

고로 슬래그 미분말을 사용한 고강도 콘크리트의 특성

Properties of High Strength Concrete Incorporating Fine Blast Furnace Slag

이 봉 학* · 이 주 형** · 홍 창 우**
Lee, Bong Hak · Lee, Joo Hyung · Hong, Chang Woo

Abstract

The object of this study is to investigate the strength characteristics and the freeze-thaw resistance of high strength concrete incorporating fine blast furnace slag. Major experimental variables were the water/cement ratio, maximum size of coarse aggregate, and cement types such as ordinary portland and slag cement. The results were as follows ; The workability of fresh concrete incorporating fine blast furnace slag was better than that of OPC(ordinary Portland cement) in terms of slump. The freeze-thaw resistance showed better than that of OPC, keeping more than 90% of relative modulus of elasticity after 506 cycles and showing only a hair crack at surface without serious damage. Thus, the fine blast furnace slag might be recycled at concrete to make high strength concrete at fields.

I. 서 론

현재 대부분의 폐기물 처리는 매립에 의존하고 있으며, 이로 인한 매립지 부족 및 환경오염 등이 심각한 사회문제로 대두되고 있다.(최진기, 1992) 근래에 들어 폐기물의 효율적인 처리방법으로 재활용에 대한 관심이 높아지고 있으며, 폐기물을 콘크리트에 사용하여 각종 건설재료나 건축자재로 재활용하는 사례가 점점 많아지고 있다.(김광우, 1995) 많은 종류의 폐기물이 콘크리트의 혼화재료나 골재로 재활용되고 있는데, 대표적인 것으로는 고로 슬래그, 플라이 애시, 실리카 흙 등을 들 수 있다. 제철소의 선철 과정에서 생성되는 산업 부산물인 고로 슬래그는 우리

나라에서 연간 약 6,000만 톤이 생산되고 있다. 이들 대부분은 폐기처분 되고 일부분이 연안매립 또는 도로포장 보조기층 재료와 같이 부가가치가 낮은 재료로 활용되고 있다. 이렇게 고로 슬래그가 고 부가가치의 재료로 재활용되지 못하는 이유는 이들이 부산물이기 때문에 품질의 편차가 크고 별도의 공정을 필요로 하는 경우가 많기 때문이다.(Kawal, 1988) 그러므로 고로 슬래그를 콘크리트에 효율적으로 재활용하기 위해서는 고로 슬래그의 특성과 이것이 콘크리트에 미치는 영향에 대한 세심한 검토가 선행되어야 한다.(문한영, 1985) 고로 슬래그는 콘크리트의 알칼리성 수화생성물에 의한 잠재 수경성을 발휘하며, 수화반응이 시작되면 장기적으로는 석회결합기

* 강원대학교 공과대학
** 강원대학교 대학원

키워드 : 고로 슬래그 미분말, 고내구성 콘크리트, 동결융해 저항성.

능도 나타내기 때문에, 고로 슬래그 미분말은 포졸란 반응도 함께 갖는 물질로 해석되고 있다. 최근 세계 각국에서는 분쇄기를 사용하여 고로 슬래그를 미분말로 제조한 후 콘크리트용 혼화재로 사용하여 고강도, 고유동성 및 고내구성 콘크리트를 개발하고자 많은 연구가 진행되고 있으나, 국내에서는 고로 슬래그 미분말을 혼화재로 사용한 콘크리트와 관련되는 연구와 사용실적이 미흡한 실정이다. 슬래그를 보통포틀랜드 시멘트와 비슷한 크기로 분쇄하여 혼화재로 사용할 경우에 포졸란 효과에 의한 수화온도의 상승을 억제할 수 있는 등의 장점이 있는 반면, 응결 및 강도발현이 지연되고 중성화가 촉진되는 등의 단점도 지니고 있다. 이러한 경향은 슬래그 치환율이 클수록, 물-시멘트비가 작아질수록 현저한 경향을 보인다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하고자 고로 슬래그를 미분말로 분쇄하여 시멘트의 혼화재로 재활용하고자 하였다. 또한, 고로 슬래그를 미분말로 가공하였을 때의 효과를 충분히 이용하고자 고강도콘크리트에 적용한 실험을 실시하여, 고로 슬래그 미분말을 혼입한 고강도 콘크리트의 강도특성 및 내구특성을 고찰하였다.

