

고로슬래그 미분말 대체율에 따른 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Engineering Properties of Concrete According to the Replacement Ratio of Blast-Furnace Slag

○ 송민섭* 장재봉* 김갑수* 윤종기* 김재환** 김무한***
Song, Min-Seob Jang, Jea-Bong Kim Gab-Su Yoon, Jong-Kee Kim, Jae-Hwan Kim, Moo-Han

Abstract

As a part of efforts to obtain high quality and economical efficiency of concrete, blast-furnace slag has been utilized by means of cement replacement. Therefore superior performance can be ensured, environmental pollution can be prevented and economical advantage can be obtained with utilization by cement replacement. But the studies on the blast-furnace slag are not systematic and reasonable.

So, it was planned that basic data in regard to technique of manufacturing and economic improvement of concrete is showed with experimental comparison and investigation of engineering properties of concrete utilizing blast-furnace, industry by-product, as cement replacement in this study.

키워드 : 고로슬래그미분말, 콘크리트, 슬럼프, 압축강도, 양생방법

Keywords : Blast-Furnace Slag, Concrete, Slump, Compressive Strength, Curing Method

1. 서론

최근 콘크리트구조물의 복잡화대형화초고층화고기능화에 따라 주요 건설재료인 콘크리트의 고품질 및 고성능화가 요구되고 있다. 또한, 레미콘 업계에서는 사용재료의 원가상승, 납품단가의 저하 등으로 인하여 수익성이 악화되고 있어 원가절감 및 최적의 배합설계를 통하여 경제적인 효과를 거두고자 노력하고 있는 실정이다.¹⁾

이러한 콘크리트의 품질 및 성능을 개선시키고 경제적인 문제를 해결하는 방안의 일환으로서, 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체재로 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 콘크리트의 제조시 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체재로 활용함으로써 단위시멘트량의 저감에 의한 경제적인 콘크리트 제조 및 장기강도와 수밀성 향상, 염화물 침투억제에 의한 철근의 발청 억제 등의 우수한 성능을 확보할 수 있으며, 자원재활용에 따른 환경오염방지 및 경제적 인 효과를 동시에 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다.³⁾

이와 같은 특성을 고려해서 콘크리트구조물에 요구되는 소량의 품질을 확보하는 것이 중요하지만 현재 레미콘산업에서는 경제성만을 고려할 뿐, 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체재로 활용한 콘크리트의 체계적이고 합리적인 연구가 미흡한 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 콘크리트용 혼화재료로서 활용한 콘크리트의 공학적 특성을 실험·실증적으로 비교·검토함으로써 콘크리트의 제조기술 및 경제성 향상 기술에 관한 기초적 자료를 제시하고자 한다.¹⁾²⁾³⁾

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

본 연구의 실험계획 및 배합은 표 1과 같이 레미콘산업에서 활용되는 배합을 수집·분석하여 물결합재비 50%, 잔골재율 50%, 단위수량 175kg/m³으로 고정하였으며 고로슬래그 미분말 대체율을 0, 10, 20, 30, 40%로 변화시켜 이에 따른 콘크리트의 공학적 특성을 비교 검토하였다.

또한 고로슬래그 미분말을 활용한 콘크리트의 경화성상에 미치는 양생방법의 영향을 검토하기 위해 양생방법을 기건양생 및 표준수중양생 2수준으로 설정하였다.

2.2 사용재료

본 연구에 사용한 재료의 물리적 성질은 표 2에 나타난 바와 같이 결합재로서 시멘트는 비중 3.15의 1종 보통포틀랜드 시멘트, 혼화재는 비중 2.99의 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 또한 잔골재는 비중 2.58의 제염사, 굵은골재는 비중 2.68의 부순자갈을 사용하였다.

