

슬래그를 다량 치환한 콘크리트의 동결융해 저항성능에 미치는 미세공극의 영향

Effects of Micropores on the Freezing-Thawing Resistance of High Volume Slag Concrete

김 래 환¹⁾ 김 규 용^{2)*} 이 보 경³⁾ 신 경 수⁴⁾ 송 권 용⁵⁾
Rae-Hwan Kim Gyu-Yong Kim Bo-Kyeong Lee Kyoung-Su Shin Gwon-Yong Song

Abstract

In this study, effects of micropores on the freezing-thawing resistance of high volume slag concrete are reviewed. Concrete was made with slag which contains the ground granulated blast furnace slag(GGBS) and the pig iron preliminary treatment slag(PS) by replacing 0, 40, 70 %, then compressive strength, freezing-thawing resistance, micropores were reviewed. Also, specified design strength, target air contents were set. Deterioration was induced by using 14-day-age specimen which has low compressive strength for evaluating deterioration by freeze-thawing action. As results of the experiment, despite of specified design strength which has been set similarly and ensured target air contents, the pore size distribution of the concrete showed different results. Micropores in GGBS70 specimen have small amount of water which is likely to freeze because there is small amount of pore volume of 10~100 nm size at 0 cycle which has not been influenced by freezing-thawing. For these reasons, it was confirmed that the freezing-thawing resistance performance of GGBS70 is significantly superior than other specimens because relatively small expansion pressure is generated compared to the other specimens.

Keywords : high volume slag concrete, micropores, freezing-thawing, porosity

1. 서론

해양환경에 노출된 콘크리트 구조물은 기후변화로 인한 동결융해 작용에 의해 내부균열, 표면박리, 철근노출 등의 열화에 취약하다. 특히 우리나라의 경우 겨울철에 낮은 기온으로 인해 콘크리트 내 물이 동결하여 콘크리트 구조물의 열화가 쉽게 발생할 수 있다. 동결융해 저항성능은 일반적으로 공기량과 압축강도에 큰 영향을 받으며 이와 관련하여 많은 연구자들은 동결융해 저항성능과 공기량 또는 압축강도가 서로 밀접한 연관이 있다고 보고하고 있다(Oh et al., 1993; Huaishuai et al., 2009).

그러나 동결융해 저항성능은 공기량 및 압축강도 외에도 콘크리트 내부의 공극구조와 밀접한 관련이 있다(H. Cai et al., 1998). Figure 1은 콘크리트의 공극의 크기 및 동결융해

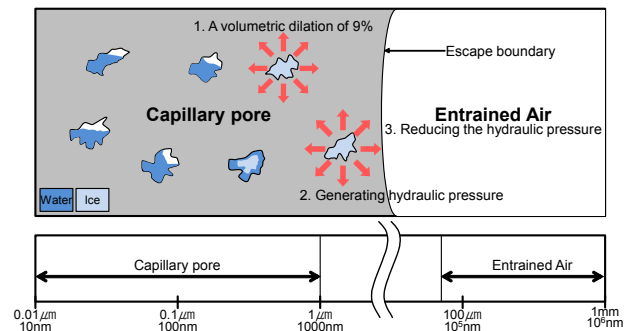


Fig. 1 Pore Size and Mechanism of Freezing-Thawing

메커니즘을 나타낸 것이다. 일반적으로 콘크리트의 공극은 겔 공극(Gel pore), 모세관 공극(Capillary pore), 갇힌공기(Entrapped air), 연행공기(Entrained air) 등으로 구분할 수

1) 정희원, 충남대학교 건축공학과 석사과정
2) 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수, 교신저자
3) 정희원, 충남대학교 건축공학과 박사과정
4) 정희원, 충남대학교 건축공학과 박사과정
5) 정희원, 계룡건설산업(주)

* Corresponding author : gyuyongkim@cnu.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2015년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

있다(Pigeon et al., 1992). 겔 공극은 물을 흡착하는 힘이 상대적으로 강해서 항상 물로 채워져 있고 일반적인 기상조건에서 물이 동결하지 않는 특징이 있다. 그러나 모세관공극은 수화물질이 미처 다 채우지 못하여 남은 공극으로서 동결 가능한 물이 포함되어 있어 동결팽창압에 따른 콘크리트 내부 균열 및 표면 박리를 일으키게 된다(Mehta et al., 2005; Olivier et al., 2008). 이때 연행공기는 모세관 공극 내 물의 동결팽창압을 완화하는 역할을 한다. 콘크리트가 동결융해 작용을 받으면 모세관공극 내 물이 동결하면서 약 9%의 체적팽창이 발생한다(Valenza et al., 2006(a); Valenza et al., 2007(b)). 체적팽창으로 인해 미동결수는 인접한 공극으로 이동하게 되는데 동결이 진행될수록 수압이 발생하여 인장력이 약한 콘크리트 내부조직부터 열화가 진행된다(Chung et al., 2010).