II. 실험

1. 실험개요

본 연구에서는 분말도 5,950cm²/g의 고로 슬래그 미분말을 혼입하여 제조된 굳지 않은 콘크리트의 특성을 고찰하기 위한 실험으로 슬럼프 및 공기량 시험을 실시하였고, 굳은 콘크리트의

특성을 분석하기 위해 압축강도, 할렬인장강도, 휨강도 실험을 수행하였다. 그리고 콘크리트의 내동결융해성을 파악하기 위해 급속 동결융해 실험을 실시하였다. 주요실험변수의 결정은 고로 슬래그 미분말 시멘트와 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하는 것으로 하였으며, 물/시멘트비, 단위수량, 잔골재율, 고유동화제 및 공기연행계첨가량, 굵은 골재 최대치수를 예비실험변수로 하여 콘크리트의 경화전 특성과 강도특성을 측정하여 주요 실험변수를 결정하고 적정배합계획을 도출하였다.

본 실험에서는 예비실험 변수 중 영향이 큰 것으로 확인된 물/시멘트 비, 굵은골재의 최대치수 및 단위시멘트량을 주요 실험변수로 결정하여 실험을 수행하였다.

2. 실험재료

가. 슬래그 미분말

본 연구에서 사용한 슬래그는 포항제철소에서 생산되는 수쇄슬래그이며 화학성분은 Table 1과 같다. 고로 슬래그의 염기도는 고로 슬래그 분말의 화학분석값으로부터 1.8을 나타내어 KS L 5210 「고로 슬래그 시멘트」에 사용하는 고로 슬래그의 염기도는 1.4 이상이어야 한다는 규정을 만족하였다. 염기도는 $(CaO + MgO + Al_2O_3) / SiO_2$ 로 계산한다. 슬래그 미분말을 생산하기 위해서 S사의 소형 roller mill을 이용하였고 분말도는

Table 1. Chemical components of fine blast furnace slag(%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	기타
34.8	14.6	1.2	41.8	6.6	1.0

Table 2. Physical properties of cement

Type	Grain size distribution(μm)								MS	Specific gravity	Specific surface area
	1	2	4	8	16	32	48	64			
Fine blast furnace slag cement	5.1	6.9	11.0	28.6	47.5	76.3	94.3	97.1	16.8	3.02	5,950cm ² /g
Ordinary portland cement	8.7	14.0	25.4	53.6	75.0	89.0	97.6	99.5	7.3	3.15	2,800cm ² /g

*MS : Medium size

Blaine값 기준으로 5,950cm²/g 수준으로 분쇄하여 사용하였다.

나. 시멘트

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 주재료하여 분말도 5,950cm²/g이 되도록 분쇄한 슬래그 미분말을 50 : 50으로 배합한 시멘트를 사용하였으며, 보통 포틀랜드 시멘트는 시중의 H사 제품을 비교용으로 사용하였다. 슬래그 및 보통 포틀랜드 시멘트의 입도분포 및 물리적 특성은 Table 2와 같다.

