

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on Freezing - Thawing Resistance of Concrete Using Ground Granulated Blast - Furnace Slag

남용혁* 최세규** 김동신** 김생빈**
Nam, Yong Hyuk Choi, Se Gyu Kim, Dong Sin Kim, Saeng Bin

Abstract

Concrete with ground granulated blast-furnace slag can be affected by frost attack because the reaction of hydration is slow at the early age .

In this study, therefore, the freezing and thawing test has been carried out to investigate the freezing and thawing resistance on concrete with ground granulated blast-furnace slag.

The freezing and thawing test has been performed on concrete a blended cement, which was substituted by ground granulated blast-furnace slag with 4 kinds of ratio (non-admixture, 20%, 40% and 60%). And also tested on concrete added the AE agents to the concrete of same mix proportion to search the improvement effects about the resistance.

As a result, the freezing and thawing resistance showed a tendency of reduction in proportion to the increase of the substitution ratio. For non-AE concrete, resistances of the freezing and thawing were very poor as the durability index indicated less than 5.8%. For AE concrete, resistances of the freezing and thawing were excellent as the durability index indicated more than 80.9%.

1. 서 론

제철소에서 선철을 제조할 때 생성되는 부산물인 고로슬래그는 1980년대 초반까지만 해도 재활용

* 동국대 토목공학과 석사과정
** 동국대 토목공학과 박사과정
*** 동국대 토목공학과 강사, 공학박사
**** 동국대 토목공학과 교수, 공학박사

에 대한 연구가 미흡하여 매립용재료, 도로포장용, 보조기층재료 등으로만 쓰였으나 최근 선진 각국에서는 고로슬래그 미분말을 활용한 콘크리트 제조의 연구 및 실용화가 활발히 진행되고 있다. 고로슬래그 미분말은 유리질의 급냉슬래그를 곱게 분쇄하여 만든 것이다. 우리나라의 경우 1986년 공업진흥청에서 고로슬래그 시멘트(KS L 5210)를 규격화하였고 1995년에는 대한토목학회에 의해 고로슬래그 시멘트 및 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 설계·시공지침안이 제정되었다.¹⁾

고로슬래그 미분말을 적절히 사용한 콘크리트는 보통콘크리트에 비해 장기강도의 증진효과를 얻을 수 있으며 수화열로 인한 온도상승을 억제시키고 황산염이나 해수 등에 대한 화학저항성의 향상과 알칼리골재 반응의 억제 등의 효과가 있다고 알려져 있다.^{2),3)} 그러나 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 수화속도가 늦어 어린재령시 동해로 인한 영향을 크게 받을 수 있다.⁴⁾ 더욱이 우리나라 중북부 지방의 겨울철 기후는 밤과 낮의 기온차가 크므로 동결과 융해의 반복이 잘 일어나고 이로 인해 콘크리트 구조물이 손상을 입기 쉽다.

따라서 본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 동결융해에 대한 내구성을 알아보기 위하여 단위시멘트량의 0%, 20%, 40% 및 60%를 고로슬래그 미분말로 치환한 콘크리트에 대한 동결융해 시험 등을 실시하였으며, 또한 동일한 치환율의 콘크리트에 AE제를 첨가시켜 AE공기로 인한 동결융해 저항성의 개선효과를 알아보았다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 연구에서는 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 동결융해 저항성을 알아보기 위하여 단위시멘트량의 20%, 40% 및 60%를 고로슬래그 미분말로 각각 치환한 콘크리트에 대해 KS F 2456에 따라 공기중 급속동결 수중 급속융해의 방법으로 동결융해 시험을 실시하였다.⁵⁾ 또한 보통포틀랜드 시멘트만을 사용한 콘크리트에도 동일한 시험을 실시하여 이와 비교 분석하였다.

AE제 사용에 따른 동결융해 저항성의 개선여부를 알아보기 위하여 결합재(시멘트+고로슬래그 미분말) 중량의 0.014%인 AE제를 첨가한 AE 콘크리트에 대해 동결융해 시험을 실시하여 AE제를 첨가하지 않은 콘크리트와 그 저항성을 비교하였다.

KS규준에 따라 동결융해 시험은 동결융해 사이클 수가 300이 되거나 상대동탄성계수가 60%이하일 때 완료하였다.⁶⁾

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 변화를 측정하였으며, 표준양생의 재령 7일, 14일, 28일에 시 콘크리트의 압축강도를 측정하였다.