동결융해 저항성은 모세관공극의 부피 감소와 모세관공극의 동결에 의해 발생하는 동결팽창압을 완화시키는 연행공기의 형성을 통해 향상시킬 수 있다(Huaishuai et al., 2009). 고로슬래그를 치환할 경우 공극분포가 변하게 되며 공극구조는 슬래그를 치환한 콘크리트의 동결융해 저항성에 중요한 요소라고 언급하고 있다(Shi et al., 2012; Ali et al., 2014; Khan et al., 2010; Yang et al., 2003). 또한, 콘크리트 혼화재료로써 슬래그를 활용하면 매트릭스 충전효과에 기인하여 콘크리트 내부의 모세관공극의 용적을 감소시켜 수화반응에 의한 다른 미세공극구조를 가질 수 있다고 보고하고 있다(So et al., 2011). 따라서 연행공기를 통한 동결융해 저항성의 향상 외에도 콘크리트 제조 시 고로슬래그 미분말을 활용할 경우 공극구조 개선을 통한 동결융해 저항성의 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 공기량을 동일하게 설정하여 슬래그를 다량 치환한 콘크리트의 동결융해 저항성에 미치는 미세공극의 영향을 검토하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

Table 1, 2는 사용재료의 물리·화학적 성질을 나타낸 것이다. 시멘트는 KS F 5201 「포틀랜드 시멘트」의 규정을 만족시키는 1종 보통포틀랜드시멘트(C)를 사용하였으며, 밀도는 3.15 g/cm^3 , 분말도는 $3,500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이다. 고로슬래그 미분말은 KS F 2563 「콘크리트용 고로슬래그 미분말」 3종의 규

Table 1 Physical Properties of Used Materials

Materials	Physical properties
C	Ordinary portland cement, Density : 3.15 g/cm^3 , Blaine : $3,500 \text{ cm}^2/\text{g}$
GGBS	Ground granulated blast-furnace slag, Density : 2.90 g/cm^3 , Blaine : $4,196 \text{ cm}^2/\text{g}$
PS	Pig iron preliminary treatment slag, Density : 2.83 g/cm^3 , Blaine : $4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$
S	Fine aggregate (Sea sand), Density : 2.56 g/cm^3 , Maximum size : 5 mm, Water absorption ratio : 1.01 %
G	Coarse aggregate (Crushed aggregate), Density : 2.67 g/cm^3 , Maximum size : 25 mm, Water absorption ratio : 1.39 %
SP	Polycarboxylate Superplasticizer

Table 2 Chemical Properties of Used Materials

Materials	Chemical composition (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
C	20.70	6.20	3.10	62.20	2.80	0.10	0.84	2.10	1.96
GGBS	32.75	15.61	0.50	43.51	4.41	0.25	0.49	0.04	2.44
PS	15.35	1.21	2.40	69.71	1.52	0.10	-	4.20	5.51

정을 만족시키는 고로슬래그 미분말(GGBS)을 사용하였으며, 밀도는 2.90 g/cm^3 , 분말도는 $4,196 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이다. 용선예비처리슬래그(PS)는 철강공정 중 유해성분인 황(S) 등을 씻물에서 제거하기 위하여 별도의 예비처리 공정을 통해 발생하는 산업부산물로써 밀도는 2.83 g/cm^3 , 분말도는 $4,196 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이다. 잔골재와 굵은 골재의 밀도는 각각 $2.56, 2.67 \text{ g/cm}^3$ 이고, 최대치수는 각각 5, 25 mm이며, 흡수율은 1.01, 1.39 %이다.

2.2 실험계획

Table 3은 실험계획 및 콘크리트 배합을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 슬래그를 다량 치환한 콘크리트의 동결융해 저항성에 미치는 미세공극의 영향을 검토하기 위해 보통포틀랜드시멘트 콘크리트, 고로슬래그 미분말과 용선예비처리슬래그를 포함한 슬래그를 40, 70 % 치환한 콘크리트를 제조하였다. 또한, 동결융해 저항성은 압축강도와 밀접한 관련이 있기 때문에 설계기준강도를 24 MPa의 일반강도로 동일하게 설정하였다. 고로슬래그 미분말을 치환할 경우 압축강도가 낮아지므로 고로슬래그 미분말의 수화반응을 촉진시키고자 자극제와 유사한 성분으로 구성된 용선예비처리슬래그를 사용하여 초기강도를 개선하였다. C100, GGBS40,

Table 3 Experimental Plan and Mix Proportion of Concrete

Specimens	f _{ck} (MPa)	Slump (mm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					SP (B. %)	AE agent (SP. %)	Evaluation contents	
						W	B (binder)			S				G
							C	GGBS	PS					
C100	24	180 ± 30	4.0 ± 1.0	60	48	202	337	-	-	816	880	-	-	<ul style="list-style-type: none"> Compressive strength (MPa) Relative dynamic modulus of elasticity (%) Weight loss (%) Porosity (%)
GGBS40				60	48	202	202	128	7	812	874	-	-	
GGBS70				53	48	179	101	225	11	838	902	0.1	0.6	

