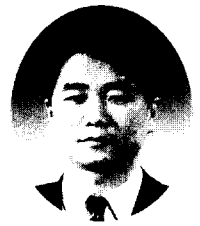

초기동해를 받은 콘크리트의 내동해성 평가법에 대한 검토

Investigation on the Method of Evaluating the Resistance to Freezing and Thawing of Concrete Subjected Initial Frost Damage.



고 경 택*

Ko, Kyeong-Taek



장 일 영**

Jang, Il-Young

ABSTRACT

In concrete incorporating high volume ground granulated blast-furnace slag that has frozen at early age, to evaluate the results of resistance to freezing and thawing is very difficult because the hydration of the concrete increases over the duration of rapid freezing and thawing test. Hence, the dynamic modulus of elasticity of specimens after freezing and thawing will be favorable results unless the hydration effect is taken into consideration.

In this study, a method of evaluating to the resistance to freezing and thawing of concrete subjected freezing at early age, in which the effect of hydration is modified for its increase during rapid freezing and thawing test, is investigated.

Keywords : resistance to freezing and thawing, rapid freezing and thawing test, slow freezing and thawing test, water-keeping test, dynamic modulus of elasticity

* 정회원, 한국건설연구원 토목연구부 구조재료그룹
** 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 부교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로
보내주시면 2000년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

콘크리트의 내동해성을 평가하는 시험방법으로써 ASTM C 666 A법¹⁾에 의한 급속수중동결융해시험이 미국, 캐나다, 일본, 한국 등에서 널리 사용되고 있다. 이 방법은 재령 14일(또는 재령 28일) 까지 콘크리트 공시체를 20℃에서 수중양생한 후 수중에서 동결융해를 가해 동탄성계수 및 질량변화등에 의해 내구성능 저하정도를 평가하는 것이다. 그러나 이 시험방법은 콘크리트 공시체가 동결융해시험 개시시까지 수화가 충분히 진행되지 않으며 특히 수화반응이 늦은 포졸란계 혼입 콘크리트에서는 동결융해시험 중에 장기간(약 45일) 수중에 방치되기 때문에 수화가 진행되는 경우도 발생한다. 따라서 내구성능 저하에 의한 동탄성계수의 감소와 수화반응에 의한 동탄성계수의 증가가 상쇄되어 내구성능 저하의 정도를 정확히 평가할 수 없다.^{2), 3), 4)} 고경택등⁵⁾은 고로슬래그미분말을 다량으로 혼합한 고유동콘크리트가 재령초기에 동결의 영향을 받았을 경우에 대해서 급속동결융해시험을 실시하면, 시험 중에 상당한 수화반응이 진행되기 때문에 내동해성을 보다 정확히 평가하기 위해서는 그 영향을 보정할 필요가 있다는 것을 지적하고 있다.

급속동결융해시험중에 발생하는 수화반응의 영향을 보정하는 방법으로써 三浦등⁶⁾이 제안한 완속동결융해시험에 의한 것과 長畠등⁷⁾이 제안한 적산온도와 동탄성계수의 관계를 이용하는 방법들이 알려지고 있다. 그러나 이러한 방법들은 실용상 또는 정확도면에서 많은 문제점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 재령초기에 동결의 영향을 받는 콘크리트의 내동해성을 비교적 정확하게 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 수화반응이 장기간 이뤄지는 고로슬래그미분말 혼입 고유동콘크리트를 대상으로 하여 급속동결융해시험, 완속동결융해시험 그리고 수중일정시험을 실시하였으며, 이 결과들을 토대로 하여 급속동결융해시험중의 수화의 영향을 보정하는 방법을 제안한다.

2. 기존연구

전술한 바와 같이 급속동결융해시험중에 발생하는 수화의 영향을 보정하는 방법으로써 三浦등이 제안한 방법, 급속동결융해시험중에 있어서 내구성능 저하정도는 시험중의 수화에 의한 품질 향상량과 급속동결융해시험에 의한 품질감소량의 차이라고 생각하여 1사이클의 적산온도가 급속동결융해시험의 30 사이클의 경우와 동일하게 되도록 설정한 완속동결융해시험에 의한 품질의 향상량을 평가하였다.

Fig. 1은 상대동탄성계수의 보정방법을 모델화한 것이다. 측정 n 회째에 있어서 상대동탄성계수의 보정치 R_n 은 이하의 식으로 표현된다.

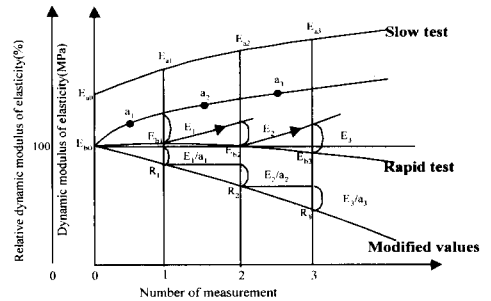


Fig. 1 Modeling of method to modifying relative dynamic modulus of elasticity

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

여기서 ΔE_i 은 측정 i 회째에 있어서 급속동결융해시험과 완속동결융해시험과의 동탄성계수 차이 값이며 식(2)로 표현된다. 또한 a_i 는 측정 i 회째와 $i-1$ 회째의 완속동결융해시험의 평균동탄성계수를 급속동결융해시험의 결과에 적용할 수 있도록 보정한 것이며 식(3)으로 표현된다.

