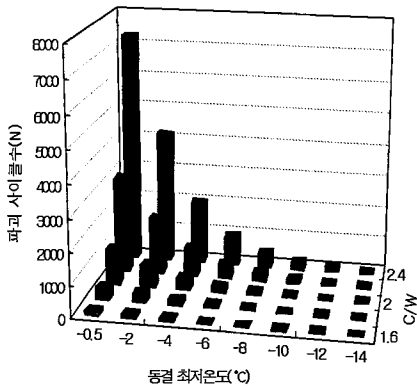


Fig. 1 동결온도, 시멘트-물비와 파괴 사이클수와의 관계

식 (1)을 이용하여 임의의 시멘트-물비와 동결 최저온도에서의 파괴 사이클수를 예측한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 즉 식 (1)로 임의의 물-시멘트비와 동결 최저온도에 대응하는 파괴 사이클수를 구할 수 있다.

그리고 山下<sup>(5)</sup> 등은 물-시멘트비와 동결 최저온도의 영향을 동시에 표현하기 위해 기준이 되는 물-시멘트비와 동결 최저온도에 대해 구하자고 하는 물-시멘트비와 동결 최저온도에서의 파괴 사이클수의 비인 가중계수를 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\phi = \frac{N_d[(C/W)_{st}, (\theta)]^1}{N_d[(C/W)_{t}, (\theta)_{st}]^1} \quad (2)$$

여기서,  $\phi$ 는 가중계수,  $N_d[(C/W)_{st}, (\theta)_{st}]$ 는 기준이 되는 콘크리트의 물-시멘트비와 동결 최저온도에서의 파괴 사이클수,  $N_d[(C/W)_{t}, (\theta)_{t}]$ 는 구하고자 하는 콘크리트의 물-시멘트비와 동결 최저온도에서의 파괴 사이클수이다.

식 (1)은 Non-AE 콘크리트에 적용할 수 있으므로 외적 성능저하 요인(동결 최저온도 요인)의 영향만을 평가할 수 있지만, 식 (2)를 이용하면 AE제를 사용한 콘크리트에도 적용할 수 있으므로 내식 성능저하 요인의 영향도 평가할 수 있다.

## 2.2 자연환경 하에 있어서 동결융해 사이클수 산출

현장 점검결과 및 현장에 폭로된 콘크리트 공시체에 대해 측정된 결과가 있으면 식 (1), 식 (2)로도 자연환경 하에 있어서 동결융해 사이클수의 산출이 가능하다. 그러나 국내에는 동결융해에 대한 현장 점검결과 및 현장에 폭로된 콘크리트에 대해 체계적으로 관측된 결과는 거의 없는 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 실내 동결융해시험의 결과를 토대로 자연환경 하에서의 불규칙한 동결 최저온도를 고려할 수 있는 동결융해 사이클수를 산출하는 기법을 다음과 같이 제안하고자 한다.

### (1) 년 평균 동결융해 사이클수 산출

콘크리트는 일반적으로 0°C보다 약간 낮은 온도에서 동결하며 그 동결점의 온도는 일반적으로 콘크리트의 알칼리 농도, 염화물 농도 등에 따라 약간 다르다. 이처럼 동결점 온도가 콘크리트 종류마다 다르므로 본 연구에서는 기상 데이터의 정리를 간편화하기 위해 0°C에서 동결-융해가 발생한다고 가정하며 동결융해 빈도수를 동결 최저온도 0.5°C마다 산출한다. 이상의 가정으로 년 평균 동결융해 사이클수를 식 (3)과 같이 산출한다.

$$NFT_{av.} = \frac{\sum (NT_i \times T_i)}{T_m} \quad (3)$$

여기서,  $NFT_{av}$  : 년 평균 동결융해 사이클수  
 $NT_i$  : 동결 최저온도  $i$ 에 있어서 동결융  
 해 사이클수  
 $T_i$  : 0.5°C마다 산출한 동결 최저온도  
 $T_{av}$  : 년 평균 동결 최저온도

(2) 파괴 사이클수 및 가중계수 산출  
 동결 최저온도별로 식 (1), 식 (2)로부터 파괴 사  
 이클수 및 가중계수를 구한다.