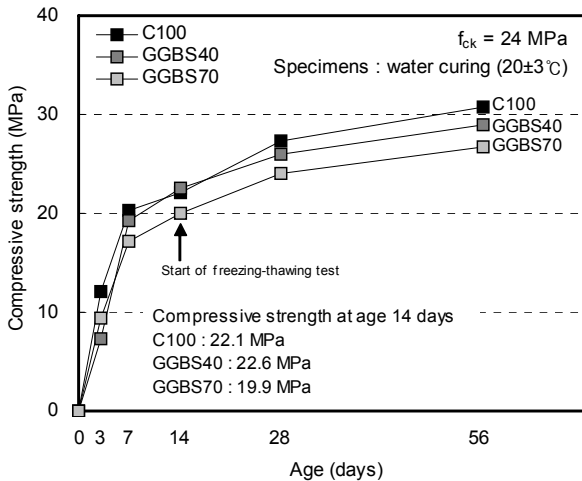


Fig. 2 Compressive Strength

GGBS70의 슬럼프는 각각 190, 200, 210 mm로 목표슬럼프를 만족하였다. 또한 C100, GGBS40의 공기량은 4.0, 4.3%, 그리고 GGBS70의 경우 공기량이 낮게 측정되어 AE제를 사용하여 3.7%로 목표공기량을 만족하였다.

Figure 2는 동결융해를 받지 않고 수중양생 한 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다. C100, GGBS40, GGBS70의 재령 14일 압축강도는 각각 22.1, 22.6, 19.9 MPa로 측정되었으며, 낮은 강도 범위에서 동결융해 반복 작용에 의한내력저하를 유도하였다.

일반적으로 동결융해 저항성은 공기량과 압축강도에 따른 영향이 크지만 본 연구에서는 유사한 공기량 및 압축강도로 실험을 계획하여 슬래그를 다량 치환한 콘크리트의 미세공극이 동결융해 저항성에 미치는 영향을 검토하였다.

2.3 실험방법

압축강도 시험은 Ø100×200 mm의 원주형 시험체를 제작하여 수중양생 한 이후 재령 3, 7, 14, 28, 56일에서 KS F 2405에 준하여 측정하였다.

동결융해 저항시험은 ASTM C 666/C 666M에 준하여 실시하였으며 모든 시험체의 공극 내에 물이 포함될 수 있도록 수중양생 한 시험체를 매 30 사이클마다 300사이클까지 상대동탄성계수와 질량감소율을 측정하였고 시험체가 파괴되었을 때는 측정하지 않았다. 상대동탄성계수는 다음과 같은 식(1)로 계산하였다. 또한, 동결융해 작용 매 100 사이클마다 압축강도를 측정하여 동결융해 반복 작용이 압축강도에 미치는 영향을 검토하였다.

$$P_c = (n_1^2/n^2) \times 100 \quad (1)$$

여기서, P_c 는 동결융해 c사이클 후의 상대동탄성계수(%), n 은 초기의 1차 공명 진동수(Hz), n_1 은 동결융해 c사이클 후의 1차 공명 진동수(Hz)이다.

콘크리트의 공극구조분석은 ASTM D 4284 수은압입시험 방법(Mercury Intrusion Porosimetry)에 의해 실시하였으며, 이는 젖지 않는 유체(수은)가 압력에 의해 공극에 침투하여 수은의 부피를 측정하는 시험방법이다(Winslow et al., 1970). 수은압입법은 다음의 식(2)로 표현되는 Washburn 식에 의해 공극의 모양을 실린더형 모세관으로 정의하여 수은이 침투하는 공극의 크기는 적용된 압력에 반비례하는 것을 나타내었다(Ritter et al., 1949).

$$d = \frac{-4\gamma(\cos\theta)}{P} \quad (2)$$

여기서, d 는 공극직경, γ 는 수은의 표면장력, θ 은 고체와 수은의 접촉각, P 는 수은압입압력이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상대동탄성계수 및 질량감소율 측정결과

슬래그 콘크리트의 동결융해 저항성능 검토결과 Table 4

Table 4 Specimens Exposed to Freezing–Thawing

Specimens	Number of freezing–thawing cycles(Tap water)										Specimens	Number of freezing–thawing cycles(Sea water)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270		300	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
C100								-	-	-	-	C100								-	-	-	-
GGBS40								-	-	-	-	GGBS40								-	-	-	-
GGBS70												GGBS70											

