

# 초기동해를 받은 고로슬래그 다량 혼입 콘크리트의 강도발현 및 동결융해 저항성

## Strength Development and Freeze-Thaw Resistance of Concrete Incorporating High Volume Blast-Furnace Slag Subjected to Initial Frost Damage

(Received August 30, 2011 / Revised September 16, 2011/ Accepted October 18, 2011)

고 경 택<sup>1)\*</sup> 류 금 성<sup>1)</sup>  
한국건설기술연구원 구조교량연구실  
Kyung-Taek Koh<sup>1)\*</sup> Gum-Sung Ryu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Structural Engineering & Bridge Research Division, Korea Institute of Construction Technology,  
Goyang, 411-712, Korea

### Abstract

Concrete incorporating high volume blast-furnace slag placed in cold weather regions might be in danger of initial frost damage because dependently on the mix proportions, the setting and the hardening would be remarkably delayed. Therefore, this study investigated to effect of the degree of frost on the strength development and the resistance to freezing and thawing of the concrete incorporating blast-furnace slag when being subjected to freeze at early age. As the experimental results, the concrete incorporating blast-furnace slag attacked by initial frost damage showed the remarkable reduction of both the compressive strength development and the resistance to freezing and thawing. Especially, the resistance to freezing-thawing of the concrete incorporating high volume blast-furnace slag became much lower than that of the normal concrete.

**키워드 :** 고로슬래그, 초기동해, 강도발현, 동결융해 저항성

**Keywords :** Blast-Furnace Slag, Initial Frost Damage, Strength Development, Resistance to Freeze-Thaw

## 1. 서론

국내의 제철소에서 발생하는 고로슬래그 미분말은 연간 약 800만 톤 이상으로 2000년대 초까지도 재활용이 낮아 상당한 양의 재고가 쌓여 있었으나, 최근 보통포틀랜드 시멘트 생산 시 중량재, 혼합시멘트 및 레미콘 혼화재 등으로 사용량이 급증함에 따라 재활용율이 100%에 근접하게 되었다. 그러나 2010년부터 제철소가 추가로 가동되면서 향후 고로슬래그 미분말의 발생 양은 계속 증가할 것으로 판단되므로 이에 대한 대책이 필요하다.

국내외적으로 고유동 콘크리트와 고강도 콘크리트의 보급 및 자원의 유효이용 측면에서 고로슬래그를 다량으로 혼입한 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일부 구조물에서 적용사례도 점차 증가하고 있다. 또한 동절기에서도 구조물의 조건 및 용도에 따라 고로슬래그 다량 혼입 콘크리트의 적용이 충분히 기대되고 있다.

동절기에 콘크리트를 시공할 경우에는 초기동해를 받지 않도록 하는 것이 매우 중요하다. 그러나 수화반응이 늦은 고로슬래그 다량 혼입 콘크리트는 응결경화가 지연되는 경향이 있다<sup>6,11)</sup>. 이 경향은 저온환경에서 보다 현저히 나타나기 때문<sup>3)</sup>에 특히 고로슬래그를 다량으로 혼입한 콘크리트를 동절기에서 시공할 경우, 고로슬래그를 혼입하지 않은 통상의 콘크리트에 비해 초기동해를 받을 위험성과

\* Corresponding author  
E-mail: ktgo@kict.re.kr

Table 1 Properties of cement and blast-furnace slag

Type	Items	Surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Ig.Loss (%)	Chemical composition (%)					
					SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
	OPC	3,413	3.15	1.40	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.14
	BS4000	4,150	2.92	0.05	33.80	14.50	0.40	42.00	5.80	0.20
	BS8000	8,240	2.92	0.05	33.20	14.40	0.50	41.00	5.50	0.20

Table 2 Physical properties of aggregates

Type	Items	Classification	Density (g/cm <sup>3</sup> )	FM	Absorption (%)	Unit volume mass (kg/m <sup>3</sup> )	Abrasion (%)
	Fine aggregate	Crushed sand	2.53	2.71	2.64	1,597	
	Coarse aggregate	Crushed stone	2.85	6.87	0.98	1,703	13.5

Table 3 Mix proportions of concrete

Proportion name	W/B (%)	S/a (%)	Unit content(kg/m <sup>3</sup> )				SP (B×wt.%)	AE (B×wt.%)	
			W	B		S			G
				C	BS				
BS00	35	40	175	500	-	629	1062	1.51	0.007
BS4000-50	35	52	175	250	250	809	841	1.26	0.007
BS4000-70	35	52	175	150	350	806	838	1.26	0.007
BS8000-50	35	52	175	250	250	809	841	1.35	0.005

그 영향이 클 것으로 판단된다<sup>7)</sup>.

한편 초기동해에 관한 기존연구에서는 초기동결이 콘크리트의 성능에 미치는 영향에 대해 주로 강도만으로 평가한 것이 대부분이다<sup>4,5,10,17)</sup>. 일반적으로 강도와 내구성과는 밀접한 상관관계가 있다고 하지만, 초기에 동결을 받은 경우에는 콘크리트의 공극조직이 변하기 때문에 양자에 상관이 없을 가능성도 있다. 그러므로 이 연구에서는 콘크리트의 내구성능 중에서 특히 동결기에 중요시되는 동결융해 저항성에 대해 주목하여 초기동해를 받은 콘크리트에 대해서 압축강도와 동결융해 저항성을 병행하여 평가하였다.