* 정희원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 석사과정

** 정희원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정

*** 정희원, 충남대학교 건축공학과, 교수공박

표 1. 실험계획 및 배합

물 결합재 비 (%)	목 표 슬럼프 (cm)	고 로 슬래그 미분말 대체율 (%)	잔 골 재 율 (%)	단 위 수 량 (kg/m ³)	단 위 중 량 (kg/m ³)						측 정 및 평 가 항 목	
					시멘트	고 로 슬래그 미분말	잔골재	굵은골재	고성능 감수제	AE제	굳지않은 콘크리트	경화콘크리트
50	18±2	0	50	175	350	0	869	886	*1)	*2)	• 공기량 (%) • 단위용적중량 (kg/l) (비빔직후, 60분) • 슬럼프 • 슬럼프-플로우 (cm) (비빔직후, 30, 60분) • 응결시험 (h : m)	• 압축강도 (MPa) • 동탄성계수 (GPa) • 초음파속도 (km/sec) (재령 3, 7, 28, 56일)
		10			315	35	869	885				
		20			280	70	868	885				
		30			245	105	867	884				
		40			210	140	866	883				

- 1) 목표 슬럼프를 만족시키기 위한 소정의 첨가량
- 2) 목표 공기량 (4.5±1.5%)을 만족시키기 위한 소정의 첨가량

표 2. 사용재료의 물리적 성질

구 분		사 용 재 료	
결 합 재	시멘트	1종 보통포틀랜드 시멘트 비중 : 3.15, 분말도 : 3,630cm ² /g	
	혼화재	고로슬래그미분말 비중 : 2.99, 분말도 : 4,379cm ² /g	
골 재	잔골재	제염사, 최대치수 : 5mm 비중 : 2.58, 조립율 : 2.41	
	굵은 골재	부순자갈, 최대치수 : 25mm 비중 : 2.68, 조립율 : 6.94	
	혼 화 제	나프탈렌계 고성능감수제	

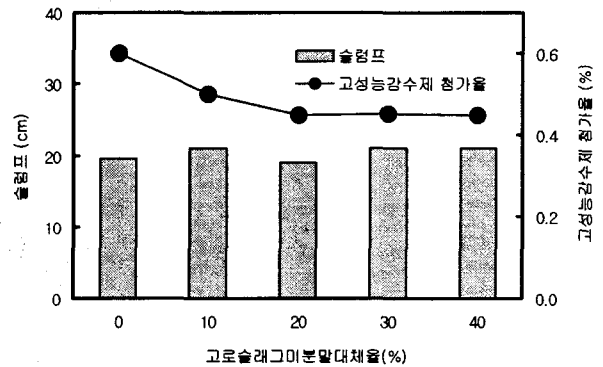


그림 1. 고로슬래그 미분말 대체율에 따른 슬럼프 및 목표슬럼프를 만족시키기 위한 고성능감수제 첨가율의 변화

2.3 비빔방법, 시험체 제작 및 양생방법

콘크리트의 비빔은 시멘트, 고로슬래그 미분말, 잔골재를 먼저 건비빔한 후, 물, 고성능감수제와 AE제 및 굵은골재를 투입하는 분할투입방식을 사용하였으며, 총 90초가 소요되었다. 또한 비빔이 완료된 굳지않은 콘크리트에 대하여 슬럼프, 슬럼프-플로우, 공기량 및 단위용적중량을 측정하였으며, 경화콘크리트의 압축강도, 동탄성계수, 초음파속도를 측정하기 위해 $\phi 10 \times 20$ cm 공시체를 제작하였다. 한편, 성형 24시간 후에 물드를 탈형하여 20±3°C, RH 60%의 대기에서의 기건 양생 및 20±3°C의 수중에서의 수중양생을 각각 소요 재령까지 실시하였다.

2.4 시험방법

굳지않은 콘크리트의 시험방법으로 슬럼프는 KS F 2402, 공기량 시험은 KS F 2421, 단위용적중량은 KS F 2409, 응결 시간 측정은 KS F 2436에 준하여 측정하였다.

