

# 제강 슬래그를 이용한 콘크리트의 동결융해에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Freezing and Thawing of Concrete Mixed with Steel Slag

정 원 섭<sup>\*</sup>    조 성 현<sup>\*\*</sup>    권 기 주<sup>\*\*\*</sup>    박 성 우<sup>\*\*\*\*</sup>    김 진 만<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Jung, Won Seup    Cho, Soug Hyun    Kwon, Ki Joo    Park, Soung Woo    Kim, Jin Man

### ABSTRACT

The steel slag, a by-product which is produced on the process of manufacturing steel by refining pig iron is mainly used as road materials after aging it. It is necessary to age steel slag for long time in air because the reaction with water and free-CaO in steel slag could make the volume expanded. Due to this reason it prevents steel slag from being used as aggregate of concrete. But steel slag used in this study is controled by a air-jet method which rapidly cools substance melted at a high temperature. Rapid cooling prevents from generating of free-CaO in steel slag.

In this study, it was investigated that steel slag manufactured by air-jet method affects on concrete in the freezing and thawing. As results of this study, concrete mixed with steel slag was worse in the freezing and thawing than concrete mixed with sand in spite of using air entraining agent. To obtain durability of concrete in the freezing and thawing, it is desirable to mix 50% of steel slag in concrete per unit weight of volume.

### 1. 서론

최근 지속적인 경제 발전과 함께 성장한 철강산업은 그 제조과정 특성상 다량의 원료와 에너지를 사용할 뿐만 아니라 다양한 종류의 부산물과 폐기물을 필연적으로 발생시키고 있다. 즉 복잡한 제강생산 공정을 거치면서 고로 및 전로에서 다량의 제강 슬래그를 발생시킨다. 이때 발생하는 제강 슬래그는 약 815만톤('98기준) 정도이며 시멘트 원료 및 도로용 골재 등 용도가 다양하여 재활용에 큰 어려움이 없다. 그러나, 전로의 제강슬래그는 Free CaO에 의해 그 자신이 가지고 있는 팽창 붕괴의 불안정성 때문에 콘크리트 및 성토재로써 재활용의 한계가 있다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위해 급냉으로 제조된 제강슬래그가 있으며 이를 중량콘크리트용 혼화재로 재활용하기 위해 동결융해 저항 특성을 제시하고자 한다. 본 논문에서는 제강슬래그의 잔골재 대체율 별로 5종류의 시편을 제작하였으며 시편 제작은 AE제를 전혀 넣지 않은 것과 콘크리트 표준 시방서의 규정에 따라 넣은 경우 등 2개의 경우로 나누어서 수중 급속 동결융해 시험을 실시하여 제강슬래그를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항 특성을 평가하였다.

\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 연구원

\*\* 정회원, 공주대학교 자원재활용신소재 연구센터 연구원

\*\*\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

\*\*\*\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 연구원

\*\*\*\*\* 정회원, 공주대학교 건축공학과 부교수

## 2. 사용 재료의 물성과 시험 계획

### 2.1 사용재료의 물성

제강슬래그를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항 특성 구명을 위해 선정된 재료의 종류는 잔골재, 제강슬래그, 굵은골재(쇄석) 및 1종 포틀랜드 시멘트와 폴리카르본산계의 혼화제를 사용하였다. 이의 물성은 표 1과 같다.

표 1. 물성시험 결과표

구 분	잔골재	제강슬래그	굵은골재(쇄석)	시멘트
최대입경(mm)	5	5	19	-
조립율	2.83	3.10	6.96	-
비 중	2.58	3.57	2.58	3.15
흡수율(%)	1.19	0.42	0.99	-

### 2.2 시험 계획

#### 2.2.1 제강슬래그 콘크리트의 배합설계

본 연구는 제강슬래그를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성을 평가하기 위한 시험으로 물시멘트비를 35%, 단위 시멘트량을 500 kg/m<sup>3</sup>로 하고, 잔골재를 제강슬래그로 0, 25, 50, 75, 100% 대체한 Non-AE 콘크리트와 AE 콘크리트 2종류의 배합으로 실시하였다. 또한 콘크리트의 물성을 알아보기 위하여 압축강도를 측정하였으며, 제강슬래그의 대체율은 중량 대체율이 아닌 용적 대체율로 실시하였고, 배합표는 표 2와 같다. 단, AE 콘크리트의 배합표는 아래 표 2와 같으며, 시멘트 단위중량에 AE제를 0.2%를 첨가하였다.

