초기동해를 입은 고로슬래그 콘크리트의 강도발현 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Strength Properties of Concrete Using Blast-Furnace Slag Subjected to Frost Damage at Early Age

최 성 우* 반 성 수* 최 봉 주* 유 득 현**

Choi, Sung woo Ban, Seong Soo Choi, Bong Joo Ryu, Deuk Hyun

ABSTRACT

Recently, to consider financial and constructive aspect, usage of Admixture, like Blast-Furnace Slag and Fly-Ash, are increased. Also the use of cold-weather-concrete is increased.

Blast-Furnace Slag, a by-product of steel industry, have many advantage, to reduce the heat of hydration, increase in ultimate strength and etc. But it also reduces early-age strength, so it is prevented from using of Blast-Furnace Slag at cold-weather-concrete.

In this study, for the purpose of increasing usage of Blast-Furnace Slag at cold-weather-concrete, it is investigated the strength properties of concrete subjected to frost damage for the cause of early age curing.

According to this study, if early curing is carried out before having frost damage, the strength of concrete, subjected to frost damage, is recovered. And that properties is not connected with the frost cause.

1. 서론

최근, 콘크리트의 주요 구성재료인 시멘트나 골재 등의 원재료값 상승으로 인하여 레미콘의 제조원가가 상승하고 있으나, 실제 레미콘의 납품단가는 오히려 낮아지고 있어 레미콘 제조단가의 절감이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이에 레미콘 업계에서는 레미콘의 제조단가 절감을 위하여 혼화재 및 부순모래를 사용한 원재료비 측면의 절감, 감수율이 높은 혼화제를 사용하여 단위시멘트량 자체를 줄이는 배합설계 측면의 절감 등 다방면에 걸쳐 검토 및 적용이 이루어지고 있다.[1)]

한편, 건설현장에서는 공기단축을 통한 비용절감 효과 및 콘크리트 제조기술의 발달로 인해 한중콘크리트의 적용이 활발해지고 보편화되어 가고 있다. 그러나 일반적으로 동절기 콘크리트를 타설할 경우 기온에 따라 반복되는 동결·융해를 통한 수분의 팽창으로 콘크리트의 내부조직에 악영향을 미치며, 결국 콘크리트의 내구성 저하를 초래하여 구조물의 구조적 결함을 초래한다.[2),3),4)]

콘크리트의 성능개선 및 레미콘 제조단가 절감을 위해 사용되는 고로슬래그미분말 및 플라이애시 등의 혼화재를 한중콘크리트에 적용할 경우, 단위시멘트량의 감소로 인하여 초기동해에 대한 저항성

* 정회원, 유진종합개발(주) 콘크리트연구소 연구소

** 정회원, 유진종합개발(주) 콘크리트연구소 소장

표 1 실험계획 및 배합

배합명	W/B (%)	S/A (%)	단위결합재량 (kg/m³)	FA (%)	BS (%)	동해시점 (h후)	동해지속시간 (h)	동결온도 (℃)	측정항목	
									굳지않은 콘크리트	경화 콘크리트
ST	50.0	48.0	348	-	-	0 12 24 48	12 24 48	-1 -10 -15	공기량 슬럼프 응결성상	압축강도 (3,7,28)
BS00				10	-					
BS10					10					
BS20					20					
BS30					30					

이 저하하는 것으로 알려져 있어서[3] 동절기에는 그 혼화재의 사용을 경시하는 실정이다.

따라서 본 연구에서는, 콘크리트의 초기 양생조건을 변화시켜 동절기 초기동해를 입은 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 콘크리트의 강도 발현 특성을 검토하고, 한중콘크리트 시공에 있어서 고로슬래그 미분말 및 플라이애시의 적용을 증대시키기 위한 기초자료로 제시하고자 하는 데 그 목적이 있다.