(3) 누계 동결융해 사이클수( $N$ )  
 식 (4)로부터 자연환경 하에 있어서 누계 동결융  
 해 사이클수를 산출한다.

$$N = \sum_{i=1}^n N_i = \frac{\{NT\}^k}{\{\phi_i\}} \quad (4)$$

여기서,  $N$  : 누계 동결융해 사이클수  
 $\{NT_i\}$  : 동결 최저온도  $i$ 의 동결융해 사  
 이클수  
 $\{\phi_i\}$  : 동결 최저온도  $i$ 의 가중계수

(4) 대응계수 산출  
 실내 촉진동결융해시험의 결과를 실제 자연환경  
 하의 콘크리트 구조물에 적용하기 위해 일정한 온도  
 조건으로 동결융해 작용을 받는 실내 촉진동결융해  
 시험의 결과와 실제 콘크리트 구조물의 위치한 기상  
 데이터로부터 다음과 같이 대응계수를 산출한다.

$$K = \frac{N}{NFT_{av}} \quad (5)$$

(5) 자연환경 하에 있어서 동결융해 사이클수 산출  
 실내 촉진동결융해시험의 동결융해 사이클수에 대  
 응하는 실제 자연환경 하에 있어서 동결융해 사이클  
 수를 식 (6)과 같이 산출한다.

$$N_{na} = K \times N \quad (6)$$

여기서,  $N_{na}$  : 자연환경하에 있어서 동결융해 사  
 이클수  
 $K$  : 대응계수  
 $N_{no}$  : 실내 촉진동결융해시험의 동결융해  
 사이클수

(6) 상대동탄성계수와 동결융해 사이클수의 관계  
 실내 촉진동결융해시험에서 얻어진 상대동탄성계  
 수와 자연환경 하에서의 동결융해 사이클수와의 관  
 계를 식 (7)의 형태로 회귀분석을 통해 추정한다.

$$R_{ed} = 100 \text{Exp}(a \times N) \quad (7)$$

여기서,  $R_{ed}$  : 상대동탄성계수  
 $a$  : 변수

여기서 변수  $a$ 는 콘크리트 배합 및 환경조건에 따  
 라 변하는 계수이다.

그리고 본 연구에서 동결융해 작용에 의해 내구성  
 능 저하의 판단은 Fig. 2에 나타난 것처럼 상대동탄  
 성계수 90% 이상을 내구성 저하 징후가 나타나는  
 과정, 상대동탄성계수 90%에서 60%까지를 내구성  
 능 저하가 명확히 나타나는 과정 및 상대동탄성계수  
 60% 이하를 콘크리트 파괴상태 과정으로 구분하였  
 다. 여기서 상대동탄성계수 90% 이하의 콘크리트는  
 유지관리가 필요하다.

### 3. 실내 촉진동결융해시험

#### 3.1 시험개요

Table 1과 Table 2에 사용재료의 특성과 콘크리  
 트의 배합비를 나타내었다. 결합재로서 보통 포틀랜  
 드시멘트만을 사용한 보통 콘크리트는 폴-시멘트비  
 50%, 폴-시멘트비 35%의 2종류에 대해 시험을 실  
 시하였다. 그리고 고유동 콘크리트는 폴-결합재비  
 $W/B=35\%$ , 비표면적 4,240 $\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬레그 미  
 분말을 치환율 80%으로 혼합한 BS4/80, 폴-결합  
 재비  $W/B=35\%$ , 비표면적 8,240 $\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬레