표 1 시멘트 및 고로슬래그 미분말의 물리적 성질

구분	비중	분말도 (cm ² /g)	응결시간 (시: 분)		압축강도 (kg/cm ²)		
			초결	종결	3일	7일	28일
BS	2.9	5500	-	-	-	-	-
NPC	3.15	3434	3:15	6:30	210	265	350

표 2 시멘트 및 고로슬래그 미분말의 화학적 성질

항목 구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss on ignition
BS	35.08	14.92	0.38	42.26	6.41	0.11	-
NPC	20.80	5.88	3.33	62.71	2.76	2.23	0.41

표 3 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질

구분	최대입경(mm)	비중	흡수율	조립률
잔골재	-	2.58	0.72	1.98
굵은골재	25	2.73	0.93	6.60

2.2 사용재료

본 연구에 사용된 보통포틀랜드 시멘트(NPC)와 고로슬래그 미분말(BS)의 물리적 성질 및 화학적 특성은 다음 표 1 및 표 2와 같다.

잔골재 및 굵은골재는 한강 상류지역에서 채취한 것으로 그 물리적 성질은 표 3과 같으며, 연행공기를 도입시키기 위하여 사용한 혼화제는 국내 생산제품인 리그닌 설폰산염계 AE제이다.

2.3 배합설계

보통포틀랜드 시멘트 콘크리트로 시험비비를 실시하여 압축강도 200~240kg/cm²를 목표로 시적 배합설계 하였으며, 슬럼프는 8±1cm, 굵은골재 최대치수는 25mm를 사용하였다.

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 동일한 배합비를 사용하였으며 표 4의 배합설계표와 같이 단위시멘트량을 고로슬래그 미분말로 일정량 치환하여 배합하였다.

2.4 시험방법

압축강도 시험은 $\phi 10 \times 20$ cm 원추형 공시체를 각 재령별로 3개씩 제작하였으며, 동결융해 시험용 공시체는 7.5×10×40cm 크기의 각주 공시체로 제작하였다.

동결융해 시험은 공기중 급속동결 수중 급속융해의 방법에 의해 전자동 동결융해 시험기를 사용하여 실험하였으며, 이 때 공시체의 온도는 동결시 -17℃, 융해시 4℃가 되게 하였고 동결융해의 1사이클은 약 2.5시간이 소요되었다. 상대동탄성계수값은 초음파 속도에 의한 동탄성계수 시험법에 의해 PUNDIT로 전파시간을 측정하여 아래 식에 의해 상대동탄성계수 및 내구성 지수를 구하였으며, 동결융해 반복이 300사이클이 되거나 상대동탄성계수가 60% 이하로 될 때 시험을 완료하였다.

동탄성계수와 내구성지수를 구하는 공식은 다음과 같다.

표 4 배합설계표

공시체종류	굵은골재 최대치수 (mm)	물-결합재비 (W/BS+NPC) (%)	잔골재율 (%)	단위중량(kg/m ³)					혼화제 (g)
				물	결합재량		잔골재	굵은골재	
					시멘트	고로슬래그 미분말			
NPC	25	51	36.16	175	341	-	655	1223	-
BS20	25	51	36.16	175	273	68	655	1223	-
BS40	25	51	36.16	175	205	136	655	1223	-
BS60	25	51	36.16	175	136	205	655	1223	-
NPC AE	25	51	36.16	175	341	-	655	1223	47.74
BS20 AE	25	51	36.16	175	273	68	655	1223	47.74
BS40 AE	25	51	36.16	175	205	136	655	1223	47.74
BS60 AE	25	51	36.16	175	136	205	655	1223	47.74

주) 공시체종류에서의 숫자는 치환율을 나타내며 AE는 AE제를 첨가한 콘크리트임.

$$E_D = V l^2 \times \rho \times 107 \times \frac{1}{g}$$

$$V l = L \times 10 \times \frac{1}{T}$$

여기서

E_D : 동탄성계수(kg/cm^2)

V_l : 전파속도(km/sec)

L : 공시체의 길이 (cm)

T : 전달시간 (μsec)

ρ : 공시체의 밀도 (g/cm^3)

g : 중력가속도(cm/sec^2)

$$DF = C \cdot \frac{N}{M}$$

여기서

DF : 내구성 지수

C : N사이클에서 상대동탄성계수

N : 동결융해 시험을 마친 사이클 수

M : 동결융해 목표 사이클수(300사이클)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트의 성질

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 슬럼프는 보통 콘크리트에 비해 동등 이상으로 측정되었으며, 대체로 미분말의 치환율이 증가할수록 슬럼프는 다소 크게 나타났다. 또한 공기량은 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 약간씩 적어지는 것으로 측정되었다.