2. 실험계획

2.1 실험계획 및 배합

실험계획 및 배합을 나타낸 표 1에서 보는 바와 같이 본 연구에서는 물결합재비 50%, S/a 47%, 단위결합재량을 348kg/m³로 선정하고 목표 공기량을 4.5±0.5%, 목표 슬럼프는 15±1.0㎝로 하였다. 혼화재의 종류 및 대체율은, 기준배합으로 혼화재를 사용하지 않은 배합과, 플라이애시의 대체율을 10%로 고정하고, 고로슬래그 미분말의 대체율을 0, 10, 20, 30%로 변화시킨 배합의 총 5수준으로 설정하였다.

콘크리트의 동해조건으로서 동해시점을 콘크리트 제조 직후, 12시간후, 24시간후, 48시간후의 4수준으로 선정하고, 각 수준별 동해지속시간을 직후, 12시간후, 24시간후, 48시간후의 4수준으로 각각 선정·적용하였으며, 동해 온도는 -1℃, -10℃, -15℃의 3수준으로 선정하였다. 또한 초기양생조건으로서 콘크리트 제조 후 동해를 받기전 소정의 양생기간 동안 20℃ 기건양생을 실시하였으며, 동해를 받은 후 모든 공시체는 20±3℃ 표준수중양생을 실시하였다.

2.2 사용재료 및 시험방법

콘크리트용 골재로서 굵은골재는 부순자갈, 잔골재는 세척사를 사용하였다. 결합재로서 시멘트는 국내 D사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말은 인천소재 K사의 고로슬래그 미분말 제품, 플라이애시는 충남 보령산 플라이애시를 사용하였으며, 각 재료의 물성을 표 2~표 5에 나타내었다. 소정의

표 2 골재의 물성

구분 / 항목	굵은골재	잔골재	비고
조 립 율	6.40	2.85	
비중(절대건조)	2.61	2.60	
흡 수 율(%)	0.89	0.40	
단위용적중량 (kg/m³)	1,565	1,686	
실 적 율(%)	60.16	65.25	
입자모양판정 실적율	59.04	-	
마모감량(%)	19.6	-	
0.08㎜체 통과율(%)	0.48	0.8	
염화물량 ($NaCl^-$환산량)	-	0.0154	

표 3 시멘트의 물성

항목 / 구분			측정값	규준
비 중	르샤틀리에 비중병		3.15	
분말도	비표면적(cm^2/g)		3454	≥2,800
안정도	오토클레이브 팽창도 (%)		0.24	≤0.8
응결 시간	길모어 시 험	초결(분)	170	≥60
		종결(분)	295	≤600
압축 강도 (kgf/cm^2)	3 일		235	≥130
	7 일		320	≥200
	28 일		374	≥290

표 4 고로슬래그 미분말의 물성

품질 / 종류		1종	비 고
비 중		2.97	
비표면적(cm^2/g)		4201	
활성도지수(%)	3일	51	
	7일	70	
	28일	111	
플로우값 비(%)		104	
MgO(%)		5.93	
SO_3(%)		0.16	
강열감량(%)		0.54	
염화물이온(%)		0.0062	

표 5 플라이애시의 물성

항목	이산화규소 (%)	습분 (%)	강열감량 (%)	비중	단위수량비 (%)	압축강도비(%)	
						7일	28일
값	65.5	0.08	4.1	2.22	100	79	91

공기량을 확보하기 위한 혼화제는 경기도 부천시 소재 I사의 AE감수제를 사용하였다.

콘크리트를 동결시키기 위해 항온항습기를 건식으로 사용하였으며, 초기재령의 콘크리트 압축강도는 석고와 유황을 이용하여 공시체의 상부를 캐핑한 후 압축강도 시험을 실시하였다.

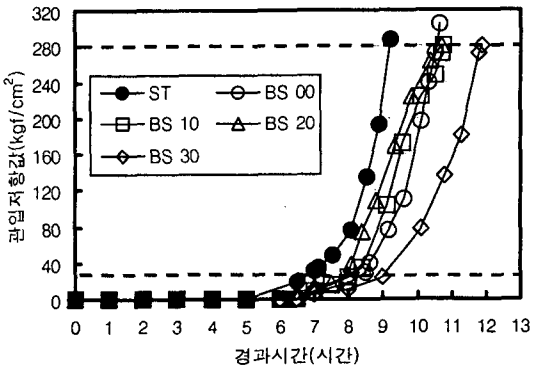

그림 1 배합별 응결 성상

3. 실험결과 및 분석

3.1 응결성상 검토

그림 1은 배합별 콘크리트의 응결성상을 나타낸 것이다.