이상으로부터 이 연구에 있어서는 동결기에 타설한 고로슬래그를 다량으로 혼입한 콘크리트가 초기재령에서 예기치 않은 기상변화 또는 부주의에 의해 동결을 받은 경우를 상정하여 초기동해가 강도발현과 동결융해 저항성에 미치는 영향에 대해 비교·검토하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

실험에 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)이며, 고로슬래그(BFS)는 비표면적 4,150cm<sup>2</sup>/g, 8,240cm<sup>2</sup>/g 2종류를 사용하였으며, 이들의 물리·화학적 성질은 Table 1과 같다. 굵은골재는 최대치수 20mm인 부순돌을 사용하였고, 잔골재는 부순모래를 사용하였으며 그 특성은 Table 2와 같다. 고성능감수제는 폴리카르본산계를 사용하였고, AE제는 카르본산계를 사용하였다.

### 2.2 콘크리트 배합

Table 3에 콘크리트의 배합을 나타내었으며, 타설 시 다짐이 필요하지 않은 고유동 콘크리트를 대상으로 하였다. 물-결합재비는 0.35이고, 고로슬래그를 사용하지 않은 1종류의 배합(BS00)과 비표면적 4,240 cm<sup>2</sup>/g의 고로슬래그를 치환율 50% (BS4000-50)과 70%(BS4000-70)로 혼입한 2종류의 배합, 비표면적 8,240 cm<sup>2</sup>/g의 고로슬래그를 치환율 50%(BS8000-50)로 혼입한 1종류의 배합, 모두 4종류이다. 아직 굳지 않은 콘크리트의 특성으로서 슬럼프 플로우값은 650±50 mm, 공기량은 4.5±0.5%을 만족하도록 하였다.

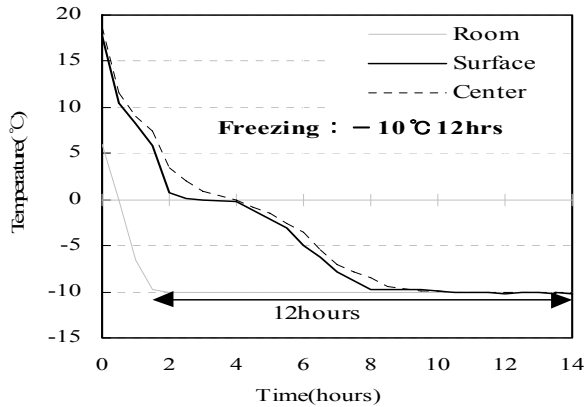


Fig. 1. Temperature history during early freezing(-10°C 12hrs)

### 2.3 실험방법

초기동해는 콘크리트 타설 직후에 동결을 받는 것으로 하였다. 동결조건은 -10°C에서 12시간 동안 동결(이하, -10°C 12hrs)을 받는 경우, 이보다 심한 조건으로 동결시간을 길게 한 -10°C에서 24시간(이하, -10°C 24hrs)과 동결 최저온도를 보다 낮게 한 -20°C에서 12시간(이하, -20°C 12hrs)의 3종류로 하였다. 초기동결 동안의 콘크리트 공시체 온도이력의 한 예를 Fig. 1에 나타내었다.

양생은 재령 7일까지는 5°C에서 밀봉양생을 실시하고 그 이후 재령에서는 20°C에서 밀봉양생을 실시하였으며, 동결을 받은 것은 F5S, 동결을 받지 않은 것은 5S로 정의하였다. 밀봉양생은 폴리에틸렌 필름으로 공시체를 씌운 후 공기를 빼내면서 비닐포대로 2중 3중으로 밀봉하는 것으로 하였다. 여기서 5°C는 동결기에서 일 평균온도를 고려한 것이고 20°C는 표준양생에서 이용되는 온도이다.

압축강도는  $\phi 100 \times 200$  mm 원주 공시체를 제작한 후 소정의 양생을 실시한 다음 재령 7일, 35일, 91일에 KS F 2405에 준하여 측정하였으며, 압축강도 값은 공시체 3개의 평균값이다.

동결융해시험은  $100 \times 100 \times 400$  mm 각주 공시체로 재령 35일까지 소정의 양생을 실시하여 콘크리트 공시체를 20°C에서 2일간 침수시킨 다음에 KS F 2456의 수중동결수중융해방법에 준하여 실시하였다. 동결융해시험의 온도범위는 공시체 중심온도를 -18.7°C ~ +5°C로 하고 1사이클의 시간은 3시간 20분으로 하였으며 30사이클마다 일차공명진동수와 공시체 질량을 300사이클까지 측정하여 상대동탄성계수 및 질량변화율을 구하였다.

공극분포는 재령 7일, 35일, 91일에서 수은압입식 포로

시메타로 측정하였다. 측정용 시료는 콘크리트의 원주공시체로부터 5 mm 정도의 크기로 절단하여 1일 정도 아세톤에 넣어 수화를 정지시킨 다음 40°C에서 20시간 이상 진공조건을 실시한 후에 공극분포 측정에 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 고로슬래그 다량 혼입 콘크리트의 강도발현 및 동결융해 저항성

Fig. 2는 초기동해를 받지 않고 7일 동안 밀봉양생을 실시한 5S의 압축강도 결과이다. 고로슬래그를 사용한 콘크리트는 비표면적 및 치환율에 관계없이 고로슬래그를 사용하지 않은 BS00에 비해 압축강도가 크게 낮은 것으로 나타났다. 고로슬래그의 혼입률이 높을수록 그리고 비표면적이 낮을수록 강도발현이 저하되고, 특히 5°C 양생을 실시한 재령 7일까지 강도의 저하가 더욱 큰 것으로 나타났다. 이런 결과로부터 고로슬래그를 다량 혼입한 콘크리트는 겨울철에 타설할 경우, 강도발현 저하로 초기동해를 받을 위험성이 높다는 것을 알 수 있다. 그리고 BS00은 수중양생(Fig. 2에서 재령 28일에서 검은 마크)과 밀봉양생과의 차이가 크지 않으나, 고로슬래그 다량 혼입 콘크리트는 양생조건에 따라 강도의 차이가 크게 나타났다.