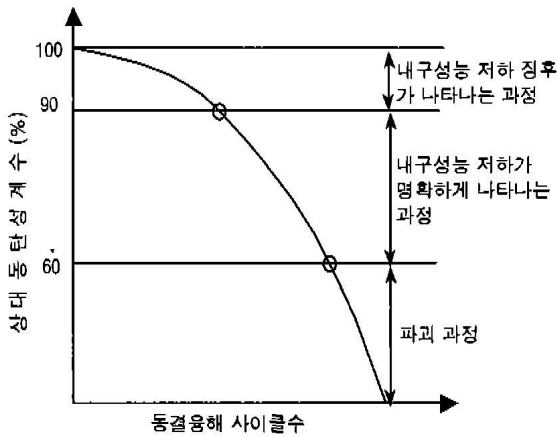


Fig. 2 동결융해 작용에 의한 내구성능 저하 과정 개략도

Table 1 사용재료의 물성

사용재료	기호	물 성
시멘트	C	보통 포틀랜드시멘트, 밀도: 3.16g/cm <sup>3</sup> , 비표면적: 3,250cm <sup>2</sup> /g
고로슬래그 미분말	BS4	비표면적: 4,240cm <sup>2</sup> /g, 밀도: 2.92g/cm <sup>3</sup>
	BS8	비표면적: 8,240cm <sup>2</sup> /g, 밀도: 2.92g/cm <sup>3</sup>
잔골재	S	산모래, 밀도: 2.53g/cm <sup>3</sup> , 흡수율: 2.64%
굵은골재	G	쇄석, 밀도: 2.86g/cm <sup>3</sup> , 흡수율: 0.98%, G <sub>max</sub> : 20mm
고성능 감수제	SP	폴리칼리본산계와 가교폴리마의 복합제
AE제	AE	변성알칼리칼리본산계

Table 2 콘크리트 배합

콘크리트 종류	배합명	슬럼프 또는 슬럼프플로우 <sup>2)</sup> (cm)	공기량 (%)	W/B (%)	s/a (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )					SP (B× wt.%)	AE (B× wt.%)
						W	B		S	G		
							C	BS				
보통 콘크리트	W/C=50%	10±2'	4.5±0.5	50	42	175	350	-	728	1118	-	0.008
	W/C=35%			35	40	168	480	-	643	1090	0.8	0.004
고유동 콘크리트	BS4/80	65±5"	4.5±0.5	35	52	175	100	400	804	839	1.26	0.007
	BS8/50			35	52	175	250	250	810	843	1.35	0.005

그 미분말을 치환율 50%로 혼합한 BS8/50의 2 종류에 대해서도 시험을 실시하였다.

아직 굳지 않은 콘크리트의 특성으로서 보통 콘크리트에서는 슬럼프 10±2cm, 고유동 콘크리트에서는 슬럼프 플로우값 65±5cm, O형 7.5cm 시험기 유지시간 10±5초를 만족하도록 하였다. 또한 공기량은 콘크리트 종류에 상관없이 4.5±0.5%의 범위를 만족하도록 하였다.

실험은 10×10×40cm 각주 공시체로 재령 28일까지 20℃에서 밀봉양생을 실시하여 급속 동결융해 시험 및 완속 동결융해 시험을 실시하였다. 그리고 동절기에 시공 초기 동결을 받는 것을 상정하여 타설 직후에 -10℃에서 12시간 동안 동결을 시킨 다음에 재령 28일까지 20℃에서 밀봉양생을 실시하여 동결융해 시험을 실시하였다.

급속 동결융해 시험은 ASTM C 666 A법<sup>(3)</sup>인 수중동결 수중융해에 준하여 실시하였다. 급속 동결융

해 시험의 온도범위는 공시체의 중심온도를 -18.7℃~+5.0℃로 하고 1사이클의 시간은 3시간 20분으로 하였다. 30사이클마다 가로진동의 일차 공명진동수와 공시체의 질량을 300 사이클까지 측정을 실시하여 상대동탄성계수를 구하였다.

ASTM C 666 A법은 고로슬래그 미분말 및 플라이 애쉬와 같은 수화반응이 늦은 포졸란계를 혼합한 콘크리트에서는 동결융해 시험 중에 장기간(약 45일) 수중에 방치되므로 수화가 진행되는 경우가 발생한다. 즉 내구성능 저하에 의한 동탄성계수의 감소와 수화반응에 의한 동탄성계수의 증가가 상쇄되어 내구성능 저하의 정도를 정확히 평가할 수 없게 된다.<sup>(16)</sup> 특히 본 연구와 같이 실내 동결융해 시험 결과로 동결융해 작용에 의한 내구성능 저하를 예측하는 경우에는 실내 동결융해 시험 결과를 정확히 평가하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 급속 동결융해 시험 중에 발

생하는 수화반응의 영향을 보정하기 위해 1사이클의 적산온도가 급속 동결융해시험의 30사이클의 경우와 동일하게 되도록 설정한 완속 동결융해시험에 의해 품질의 향상량을 평가하였다.<sup>(17)</sup> 완속 동결융해시험의 온도범위는 급속 동결융해시험의 평균온도(공시체 깊이 방향에 따른 온도분포를 고려하여 구한 온도)인  $-19^{\circ}\text{C} \sim +7.6^{\circ}\text{C}$ 로 1사이클의 시간은 급속 동결융해시험을 30배 한 100시간으로 하였다. 측정은 1사이클마다 10사이클까지 실시하였다.