다. 골재

굵은골재는 춘천시 남산면 광관리산 쇄석 19mm와 25mm를 사용하였으며, 잔골재는 홍천강 유역에서 채취된 강모래를 사용하였다. Table 3은 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

Table 3. Physical properties of aggregate

Type	Max. size	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate	-	2.61	0.87	2.52
Coarse Aggregate	19mm	2.61	0.98	5.86
	25mm	2.65	1.01	7.00

3. 콘크리트 배합

고강도 콘크리트의 유동성을 향상시켜 충분한 작업성을 확보할 수 있도록 고유동화제를 첨가하여 목표슬럼프를 18cm 이상 되도록 하였으며, 고로 슬래그의 분말도가 보통 포틀랜드 시멘트보다 2배 이상 높아 목표 공기량 2.5%를 확보하기 위하여 공기연행제를 사용하였다. 배합설계는 단위수량이 최소로 되는 잔골재율, 적정 슬럼프, 공기량 및 최적의 작업성을 도출하기 위하여 예비실험을 통하여 Table 4와 같이 결정하였다. 이때 보통시멘트를 사용하고 물/시멘트비를 28%로 한 배합에서는 슬럼프가 5cm 미만으로 나타나 목표슬럼프를 만족시키지 못하여 실험조건에서 제외하였다. 실험 주요변수로는 시멘트(슬래그 및 보통포틀랜드 시멘트), 굵은골재의 최대치수(19mm, 25mm)와 물/시멘트비(28, 32, 36%)로 하였다. 콘크리트의 배합은 단위수량이 적고 재료의 충분한 혼합을 위해 잔골재와 굵은골재를 투입한후 30초간 건비빔을 실시하고, 시멘트와 AE제 및 배합수의 70%을 넣고 1분 30초간 비빔을 실시한후, 최종적으로 배합수의 30%와 유동화제를 투입하여 2분간 비빔을 실시하였다.

Table 4. Mix proportions of concrete

Specimen	Cement	Max.size of coarse aggregate(mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m ³)					
					Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	AE	Super plasticizer
S1-28	Slag cement	19	28	38	160	571	616	1,005	0.114	5.71
S1-32			32	38	160	500	639	1,043	0.100	5.00
S1-36			36	38	160	444	658	1,073	0.089	4.44
S2-28		25	28	38	160	571	616	1,020	0.114	5.71
S2-32			32	38	160	500	639	1,059	0.100	5.00
S2-36			36	38	160	444	658	1,089	0.089	4.44
N1-32	Ordinary Portland cement	19	32	38	160	500	646	1,054	0.100	5.00
N1-36			36	38	160	444	664	1,083	0.089	4.44

* AE제 : 국내 K사의 AEA 202표준형, C의 0.02%

* 고유동화제 : 국내 K사의 Rheobuild 1000, C의 1.0%

* S1-28;(S, N)-시멘트종류, (1, 2)-골재(19, 25mm), (28, 32, 36)-W/C

Ⅲ. 실험결과 및 분석

1. 굳지않은 콘크리트의 특성

미분말 고로 슬래그 시멘트와 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 대한 슬럼프 값을 Table 5에 나타내었다. S1-32, S1-36 콘크리트의 슬럼프가 각각 20.0cm, 19.2cm로 나타났으며, N1-32, N1-36 콘크리트의 경우는 각각 17.5cm, 15.0cm의 값을 나타내어, 동일한 조건에서 슬래그 시멘트의 슬럼프가 더 크게 나타났다. 이와같은 것은 슬래그의 분말도를 높임으로 인해서 슬래그 미분말의 롤링효과와 시멘트 입자에 비해서 표면이 매끄럽기 때문이다. 따라서 같은 슬럼프를 얻기 위해 필요한 단위수량도 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 미분말 슬래그 시멘트를 사용함으로써 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리

트에 비해 높은 작업성을 얻을 수 있다는 것은 동일한 배합조건에서 블리딩을 줄일 수 있고 모재(matrix)를 치밀하게 하여 고내구성 콘크리트의 제조가 가능함을 나타내는 것이다.

콘크리트의 배합에서 공기연행제는 시멘트 중량의 0.02%를 첨가하여 공기함유량이 2±1%가 되도록 하였다. 공기량 측정은 워싱턴형 에어미터를 사용하였다. 실험결과 미분말 슬래그 시멘트를 사용한 S1콘크리트의 공기량은 2.2%, 2.5%, 2.8%를 보이며, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 N1콘크리트는 2.7%, 2.8%로 나타났다. 이러한 측정결과는 실험오차 범위 내에 있는 것으로 슬래그 시멘트 콘크리트의 공기함유 특성은 보통포틀랜드 시멘트의 공기함유 특성과 유사하다고 할 수 있다.