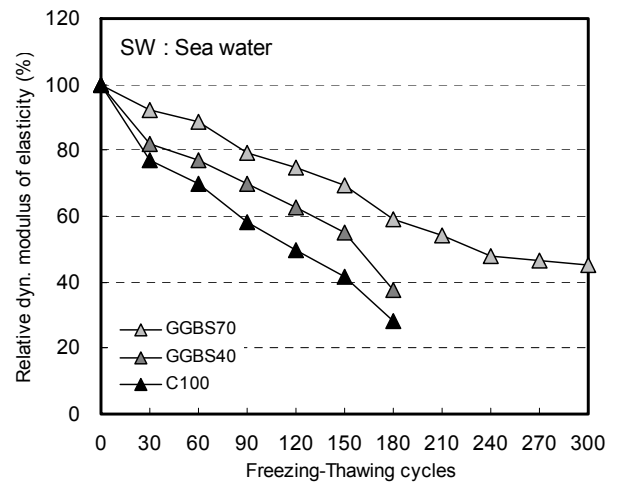
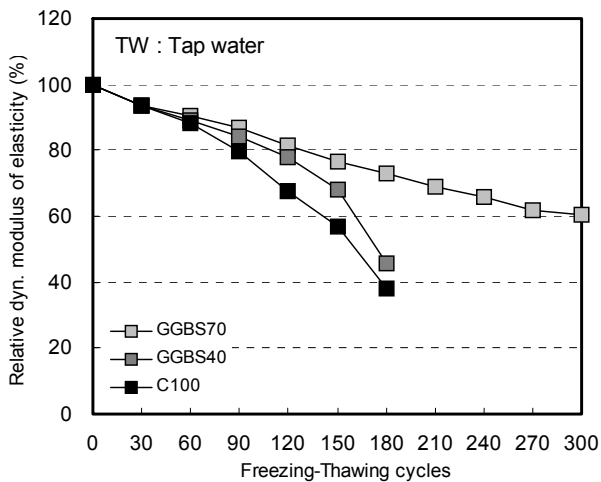


Fig. 3 Relative Dynamic Modulus of Elasticity

에 동결융해 작용을 받은 시험체를 나타냈으며, Figure 3에 동결융해 작용을 받은 슬래그 콘크리트의 상대동탄성계수 측정결과를 나타냈다. 동결수 담수조건에서 GGBS70 시험체가 가장 높은 상대동탄성계수를 나타냈으며 다른 시험체들에 비해 동결융해 저항성능이 우수한 것으로 나타났다. C100 시험체는 150사이클에서 상대동탄성계수가 60%미만으로 나타났으며 180사이클 이후에는 시험체가 파괴되어 상대동탄성계수를 측정할 수 없었다. GGBS40 시험체는 C100 시험체보다 다소 높은 상대동탄성계수가 측정되었으며 180사이클에서 60%미만으로 상대동탄성계수가 저하되었으며 180사이클 이후에는 시험체의 파괴로 인하여 더 이상 측정할 수 없었다.

동결수 해수조건에서는 C100, GGBS40 시험체가 담수조건에 비해 상대동탄성계수가 더 낮게 측정되었으며 두 시험체 모두 180사이클 이후에서 시험체의 파괴로 인하여 더 이상 상대동탄성계수를 측정할 수 없었다. 동결수 조건에 관계없이 GGBS70 시험체는 상대동탄성계수가 C100 시험체보다 높게 측정되어 동결융해 저항성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 4는 동결융해 작용을 받은 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트의 질량감소율 측정결과를 나타낸 것이다. 동결수 담수조건에서 C100, GGBS40, GGBS70 시험체는 150사이클까지 질량감소율이 각각 4.4, 3.4, 2.5%로 비슷한 수준을 나타냈으나 180사이클에서 질량감소율이 각각 12.8,

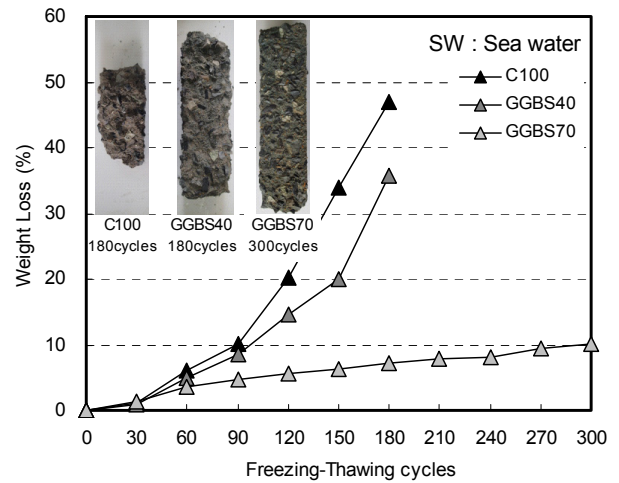
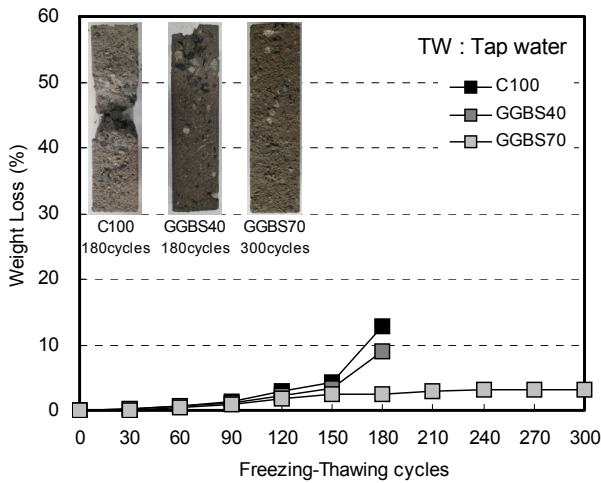


Fig. 4 Weight Loss

9.0, 2.5 %로 나타나 GGBS70 시험체를 제외한 나머지 시험체는 질량감소율이 급격하게 감소하였다. C100, GGBS40 시험체는 180사이클 이후 시험체가 파괴되어 질량을 측정할 수 없었다. 상대동탄성계수가 가장 높게 측정된 GGBS70 시험체는 동결융해 작용에 따른 열화가 가장 적어 질량감소율이 크지 않았다.