$$\Delta E_i = (E_{ai} - E_{ai-1}) \times \frac{E_{bo}}{E_{ao}} - (E_{bi} - E_{bi-1}) \quad (2)$$

$$a_i = \frac{E_{ai} + E_{a(i-1)}}{2} \times \frac{E_{bo}}{E_{ao}} \quad (3)$$

여기서, E_{ai} : 완속동결융해시험에 있어서 측정
 i회째 동탄성계수
 E_{bi} : 급속동결융해시험에 있어서 측정
 i회째 동탄성계수

이 방법은 급속동결융해시험과 완속동결융해시험에서 적산온도가 항상 같기 때문에 완속동결융해시험중에 동결에 의한 내구성능저하가 일어나지 않는 한, 급속동결융해시험중의 수화에 의한 품질의 향상량을 정도 높게 구할 수 있다고 생각되어진다. 그러나 이 방법은 급속동결융해시험 장치와 더불어 완속동결융해시험 장치가 필요하여 실용상의 문제가 따른다. 한편 長壽등이 제안한 방법은 급속동결융해시험을 행하기 전의 양생기간 중에 측정된 동탄성계수의 실험결과로부터 적산온도와 동탄성계수와의 관계를 구하여 급속동결융해시험중의 수화에 의한 품질의 향상량을 평가하는 것이다. 동탄성계수와 적산온도와의 관계를 구하기 위해서 식(4)을 이용하였고⁸⁾, 적산온도를 산출하기 위해서 식(5)을 이용하였다⁹⁾.

$$E_d = \frac{M - M_o}{(1/a) + (M - M_o)/b} \quad (4)$$

$$M = \sum k(\theta + 10), \quad \theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (5)$$

여기서 E_d 는 동탄성계수(MP_a), M 은 적산온도(DD), M_o , a , b 는 정수, k 는 재령(Π), θ 은 온도($^\circ\text{C}$)이다. 또한 급속동결융해시험시의 적산온도를 산출하기 위해서 0°C 미만인 경우의 적산온도에 대해서 식(6)을 이용했다¹⁰⁾.

$$M = 0.3 \cdot \sum (\theta + 15)t, \quad \theta < 0^\circ\text{C} \quad (6)$$

동결융해시험중의 수화에 의한 동탄성계수 증가량을 구하기 위해서 식(5) 또는 식(6)으로 산출한 적산온도 M 을 식(4)에 대입하면 내구성능저하의 영향을 포함하지 않은 동탄성계수의 값을 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 三浦등이 제안한 완속동결융해시험에 비해서 시험방법은 간단하지만, 정확도면에서 문제가 있다고 생각되어진

다. 예를들면 봉합양생후 수중동결융해시험을 하는 경우, 시험중에 콘크리트 공시체가 수분을 흡수하게 되어 동결융해시험개시전후에서 수분조건이 변하게 된다. 따라서 동결융해시험을 실시하기 전의 양생 중에 측정된 동탄성계수의 데이터를 이용하여 동결융해시험중의 동탄성계수의 증가량을 평가할 때에는 무시할 수 없는 오차가 발생할 것이 예상된다. 그 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 점에 대해서는 콘크리트 공시체를 급속동결융해시험의 개시 재령까지 봉합양생한 후, 공시체를 수중에 넣어서 일정 기간마다 동탄성계수를 측정하면 개선할 수 있다고 생각된다.

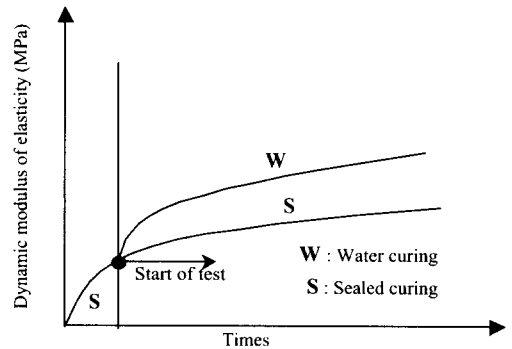


Fig. 2 Difference of hydration between sealed curing and water curing

또한 長壽등이 이용한 적산온도식은 동결융해시험중의 적산온도를 정도(定度) 높게 구할 수 없을 것이 예상된다. 이것은 고로슬래그미분말을 혼합한 콘크리트는 저온하에 있어서 강도발현이 현저하게 늦어지기 때문에 종래의 적산온도식⁵⁾을 적용하는 것은 어려우며¹¹⁾, 0°C 미만의 저온영역에 있어서 고로슬래그미분말을 혼합한 콘크리트의 강도발현특성에 대해서 상세한 연구를 한 예가 없기 때문이다.

따라서 이상과 같은 문제점들을 개선하기 위하여 본 연구에서는 0°C , 20°C 에서 수중일정시험을 실시, 수화의 영향을 평가하여 완속동결융해시험에 의해서 얻어진 결과와 비교하기로 한다. 여기서 수중일정시험이라는 것은 0°C , 20°C 의 온도가 일정하게 유지된 수중에 공시체를 넣어서 그 때

의 적산온도와 동탄성계수와의 관계를 이용하여 급속동결융해시험중의 수화의 영향을 보정한 것이다.