혼화재가 첨가되지 않은 ST의 경우 초결은 약 7시간, 종결은 약 9시간 10분으로 초결에서 종결까지는 2시간 10분의 시간이 소요되었다. 플라이애시 및 고로슬래그 미분말이 첨가된 배합 BS00~BS20까지는 초결이 8시간 20분 내외, 종결은 10시간 40분 내외의 유사한 값을 나타냈으며, ST에 비해 초결은 1시간 20분, 종결은 1시간 30분 정도 지연되는 것으로 나타났다. 초결에서 종결까지의 소요시간은 ST와 유사한 2시간 20분 내외로 나타났다. 그러나 플라이애시가 10%, 고로슬래그 미분말이 30% 치환된 BS30의 경우는 초결이 9시간 10분, 종결이 11시간 50분으로 나타나 ST에 비해 초결은 2시간 10분, 종결은 2시간 40분이 지연되는 것으로 나타났으며, 초결에서 종결까지의 시간도 2시간 40분으로 나타나 ST에 비해 대략 30분 정도 지연되는 것을 알 수 있었다.

3.2 압축강도 발현 성상

그림 2는 -10℃에서의 동해시점별 동해지속시간에 대한 재령 28일의 압축강도를 각 배합별로 나타낸 그림이다. 모든 배합에서 콘크리트 제조 직후에 동해를 입은 경우 설계기준강도를 만족시키지 못하는 것으로 나타났으나, 그 외의 경우는 동해 지속 시간에 관계없이 재령 28일에서 설계기준강도를 만족시키는 것으로 나타났다. 특히 BS10, BS20, BS30에서 동해시점 24시간후의 경우, 콘크리트 압축강도는 동해를 받지 않은 콘크리트의 압축강도와 유사한 것으로 나타났다.

고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 시멘트만을 사용한 ST보다 다소 높은 압축강도를 나타내고 있어, 한중콘크리트에 혼화재를 사용한 경우 초기 소정의 기간동안 보양 등의 조치를 취한다면 그 후에 동해를 입더라도 포졸란반응에 의한 강도회복성능을 기대

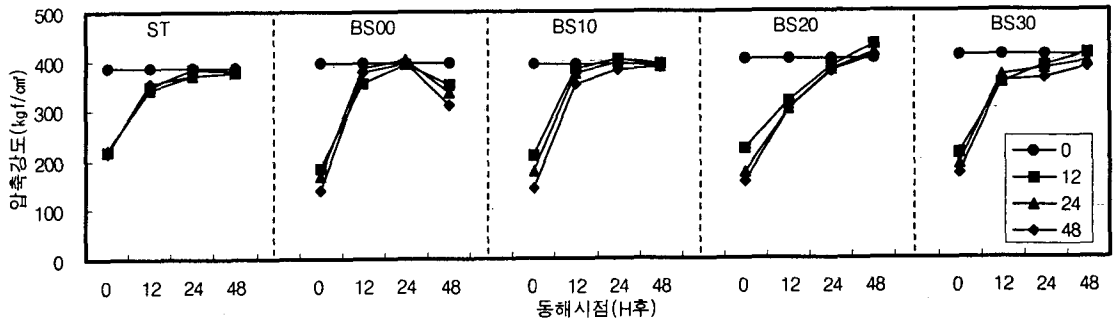

그림 2 동해시점에 따른 동해지속시간별 압축강도(-10℃)

할 수 있는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 동결온도 -1℃, -15℃에서도 동일하게 나타났다. 따라서, 한중콘크리트 시공에 있어서 초기보양을 실시한 경우 혼화재를 사용한 콘크리트도 혼화재를 사용하지 않은 콘크리트에 근접한 품질이 확보될 것으로 사료된다.