동결수 해수조건에서는 모든 시험체가 담수조건에 비해 질량감소율이 크게 나타났지만 GGBS70 시험체의 경우 다른 시험체에 비해 질량감소율이 가장 적게 나타났다. GGBS70 시험체는 동결수 담수조건에서 뿐만 아니라 해수조건에서도 동결융해 작용에 따른 저항성능이 우수한 것으로 나타났다. 한편, 동결수 해수조건에서 C100, GGBS40 시험체의 표면 열화가 담수조건에 비해 심하게 나타나 질량감소율이 급격하게 커지는 것을 확인하였다.

Figure 5는 동결융해 작용을 받은 콘크리트의 압축강도 비를 나타낸 것이다. 압축강도 계산 시에는 표면박리에 의한 시험체의 단면적 감소를 고려하여 산정하였다. 동결융해 작용으로 인한 표면박리와 내부 매트릭스의 변화가 나타나 동결융해 작용에 따른 압축강도의 감소를 확인할 수 있다. 동결수 담수, 해수조건에서 C100, GGBS40 시험체는 GGBS70 시험체에 비해 압축강도가 크게 감소하고 있으며 전체적으로 GGBS70 시험체가 가장 작은 압축강도 감소를 나타냈다. 동결수 해수조건에서는 담수조건에 비해 동결융해 작용에 따른 표면박리가 증가하여 압축강도가 더욱 감소하였다. 그러나 동결융해 저항성능이 우수한 GGBS70 시험체는 동결수 담수, 해수조건에서 동결융해 작용이 진행되어도 300사이클까지 표면박리가 적어 압축강도 변화가 다른 시험체에 비

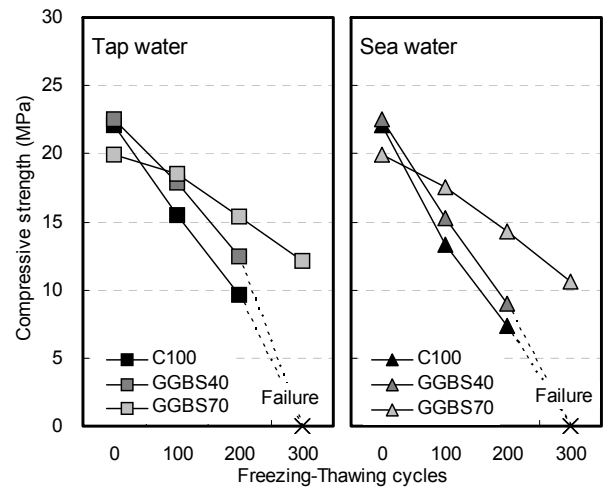


Fig. 5 Ratio of Compressive Strength of Concrete Exposed to Freezing-Thawing

해 크지 않은 것을 확인하였다.

해수조건에서 상대동탄성계수, 질량감소율 그리고 압축강도가 담수조건에 비해 더 감소하는 것은 해수의 용존이온에 의해 생성된 반응생성물로 인하여 콘크리트 내부조직이 침식을 받아 동결융해 반복작용에 따른 열화가 더욱 가속화된 것으로 판단된다(Lee et al., 2010).

3.2 공극률 측정결과

Figure 6은 동결융해를 받지 않은 콘크리트의 공극률 측정 결과를 나타낸 것으로 동결융해 작용을 받지 않고 수중양생한 시험체의 공극분포는 상이한 결과를 나타냈다. 누적공극