표 2. 제강슬래그 콘크리트 배합표

구 분	W/C (%)	제강슬래그 대체율 (%)	목표 슬럼프 (cm)	SP 첨가량 (%)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	단위용적(l/m <sup>3</sup> )				단위중량(kg/m <sup>3</sup> )				시험항목
							시멘트	모래	제강슬래그	쇄석	시멘트	모래	제강슬래그	쇄석	
Non-AE Concrete	35	0	18 ± 2	0.5	46	175	159	288	0	338	500	743	0	872	· 압축강도 · 동결융해
	"	25			46	175	159	216	72	338	500	557	257	872	
	"	50			46	175	159	144	144	338	500	371	514	872	
	"	75			46	175	159	72	216	338	500	186	771	872	
	"	100			46	175	159	0	288	338	500	0	1028	872	

#### 2.2.2 시험내용

본 시험에서 각각의 시험은 시편에 동결과 융해를 반복시켜 30 사이클 당 상대동탄성계수 및 중량을 측정하였다. 시험변수는 골재 함유량, 제강슬래그의 대체율 및 공기량 등이며, 대상 콘크리트의 상대동탄성계수는 제강슬래그의 대체율, 공기량 등에 따라 크게 좌우되므로 표 2의 배합표에서 정한 대체율의 조건으로 시험을 수행하였다. 시편 규격은 W100 mm×D100 mm×H400 mm로서 최대 32본을 시험할 수 있는 장비를 이용하였으며, 압축강도 시편은 표준 공시체(Φ100 mm×H200 mm)를 사용하였다.

### 2.2.3 시험기기

본 시험에 사용된 동결융해 시험기 및 동탄성계수 측정기는 일본 MARUI사에서 제작한 시험기로서 동결융해 시험기 저장조의 시편은 냉동기에 의해 동결되며 적정 온도로 융해된다. 이 장비의 동결융해 측정 방법은 콘크리트 시편을 동결융해 시험기의 저장조에 넣고 30 사이클을 1회로, 시편의 상대 동탄성계수가 최초 계수의 60 % 이하로 될 때까지 10 회 반복하여 측정한다. 이때 동결융해 시험기의 동결 온도는  $-18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이며, 융해 온도는  $+5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 유지한다. 동탄성계수 측정기는 시험 시편을 전기식 구동자에 의하여 주파수를 가변하고 가진하여 가속도 검출기에서 시편의 동탄성계수를 측정하며 신뢰성이 인정된 시험 장비이다. 동결융해 및 동탄성계수 측정기는 사진 1, 2 와 같다.