### 3.2 동결융해시험 중 수화영향 보정 방법<sup>(17)</sup>

급속 동결융해시험 중 내구성능 저하 정도는 수화에 의한 품질 향상량과 동결융해 작용에 의한 품질 저하량의 차이라고 생각하여 급속 동결융해시험 중 발생하는 수화의 영향을 보정하였다.

Fig. 3은 상대동탄성계수의 보정 방법을 모델화한 것이다. 측정  $n$ 회에 있어서 상대동탄성계수의 보정값  $R_n$ 은 식 (8)로 표현된다.

$$R_n = \left\{ 1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta E_i}{a_i} \right\} \times 100 \quad (8)$$

여기서,  $\Delta E_i$ 는 측정  $i$ 회에 있어서 급속 동결융해시험과 완속 동결융해시험과의 동탄성계수 차이 값이며 식 (9)로 표현된다.  $a_i$ 는 측정  $i$ 회와  $i-1$ 회 사이의 완속 동결융해시험의 평균 동탄성계수를 급속 동결융해시험 결과에 적용할 수 있도록 한 계수이며 식 (10)으로 표현된다.

$$\Delta E_i = (E_{ai} - E_{ai-1}) \times \frac{E_{bo}}{E_{ao}} - (E_{bi} - E_{bi-1}) \quad (9)$$

$$a_i = \frac{E_{ai} + E_{ai-1}}{2} \times \frac{E_{bo}}{E_{ao}} \quad (10)$$

여기서,  $E_{ai}$  : 완속 동결융해시험에 있어서 측정  $i$ 회  
          제 동탄성계수

$E_{bi}$  : 급속 동결융해시험에 있어서 측정  $i$ 회  
          제 동탄성계수

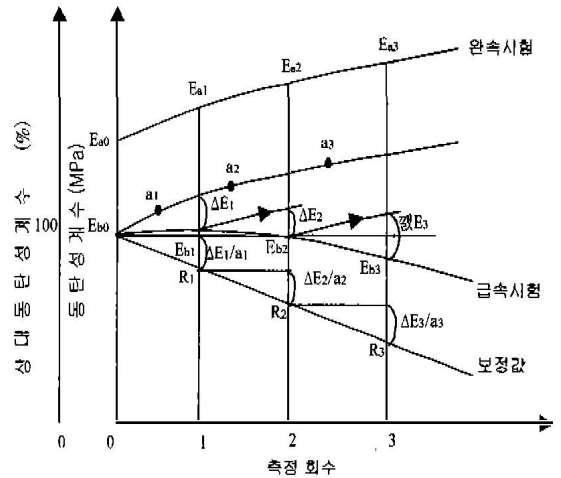


Fig. 3 상대동탄성계수 보정 방법의 모델<sup>(17)</sup>

### 3.3 시험 결과

Fig. 4에  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 12시간 동결을 받은 보통 콘크리트의 동결융해 시험결과를 나타내었다. Fig. 4에서 보정 값은 완속 동결융해시험으로부터 급속 동결융해시험 중에 진행되는 수화의 영향을 식 (8)에 의해 보정 한 상대동탄성계수의 값이다. 보정 전과 보정 후 상대동탄성계수를 비교해 보면 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 결합재로 보통 포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트는 본 연구와 같이 충분한 기간 양생을 실시하면 동결융해시험 중 수화