3. 시험개요

3.1 사용재료 및 배합

Table 1과 Table 2에 사용재료의 물성과 배합비를 나타내었다. 본 연구에서 채용한 고유동콘크리트의 배합은 물결합재비 W/B=35%, 비표면적 4240cm²/g의 고로슬래그미분말을 치환율 80%로 혼합한 것과, 물결합재비 W/B=35%, 비표면적 8240cm²/g의 고로슬래그미분말을 치환율 50%로 혼합한것 2종류이다. 이하 전자를 BS4000-80, 후자를 BS8000-50으로 기입한다. 이러한 배합을 선정한 이유는 실제 시공에 있어서 사용되고 있

는 고유동콘크리트 가운데 BS4000-80은 초기의 동결에 의한 영향을 받기 쉬운 것, BS8000-50은 초기의 동결에 의한 영향을 받기 어려운 것이라고 판단되었기 때문이다. 기존연구²⁾에서도 고로슬래그미분말의 분말도가 작고 치환율이 높을수록 저온환경하에 있어서 강도발현이 지연된다고 알려져 있기 때문이다. 또한 비교 검토를 위해서 물시멘트비 W/C=35%와 W/C=50%로 고로슬래그미분말을 혼합하지 않은 2종류의 보통콘크리트에 대해서도 실험을 실시했다.

아직 굳지 않은 콘크리트의 특성으로서 고유동콘크리트에서는 플로우치 65±5cm, O형 7.5cm 시험기 및 V형 6.5×7.5cm 시험기의 유하시간은 10±5초, 보통콘크리트에서는 슬럼프10±2cm를 만족하도록 하였다. 또한 공기량은 고유동콘크리트 및 보통콘크리트 모두 4.5±0.5%의 범위를 만족하도록 하였다. 콘크리트 비빔직후의 온도는 20±2℃가 되도록 타설전에 미리 콘크리트용 재료를 보온하는 것으로 조절하였다.

Table 1 Properties of materials

Materials	Marks	Properties
Cement	C	Ordinary portland cement Fineness:3250cm ² /g Specific gravity:3.16
Blast Furnace Slag	BS4000	Fineness:4240cm ² /g Specific gravity:2.92
	BS8000	Fineness:8240cm ² /g Specific gravity:2.92
Fine Aggregate	S	Pit sand, Specific gravity:2.53 Absorption:2.64%
Coarse Aggregate	G	Crushed stone Specific gravity:2.86 Absorption:0.98%, Gmax:20mm
Superplasticizer	SP	A complex of a polycarboxylic ether and a crosslinked polymer
Air Agent	AE	Alkyl carboxylic acid type

3.2 실험방법

본 연구의 동결조건은, -10℃에서 12시간, -20℃에서 12시간의 2종류로 하고, 타설직후에 동결시켰다. Table 3에 재령 7일까지의 양생조건을 나타내었다. 본 연구에서는 동결의 영향, 동결후의 양생영향에 대해 검토하기 위해서 Table 3에 나타난 것처럼 재령 7일까지는 한랭지 현장의 상황을 상정하여 양생조건을 설정하였다. 그 이후의 재령에서는 촉진양생으로써 20℃에서 봉함양생을 실시하였다. 여기서 5S와 F5S는 동결 유무의 영향을 검토하기 위한 것이다. F5W는 동결후 수중양생

Table 2 Mix proportions of concrete

Types of concrete	Name of mix proportion	W/B or W/C (%)	s/a (%)	Unit content(kg/m ³)					SP (B×wt%)	AE (B×wt%)
				W	B		S	G		
					C	BS				
Self-compacting concrete	BS4000-80	35	52	175	100	400	804	839	1.26	0.007
	BS8000-50	35	52	175	250	250	810	843	1.35	0.005
Normal concrete	W/C=35%	35	40	168	480	-	643	1090	0.8	0.004
	W/C=50%	50	42	175	350	-	728	1118	-	0.008

Table 3 Curing conditions

5S	Sealed curing at 5°C for 7days, without freezing
F5S	Sealed curing at 5°C for 7days, after freezing
F5W	Water curing at 5°C for 5days, after freezing
F30S	Sealed curing at 30°C for 3days and sealed curing at 5°C for 2days, after freezing
F30W	Water curing at 30°C for 5days, after curing

에 의한 효과를 검토하기 위한 것이고, F30S는 동결후 급열양생에 의한 효과를 검토하기 위한 것이다. F30W는 동결후 수중양생과 급열양생을 병용한 효과를 검토하기 위한 것이며, 본 실험조건 중에서는 가장 적극적으로 양생을 실시한 것이다. 기본양생에 대해서는 한랭지에 있어서의 현장 상황을 고려하여 바람직하다고 판단되는 봉합양생을 채용했다. 그 이유는 지금까지의 연구에 의하면¹²⁾, 한랭지에 있어서 콘크리트를 시공할 경우에 기중양생에서는 충분한 강도가 얻어지지 않으며, 실제 시공에서는 수중양생을 실시하는 것이 현실적으로 어렵기 때문이다. 5°C는 한랭지에 있어서의 일평균온도를 상정한 것이고, 20°C는 표준양생에서 이용되어지는 온도이다.