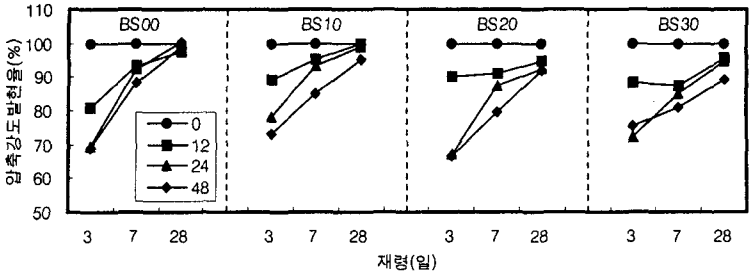

그림 3 재령별 압축강도 발현율(%, -10℃, 동해시점 24시간후)

3.3 재령별 압축강도 발현율

그림 3은 -10℃, 동해시점 24시간후의 동해지속시간에 따른 동해를 받지 않은 콘크리트에 대한 재령별 압축강도 발현율을 나타낸 그림이다.

동해를 받은 직후인 초기 재령에서는 동해를 받지 않은 콘크리트에 비해 약 70~80% 정도의 압축강도 발현율을 나타내고 있지만, 동해 이후에 동일한 조건의 표준 수중양생을 실시한 결과 재령 28일에서는 동해를 받지 않은 콘크리트와 유사한 90~100%의 압축강도 발현율을 나타내고 있다. 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 강도 회복 속도는 다소 지연되는 것으로 나타나고 있으나, 재령의 경과에 따라 그 폭은 줄어들고 있어서, 재령 28일 이후의 장기강도에서는 충분히 회복 가능할 것으로 사료된다.

3.4 초기동해 온도에 따른 압축강도 발현율

그림 4는 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 동해를 받지 않은 콘크리트에 대한 동해지속시간별 압축강도 발현율을 동해 온도별, 동해시점별로 나타낸 그림이다.

콘크리트 제조 직후에 동해를 받은 경우, 대부분의 배합에서 전반적으로 재령 28일이 될 때까지 동해를 받지 않은 콘크리트의 압축강도 수준을 회복하지 못하는 것으로 나타났다.

-1℃의 경우에는 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가함에 따라서 압축강도 발현율이 큰 폭으로 증가하고 있으며, 특히 치환율 20%에서는 발현율이 100%에 가까운 값을 나타내고 있다. 또한 동해 시점이 12시간 후 이상인 경우, 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 동해온도와 관계없이 동해 종료 이후의 양생에 의해 28

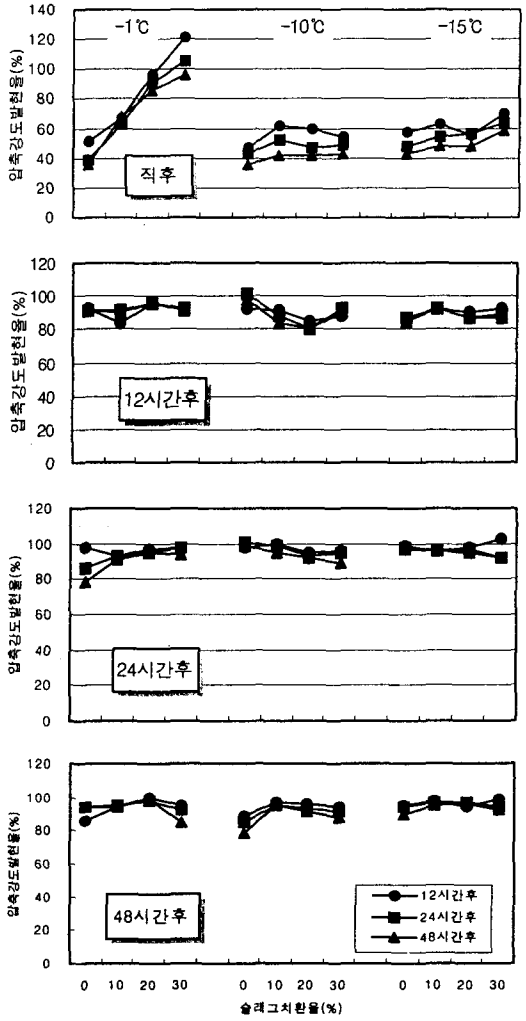

그림 4 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 동해지속시간별 압축강도 발현율(%)

일 강도발현율이 100% 내외를 나타내고 있어서 고로슬래그 미분말의 포졸란 반응에 의한 강도증진효과가 큰 것으로 사료된다.