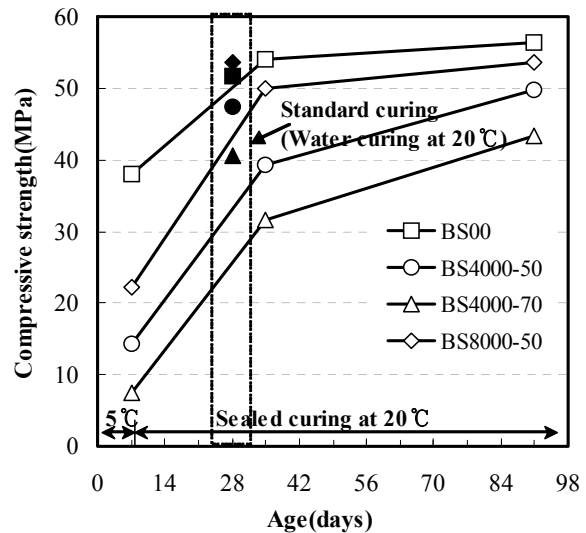


Fig. 2. Compressive strength of concrete incorporating high volume blast-furnace slag without initial frost

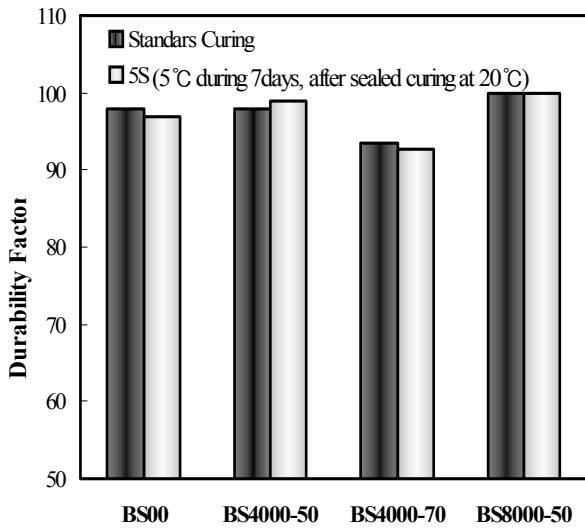
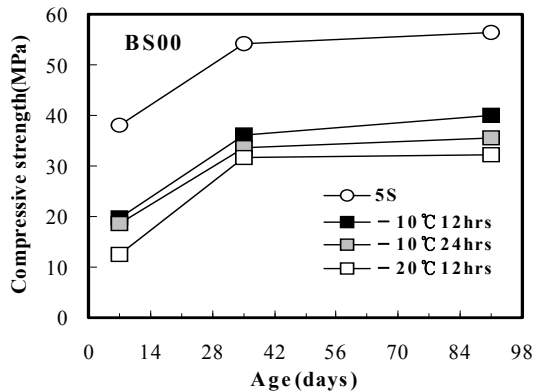


Fig. 3. Compressive strength of concrete incorporating high volume blast- furnace slag without initial frost

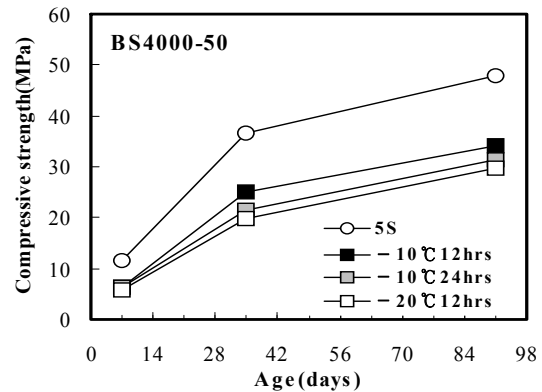
Fig. 3은 초기동해를 받지 않고 7일 동안 밀봉양생을 실시한 5S와 28일 동안 표준양생을 실시한 동결융해 저항성 결과이다. 양생방법 및 배합에 관계없이 동결융해 실험 종료시점인 300사이클까지 상대동탄성계수가 거의 100%로 동결융해 저항성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 고로슬래그를 혼입한 콘크리트는 양생을 충분히 실시하면 고로슬래그를 혼입하지 않은 일반콘크리트와 비교하여 동등이상의 동결융해 저항성을 가지는 것으로 알려져 있다(6,14,16). 이와 같이 고로슬래그를 다량 혼입한 콘크리트는 밀봉양생을 실시하더라도 배합에 상관없이 동결융해 저항성이 매우 우수한 것으로 판단된다.