실험은 10×10×40cm의 각주공시체로 재령 35일까지 소정의 양생을 실시하여 콘크리트 공시체를 20°C에서 2일간 침수시킨 후에 급속동결융해시험, 완속동결융해시험 그리고 수중일정시험을 실시하였다. 여기서 2일간 침수시킨 이유는 봉합양생을 실시한 공시체에는 충분한 수분이 존재하지 않으므로 동결융해시험 사이클의 초기에는 정확한 열화가 얻어지지 않기 때문이다.

급속동결융해시험은 ASTM C 666 A법에 준해서 실시하였다. 동결융해시험의 온도범위는 공시체의 중심온도를 -18.7°C ~ +5°C으로 하고, 1사이클의 시간은 3시간 20분으로 하였다. 30사이클마다 가로진동의 일차공명진동수와 공시체 질량에 대해서 300사이클까지 측정을 실시하여 상대동탄성계수를 구하였다.

완속동결융해시험은 三浦등이 제안한 방법에 따라서 실시하였다. 완속동결융해시험의 온도범위는 급속동결융해시험의 평균온도인 -19.0°C ~ +7.

6°C (이 온도를 계산한 방법에 대해서 3.3에서 기술하기로 한다)로 하여 1사이클의 시간은 급속동결융해시험을 30배 한 100시간으로 하였다. 측정은 1사이클마다 10사이클까지 실시하였다.

수중일정시험은 급속동결융해시험과 완속동결융해시험의 개시재령과 동일한 재령에서 콘크리트 공시체를 각각 0°C, 20°C가 일정하게 유지된 수조에서 급속동결융해시험의 30사이클 및 완속동결융해시험의 1사이클에 해당하는 재령마다 측정하였다.

3.3 완속동결융해시험의 온도이력의 결정

완속동결융해시험은 측정시에 있어서 적산온도를 급속동결융해시험과 동일하게 하고, 동결융해 사이클의 시간을 연장시켜서 동결융해의 반복에 의한 내구성능저하를 억제한 것이다. 완속동결융해시험은 천천히 온도가 변화하기 때문에 공시체의 깊이에 따른 온도의 차는 거의 없다고 생각된다. 그러나 급속동결융해시험은 공시체의 온도가 급속히 변하기 때문에 공시체 깊이에 따른 온도 변화가 발생하여 완속동결융해시험의 온도이력을 어떤 온도로 표현해야 할지가 하나의 문제가 된다. 따라서 급속동결융해시험시에 공시체의 깊이에 따라서 어느 정도 온도가 변하는가를 측정할 필요가 있다. 본 연구에서는 동결융해시험용인 10×10×40cm 각주공시체에 열전대를 매설하여 급속동결융해시험중의 공시체의 온도분포를 측정하였다. 공시체에 매설한 열전대의 위치를 Fig. 3에 나타내었다.

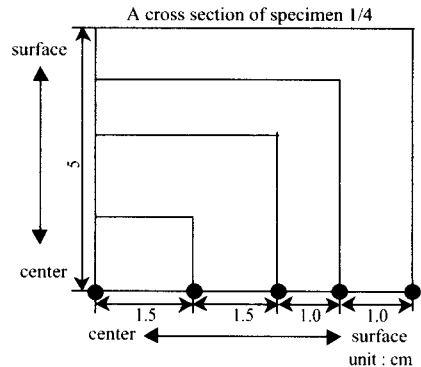


Fig. 3 Position of thermocouple

Fig. 4는 급속동결융해시험중에 측정된 온도이력의 일례이다. Fig. 4로부터 급속동결융해시험시의 온도이력은 공시체 깊이에 따라서 크게 변화함을 알 수 있다. 공시체 표면의 온도이력은 +9.1℃ ~ -19.3℃이지만, 공시체 중심부의 온도이력은 +5.0℃ ~ -18.7℃이다. 이처럼 공시체의 중심과 표면의 온도이력의 변화는 특히 0℃이상의 온도범위에서 큰 차이가 발생하며, 이 온도범위에서는 동결융해시험중에 수화반응의 영향이 매우 클 것이 예상된다.

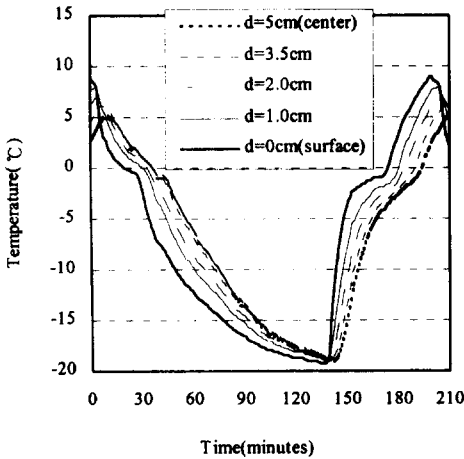


Fig. 4 Temperature history in rapid freezing-thawing test

급속동결융해시험은 일반적으로 공시체의 중심 온도로 관리한다. 그러나 완속동결융해시험시의 온도는 천천히 변화하여 공시체의 표면과 중심의 온도차가 거의 없기 때문에 완속동결융해시험의 온도이력을 공시체 중심온도로 나타낼 경우에는 급속동결융해시험과 공시체 전체에 대한 적산온도가 일치하지 않을 것이 예상된다. 한편 三浦등이 제안한 방법에서는 완속동결융해시험은 급속동결융해시험시의 공시체 중심부의 온도이력으로 관리하였다.