동해온도에 따른 특성은 온도에 따라서 다소 차이는 나타나지만 -10℃, -15℃ 모두 -1℃와 유사한 경향을 나타내고 있다.

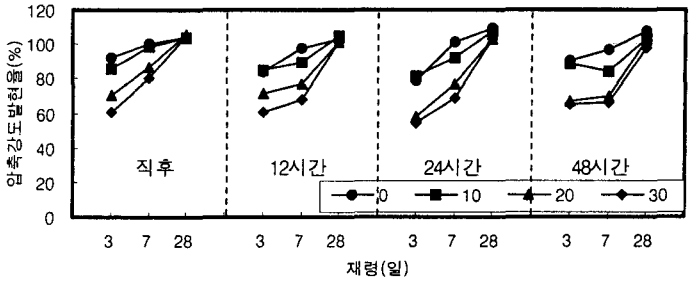

그림 5 ST대비 압축강도 발현율(%)

3.5 ST대비 압축강도 발현율

그림 5는 동해온도 -10℃, 동해시점 24시간후의 콘크리트 압축강도를 재령에 따른 고로슬래그 치환율별 ST대비 발현율로 나타낸 것이다.

재령 3일에서는 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 결합재로서 시멘트만을 단독으로 사용한 콘크리트의 압축강도에 비해 낮은 경향을 나타내고 있지만 재령이 증가할수록 발현율도 증가하여 재령 28일에는 모든 배합이 배합 ST의 압축강도와 유사한 발현수준을 나타내고 있다.

동해지속시간에 따른 압축강도의 발현율은 모든 조건에서 유사한 수준을 나타내고 있으며, 배합 BS30의 경우는 재령 3일 압축강도 발현율이 모든 조건에서 60% 수준에 머물던 것이 재령 28일에는 모두 100% 내외의 발현율을 나타내고 있어 고로슬래그 미분말을 30%까지 사용하여도 재령 28일에는 시멘트를 단독사용한 콘크리트와 동일한 수준의 강도값을 나타내는 것으로 나타났다.

3.6 동해온도별 ST대비 압축강도 발현율

그림 6은 동해 지속시간에 따른 온도별 ST대비 압축강도 발현율을 나타낸 그림이다. 시멘트를 단독 사용한 ST에 대한 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 사용한 콘크리트의 배합 BS00, BS10, BS20, BS30의 각 온도별 재령 28일의 압축강도 발현율을 검토한 결과 배합 BS00의 경우가 온도에 따른 변동폭이 가장 컸으며, 동해시작 시간별로는 직후에서 48시간후로 갈수록 그 폭이 다소 증가하고 있음을 알 수 있었다.