한편, 경화 콘크리트의 시험으로 압축강도 시험은 KS F 2405에 준하여 최대하중을 측정한 후 압축강도를 산정하였으며, 동탄성계수는 MARUTO의 동탄성계수 측정기(규격 CH-48D)를 사용하여 1차공명 진동수를 측정한 후 동탄성계수를 산정하였다. 또한 초음파속도는 영국의 C.N.S 사의 PUNDIT를 이용하여 공시체의 통과 시간(μ s)을 측정한 후 초음파속도를 산정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트의 측정결과 분석 및 검토

1) 슬럼프의 변화

그림 1은 고로슬래그 미분말 대체율에 따른 슬럼프 및 목표 슬럼프를 만족시키기 위한 고성능감수제 첨가율의 변화를 나타낸 것으로, 고로슬래그 미분말 대체율이 증가함에 따라 고성능감수제 첨가율은 저하하는 것으로 나타나 고로슬래그 미분말의 대체율이 증가함에 따라 목표슬럼프를 만족시키기 위한 단위수량의 저감효과가 있는 것으로 사료된다.³⁾

2) 경과시간에 따른 슬럼프의 변화

그림 2는 경과시간에 따른 고로슬래그 미분말 대체율별 슬럼프의 변화를 나타낸 것으로, 대체율별로 유사하게 나타났으나 고로슬래그 미분말 대체율 30% 및 40%의 경우에서는 슬럼프로스(Slump Loss)가 적은 것으로 나타났다. 비빔직후의 슬럼프를 기준으로 슬럼프 경시변화율은 고로슬래그 미분말 대체율 0, 10, 20, 30, 40%에서 경과시간 30분의 경우 각각 38, 43, 34, 24, 21%, 경과시간 60분의 경우 각각 59, 64, 63, 60, 38%의 수준으로 나타났다.

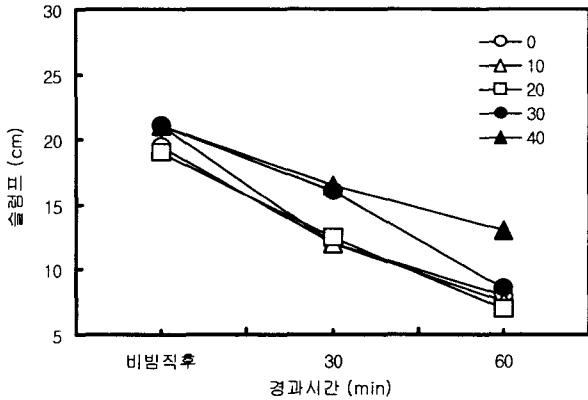


그림 2. 경과시간에 따른 슬럼프의 변화

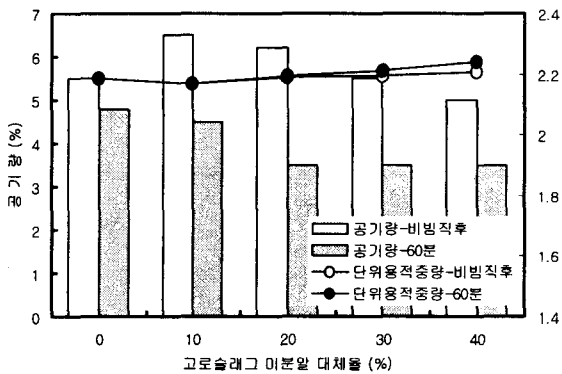


그림 3. 경과시간에 따른 공기량 및 단위용적중량의 변화

3) 경과시간에 따른 공기량 및 단위용적중량의 변화

그림 3은 경과시간에 따른 공기량 및 단위용적중량의 변화를 나타낸 것으로 비빔직후에서 고로슬래그 미분말을 시멘트에 대체하여 사용한 경우 공기량은 대체율 0%와 유사하거나 다소 높게 나타났으며, 단위용적중량은 대체율에 관계없이 유사한 수준을 보이고 있다.

한편, 경과시간 60분에서 콘크리트의 공기량은 고로슬래그 미분말 대체율에 따라 0.7-2.7% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