### 3.2 초기동해가 압축강도에 미치는 영향

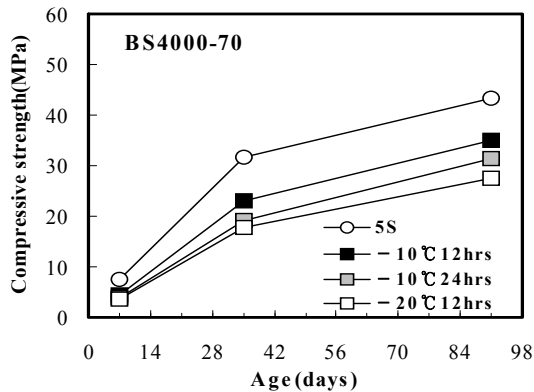
Fig. 4는 초기동결 정도가 고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향에 대한 검토한 결과이다. Fig. 5는 초기동해를 받은 F5S와 초기동해를 받지 않은 5S의 강도비이다.



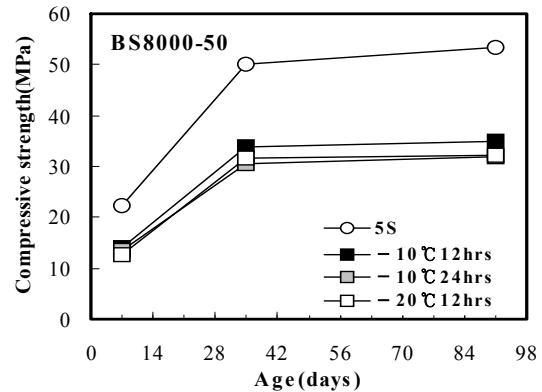
(a) BS00



(b) BS4000-50



(c) BS4000-70



(d) BS8000-50

Fig. 4. Compressive strength of concrete incorporating high volume blast-furnace according to the extent of early freezing

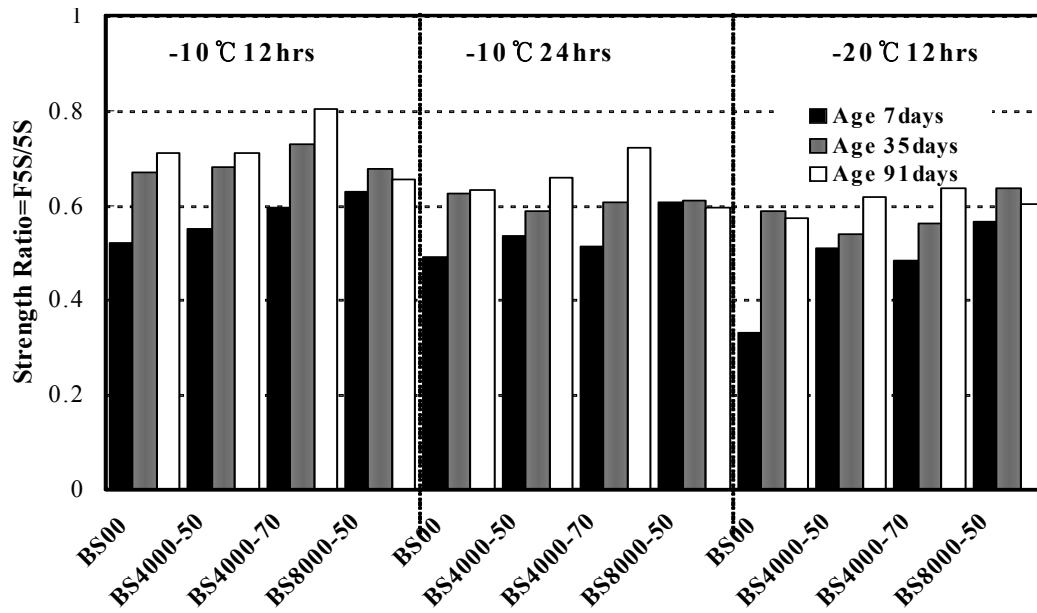


Fig. 5. Strength ratio of concrete with freezing at early age to concrete without freezing at early age

초기동해를 받은 F5S는 초기동해를 받지 않은 5S에 비하여 동결정도 및 배합에 상관없이 압축강도가 크게 저하되고 있다. 고로슬래그의 혼입률 및 비표면적에 따라 초기동해를 받은 후 강도발현의 차이가 있는 것으로 나타났다. 동일한 비표면적 4000급을 사용한 경우에는 고로슬래그의 혼입률이 많은 배합인 BS4000-70이 배합 BS4000-50에 비해 강도발현이 증가되어 점차 초기동해의 영향에 의한 강도저하가 감소되는 것으로 나타났다. 그리고 동일한 고로슬래그의 혼입률 50%를 사용한 배합 중에서 비표면적의 차이에 따른 영향을 비교해보면, 배합 BS4000-50이 배합 BS8000-50에 비해 재령이 증가함에 따라 강도증진이 커져 초기동해의 영향이 작아지는 것으로 나타났다.

초기 동결조건의 차이에 의한 영향을 분석한 결과, 모든 배합에서 -10°C 12hrs의 동결조건에 비해 -10°C 24hrs의 동결조건과 -20°C 12hrs의 동결조건이 압축강도 저하가 큰 것으로 나타났다. 특히 BS4000-70 배합이 다른 배합에 비해 초기 동결 조건에 따라 강도발현이 크게 차이는 것으로 나타났다.