Table 5. Slump and air content

Classify	Specimen							
	S1-28	S1-32	S1-36	S2-28	S2-32	S2-36	N1-32	N1-36
Slump (cm)	20.3	20.0	19.2	21.4	21.1	17.0	17.5	15.0
Air Content (%)	2.2	2.5	2.8	2.4	2.6	2.9	2.7	2.8

Table 6. Strength characteristics of concrete

Specimen	Compressive strength(kgf/cm ²)				f ₃ /f ₂₈	f ₂₈ /f ₅₆	Tensile strength (kgf/cm ²)	Flexural strength (kgf/cm ²)
	3 days	7 days	28 days	56 days				
S1-28	346	469	624	701	0.554	0.890	75.0	121.5
S1-32	251	377	513	584	0.489	0.878	60.0	93.9
S1-36	210	344	492	524	0.427	0.939	50.0	84.8
S2-28	289	391	544	604	0.531	0.900	57.5	99.9
S2-32	242	352	443	484	0.546	0.915	47.5	75.6
S2-36	189	261	324	356	0.583	0.910	35.5	53.2
N1-32	252	355	438	471	0.575	0.930	44.2	73.1
N1-36	201	295	378	407	0.532	0.929	37.4	61.8

2. 굳은 콘크리트의 강도특성

가. 압축강도

미분말 슬래그 시멘트와 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도발현

특성을 분석하기 위하여 동일한 조건으로 하여 실험을 수행한 결과를 Table 6과 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 19mm 골재를 사용하고 W/C가 32%인 슬래그 시멘트와 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 초기재령

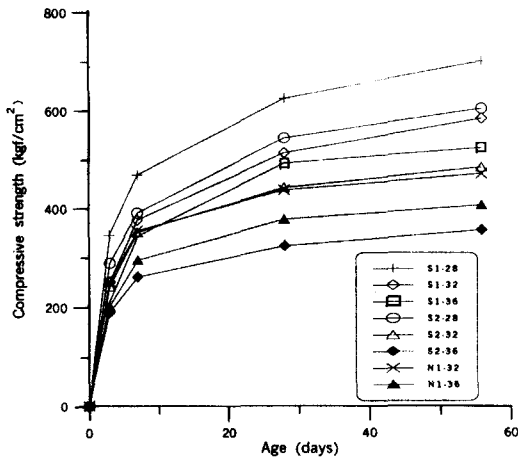


Fig. 1. Development of compressive strength

에서 압축강도는 각각 251kgf/cm², 252kgf/cm²를 나타내는데 이러한 경향은 일반적으로 알려져 있는 슬래그 시멘트의 조기재령에서 강도발현이 적은 경향과는 상이한 결과를 나타내는 것이다. 재령 28일에서는 513kgf/cm², 438kgf/cm²이므로 슬래그 시멘트를 사용한 경우가 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트보다 약 17% 정도 강도발현율이 높게 나타났으며, 재령 56일에서는 슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트가 보통 시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 21% 정도 높은 강도발현을 나타내었다. 이와같이 초기재령에 있어서 강도발현율이 저하되는 현상은 슬래그 미분말의 분말도를 높임으로 인해 강도발현율이 높아진 것으로 판단되며, 재령 28일 이후의 강도특성은 고로 슬래그의 포졸란 특성에 기인한 것으로 판단된다. 콘크리트의 압축강도에 굵은골재 최대 치수가 미치는 영향은 일반적으로 굵은골재 최대 치수를 19mm 사용한 경우가 25mm 사용한 경우에 비해 재령 28에서 압축강도의 발현율이 높게 나타났다. 또한 슬래그 시멘트를 사용하고 물/시멘트비를 28%, 굵은 골재의 최대치수를 19mm할 경우 600kgf/cm² 이상의 고강도 콘크리트를 제조할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 슬래그를 혼입한 콘크리트는 조기강도 발현율

이 떨어지는 단점을 갖고 있었으나, 이것은 슬래그의 분말도를 높게함으로써 보완될 수 있을 것으로 판단된다.