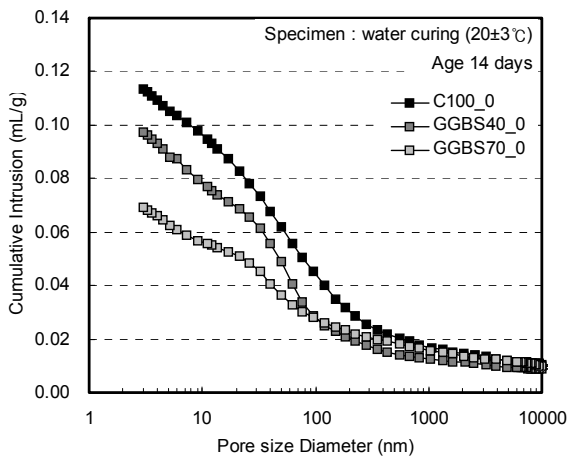


Fig. 6 Cumulative Pore Volume of Specimen

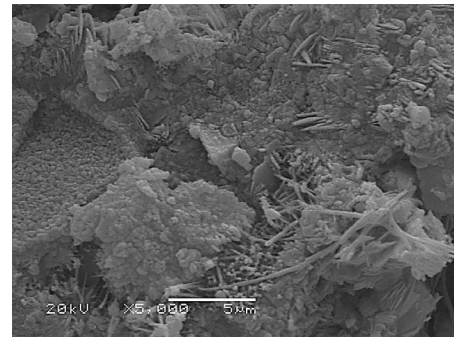
량은 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가함에 따라 감소하였으며 동결융해 저항성능이 가장 우수한 GGBS70 시험체는 다른 시험체에 비해 공극량이 적게 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말이 경화체 내부의 공극을 채워주는 효과로 인하여 공극량이 줄어든 것으로 판단된다.

GGBS70, GGBS40, C100 시험체 순으로 모세관공극의 양이 많기 때문에 모세관공극 내 동결할 수 있는 물의 양은 GGBS70 시험체가 가장 적게 되어 동결융해 저항성능이 가장 우수한 것으로 판단된다.

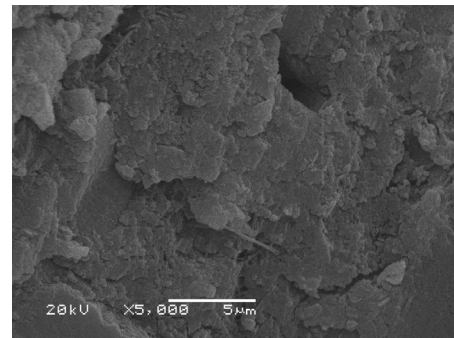
Figure 7은 동결융해 작용을 받지 않은 콘크리트의 주사전 자현미경 관찰 결과를 나타낸 것이다. GGBS40 시험체에서는 에트린자이트가 부분적으로 형성된 것을 확인할 수 있었으며 GGBS70 시험체에서는 이를 확인할 수 없었다. 이러한 에트린자이트의 형성으로 동결융해 작용에 의한 동결팽창을 완화하는 공간이 제한되어 동결융해 저항성능이 취약하게 된다(Stark et al., 1999).

Figure 8은 동결수 담수조건에서 동결융해 작용에 따른 모세관공극의 공극분포 변화를 나타낸 것이다. 목표공기량을 (4.0±1.0) % 범위로 설정하였음에도 불구하고 동결융해 반복 작용에 따라 모세관공극의 변화가 다른 경향을 보였다.

C100, GGBS40 시험체는 0~200사이클까지 동결융해 작용을 받았을 경우, 10~100 nm 크기의 모세관공극이 다른 크기의 영역보다 가장 크게 감소하는 경향을 보였다. C100, GGBS40 시험체는 GGBS70에 비해 0사이클에서 모세관공극량이 많아 동결융해 작용에 따라 모세관공극 내 동결할 수 있는 물이 많게 된다. 비교적 많은 모세관 공극 내 물은 동결하는 과정에서 높은 동결팽창압으로 인해 모세관공극의 파괴로 이어져 10~100 nm 크기의 모세관공극이 점차적으로



(a) GGBS40



(b) GGBS70

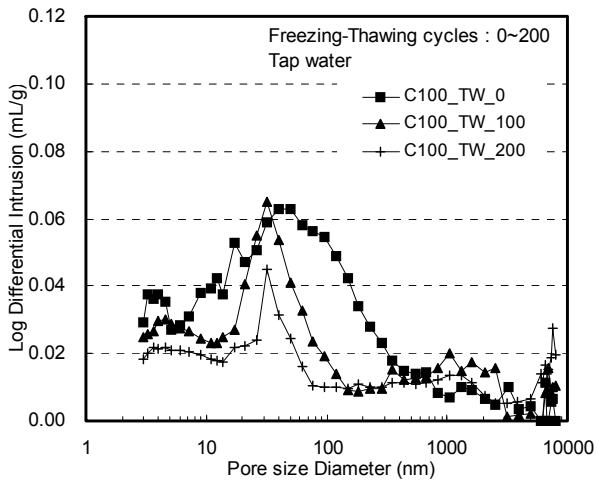
Fig. 7 SEM Images of Concrete at Age 14 Days (Water Curing)

감소한 것으로 판단된다.