동해 온도별 콘크리트의 ST대비 콘크리트의 압축강도 발현율은 온도가 낮을수록 발현율이 적게 나타나고 있으며, -15℃의 경우는 모든 배합에서

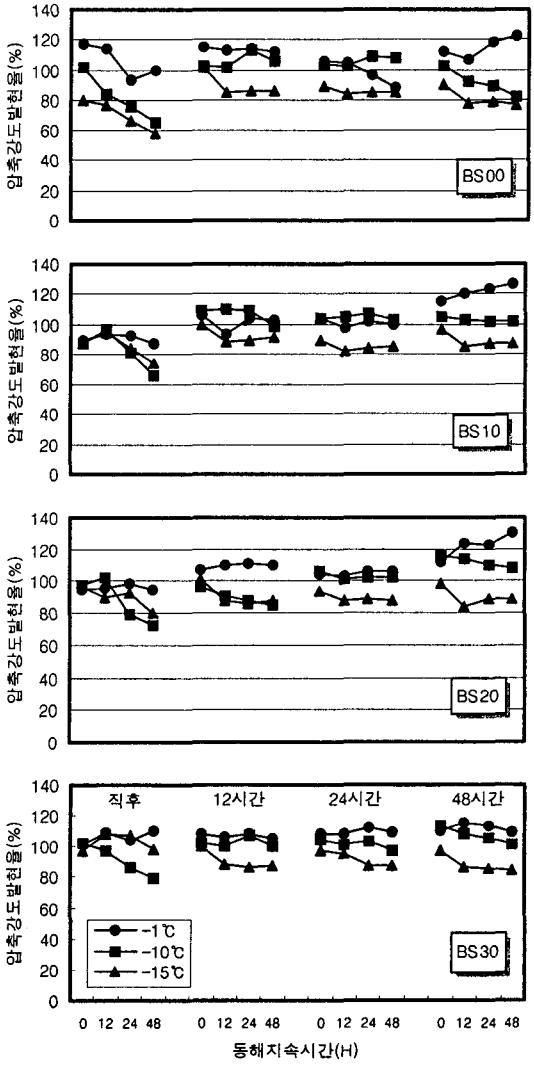

그림 6 온도별 ST대비 압축강도 발현율

기준배합 ST의 압축강도보다 낮은 압축강도를 나타내고 있는 것으로 나타났다. 그러나, 대부분의 배합 및 동해조건에서 콘크리트의 압축강도 발현율이 80%를 상회하는 것으로 나타나 배합 ST에 비해 우려할 만한 수준은 아닌 것으로 판단되었다

4. 결론

이상의 실험에서 동절기 초기동해를 입은 고로슬래그 콘크리트의 강도발현 특성을 분석·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 사용한 콘크리트는 배합 직후에 동해를 입은 경우를 제외하면 동해의 지속시간 여부와 관계없이 재령 28에서의 콘크리트 압축강도는 동해를 입지 않은 콘크리트와 유사한 강도값을 나타내었으며, 콘크리트가 동해를 입기 전 콘크리트가 경화를 할 수 있는 소요의 재령이 경과한 후에는 동해온도와 관계없이 재령 28일에서 그 값을 회복할 수 있을 것으로 사료된다.
(2) 고로슬래그 미분말 및 플라이애시 치환율에 따른 강도회복성능을 검토한 결과 초기재령에서는 치환율이 증가할수록 강도는 저하하지만, 재령이 경과함에 따라 치환율이 증가할수록 강도증진 효과는 큰 것으로 나타났다.
(3) 한중콘크리트 시공에 있어 초기재령에서 콘크리트가 경화하는 데 필요한 최소한의 시간동안 타설직후의 동해를 제어·방지할 수 있다면 재령 28일 이후의 장기재령에서는 충분한 소요의 압축강도값을 확보할 수 있을 것으로 사료되며, 본 연구에서는 강도발현의 안정화를 위한 시간은 24시간으로 나타났다.

이상의 결론에서, 동절기 콘크리트의 초기 동해에 대한 영향을 검토한 결과 콘크리트가 경화하여 강도발현이 안정화 될 수 있는 콘크리트 제조 후 24시간동안 콘크리트 보양 등의 방법에 의해 타설 직후의 동해를 제어·방지할 수 있다면 재령 28일 이후의 장기재령에서는 충분한 소요의 압축강도를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 유득현 외, "고로슬래그 초기 품질 하락 극복을 위한 연구", 콘크리트학회 가을학술발표대회 논문집 Vol.12 No.2, 2000.11, pp.1215~1220.
2. 김무한, "콘크리트 동해와 초기동해 기구에 관한 기초적 고찰", 한국레미콘공업협회 레미콘23호, 1993, pp.8~23.
3. 鎌田英治, "コンクリートの凍害とは一その現狀とメカニズムについて", 日本建築學會材料施工委員會 コンクリート構造物の凍害とその對策シンポジウム論文集, 1993, pp.59~170.
4. 권영진, "동절기 초기재령에서 동해를 받은 고강도콘크리트의 내동해성 평가에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제13권 2호, 2001.4, pp.139~145.