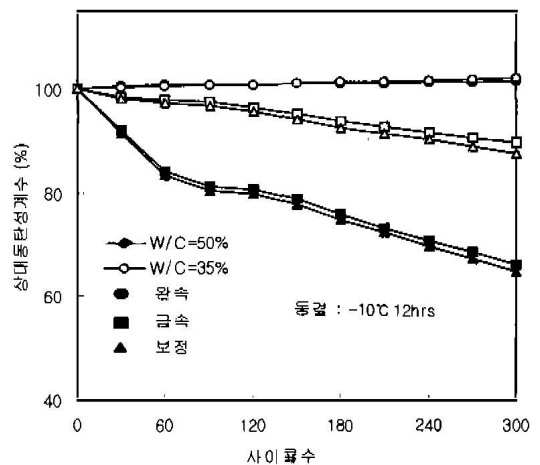


Fig. 4 보통 콘크리트의 동결융해시험 결과

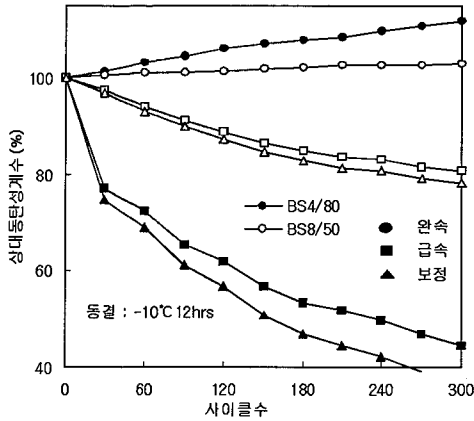


Fig. 5 고유동 콘크리트의 동결융해시험 결과

진행이 거의 발생하지 않으므로 급속 동결융해시험 결과로도 수명예측을 하더라도 무방할 것으로 판단된다.

Fig. 5에  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 12시간 동결을 받은 고로슬래그 미분말을 사용한 고유동 콘크리트의 동결융해 시험의 결과를 나타내었다. 고로슬래그 미분말을 사용한 고유동 콘크리트는 보정 전과 보정 후 상대동탄성계수 차이가 10% 정도로 크며 특히 치환율이 낮은 콘크리트일수록 수화의 영향이 많음을 알 수 있다. 즉 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 동결융해시험 중 수화진행이 무시할 수 없을 정도로 발생하므로 급속 동결융해시험 결과만으로는 정확한 수명을 예측할 수 없기 때문에 본 연구와 같은 방법으로 급속 동결융해시험 중 수화의 영향을 보정하여 수명예측을 할 필요가 있다.

#### 4. 기상 데이터

본 연구에서는 기상청의 홈페이지(<http://www.ma.go.kr/>)에서 제공되는 기상 데이터로부터  $0^{\circ}\text{C}$ 에서 동결·융해가 발생한다고 가정하여 1986년부터 1999년까지 14년 동안의 동결융해 사이클수를 동결 최저온도  $0.5^{\circ}\text{C}$  간격으로 산출하였다. 여기서 기상 데이터는 기상청에서 관측한 기온이므로 동일한 지역이라도 처한 환경에 따라 실제 구조물이 받는

Table 3 국내의 동결융해에 관한 기상 데이터

지역	년 평균 동결 최저온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )	년 평균 동결융해 사이클수
춘천	-6.5	127
서울	-5.1	90
대전	-4.8	98
대구	-3.7	80
울진	-3.5	75
광주	-3.5	78
부산	-3.1	40

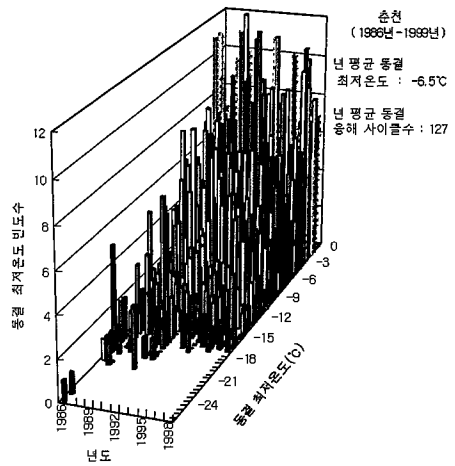


Fig. 6 춘천지역의 동결 최저기온에 관한 기상 데이터

온도는 다를 수 있다. 그리고 산출한 지역은 춘천, 서울, 대전, 광주, 대구, 울진, 부산이며 년 평균 동결융해 사이클수와 년 평균 동결 최저온도를 Table 3에 나타내었다. Fig. 6에 연도별로 조사한 춘천지역의 기상 데이터를 나타내었다.

춘천은 년 평균 동결 최저온도가  $-6.5^{\circ}\text{C}$ 이고 년 평균 동결융해 사이클수가 127회 정도로 조사 지역 중에서 동결융해 작용을 가장 많이 받고 있다. 서울은 년 평균 90 사이클 정도의 동결융해를 받고 있으며 동결 최저온도의 평균기온은  $-5.1^{\circ}\text{C}$  정도이다.