나. 활렬인장강도

각 배합별 재령 28일에 있어서 활렬인장강도 시험결과를 Table 6에 나타내었으며, 실험결과에 의하면 동일한 배합조건인 S1-32, S2-32, N1-32에서는 19mm 골재를 사용했을 때 보통 시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트가 N1-32를 기준으로 약 36% 증가한 경향을 보였으며, 동일한 슬래그 시멘트를 사용했을 때에는 19mm 골재를 사용한 콘크리트가 25mm를 사용한 콘크리트에 비하여 약 26% 높은 결과를 나타냈다. 콘크리트의 인장강도에 대한 압축강도의 비는 슬래그 시멘트의 경우는 8.32~9.84를 보이며, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우는 9.91~10.1로 나타났다.

다. 휨강도

재령 28일에 있어서 각 배합별 휨강도 결과를 Table 6에 나타내었다. 휨강도 특성에 있어서 미분말 고로 슬래그를 혼입한 S1, S2 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우보다 높은 휨강도 특성을 나타내었으며, 동일조건인 S1-32인 경우 93.9kgf/cm²으로서 N1-32의 73.1kgf/cm²보다 28% 정도 크게 나타났다. 일반적으로 콘크리트의 휨강도는 압축강도의 약 1/5~1/8 정도로 알려져 있는데, 본 연구에서는 미분말 고로 슬래그 시멘트를 이용한 콘크리트가 약 1/5~1/6 정도의 범위로 다소 높은 휨강도를 나타내었다.

라. 압축강도에 대한 활렬인장강도 및 휨강도와의 관계

슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도에 대한 인장강도 및 휨강도의 상관관계를 각 배합별로 Fig. 2에 나타내었다. 압축강도가 증가함에 따라 인장강도 또한 높아짐을 알 수 있으며

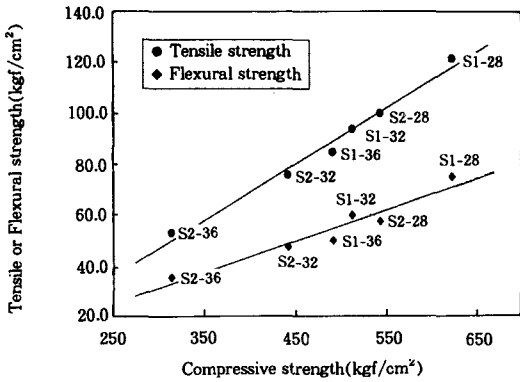


Fig. 2. Relationship of tensile, flexural and compressive strength

굵은골재 25mm를 사용한 콘크리트에 비하여 19mm의 골재를 사용한 콘크리트가 다소 인장강도가 큰 것으로 나타났다. 압축강도와 할렬인장강도와의 상관관계를 회귀분석하여 식 (1)의 결과를 도출하였다. 이때의 상관계수는 $r=0.98$ 로서 높은 상관성을 보여주고 있다.

$$\sigma_t = 0.2196 \sigma_c - 19.051 (\text{kgf/cm}^2) \dots\dots\dots (1)$$

또한 압축강도와 휨강도의 상관관계를 회귀분석한 결과는 식 (2)와 같으며, 이때의 상관계수는 $r=0.92$ 로 나타났다.