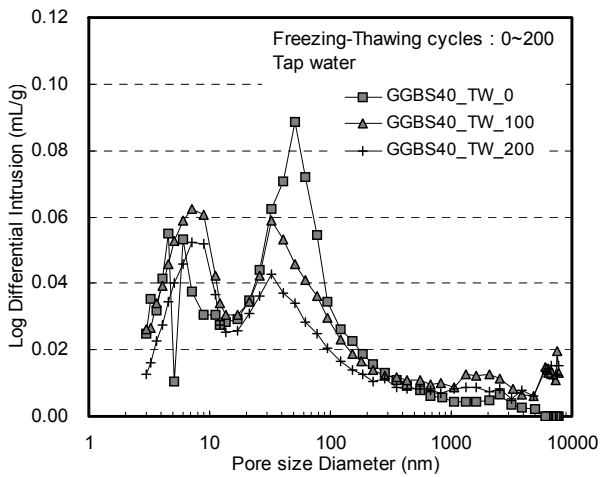
GGBS70 시험체는 0~200사이클까지 동결융해 작용을 받을 경우, C100, GGBS40 시험체와는 다르게 10~100 nm 크기의 공극이 증가했다가 100~200사이클까지는 다시 감소하는 경향을 나타냈다. GGBS70 시험체는 0사이클에서 다른 시험체에 비해 모세관공극이 적고 동결할 수 있는 모세관공극 내 물이 적어 동결팽창압이 가장 낮은 것으로 판단된다. 따라서 다른 시험체에 비해 낮은 동결팽창압으로 인해 모세관공극의 팽창이 서서히 진행되어 증가하였다. 또한 동결융해가 진행될수록 동결팽창압은 더욱 증가하여 200사이클에서 인장력이 약한 모세관공극부터 급격히 파괴된 것으로 판단된다.

동결수 해수조건에서는 담수조건과 유사한 공극크기별 공극분포를 나타냈으며, 동결수 조건이 슬래그 경화체 내부의 공극구조의 변화에 미치는 영향이 크지 않음을 확인하였으며, 해수에 의한 동결융해 작용은 표면박리에 더 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다.

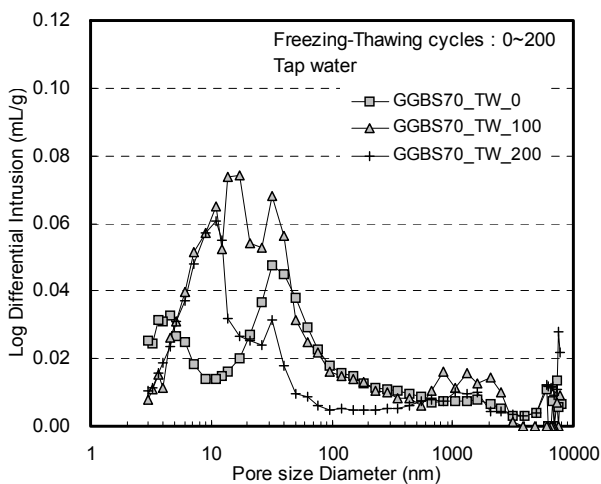
Figure 9는 동결수 담수조건에서 동결융해 작용에 따른 10~100 nm 크기의 모세관공극의 변화를 나타낸 것이다. 0사이클에서 10~100 nm 크기의 모세관공극은 C100, GGBS40, GGBS70 순으로 많았다. C100, GGBS40 시험체는 동결융



(a) C100



(b) GGBS40



(c) GGBS70

Fig. 8 Variation of Porosity for Concrete Exposed to Freezing-Thawing (Tap Water)

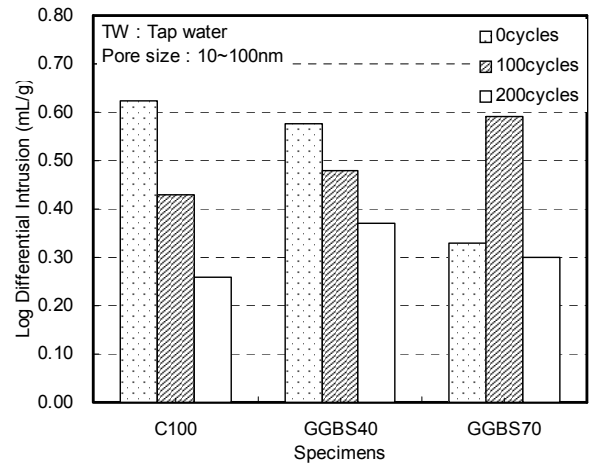


Fig. 9 Variation of Capillary Pore of 10~100nm Size for Concrete Exposed to Freezing-Thawing

해 반복작용에 따라 10~100 nm 크기영역의 모세관공극이 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 반면에 GGBS70 시험체는 100사이클까지 모세관공극이 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 GGBS70 시험체가 다른 시험체에 비해 0사이클에서 모세관공극이 적은 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는, 슬래그를 다량 치환한 콘크리트의 동결융해 저항성능에 미치는 미세공극의 영향에 대해 검토하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 미세공극인 10~100 nm 크기의 모세관공극이 적게 나타난 GGBS70 시험체는 동결수 담수, 해수조건에서 우수한 동결융해 저항성능을 나타냈다. 모세관공극의 양이 적어 동결할 수 있는 물의 양이 적고 동결융해 저항성능에 영향을 미치는 에트린자이트가 보이지 않았기 때문에 우수한 동결융해 저항성능을 나타낸 것으로 판단된다.
- (2) 동결수 담수, 해수조건에서 GGBS70 시험체는 동결융해 작용에 따른 압축강도의 변화가 다른 시험체에 비해 작았다. 이는 GGBS70 시험체가 다른 시험체에 비해 300사이클까지 표면파리가 적어 압축강도의 변화가 작은 것으로 판단된다.
- (3) 동결융해 저항성능은 연행공극의 형성 외에도 미세공극구조 개선을 통해 확보하는 것을 확인하였다. 고로 슬래그 미분말을 치환할 경우 경화체 내부의 조직이

치밀하게 되어 모세관공극의 용적이 감소함에 따라 동결융해 저항능력이 향상되는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2012H1B8A2025606)으로 수행된 연구결과임. 이에 감사드립니다.