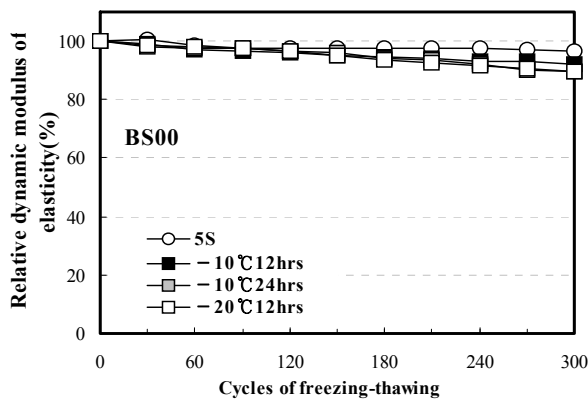
### 3.3 초기동해가 동결융해 저항성에 미치는 영향

Fig. 6은 초기동결 정도가 고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 상대동탄성계수에 미치는 영향에 대해 검토한 결과

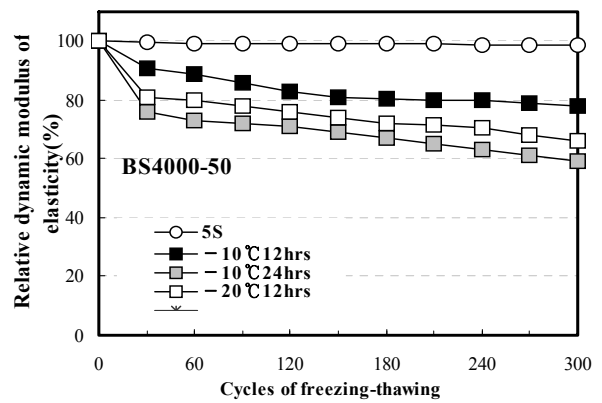
이고, Fig. 7은 내구성 지수에 대해 비교한 결과이다.

고로슬래그를 혼입한 콘크리트는 재령초기에 동결을 받음으로써 동결정도와 배합에 관계없이 동결을 받지 않은 5S에 비해 크게 저하되고 있다. 고로슬래그를 혼입한 콘크리트 중에서 배합 BS4000-70은 초기동결 조건에 관계없이 동결융해 사이클 처음부터 상대동탄성계수가 저하되어 300사이클에서 -10°C 12hrs의 동결조건은 60% 정도, -10°C 24hrs의 동결조건은 24% 정도, -20°C 12hrs의 동결조건은 36% 정도로 동결융해 저항성이 가장 많이 저하되는 것으로 나타났다. 그리고 배합 BS4000-50은 300사이클에서 10°C 12hrs의 동결조건은 73% 정도, -10°C 24hrs의 동결조건은 56% 정도, -20°C 12hrs의 동결조건은 63% 정도, 배합 BS8000-50은 -10°C 12hrs의 동결조건은 88% 정도, -10°C 24hrs의 동결조건은 73% 정도, -20°C 12hrs의 동결조건은 80% 정도로 상대동탄성계수가 저하되는 것으로 나타났다.

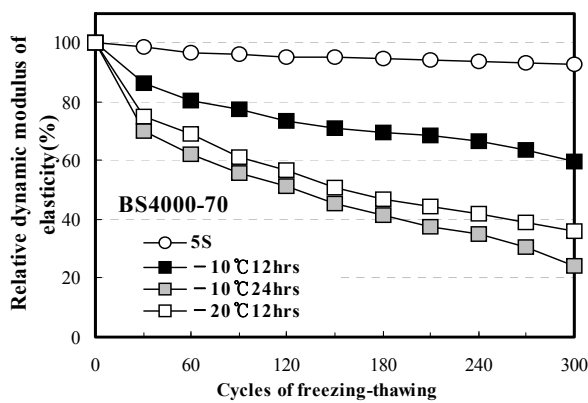
이상의 결과로부터 고로슬래그를 다량 혼입한 콘크리트가 초기동해를 받는 경우에는 비표면적이 낮을수록 혼입률이 많을수록 동결융해 저항성이 저하되는 것으로 나타났다. 이것은 동결융해 실험을 시작할 때 강도 차이와 콘크리트 조직의 치밀함 차이에 의한 영향 등이 작용했기 때문으로 판단된다. 그리고 초기동결 조건에서 동결온도가 낮을수록 동결시간이 길어질수록 동결융해 저항성이 더욱 저하되며, 이 중에서도 동결시간의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.



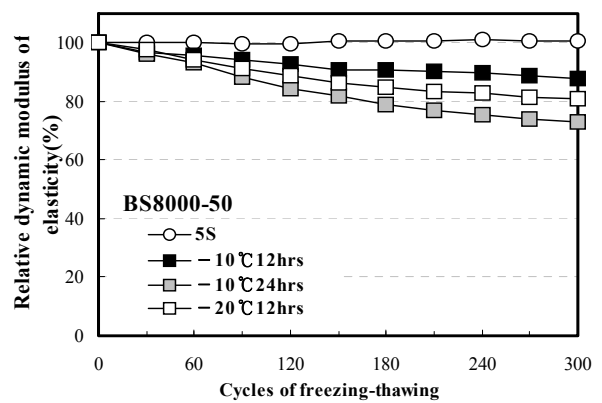
(a) BS00



(a) BS4000-50



(c) BS4000-70



(d) BS8000-50

Fig. 6. Resistance to freezing-thawing of concrete incorporating high volume blast-furnace according to the extent of early freezing