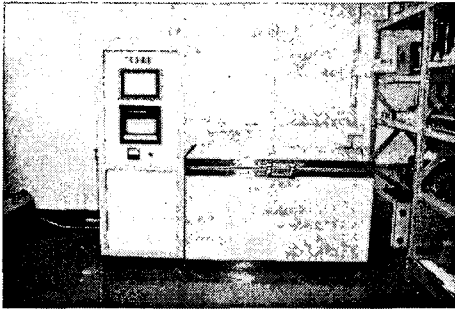


사진 1. 동결융해시험기

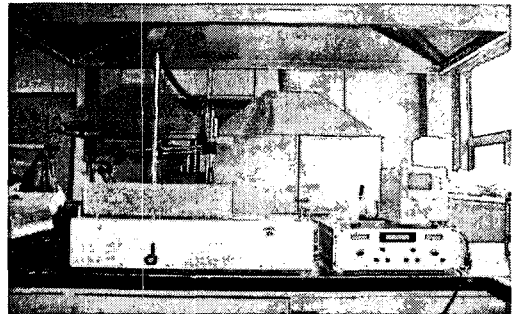


사진 2. 동탄성계수 측정기

### 2.3 시험방법

본 연구에서는 KS F 2456에 의거 수중 급속 동결융해 시험법으로 하였으며 재령 14일차에 시험을 수행 하였다. 이때 동결융해 시험 시작 전에 초기 동탄성계수를 측정하고 동결융해 시험을 되풀이 하여 30 사이클 간격으로 동탄성계수 및 중량을 측정하였다. 상대 동탄성계수는 초기 동탄성계수에 대한 시험 후 동탄성계수의 비를 말하며, 사이클이 300이면 시험을 완료하였는데 그 이전에 상대 동탄성계수 비가 60%이하이면 시험을 완료한다. 동결과 융해 1 사이클을 수행하는 데는 약 3시간이 소요되었다.

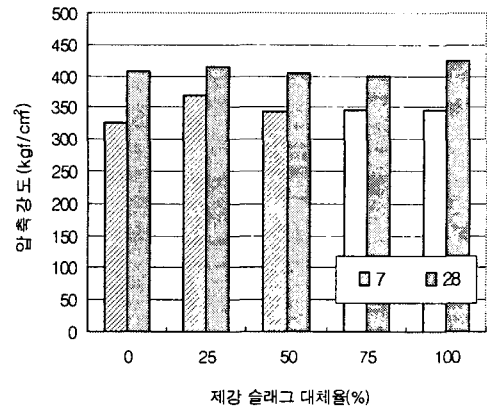
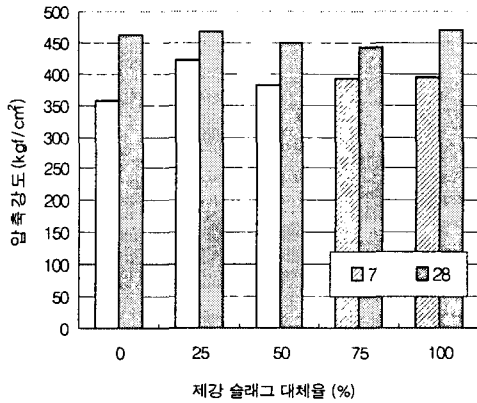
## 3. 결과 및 고찰

표 3. 시험 결과표

### 3.1 압축강도

제강슬래그를 사용한 콘크리트의 동결융해 시험을 위해 제조된 콘크리트의 물성을 알아보기 위하여 압축강도 시험은 재령 7일, 28일 압축강도를 측정하였다. 시험 결과 표 3 및 그림 1과 같이 재령 7일에서는 제강슬래그 대체율 0%의 경우보다 제강슬래그를 대체한 배합이 다소 높은 강도를 보이고 있으나, 재령 28일에서는 제강슬래그 대체율에 따른 압축강도는 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다.

구 분	W/C (%)	제강슬래그 대체율(%)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	
			7일	28일
Non-AE Concrete	35	0	356	462
	"	25	423	468
	"	50	383	449
	"	75	391	442
	"	100	394	470
AE Concrete	"	0	313	406
	"	25	368	413
	"	50	344	404
	"	75	346	398
	"	100	346	423



Non-AE 콘크리트

AE 콘크리트

그림 1. 제강슬래그 대체율에 따른 재령별 압축강도

### 3.2 동결융해

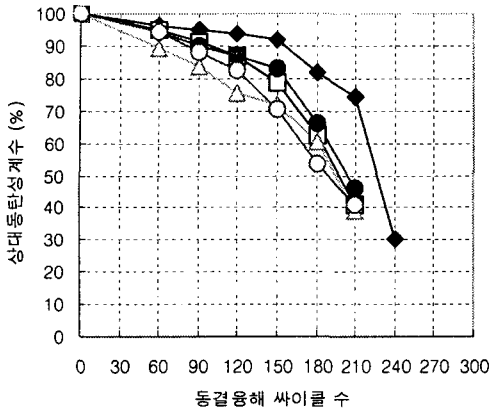
콘크리트의 동결융해 시험은 콘크리트의 내구성을 검토할 수 있는 방법 중의 하나이다. 일반적으로 '동결융해 300사이클 후에 상대동탄성계수가 60 % 이하로 저하되지 않은 콘크리트는 내구적이다' 라고 보고 있다. 표 4 는 제강슬래그 대체율 별 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수의 시험결과를 나타낸 것이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 제강슬래그를 대체한 모든 배합이 제강슬래그를 대체하지 않은 콘크리트 배합 보다 상대동탄성계수가 먼저 저하되는 것으로 나타났다.