$$\sigma_f = 0.1229 \sigma_c - 5.7229 (\text{kgf/cm}^2) \dots\dots\dots (2)$$

마. 할렬인장강도와 휨강도와의 관계

미분말 고로 슬래그를 사용한 콘크리트의 굵은골재 최대치수 및 물/시멘트비 변화에 따른 휨강도에 대한 인장강도의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. S1-28 배합조건이 휨강도 및 인장강도에서 최대의 값을 나타내었으며, 할렬인장강도와 휨강도의 상관관계를 회귀분석한 결과 식 (3)과 같이 나타났으며 이때 상관계수는 $r=0.97$ 로 매우 높은 상관성을 보여주었다.

$$\sigma_t = 0.5676 \sigma_f - 4.2159 (\text{kgf/cm}^2) \dots\dots\dots (3)$$

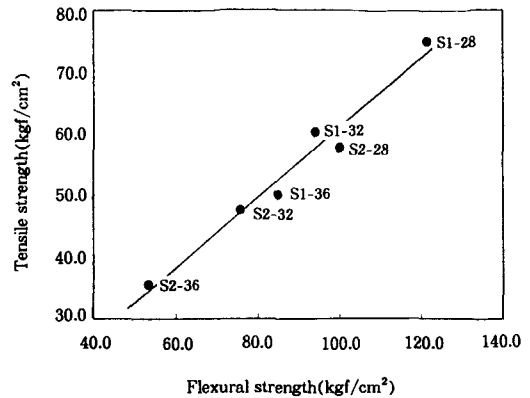


Fig. 3. Relationship of tensile and Flexural strength

3. 동결융해 저항특성

콘크리트의 동해에 대한 저항특성을 파악하기 위해 S1-28, S1-32, S2-28, S2-32, N1-32, N1-36의 배합에 대해서 ASTM C 666과 KS F 2456 B Type에 따라 한 사이클을 4시간으로 하였으며, 공시체 중심에서의 온도를 4℃에서 -18℃로 하강시키고 다시 4℃로 상승시키는 것을 반복하였다. 각 공시체의 동탄성계수 측정은 상대동탄성계수가 60% 이하가 되거나 300 사이클이 될 때로 규정되어 있지만 본 실험에서는 고강도 콘크리트에 대한 규정은 정립되어있지 않아 506 사이클까지 실험을 실시하였다.(Marzouk, 1994) Fig. 4는 동결융해 사이클수에 대한 상대동탄성계수의 변화를 나타낸 것으로써 이때 동탄성계수는 식 (4)로 계산된다.

$$E_D = 40.81632 \times \ell^2 \times n^2 \times \rho \times 10^{-7} \dots\dots (4)$$

- 여기서, E_D : 동탄성계수(kgf/cm²)
- ℓ : 시험체 길이(cm)
- n : 공명진동수(HZ)
- ρ : 밀도(g/cm³)

Fig. 4에 나타난 바와 같이 고로 슬래그 미분말 시멘트를 사용한 콘크리트는 506 사이클이 경과된 후에도 상대동탄성계수가 대부분 90%를

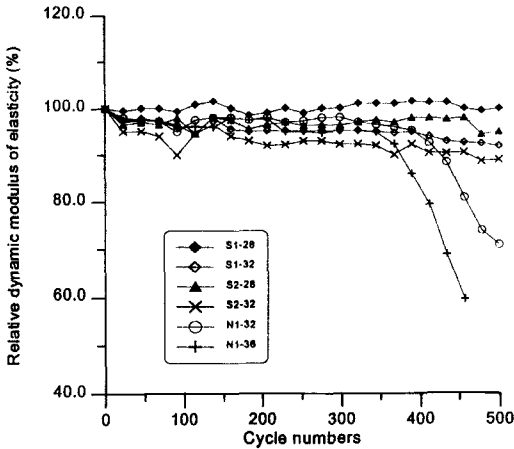


Fig. 4. Relative dynamic modulus of elasticity versus number of cycles

넘고 표면에 미세한 균열만 발견되었을 뿐 동결손상은 거의 없는 것으로 나타났으나, 보통 포트랜드 시멘트를 사용한 콘크리트는 350 사이클 이후에 상대동탄성계수가 점차 떨어지는 경향을 나타내었다. 또한, 물/시멘트비가 낮은 경우에 동결융해에 대한 저항이 우수한 것으로 나타났으며, 25mm 골재를 사용한 콘크리트 보다는 19mm 골재를 사용한 콘크리트가 다소 동결융해에 대한 저항이 유리함을 알 수 있었다. 각 공시체의 공기량은 거의 동일한 조건인 관계로 동결융해 저항성이 높은 것은 압축강도에 기인한 것으로 판단된다.