그리고 대구, 광주, 울진은 년 평균 동결융해 사이클수가 75회 정도, 동결 최저온도의 평균기온이  $-3.5^{\circ}\text{C}$  정도로 거의 동등한 동결융해 작용을 받는

Table 4 배합과 지역별 식 (7)의 변수 a를 추정한 결과

지역	보통 콘크리트				고유동 콘크리트			
	W/C=50%		W/C=35%		BS4/80		BS8/50	
	S	F	S	F	S	F	S	F
춘천	-2E-5	-5E-5	-1E-6	-3E-6	-9E-6	-1E-4	-2E-7	-7E-6
서울	-2E-5	-4E-5	-8E-7	-3E-6	-8E-6	-1E-4	-2E-7	-6E-6
대전	-2E-5	-4E-5	-8E-7	-3E-6	-6E-6	-1E-4	-2E-7	-6E-6
대구	-1E-5	-3E-5	-6E-7	-2E-6	-6E-6	-8E-5	-1E-7	-5E-6
울진	-1E-5	-3E-5	-6E-7	-2E-6	-6E-6	-8E-5	-1E-7	-4E-6
광주	-1E-5	-3E-5	-6E-7	-2E-6	-6E-6	-8E-5	-1E-7	-4E-6
부산	-1E-5	-3E-5	-5E-7	-2E-6	-5E-6	-7E-5	-1E-7	-4E-6

S : 표준양생  
F : -10℃에서 12시간 동결

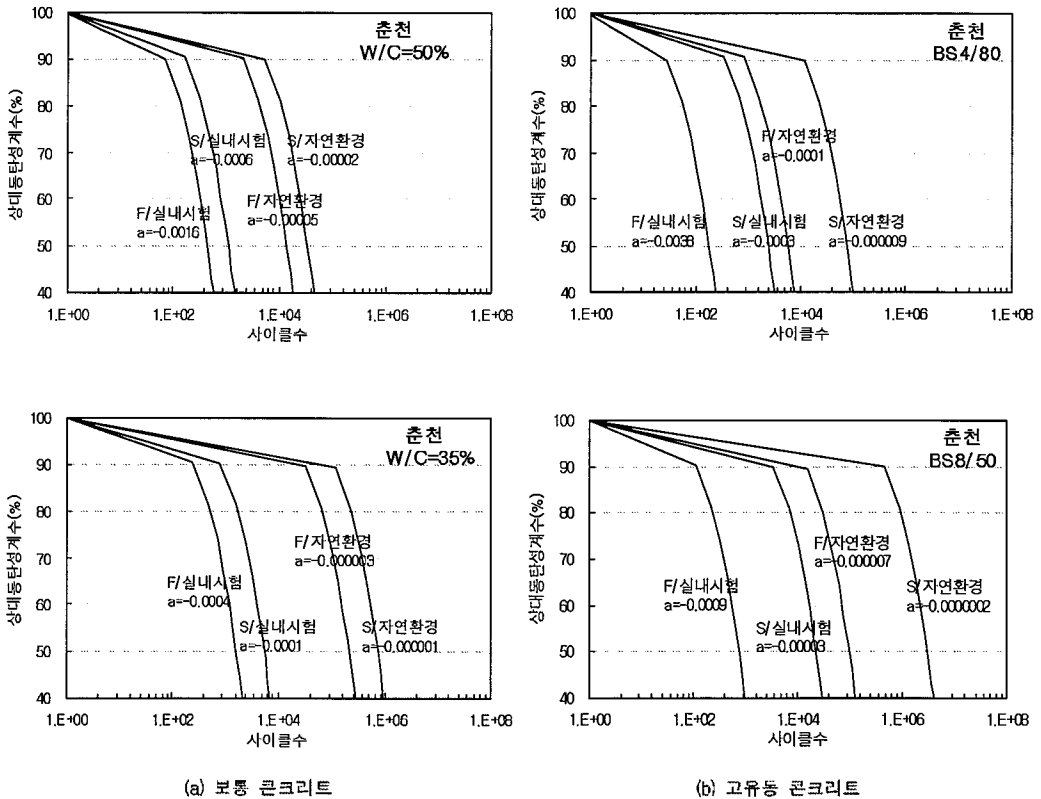


Fig. 6 내구성능 저하 곡선 추정결과(춘천)



것으로 조사되었다. 부산은 년 평균 동결융해 사이클수가 40회 정도이고 년 평균 동결 최저온도도 -3.1°C로 조사한 지역 중에서 동결융해 작용을 가장 작게 받는 것으로 나타났다.

이상과 같이 우리나라는 다소 정도의 차이는 있지만, 전국적으로 콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받을 우려가 있으므로 동결융해 저항성을 고려한 내구성 설계가 필요하다고 판단된다.