표 4 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수의 시험결과

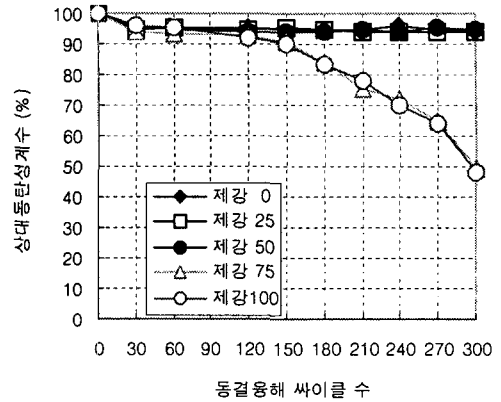
구 분	제강슬래그 대체율 (%)	동결융해 사이클 수 (cycle)									
		0	60	90	120	150	180	210	240	270	280
Non-AE Concrete	0	100	96.38	94.67	94.00	92.08	81.91	74.08	30.44	-	-
	25	100	94.90	91.31	87.02	78.54	62.55	40.66	-	-	-
	50	100	94.10	89.97	87.05	83.00	65.87	45.93	-	-	-
	75	100	89.14	83.35	75.67	71.88	60.12	39.10	-	-	-
	100	100	94.09	87.91	82.41	70.38	53.70	40.88	-	-	-
AE Concrete	0	100	95.0	95.1	95.5	94.8	94.6	94.6	95.8	94.4	94.3
	25	100	94.7	95.2	95.0	95.0	95.0	94.1	93.8	94.2	94.1
	50	100	95.8	94.5	94.2	94.1	94.3	94.5	94.3	95.1	94.7
	75	100	94.1	93.2	92.8	91.0	83.8	75.6	71.8	64.8	49.3
	100	100	96.2	95.5	91.8	89.7	83.4	78.0	70.3	64.2	47.8

제강슬래그 대체율 0 %가 240 사이클에서 상대동탄성계수가 60 % 이하로 저하된 반면에 제강슬래그 대체율 25~75 %은 210 사이클, 제강슬래그 대체율 100 %은 180 사이클에서 상대동탄성계수가 60 % 이하로 저하되었다. 따라서 제강슬래그 대체율이 증가할수록 동결융해 저항성은 저하되는 것으로 나타났다.

AE콘크리트의 경우, 제강슬래그 대체율이 0~50 %는 동결융해 300 사이클 후 상대동탄성계수가 약 94 %로 양호하였으나, 75 % 및 100 %는 상대동탄성계수가 60 % 이하로 저하됨을 알 수 있었다.



Non-AE 콘크리트



AE 콘크리트

그림 2. 제강슬래그 대체율에 따른 상대동탄성계수

표 5 및 그림 3은 제강슬래그 대체율별 동결융해 사이클에 따른 중량 유지율의 시험결과를 나타낸 것이다. Non-AE 콘크리트의 경우 그림 2와 같이 동결융해 210 사이클 후 제강슬래그 대체율 0%는 약 97 %, 제강슬래그 대체율 25~50 %는 약 93~96 %, 제강슬래그 대체율 75~100 %는 약 91 %의 중량 유지율을 보이고 있어 제강슬래그 대체율이 증가할수록 중량 유지율은 감소하는 것으로 나타났다. AE 콘크리트의 경우, 제강슬래그 대체율 별 중량유지율이 96~99 %로 큰 변화가 없었다.