3.2 압축강도

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 보통콘크리트에 비해 압축강도가 낮았으며, 치환율이 증가할수록 압축강도는 낮게 측정되었다.

양생재령이 길어짐에 따라 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 강도증진율이 높게 나타났으며, AE제를 첨가한 콘크리트에서도 동일한 성향이 나타났다. (그림 3)

3.3 동결융해 저항성

동결융해 시험 결과 AE제를 첨가하지 않은 콘크리트의 경우 모두 동결융해 30사이클 이내에 상대동탄성계수 60%에 도달하여 시험이 완료되었으며, 고로슬래그 미분말의 치환율이 높을수록 동결융해 내구성은 나쁜 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 어린재령에서의 강도가 낮으므로 재령 14일에서의 동결융해 저항성은 치환율이 높을수록 낮은 것으로 나타났다.

AE제를 첨가한 콘크리트의 경우도 치환율이 증가할수록 동결융해 저항성은 다소 낮아지나 동결융해 300사이클에서 상대동탄성계수 80.9% 이상인 것으로 나타나 대체로 동결융해 내구성이 우수한 것으로 판단된다. 다음 그림 4와 표 5는 동결융해 시험 결과를 나타낸 것이다.

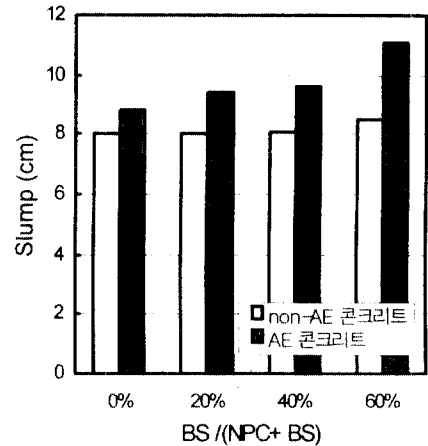


그림 1 슬럼프 변화

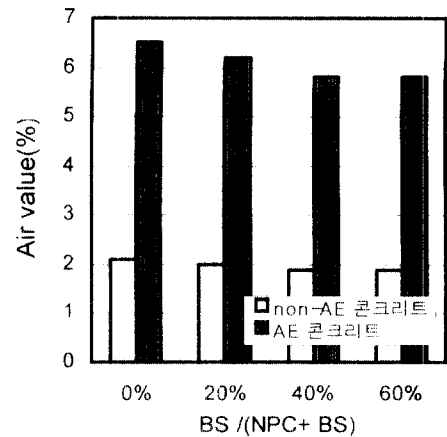
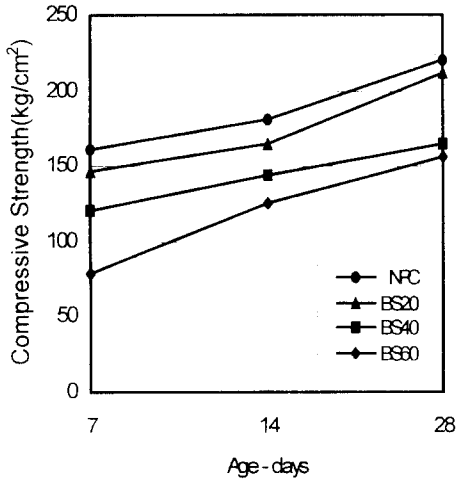
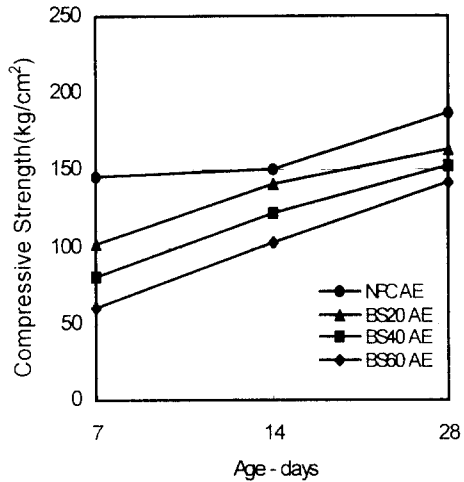