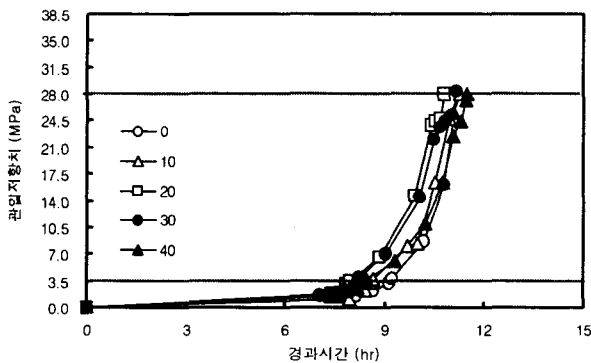


그림 4. 고로슬래그 미분말 대체율에 따른 관입저항치의 변화

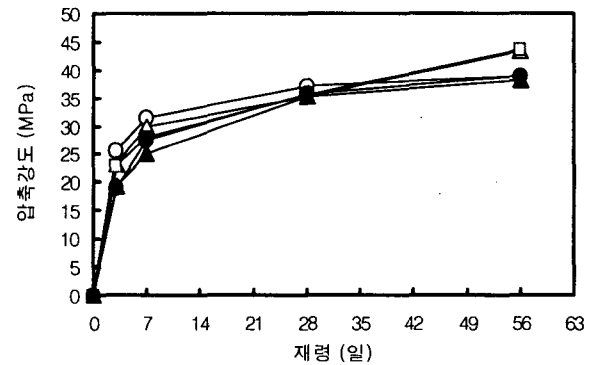
4) 응결성상의 변화

그림 4는 고로슬래그 미분말 대체율에 따른 관입저항치의 변화를 나타낸 것으로 초결시간의 경우 고로슬래그 미분말 대체율 0%에 비하여 대체율 10, 20, 30, 40%의 경우 응결시간이 다소 빠른 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말 대체율이 증가할수록 목표 슬럼프를 만족시키기 위한 고성능감수제 첨가율이 저하했기 때문인 것으로 사료된다. 또한 종결시간의 경우에는 각 고로슬래그 미분말 대체율의 응결시간이 전반적으로 유사한 것으로 나타났다.

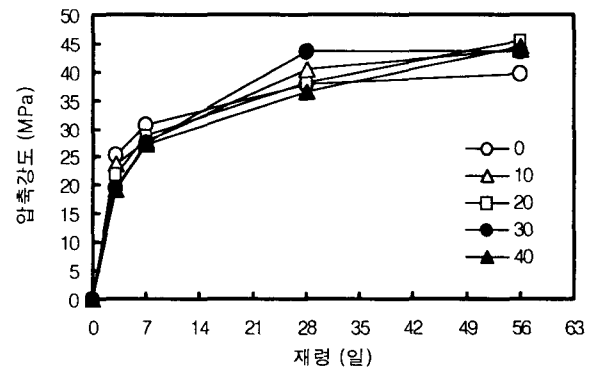
3.2 경화콘크리트의 측정결과 분석 및 검토

1) 압축강도 발현성상 분석 및 검토

그림 5는 양생방법 및 고로슬래그 미분말 대체율별 재령에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로, 기건양생의 경우 고로슬래그 미분말을 시멘트에 대체하여 사용한 경우 재령 28일까지는 대체율 0%보다 작은 압축강도를 발현하는 것으로 나타났으나, 재령 56일 이후에서는 대체율 0%와 비교하여 유사하거나 다소 높게 나타났다. 한편, 수중양생의 경우 고로슬래그 미분말을 시멘트에 대체하여 사용한 경우 재령 7일까지는 대체율 0%보다 다소 작은 압축강도를 발현하는 것으로 나타났으나 재령 28일 이후에서는 대체율 0%와 유사하거나 다소 높은 압축강도를 발현하고 있으며 재령 56일에서는 오히려 높은 압축강도를 발현하고 있다.



(a) 기건양생



(b) 수중양생

그림 5. 고로슬래그 미분말 대체율별 재령에 따른 압축강도

그림 6은 고로슬래그 미분말 대체율별 재령에 따른 수중양생에 대한 기건양생 시험체의 압축강도 발현비율을 나타낸 것으로 고로슬래그 미분말 대체율에 상관없이 기건양생 시험체의 압축강도는 수중양생의 경우와 비교하여 유사하거나 다소 작은 수준으로 나타나 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 양생조건에 유의해야할 것으로 사료된다.