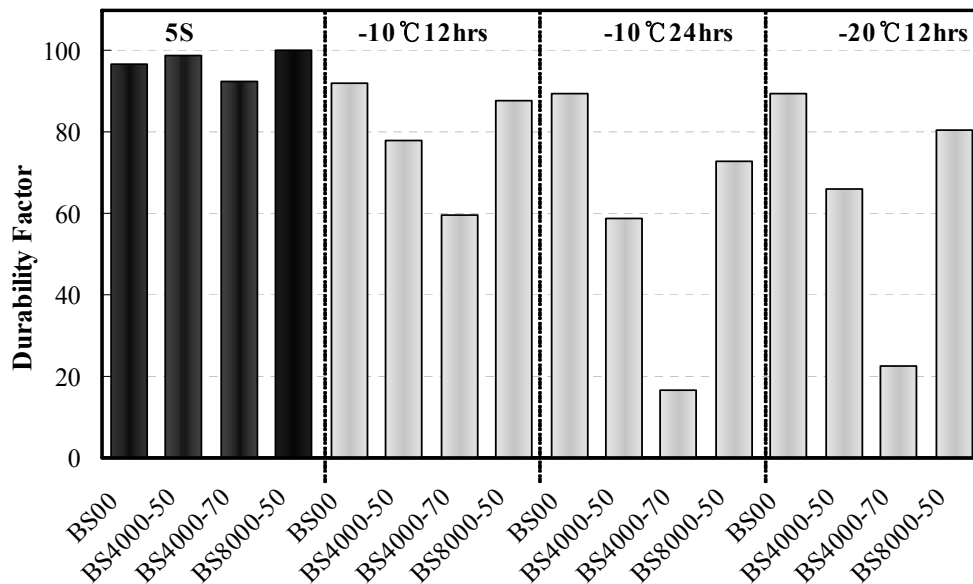


Fig. 7. Durability factor of concrete incorporating high volume blast-furnace according to the extent of early freezing

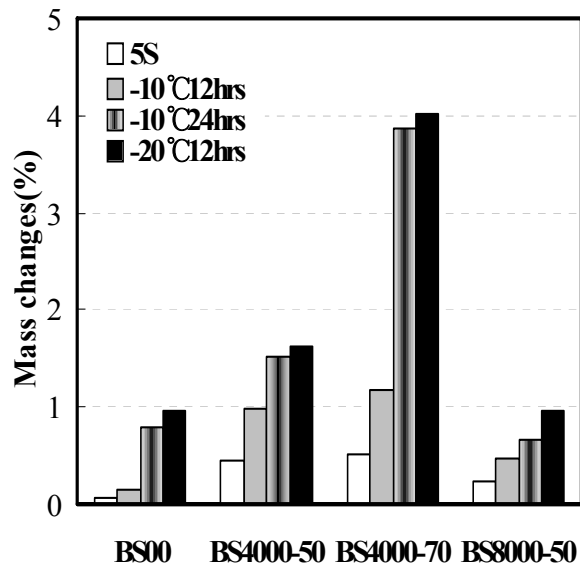


Fig. 8. Mass changes of concrete by freezing and thawing

그리고 고로슬래그를 혼입하지 않은 배합 BS00은 300사이클에서 상대동탄성계수가 -10°C 12hrs의 동결조건은 92% 정도, -10°C 24hrs의 동결조건은 90% 정도, -20°C 12hrs의 동결조건은 90% 정도로 나타났다. 이와 같이 고로슬래그를 다량 혼입한 콘크리트는 고로슬래그를 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 재령초기에 동결에 의한 영향이 큰 것으로 분석된다. 이와 같은 결과는 동결융해 시험을 시작할 때의 수화의 진행정도에 따른 영향이 작용한 것으로 생각된다. 예를 들어 수화가 크게 진행된 배합 BS00은 동결융해 저항성이 크게 저하되지 않았지만, 수화가 별로 진행되지 않은 배합 BS400-70은 동결융해 저항성이 크게 저하된 것으로 추정된다.

Fig. 8은 초기동결 정도 및 배합에 따른 동결융해 작용에 의한 질량변화율 결과이다. 초기동해를 받지 않은 5S는 배합에 상관없이 질량변화율은 0.5% 이하로 상당히 작았으나, 초기동해를 받은 콘크리트는 배합 및 동결정도에 따라 다소 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 특히 배합 BS4000-70인 경우 -10°C에서 12시간 동결은 1.77%, -10°C에서 24시간 동결은 3.87%, -20°C에서 12시간 동결은 4.02% 정도로 배합 중에는 동결융해 작용에 의한 표면박리 발생으로 질량변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고 BS4000-50, BS8000-50, BS00은 동결조건에 따라 각각 0.98%~1.62%, 0.46%~0.96%, 0.15~0.97% 정도의 질량변화가 발생하였다. 이와 같이 질량변화 결과도 상대동탄성계수의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다.