본 연구에서는 급속동결융해시험의 온도이력과 완속동결융해시험의 온도이력을 일치시키기 위한 방법으로써 완속동결융해시험은 급속동결융해시험결과에 공시체의 면적에 의한 가중치를 고려한 평균온도로 하였다. 급속동결융해시험의 온도이력의 평균온도를 이하의 식으로 구하였다¹³⁾.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \frac{(t_i - t_{i+1})}{2}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (7)$$

여기서, T : 공시체의 평균온도(℃)

A_i : i 위치에서의 단면적(cm^2)

t_i : i 위치에서의 온도(℃)

t_{i+1} : $i+1$ 위치에서의 온도(℃)

이상의 방법으로 평균온도를 구한 결과, 평균온도는 공시체의 표면으로부터 1.35cm의 깊이에 위치하는 것을 알았다. 본 연구에서는 표면으로부터 1.35cm의 위치에서의 온도이력을 구해서, 완속동결융해시험을 실시하였다. Fig. 5는 표면으로부터 1.35 cm의 위치에서 구한 평균온도, 즉 완속동결융해시험시의 온도이다.

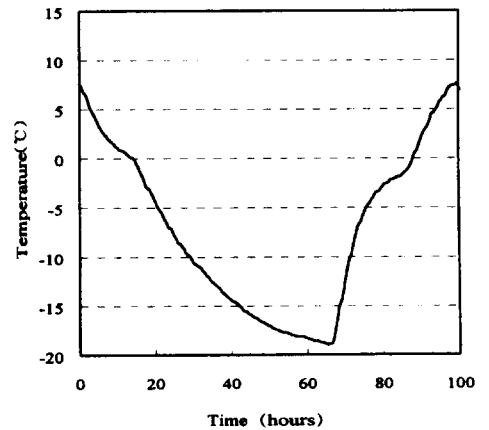


Fig. 5 Temperature history in slow freezing thawing test

4. 결과 및 고찰

4.1 완속동결융해시험에 의한 보정

재령초기에 동결의 영향을 받은 콘크리트의 내동해성을 평가할 때, 급속동결융해시험중에 수화의 영향이 어느 정도 발생하는가를 검토하기 위해서 정확도가 비교적 높다고 판단되는 완속동결융해시험을 실시하여 급속동결융해시험중의 수화반응의 영향을 보정하기로 했다.

4.1.1 완속동결융해시험의 결과

Fig. 6은 재령초기에 -10°C 에서 12시간 동결을 받은 BS4000-80의 완속동결융해시험을 실시한 결과이다. 동결융해시험중의 상대동탄성계수의 증가는 동결의 유무, 동결후의 양생방법에 관계없이 시험개시직후부터 안정적이며, 이 경향은 완속동결융해시험이 종료될 때까지 계속되고 있다. 완속동결융해시험종료시인 10사이클에서 상대동탄성계수는 106~112%정도이고, 완속동결융해시험개시전의 양생조건에 따라서 상대동탄성계수의 증가량에 차이가 발생하였다. 재령초기에 동결의 영향을 받은 F5S는 동결영향을 받지 않은 5S에 비해서 상대동탄성계수가 증가하고 있으며, 이것은 초기동결의 영향에 의해서 수화반응이 상당부분 지연되었기 때문이다.

Fig. 7은 재령초기에 -20°C 에서 12시간 동결영향을 받은 완속동결융해시험의 결과이다. 고유동콘크리트 가운데 BS4000-80은 동결의 유무에 관계없이 BS8000-50, 보통콘크리트 W/C=35%, W/C= 50%보다 상대동탄성계수의 증가량, 즉 동결융해시험중에 진행되는 수화의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 완속동결융해시험은 동결융해에 의한 내구성능 저하의 영향을 포함시키지 않고, 수화의 영향만을 검토하는 것을 목적으로 하기 때문에 시험중에 내구성능 저하가 일어나지 않도록 하는 것이 중요하다.

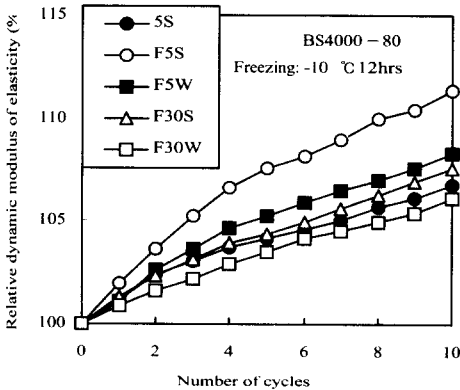
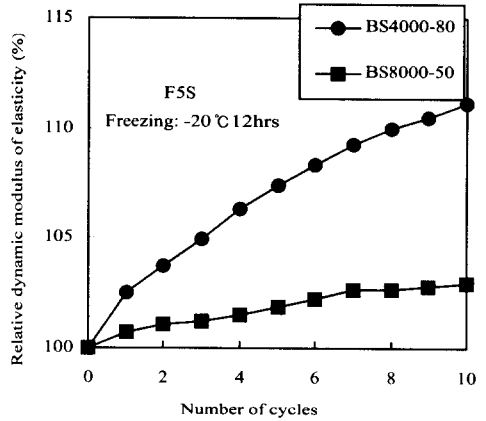
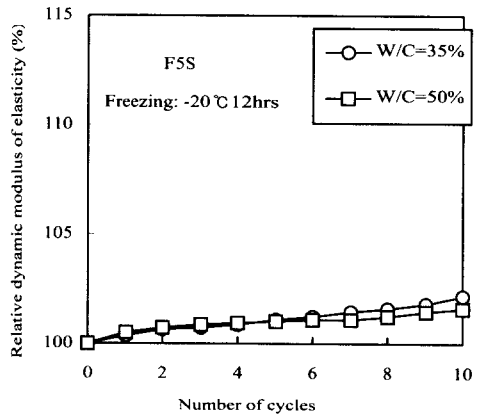