표 5 동결융해 사이클에 따른 중량유지율 시험결과

구 분	제강슬래그 대체율(%)	동결융해 사이클 수 (cycle)									
		0	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Non-AE Concrete	0	100	99.94	99.91	99.83	99.60	99.19	97.49	94.26	-	-
	25	100	99.2	99.65	99.73	98.92	97.96	93.53	-	-	-
	50	100	99.84	99.83	99.73	99.22	98.19	95.90	-	-	-
	75	100	99.90	99.86	99.65	98.45	96.64	91.23	-	-	-
	100	100	99.79	99.73	99.36	98.22	96.56	91.61	-	-	-
AE Concrete	0	100	99.9	99.91	99.77	99.78	99.67	99.63	99.55	99.46	99.40
	25	100	99.86	99.83	99.6	99.61	99.53	99.43	99.31	99.2	99.16
	50	100	99.88	99.88	99.71	99.71	99.66	99.56	99.47	99.36	99.32
	75	100	99.87	99.86	99.66	99.59	99.38	99.07	98.43	97.18	96.38
	100	100	99.87	99.82	99.69	99.75	99.69	99.51	99.13	97.78	96.96

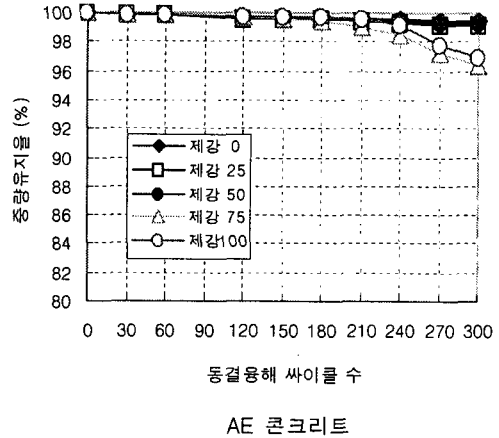
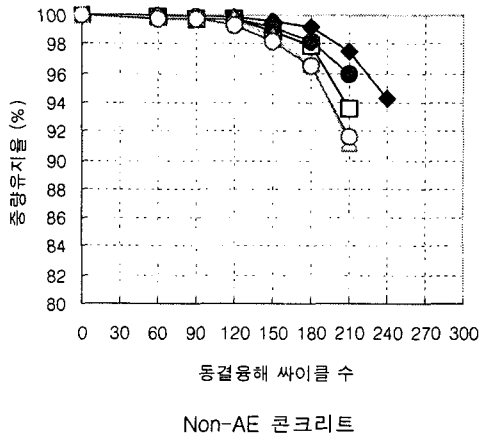


그림 3. 제강슬래그 대체율에 따른 중량유지율

#### 4. 결론

본 연구에서는 제강슬래그를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제강슬래그를 사용한 Non-AE 콘크리트와 AE 콘크리트의 동결융해 분석결과 AE제 사용이 반드시 필요한 것으로 나타났다.
- 2) AE 콘크리트의 경우라도 제강슬래그의 잔골재 대체율을 50 % 이내로 사용하는 것이 동결융해 저항성을 확보하는데 유리한 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. KSA 한국표준협회, "KS 핸드북", 2002.
2. 대한토목학회, "전기로 슬래그를 도로용 골재로 사용하기 위한 연구", 1997.
3. 한국철강협회, "철강 슬래그 재활용 실적('98)", 1999.
4. 문한영, 유정훈, 정호섭, "전로 슬래그 굼은골재를 콘크리트용으로 사용하기 위한 기초적 연구", 가을학술발표대회논문집, pp.233~236, 1999.
5. 박기주, 손순중, 김기성, "전로슬래그를 이용한 콘크리트의 강도에 관한 연구", 콘크리트학회논문집, 제6권4호, pp.113~122, 1994.9.
6. 日本コンクリート工學協會九州支部, "各種産業廢棄物のコンクリート用材料としての適用性に關する講習會", pp.41~71, 2000. 11.
7. R.L.Berger, "A Study on the General character of Sreel Slag Aggregate," Cement and Concrete Research, Vol.4, No.1, pp.99~112, 1974.