그림 2 공기량 변화

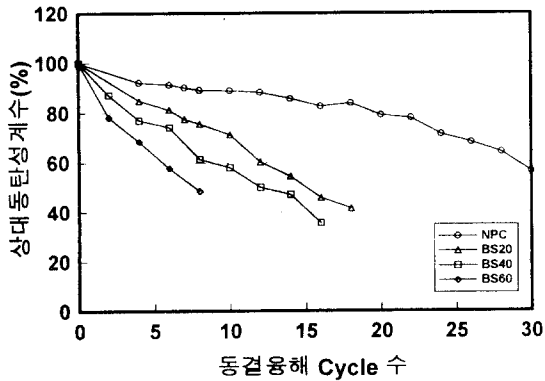


(a) non-AE 콘크리트

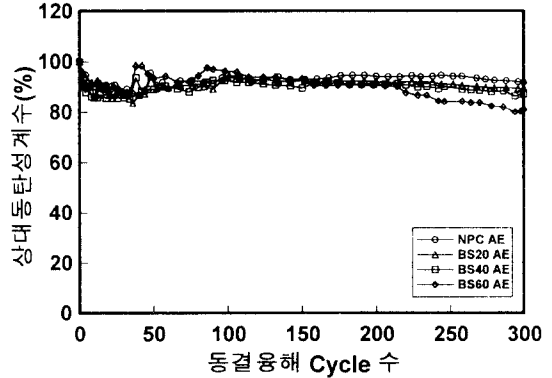


(b) AE 콘크리트

그림 3 non-AE 콘크리트 및 AE 콘크리트의 압축강도



(a) non-AE 콘크리트



(b) AE 콘크리트

그림 4 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 동결융해 사이클 수와 상대동탄성계수와의 관계

표 5 동결융해 시험결과

공시체명		시험완료 사이클 수 (%)	상대동탄성 계수(%)	내구성 지수(%)
non-AE 콘크리트	NPC	29	60	5.8
	BS20	12	60	2.4
	BS40	9	60	1.8
	BS60	6	60	1.2
AE 콘크리트	NPC AE	300	91.8	91.8
	BS20 AE	300	89.4	89.4
	BS40 AE	300	87.1	87.1
	BS60 AE	300	80.9	80.9

콘크리트의 내구성 지수는 non-AE 콘크리트의 경우 NPC는 5.8%, BS20은 22.4%, BS40은 1.8%, BS60은 1.2%로 매우 낮게 측정되어 동결융해 저항성이 나쁜 것으로 나타났으며, AE 콘크리트의 경우 내구성 지수가 NPC AE는 91.8%, BS20 AE는 89.4%, BS40 AE는 87.1%, BS60 AE는 80.9%로 높게 측정되어 동결융해 저항성이 우수하게 나타났다. 이를 도표로 나타낸 것이 그림 5이다.

4. 결 론

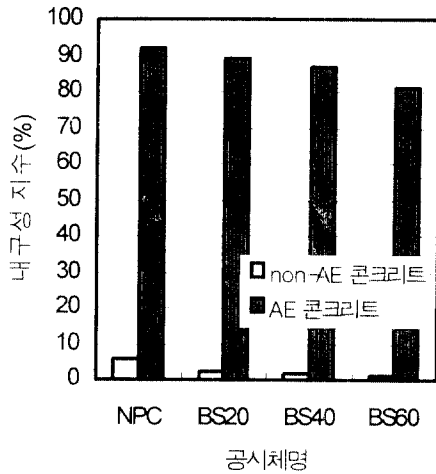


그림 5 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 동결융해 내구성 지수

융해 저항성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

- 4) 동해를 받기 쉬운 지역에서 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트로 시공할 때는 AE제를 사용하여 동결융해에 대한 내구성을 증진시켜야 한다.

● 참고문헌 ●

1. 대한토목학회, '고로슬래그 시멘트 및 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 설계·시공 지침(안)', 1995
2. R. N. Swamy, "Cement Replacement Materials", pp. 73-129, 1986
3. ACI Committee226, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", 1987
4. V. M. Malhotra, "Mechanical properties and freezing and thawing durability of concrete incorporating a ground granulated blast-furnace slag", Canadian Journal of Civil Engineering, Volume 16, Number 2, pp. 140-156, 1989
5. 한국콘크리트학회, '최신 콘크리트공학', pp. 144-150
6. 한국공업표준협회, '급속동결에 대한 콘크리트의 저항 시험방법', KS F 2456