Fig. 6 Results of slow freezing-thawing test associated with various curing method



(a) self-compacting concrete



(b) Normal concrete

Fig. 7 Differences of relative dynamic modulus of elasticity in slow freezing-thawing test between self-compacting concrete and normal concrete (-20°C 12hrs)

본 연구에서 사용한 콘크리트는 시험개시시의 강도가 거의 20MPa이상이고(Table 4), 공기량도 $4.5 \pm 0.5\%$ 로 충분히 확보되어 있다. 따라서 본 연구에서 행한 완속동결융해시험과 같은 매우 작은 냉각각열속도정도라면, 공시체가 완속동결융해시험중에 동결융해에 의한 내구성능 저하의 영향은 매우 미미하여 무시해도 좋다고 판단된다.

Table 4 Compressive strength at the commencement of freezing-thawing test

Freezing	Mix proportion	Curing condition	Strength(MPa)
-10°C 12hrs	BS4000-80	5S	31.7
		F5S	23.1
		F5W	28.5
		F30S	24.2
		F30W	33.8
-20°C 12hrs	BS4000-80	F5S	20.5
	BS8000-50	F5S	30.8
	W/C=35%	F5S	36.0
	W/C=50%	F5S	22.9

4.1.2 보정결과

급속동결융해시험에 진행되는 수화반응의 영향을 제거하기 위해서 식(1)을 사용하여 보정하였다. Fig. 8은 재령초기에 -10°C에서 12시간 동결을 받은 BS4000-80의 완속동결융해시험에 의한 상대동탄성계수의 보정전후를 비교한 결과이다.

여기서 보정전은 급속동결융해시험의 결과이고, 보정후는 완속동결융해시험에 의해서 급속동결융해시험중의 수화의 영향을 보정한 결과이다. 급속동결융해시험종료시인 300사이클의 상대동탄성계수는 보정후 5~10% 정도의 차이를 보이고 있으며, 이처럼 동결의 유무, 동결후의 양생방법에 관계없이 보정된 값은 보정전의 값보다 작아지고 있다. 예를 들면 급속동결융해시험종료시인 300사이클에 있어서 상대동탄성계수가 60%선을 상회하고 있었던 F5S 및 F30S가 보정후에는 60%선에 못미치는 결과를 나타내고 있다. 여기서 상대동탄성계수 60%는 내동해성의 유무를 판단하는 기준치이므로 매우 중요한 문제를 초래할 수도 있다.

Fig. 9는 재령초기에 -20°C에서 12시간 동결을 받게 하는 완속동결융해시험을 이용하여 보정전후를 비교한 결과이다. BS4000-80은 매우 큰 차이를 나타내고 있으나, BS4000-50, 보통콘크리트 W/C=35% 및 W/C=50%는 그 차이가 작은 것을 알 수 있다.

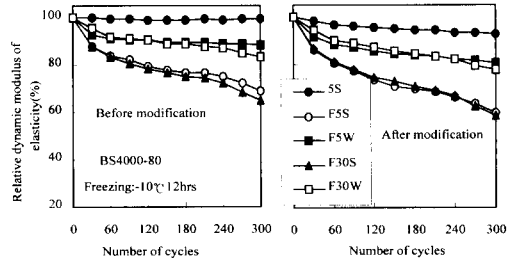


Fig. 8 Comparison of relative dynamic modulus of elasticity between before and after the modification (-10°C 12hrs)

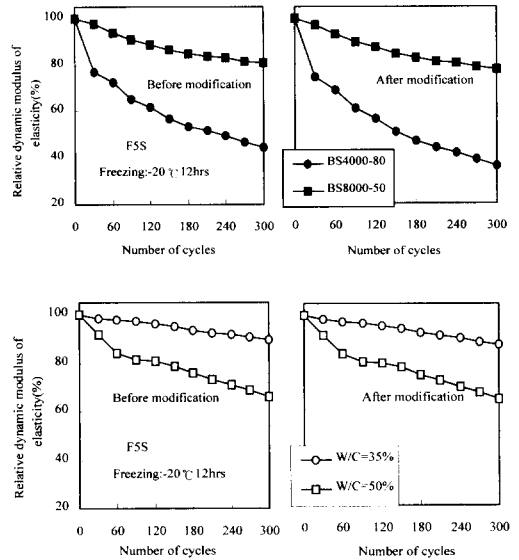


Fig. 9 Comparison of relative dynamic modulus of elasticity between before and after the modification (-20°C 12hrs)

이상의 결과로부터, BS4000-80과 같은 수화반응이 낮은 콘크리트 공시체에 대해서 급속동결융해시험을 실시할 경우, 본 시험과 같이 재령 35일에서 시험을 개시하더라도 시험중에 발생하는 수화반응의 영향이 매우 크기 때문에 내동해성을 정확하게 평가하기 위해서는 이 영향을 필히 보정해야 한다.