동결융해에 따른 표면손상과 내구성지수를 Table 7에 나타내었다. 동결융해에 따른 공시체의 표면손상은 크게 4가지 정도로 분류할 수 있다. 첫 번째로 공시체 표면에 미세 균열이 생기고 이후 굵은 균열로 발전하는 경우(Cracking), 두 번째로 표면에 미세균열이 생기면서 부분적으로 부풀어 오르는 경우(Swelling), 세 번째로 표면이 거칠어지면서 이탈되는 경우(Scaling), 네 번째로 공시체가 절단되는 경우(Breakage)로 구분된다. 동결융해 실험에 따른 시편의 표면손상을 관찰한 결과 S1 콘크리트의 경우는 표면에 미세균열만 발생되었다. S2 콘크리트의 경우는

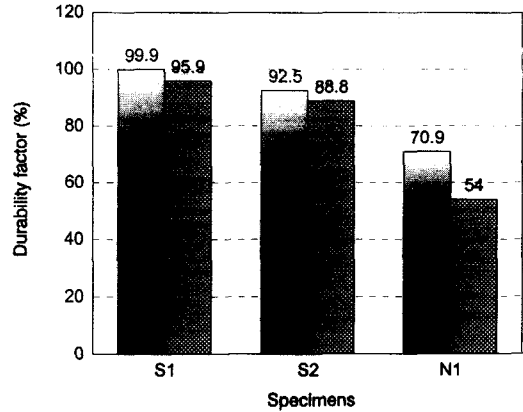


Fig. 5. Change of durability factor

250 사이클 이후에 표면에 미세균열이 형성되고 400 사이클 이후에 굵은균열로 발전되었다. 그러나 N1 콘크리트의 경우는 200 사이클 이후에 Cracking현상이 발생되었고, 350 사이클 이후에 Swelling현상이 발생되었으며, 450 사이클 이후에는 심각한 손상으로 발전되었다. 급속동결융해 시험에 대한 내구성 지수는 식 (5)에 의해 계산하였다.

$$DF = C \times \frac{N}{M} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, DF : 내구성 지수

M : 동결융해 목표 사이클 수
(506 사이클)

N : 동결융해 시험을 마친 사이클 수

C : N 사이클에서 상대동탄성계수

실험결과 S1, S2 콘크리트의 경우는 내구성 지수가 88% 이상으로 나타났으나 N1 콘크리트의 경우는 70.9%, 54%를 나타내어 상대적으로 동결융해에 대한 저항성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험결과로부터 고로 슬래그 미분말 시멘트를 사용한 콘크리트는 경화체 내부에 미소세공이 많이 존재해 동결가능한 세공 용적수가 상대적으로 작아져 동결저항성이 높은 것으로 판단되고, 다른 요인으로는 콘크리트 강도로서

Table 7. Relative dynamic modulus and durability factors

Specimen	Finishing cycles	Cycle numbers										Relative dynamic modulus (%)	DF (%)
		138	184	230	276	322	368	414	460	483	506		
S1-28	506							C				99.9	99.9
S1-32	506						C					92.5	92.5
S2-28	506						C					95.9	95.9
S2-32	506				C							88.8	88.8
N1-32	506			C			W		S			70.9	70.9
N1-36	406		C				W	S				59.4	54.0

* C : Cracking, W : Swelling, S : Scaling

동결융해 작용으로 인한 내부 팽창압력에 저항할 수 있는 인장강도가 증가하여 동결융해 저항성이 증가하는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 미분말 슬래그를 사용한 고강도 콘크리트의 경화전·후의 특성과 동결융해 저항 특성에 대한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고로 슬래그 미분말 시멘트를 사용한 콘크리트는 동일한 조건에서 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 슬럼프는 크게 나타났으며, 이것은 슬래그의 분말도를 높임으로 인해서 슬래그 미분말의 물링효과와 시멘트 입자에 비해서 표면이 매끄럽기 때문이다.