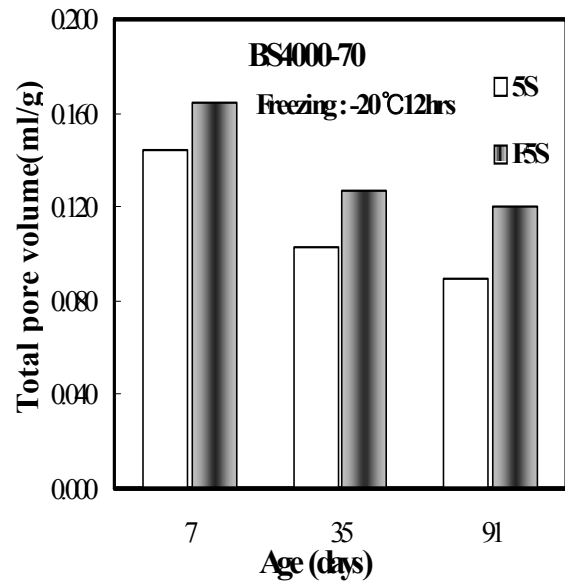


Fig. 9. Results of total pore volume

### 3.4 초기동해가 공극분포에 미치는 영향

본 연구에서 초기동해에 의한 콘크리트의 성능 저하의 원인을 검토하기 위하여 콘크리트의 공극분포를 조사했다. 시험은 초기동해의 영향이 현저하게 나타난 -20°C에서 12시간 동결을 받은 배합 BS4000-70에 대해서 실시하였다. 초기동해 유무가 전체 공극량에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 초기동해를 받은 F5S는 초기동해를 받지 않은 5S에 비하여 모든 재령에 있어서 전체 공극량이 증가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 초기동해가 공극분포에 미치는 영향을 나타내었다. 초기동해를 받은 F5S는 초기동해를 받지 않은 5S에 비하여 재령 7일에서 약 0.1 μm 이상의 공극량, 재령 35일과 재령 91일에서는 0.01~0.1 μm 부근의 공극량이 증가되고 있다. 일반적으로 콘크리트가 아직 굳지 않은 상태에서 동결을 받는 경우에는 콘크리트 중의 수분이 동결되어 융해 후에 공극을 남기는 것으로 알려져 있다<sup>10,17,18)</sup>. 이 연구의 결과로부터 이 공극은 0.1 μm 이상의 큰 공극이라고 추정되며, 그 후에 수화반응으로 인해서 생성되는 수화물로 그 공극을 메움으로써 결과적으로 0.01~0.1 μm의 비교적 큰 모세관 공극이 증가된 것으로 추정된다. 또한 F5S는 재령 35일과 재령 91일 사이에 있어 0.01~0.1 μm의 공극량이 각각 0.053 ml/g와 0.049 ml/g으로 별로 변하지 않는 것으로 보아 이 공극은 91일 이후에도 크게 변하지 않을 것으로 예상된다.

일반적으로 공극량이 많을수록, 또 공극크기가 클수록

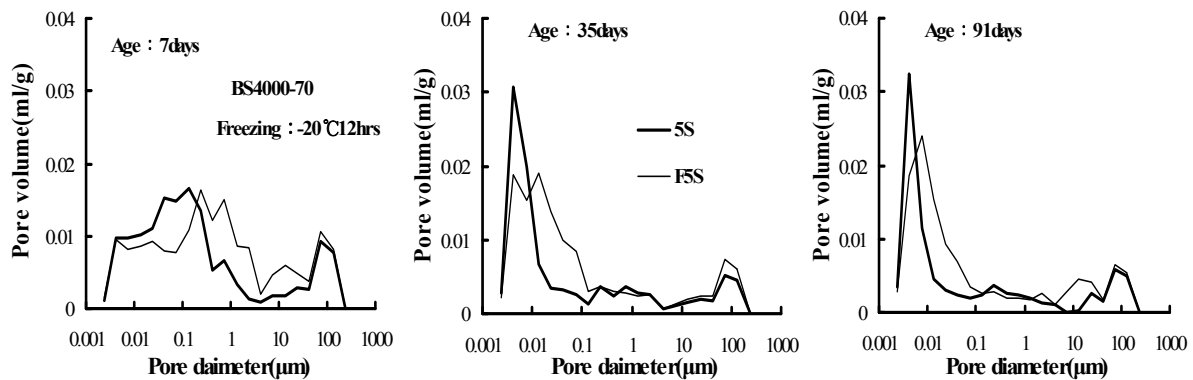


Fig. 10. Influence of early freezing on pore distribution(BS4000-70, -20°C 12hrs)

콘크리트의 강도는 저하되는 것으로 알려져 있다<sup>12,19)</sup>. 이 연구로부터 초기동해를 받은 콘크리트는 전체 공극량과 0.01 μm 이상의 공극량이 증가하는 것을 알았다. 즉 초기동해에 의해 콘크리트의 강도가 저하되는 것은 주로 0.01 μm 이상의 비교적 큰 모세관공극이 증가하여 결과적으로 전체 공극량이 증가되기 때문으로 추정된다. 0.01 μm 이상의 공극 중에 존재하는 수분은 일반 동결융해시험의 최저 온도인 약 -18°C에서 동결되어 동결융해 저항성에 크게 관여하는 것으로 알려지고 있다<sup>13,15)</sup>. 초기동해에 의해 크게 증가된 0.01~0.1 μm의 공극은 동결융해 반복 작용으로 공극 중에 있는 수분이 동결하여 그 팽창압에 의해 공극 조직이 파괴됨으로써 초기동해를 받은 콘크리트의 동결융해 저항성이 크게 저하되는 것으로 판단된다.

이와 같이 초기동해를 받은 콘크리트는 초기동해를 받지 않은 경우보다 전체 공극량이나 비교적 큰 모세관공극에 상당하는 공극량이 증가하고 있는데 이런 결과가 초기동해를 받은 콘크리트의 성능 저하와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 초기동해를 받은 고로슬래그를 다량으로 혼입한 콘크리트의 압축강도, 동결융해 저항성 및 공극분포에 대한 검토하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 초기동해를 받은 고로슬래그를 다량으로 혼입한 콘크리트는 비표면적 및 치환율에 관계없이 초기동해를 받지 않은 콘크리트에 비해 압축강도와 동결융해 저항성 모두 크게 저하된다. 또한 초기동결 시간이 길수록, 초기동결 온도가 낮을수록 콘크리트의 성능이 더욱 저하되며, 초

기동결 정도가 콘크리트 성능 저하에 미치는 영향은 압축 강도보다 동결융해 저항성이 더욱 큰 것으로 나타났다.