### 5. 수명 저하 예측 모델식 적용

본 연구에서 2절에서 구성한 수명 저하 예측 모델식에 3절에서의 실내 시험결과 및 4절에서의 기상 데이터를 입력하여 동결융해 작용을 받는 콘크리트의 수명 저하 과정을 추정하였다.

Table 4에 자연환경 하에서의 상대동탄성계수와 동결융해 사이클수와의 관계를 나타낸 식 (7)의 변수  $a$ 를 추정한 결과를 나타내었다. 그리고 변수  $a$ 와 식 (6)의 자연환경 하에 있어서 동결융해 사이클수  $N_{eq}$ 를 이용하면 자연환경 하에 있어서 상대동탄성계수의 변화곡선을 추정할 수 있다. 즉 배합별 실내 동결융해시험의 결과와 지역별 기상 데이터가 있으면 동결융해 작용에 의한 콘크리트의 내구성능 저하 곡선을 추정할 수 있다.

Fig. 6에 춘천에 대해 상대동탄성계수 변화곡선을 추정한 결과를 나타내었다. Table 5에 내구성능 저하 과정을 Fig. 2에 나타낸 것처럼 상대동탄성계수 90% 이상을 내구성능 저하 징후가 나타나는 과정, 상대동탄성계수 90%에서 60%까지를 내구성능 저하가 명확히 나타나는 과정, 60% 이하를 콘크리트 파괴 과정으로 구분하여 동결융해 사이클수를 산출한 결과를 나타내었다.

초기동해를 받지 않은 보통 콘크리트의 실내시험에서는 물-시멘트비 50%인 경우에는 850 사이클, 물-시멘트비 35%인 경우에는 5,100 사이클에서 상대동탄성계수가 60% 이하가 되는 결과를 얻었다. 자연환경 하에서는 물-시멘트비 50%인 경우에는 25,500 사이클, 물-시멘트비 35%인 경우에는 1,700,000사이클에서 상대동탄성계수가 60% 이하

Table 5 상대동탄성계수 저하 과정별 동결융해 사이클수 산출 결과(춘천)

배합		실내시험		자연환경(춘천)		
		R <sub>90</sub>	R <sub>60</sub>	R <sub>90</sub>	R <sub>60</sub>	
보통 콘크리트	W/C =50%	S	175	710	5,230	29,800
		F	65	319	2,100	10,200
	W/C =35%	S	1,050	5,100	350,000	1,700,000
		F	261	1,273	116,500	567,000
고유동 콘크리트	BS 4/80	S	350	1,700	11,700	56,750
		F	27	134	1,050	5,105
	BS 8/50	S	3,510	17,025	525,000	2,554,000
		F	116	567	15,050	72,790

가 된다. 즉 실내시험은 자연환경에 비해 물-시멘트비 50%인 콘크리트 경우에는 약 42배, 물-시멘트비 35%인 콘크리트 경우에는 약 330배의 촉진성을 가지고 있다. Ishi 등<sup>(18)</sup>은 물-시멘트비 49%의 콘크리트에 대해 실내 촉진동결융해시험과 년 평균 동결 최저온도 -6.0°C인 지역에 20년간 폭로시험을 실시한 결과, 실내 촉진동결융해시험은 폭로시험에 약 48배의 촉진성을 가진다고 하였다. 본 연구에서 사용한 콘크리트의 물-시멘트비 50%와 년 평균 동결 최저온도가 -6.5°C를 고려하면 본 연구 결과와 Ishi 연구 결과는 거의 유사한 결과라고 사료된다.

초기동해의 유무에 따라 상대동탄성계수 저하 과정별 동결융해 사이클수가 큰 차이가 있으므로 동결기에 콘크리트 타설 시는 동해를 받지 않도록 대책이 필요하다. 또 고로슬래그 미분말을 다량으로 사용한 콘크리트는 보통 포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트보다 초기동해의 영향을 크게 받으므로 특히 주의할 필요가 있다.

그리고 식 (1)로 Non-AE 콘크리트의 상대동탄성계수 60%가 되는 사이클수를 계산한 결과, 물-시멘트비 50%인 경우에는 1528 사이클, 물-시멘트비 35%인 경우에는 3324 사이클이다. 이처럼 동일한 물-시멘트비라도 공기를 연행하지 않은 콘크리트는 공기를 연행한 콘크리트에 비해 동결융해 작용에 의한 내구성능이 현저히 저하되므로 동결융해 작용의 우려가 있는 경우에는 반드시 소정량의 공기를 확보

할 필요가 있다고 판단된다.