References

1. Oh, B. H., Han, S. H., Park, S. H., Lee, Y. H. (1993), Experimental Study of Freezing and Thawing Characteristics of Concrete Influenced by Air Content and Water Cement Ratio, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 5(2), 91-96.
2. Huaishuai, S., Yupu, S., Jinping, O. (2009), Behavior of Air-Entrained Concrete after Freeze-Thaw Cycles, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 22(3), 261-266.
3. Cai, H., Liu, X. (1998), Freeze-Thaw Durability of Concrete: Ice Formation Process in Pores, *Cement and Concrete Research*, 28(9), 1281-1287.
4. Pigeon, M., Pleau, R. (1992), Durability of concrete in cold climates, London: E&FN Spon, 12-23.
5. Kumar Mehta, P., Paulo J. M. (2005), Concrete (Microstructure, Properties, and Materials), McGraw-Hill, 135-141.
6. Olivier, C., Paulo J. M. (2008), Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures, *Cement and Concrete Research*, 38(1), 40-48.
7. Valenza, J. J., Scherer, G. W. (2006), Mechanism for salt scaling, *Journal of the American Ceramic Society*, 89(4), 1161-1179.
8. Valenza II, J. J., Scherer, G. W. (2007), A review of salt scaling: II. Mechanisms, *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1022-1034.
9. Chung, C. W., Shon, C. S., Kim, Y. S. (2010), Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze-thaw cycles, *Construction and Building Materials*, 24(9), 1739-1745.
10. Xianming, S., Ning, X., Keith, F., Jing, G. (2012), Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview, *Construction and Building Materials*, 30, 125-138.
11. Allahverdi, A., Mohammad, M. B., Khandaker M. H., Mohamed, L. (2014), Resistance of chemically-activated high phosphorous slag content cement against freeze-thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 103, 107-114.
12. Khan, M. (2010), Nanostructure and microstructure of cement concrete incorporating multicementitious composites, *Transportation Research Record*, 2141, 21-27.
13. Yang, C. C., Cho, S. W. (2003), An electrochemical method for accelerated chloride migration test of diffusion coefficient in cement-based materials, *Materials Chemistry and Physics*, 81(1), 116-125.
14. So, H. S., Oh, J. S., Park, K. B. (2011), Permeability and transport mechanisms of media into concrete, *Korea infrastructure safety corporation, KISTEC.*, 37(1), 53-77.
15. Winslow, D. N., Diamond, S. (1970), A Mercury Porosimetry study of the Evolution of Porosity in Cement, *Journal of Materials*, American Society for Testing and Materials., 5(3), 564-585.
16. Ritter, H. L., Drake, L. C. (1949), Pore-size Distribution in Porous Materials, *Industrial and Engineering Chemistry*, 41(4), 780-785
17. Stark, J., Bollmann, K. (1999), Delayed ettringite formation in concrete, *Nordic Concrete Research*, 23(2), 18-19
18. Lee, S. H., Kim, H. D. (2010), A Durability Assessment on Complex Deterioration of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag Replacement, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 14(2), 171-175

Received : 02/27/2015

Revised : 04/21/2015

Accepted : 04/30/2015

요 지

본 연구에서는 슬래그를 다량 치환한 콘크리트의 동결융해 저항능에 미치는 미세공극의 영향을 검토하였다. 콘크리트는 용선예비처리 슬래그가 포함된 고로슬래그 미분말을 0, 40, 70 % 치환하여 제조하였으며 압축강도 특성 및 동결융해 저항능과 미세공극을 검토하였다. 또한 설계기준강도와 목표공기량을 설정하고, 동결융해 작용에 따른 열화를 확인하기 위하여 재령 14일의 낮은 압축강도로 인한 내력저하를 유도하였다. 실험결과, 설계기준강도를 유사하게 설정하고 목표공기량을 확보하였음에도 불구하고 콘크리트의 미세공극 분포가 상이한 결과를 나타내었다. GGBS70 시험체는 동결융해를 받지 않은 초기 0사이클에서 10~100 nm 크기의 공극량이 가장 적어 공극 내 동결할 수 있는 물의 양이 적을 것으로 판단된다. 이러한 이유로 다른 시험체에 비해 동결팽창압력이 상대적으로 작기 때문에 동결융해 저항능이 우수한 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 슬래그 다량치환 콘크리트, 미세공극, 동결융해, 공극률