4.2 완속동결융해시험과 수중일정시험의 비교

급속동결융해시험의 개시재령과 동일한 재령부

터 0℃, 20℃에서 수중일정시험을 실시하였으며, 동결융해시험중의 수화에 의한 품질의 향상량을 이하의 순서에 의해서 구할 수 있다.

① 동탄성계수와 적산온도의 관계

0℃, 20℃에서 수중일정시험을 한 공시체는 급속동결융해시험의 30사이클마다 이것에 상당하는 재령에 있어서 동탄성계수와 적산온도를 산출하여 그 관계를 구한다. 수중일정시험중의 동탄성계수와 적산온도의 관계는 식(8)을 이용하였다. 이 식은 콘크리트의 압축강도와 적산온도의 관계를 표현한 Chin¹⁴⁾의 제안식을 수정한 것으로, 식을 수정한 이유는 적산온도가 0℃일 때의 동탄성계수의 값이 매우 크고, 그 이후의 증가량은 적산온도가 0℃일 때의 값에 비해서 매우 작기 때문이다.

$$E_d = \frac{M}{\frac{M}{a} + \frac{1}{b}} + E_0 \quad (8)$$

여기서 a , b 는 근사식 계수, E_0 는 시험개시시, 즉 적산온도가 0일 때의 동탄성계수의 실측정치이다. 동탄성계수와 적산온도의 관계 및 추정결과를 Table 5 및 Fig. 10에 나타내었다. 그결과, 상관계수가 매우 높음을 알 수 있으며 식(8)에 의해서 동탄성계수와 적산온도관계를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

② 동결융해시험중의 적산온도 산출

동결융해시험중의 적산온도는 長습등이 사용한 식(5) 및 (6)를 이용하여 산출하였다.

③ 동결융해시험중의 수화에 의한 품질향상량

동결융해시험중의 수화반응에 의한 동탄성계수의 증가량을 구하기 위해 ②에서 산출한 적산온도 M 값을 식(8)에 대입하면, 동결융해에 의한 내구성능 저하의 영향을 포함하지 않은 동탄성계수를 구할 수 있다.

④ 상대동탄성계수의 보정

③에서 산출한 동탄성계수를 식(2)의 완속동결융해시험값에 대입하면 급속동결융해시험중의 수화의 영향을 보정할 수 있다.

Table 5 Relationship between dynamic modulus of elasticity and maturity

Types of test	Curing conditions	E_0	a	b	r
Water-keeping test at 20℃	5S	37016	11.03	8637.97	0.998
	F5S	28137	11.51	20524.09	0.998
	F5W	32493	11.37	12502.56	0.999
	F30S	30000	6.25	34893.99	0.989
	F30W	36081	9.85	7378.26	0.999
Water-keeping test at 0℃	5S	36470	17.00	6766.46	0.993
	F5S	28122	28.57	6797.27	0.998
	F5W	33133	25.19	5886.73	0.996
	F30S	29163	17.04	5812.44	0.997
	F30W	35553	16.42	4747.89	0.991

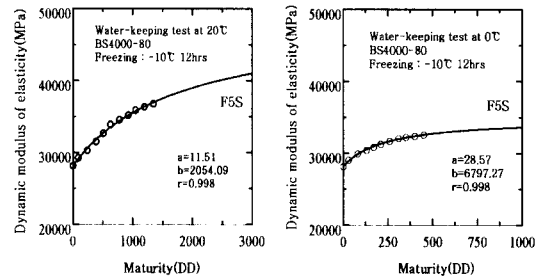


Fig. 10 Relationship between dynamic modulus of elasticity and maturity

이상의 방법에 따라서, 수중일정시험에 의한 보정결과와 완속동결융해시험에 의한 결과와의 비교를 Table 6 및 Fig. 11에 나타내었다. 동결의 유무, 동결후의 양생조건에 관계없이 완속동결융해시험으로 보정한 상대동탄성계수의 값이 수중일정시험으로 보정한 값보다 항상 낮게 나타났다.

또한 20℃에서 수중일정시험을 한 것은, 0℃에서 수중일정시험을 한 것 보다 1~4%정도 항상 보정치가 작게 나타났다. 원래 적산온도가 동일하다면 수중일정시험의 온도에 관계없이 보정치는 동일하게 되는 것이 당연하지만, 본 연구의 결과처럼 수중일정시험의 온도에 따라서 보정치가 다르게 된 이유는 이용한 적산온도식이 동결융해시험중의 적산온도를 잘 표현하지 못했기 때문이라고 사료된다.

이상과 같이 0℃에서 수중일정시험에 의한 방법은 재령초기에 동결을 받은 내동해성을 평가하

는데에 있어서 충분히 실용화 될 가능성이 있다고 생각된다. 그러나 정도면에서 완속동결융해시험과 동등한 수준에는 미치지 못했다. 이것은 이용한 적산온도식이 동결융해시험중의 적산온도를 잘 표현하지 못한 것이 원인이며, 이점에 대해서는 앞으로의 연구과제로 생각된다.