이상의 결과로부터, 본 연구에서 구성한 수명 저하 예측 모델식은 장기폭로 시험결과가 없더라도 실내 축진시험과 기상 데이터만 있으면 동결 최저온도가 불규칙한 자연환경 하의 동결융해작용에 의한 콘크리트의 내구성능 저하 폭선의 추정이 가능함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구는 실내 축진시험 결과와 실제 구조물의 처한 환경과의 대응계수를 산출하는 방법으로부터 불규칙한 온도조건으로 동결융해 작용을 받는 콘크리트 구조물에 대한 내구성능 저하를 예측하고자 하는 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서는 기상 데이터와 실내 동결융해시험의 결과를 토대로 동결 최저온도가 불규칙하게 작용하는 자연환경 하에 있어서 동결융해 작용에 의한 수명 저하 예측 모델을 구성하였으며, 이 예측 모델식을 이용하면 임의의 물-시멘트비와 동결 최저온도를 고려할 수 있는 내구성능 저하 폭선 추정이 가능하다.
- (2) 수화반응이 늦은 고르슬레그 미분말을 다량으로 혼합한 콘크리트는 축진 동결융해시험 중 수화의 영향이 포함되어 정확한 수명 저하 예측을 할 수 없으므로 수화의 영향을 보정할 필요가 있다.
- (3) 우리 나라는 전국 대부분 콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받을 우려가 있으므로 동결융해 저항성을 고려한 내구성 설계가 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. Nevil, A.M., "Properties of concrete," Fourth Edition, Longman, 1995.
2. 고정택 외, "동결융해 작용을 받는 콘크리트의 열화 예측에 관한 연구," 콘크리트학회 1999년도 가을학술발표회논문집, 1999.
3. ASTM C 666-84, "Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04, 02, pp. 403-410, 1984.
4. KS F 2456, "급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항

시험방법," 1993.

5. 山下英俊, "凍結融解を受けるコンクリートの劣化豫測に関する研究," 콘크리트工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, 1992.
6. Kamada, E. and Senbu, O., "Statistical investigation concerning the effects of pore structure on the frost resistance of concrete," Journal of Structure and Construction Eng., AIJ, No. 487, 1994.
7. 樋口泉, "多孔體の毛管内に分散した物質の性質と毛管構造," 表面, Vol. 6, No. 3, pp.186-176, 1968. 6.
8. 三浦尚, 多田活治, "細孔構造に化著したコンクリートの低溫劣化の診斷法の基礎的研究," 콘크리트工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, 1991.
9. Rostasy, F.S., Weiss, R.U. and Wiedeman, G. "Changes of pore structure of cement mortars due to temperature," Cement and Concrete Research, Vol. 18, No. 5, 1988.
10. 山下英俊, 田中典明, "凍害を受ける凍結水量の算定方法と耐凍害指標値の提案," 콘크리트工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, 1991.
11. 成田建, "凍害劣化確率モデル構成要素に及ぼす影響要因の考察," 日本建築學會構造系論文集, No. 455, 1994.
12. Ghaffori, N. and Mathis, R., "Prediction of freezing and thawing durability of concrete paving blocks," Journal of Materials in Civil Engineering, No. 45, 1998.
13. 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," 日本東北大學博士學位論文, 1991.
14. 韓相默, 三浦尚, "極低溫下での濕度保持がコンクリートの耐久性に及ぼす影響," 日本土木學會東北支部研究發表會, 1999.
15. Tabata, A. and Kamada, A., "コンクリートの耐凍害性に及ぼす環境要因の影響," セメント技術年報, Vol. 37, 1983.
16. 高京澤, 岩城一良, 三浦尚, "初期凍害を受けた高爐スラグ微分末混和高流動コンクリートの品質低下とその對策," 日本土木學會論文集 No. 641/V-46, pp. 1-13, 2000. 2.
17. 고정택, 장일명, "초기동해를 받은 콘크리트의 내동해성 평가법에 대한 검토," 콘크리트학회논문집 No. 11, Vol. 4, pp. 117-127, 1999.8.
18. Ishi, K. and Noguchi, H., "Prediction of concrete deterioration by cyclic freezing and thawing," JSCE, No. 571/V-36, 1997.

(접수일자 : 2000년 8월 28일)