2) 고로슬래그를 다량 혼입한 콘크리트는 고로슬래그를 혼입하지 않은 콘크리트보다 초기동해의 영향에 의해 성능 저하가 크며, 특히 동결융해 저항성 저하가 현저하게 나타났다.

3) 초기동해를 받은 고로슬래그 다량 혼입 콘크리트는 초기동해를 받지 않은 콘크리트보다 전체 공극량 및 0.01 μm 이상의 모세관공극에 상당하는 공극량이 증가하는 데 이런 결과가 초기동해를 받은 콘크리트 성능 저하와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다.

이 연구에서 초기동해가 콘크리트의 압축강도와 동결융해 저항성에 미치는 영향에 대해 주로 검토하였으나, 향후 염해 저항성 및 탄산화 등의 내구성과 초기동해를 받은 후 양생방법의 영향에 대해 검토할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No.201016010004)

#### 참고문헌

- 1) 국토해양부 콘크리트 표준시방서, 한국콘크리트학회, 2009
- 2) 권영진, 동결기 초기재령에서 동해를 받은 고강도콘크리트의 내동해성 평가에 실험적 연구, 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, Vol.13, No.2, pp.139-145, 2001



- 3) 고경택, 이상화, 한상목, 장일영, 三浦尙, 한랭지에 있어서 고유동콘크리트의 동해에 관한 연구, 1999년도 가을학술 발표회논문집, 한국콘크리트학회, 제11권2호, pp.763-766, 1999
- 4) 배수원, 김진근, 권기주, 정원섭, 초기동해를 입은 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향인자에 관한 연구, 2003년도 가을학술발표회논문집, 한국콘크리트학회, 제15권2호, pp.527-532, 2003
- 5) 한민철, 김효구, 황인성, 윤기원, 한천구, 강도증진해석에 의한 한중콘크리트의 초기동해 방지기간 설정에 관한 검토, 1999년도 가을학술발표회논문집, 한국콘크리트학회, 제11권2호, pp.179-182, 1999
- 6) 한국콘크리트학회, 고유동 콘크리트 제조 및 시공, 콘크리트 실무 매뉴얼, 2010
- 7) 高京澤, 岩城一郎, 三浦尙, 初期凍害を受けた高爐スラグ微粉末混和高流動コンクリートの品質低下とその対策, 土木學會論文集, 日本土木學會, No.641/V-46, pp.1-13, 2000
- 8) 中本純次, 戸川一夫, 藤井學, 高爐スラグ高含有コンクリートの強度發現特性に關する基礎的研究, 土木學會論文集, 日本土木學會, No.564/ V-35, pp.121-131, 1997
- 9) 岩城一郎, 鈴木一利, 三浦尙, 低溫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, 콘크리트工學年次論文報告集, 日本콘크리트工學協會, Vol.20, No.2, pp.205-210, 1998
- 10) 神田衡, まだ固まらないコンクリートの凍結被害と所要硬化期間に關する研究, セメント技術年報, 日本セメント協會, No.17, pp.335-343, 1963
- 11) 原田和樹, 谷口秀明, 牛島榮, 施工條件が高流動コンクリートの品質に及ぼす影響, 第48回セメント技術大會講演集, 日本セメント協會, pp.850- 855, 1994
- 12) 吉野利幸, 鎌田英治, 桂修, 空隙指標で表したコンクリート強度式の提案とその檢證, 콘크리트工學年次論文報告集, 日本콘크리트工學協會, Vol.7, No.2, pp.65-77, 1996
- 13) 鎌田英治, セメント硬化體の微細構造とコンクリートの凍害, 콘크리트工學, 日本콘크리트工學協會, Vol.19, No.11, pp.36-42, 1981
- 14) 土木學會콘크리트委員會, 高爐スラグ微粉末を用いたコンクリート施工指針, 콘크리트 라이브러리-86, 日本土木學會, 1996
- 15) 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
- 16) ACI Committee 206, Ground granulated blast-furnace slag as cementations constituent in concrete, ACI Materials Journal, No.84-M34, pp.327-342, 2009
- 17) Bernhardt, C.J., Damage due to freezing of fresh concrete, Proceedings of ACI, Vol.52, pp.573-581, 1956
- 18) Neville, A.M. Properties of Concrete, Longman, 537-580, 1995
- 19) Ryshkewitch, E., Compression strength of porous sintered alumina and zirconia, Journal of the American Ceramic Society, Vol.36, No.2, pp.65-68, 1953

### 초기동해를 받은 고로슬래그 다량 혼입 콘크리트의 강도발현과 동결응해 저항성

고로슬래그를 다량으로 혼입한 콘크리트를 동절기에 시공할 경우에는 배합에 따라서 응결과 경화가 현저히 지연되어 초기동해를 받을 위험성이 높다. 따라서 이 연구에서는 동절기에 고로슬래그를 다량으로 혼입한 콘크리트가 재령 초기에 동결을 받은 경우를 상정하여 초기동해가 콘크리트의 압축강도와 동결응해 저항성에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, 고로슬래그를 다량으로 혼입한 콘크리트는 초기동해를 받음으로써 압축강도와 동결응해 저항성 모두가 현저히 저하되고, 고로슬래그를 혼입하지 않은 일반콘크리트에 비해서 특히 동결응해 저항성이 크게 저하되는 것으로 나타났다.