2. 고로 슬래그 미분말 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도 발현 특성은 분말도를 높게 함으로써 초기강도 발현이 늦어지는 문제점을 보완할 수 있었다.

3. 활렬인장강도는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우와 유사한 경향을 나타냈으나, 휨강도는 압축강도의 1/5~1/6 정도의 범위로 다소 높은 휨강도 특성을 나타내었다.

4. 고로 슬래그 미분말 시멘트를 사용한 콘크리트는 506 사이클에서 상대동탄성계수가 90%를 유지하고 표면에 미세한 균열만 발견되었을 뿐 동결손상은 거의 없는 것을 보여, 보통 포틀

랜드 시멘트를 사용한 콘크리트보다 우수한 동결융해저항성을 나타내었다. 이는 공기량이 거의 동일할 때의 결과임으로 동결융해 저항성이 높은 것은 큰 압축강도에 기인한 것으로 판단된다.

5. 슬래그 미분말을 사용한 고강도 콘크리트의 작업성, 강도특성과 동결융해 저항성은 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 슬래그 미분말은 이러한 목적에 부합되는 혼화재로 콘크리트에 재활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 한국과학재단지정 강원대학교 부설 “석재 복합 신소재 제품연구센터” 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김광우, 박제선, 이봉학, 김진영, “재생 콘크리트의 성능향상에 관한 연구”, 콘크리트 학회지, Vol. 7, 1995.
2. 대한토목학회, “고로 슬래그 시멘트 및 고로 슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 설계시 공지침”, 1995. 8.
3. 문한영, “고로 슬래그 굵은 골재를 사용한 콘크리트 강도에 대한 고찰”, 대한토목학회 학술강연, 1985. 10.
4. 문한영, “산업부산물 및 폐기물을 이용한 콘크리트용 골재(고로 슬래그 골재)”, 한국콘

- 크리트학회지, 제9권 6호, 1997. 12, pp. 18~22.
5. 최세규, 김생빈, “고로 슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 동결융해 저항성에 관한 연구”, 한국콘크리트 학회지, 제9권 5호, 1997. 10, pp. 149~155.
 6. 최진기, “고로 슬래그 시멘트에 있어서 슬래그 함량과 강도에 관한 연구”, 공학석사 학위논문, 성균관대학교.
 7. 한국콘크리트학회, “고성능 유동화제를 이용한 고강도 콘크리트의 제조와 특성 및 활용”, KCI International Workshop Proceeding, 1993. 10, Seoul, pp. 359.
 8. Blick, Ronald, L., Peterson, C.F., and Winter, M. E., “Proportioning and Controlling High Strength Concrete”, Paper for Presentation to the American Concrete Institute Annual Convention, 1972.
 9. ACI-363, “State of the Art Report on High-Strength Concrete”, ACI 363R-92, American Concrete Institute, Detroit 1992.
 10. Marzouk. H., Dajiu Jiang., “Effects of Freezing and Thawing on the Tension Properties of High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, V. 91, No. 6, November-December, 1994, pp. 577~584.
 11. Kawal, T., Watanabe, M. and Nagataki, S., “Durability of Concrete Using Recycled Coarse Aggregate”, Reuse of Demolition Waste, Preceeding, 2nd International Symposium by Rilem, Kasai, Y. Ed., Chapman and Hall, 1988.
 12. Talal A, Radain, Tamin A., “Mechanical Properties of High-Strength Concrete”, Proceeding of SLN, 1993, pp. 1209-1216.