(2) 20°C, 0°C에서 수중일정시험을 행하고 적산온도와 동탄성계수와의 관계를 이용하여 급속동결융해시험중의 수화의 영향을 보정한 결과, 0°C에서 수중일정시험에 의한 것은 재령초기에 동결을 받은 콘크리트의 내동해성을 평가하는 방법으로써 앞으로 충분히 실용화 될 가능성이 있다.

Table 6 Comparison between slow freezing-thawing test and water-keeping test

Curing conditions	Rapid test	Modified durability factor		
		Slow test	Water-keeping test at 20°C	Water-keeping test at 0°C
5S	99.31	92.79	95.19	93.79
F5S	68.91	59.51	63.30	60.39
F5W	88.36	80.63	83.34	81.24
F30S	64.85	58.65	60.37	59.27
F30W	83.40	77.90	79.85	78.84

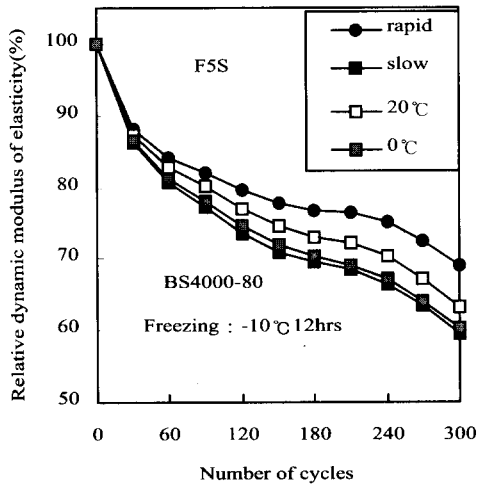


Fig. 11 Comparison between slow freezing-thawing test and water-keeping test

5. 결론

본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 재령초기에 동결을 받은 콘크리트는 배합에 따라서 급속동결융해시험중의 수화의 영향이 무시할 수 없을 정도가 발생하고, 그 내동해성을 정확하게 평가하기 위해서는 이 수화의 영향을 보정 할 필요가 있다.

참고문헌

1. 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.
2. 土木學會콘크리트委員會, "高爐슬라그微粉末を用いた콘크리트施工指針", 콘크리트ライブラリー86, 日本土木學會, 1996.
3. 高京澤, 熊谷徹, 三浦尙, "低溫養生を行った高流動콘크리트の耐凍害性に関する研究", 日本土木學會東北支部技術研究發表會, pp.552-523, 1987.
4. Gardner, N. J., Sau, P. L. and Cheung, M. S. "Strength development and durability of concrete cast and cured at 0°C", ACI Materials Journal, Vol.85, No.52, pp.529-536, 1989.
5. 高京澤, 關紀宏, 岩城一郎, 三浦尙, "初期凍害を受けた各種콘크리트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.
6. 三浦尙, 黒川聰, "高爐슬라그微粉末の耐凍害性に関する一考察", セメント技術年報, No.43, pp.247-250,
7. 長合友造, 山本泰彦, "若材齡콘크리트の耐凍害性の評價法に関する基礎研究", 日本土木學會論文集, No.433/V-15, pp.71-80, 1991.
8. Carino, N. J. and Lew, H. S. "Temperature effect on strength-maturity relationship of mortar", Journal of the ACI, Vol.80, No.3, pp.177-182, 1983.
9. Saul, A. G. A. "Principle underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure", Magazine of Concrete Research, Vol.2, No.6, pp.127-140, 1951. 1988.
10. Nykanen, A. "Hardening of concrete at different temperature especially below the freezing point", RILEM Symposium on Winter Concreting, Session B, 1956.
11. 中本純次, 戸川一夫, 藤井學, "高爐슬라그高含 有 콘크리트の強度發現特性に関する基礎的な研究", 日本土木學會論文集, No.564/V-35, pp.121-131, 1997.

12. 岩城一郎, 鈴木一利, 三浦尚, "低温養生を行った 高爐
 スラグ混和コンクリートの強度回復特性", 日本コンク
 リート工學年次論文集, Vol.20, No.2, pp.205
 -210, 1998.
13. 李道憲, "極低温下におけるコンクリートの劣化に 關す
 る研究", 東北大學博士論文, 1991.
14. Chin, F. K. "Relation between strength and
 maturity of concrete", Journal of the ACI,
 Vol.8, No.3, pp.196-203, 1971.

요 약

수화반응이 늦은 포졸란계 혼입 콘크리트에서는 동결융해시험중에 수화가 진행되는 경우도 발생한다. 따라서 내구성능 저하에 의한 동탄성계수의 감소와 수화반응에 의한 동탄성계수의 증가가 상쇄되어 내구성능저하의 정도를 정확히 평가 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 재령초기에 동결의 영향을 받는 콘크리트의 내동해성을 비교적 정확하게 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 즉 최근 사용이 비약적 증가추세에 있으며, 수화반응이 장기간 이뤄지는 고로슬래그미분말 혼입 고유동콘크리트를 대상으로 하여 급속동결융해시험, 완속동결융해시험 그리고 수중일정시험을 실시하였으며, 이 결과들을 토대로 하여 급속동결융해시험중의 수화의 영향을 보정하는 방법을 제안하였다.

그결과, 0℃에서 수중일정시험에 의한 것은 재령초기에 동결을 받은 콘크리트의 내동해성을 평가하는 방법으로써 앞으로 충분히 실용화 될 가능성이 있다.

(접수일자 : 1999. 3. 27)