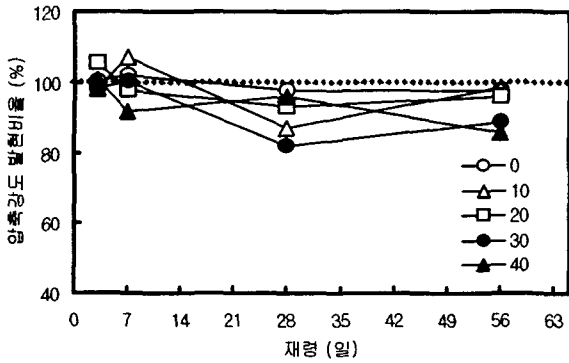


그림 6. 고로슬래그 미분말 대체율별 재령에 따른 수중양생에 대한 기건양생 시험체의 압축강도 발현비율

2) 압축강도와 비파괴 검사치의 상관관계

그림 7은 압축강도와 비파괴 검사치의 상관관계를 나타낸 것으로 압축강도가 증가함에 따라 동탄성계수 및 초음파속도 모두 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 기건양생의 경우 압축강도와 동탄성계수의 상관관계수(R)는 0.9258, 압축강도와 초음파속도의 상관관계수는 0.9814로 나타났다. 또한 수중양생의 경우 상관관계수는 각각 0.9606, 0.9764로 나타나 압축강도와의 상관성이 높게 나타났다.

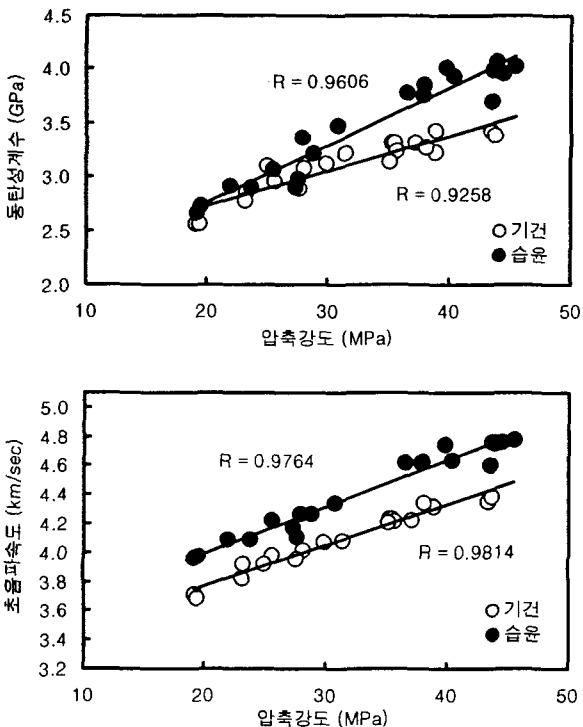


그림 7. 압축강도와 비파괴 검사치의 상관관계

4. 결 론

고로슬래그 미분말 대체율에 따른 콘크리트의 공학적 특성을 비교검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축강도에 있어서 기건양생의 경우 28일까지는 고로슬래그 미분말을 시멘트에 대체하여 사용한 경우 대체율 0%보다 전반적으로 낮은 강도발현 수준을 보이고 있으나 재령 56일에서는 대체율에 상관없이 대체율 0%의 강도발현 수준을 모두 초과하고 있는 것으로 나타났다. 한편, 수중양생의 경우 재령 7일까지는 대체율 0%보다 낮은 압축강도를 발현하는 것으로 나타났으나, 재령 28일 이후에서는 대체율 0%와 유사하거나 높은 압축강도를 발현하는 것으로 나타났다.
- 2) 콘크리트 강도발현에 있어 기건양생 하에서의 압축강도는 고로슬래그 미분말 대체율에 상관없이 수중양생의 경우와 비교하여 유사하거나 다소 작은 수준으로 나타나 양생조건에 유의해야할 것으로 사료된다.
- 3) 압축강도와 비파괴 검사치의 상관관계에 있어서 압축강도가 증가함에 따라 동탄성계수 및 초음파속도가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

감사의 글

본 연구는 기초소재(주) 「고로슬래그 미분말을 대량 활용한 콘크리트 제조기술 및 경제성 향상 기술 개발」에 관한 일련의 연구로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김무한 외, 고로슬래그미분말을 사용한 고유동 고강도 콘크리트의 잔골재 조립율에 따른 유동특성, 대한건축학회 논문집 제20권 제2호, 2000. 10, pp. 439-442
2. 김무한 외, 온도조건에 따른 고로슬래그 미분말을 사용한 고강도고유동콘크리트의 특성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집 제13권 제1호, 2001. 5, pp. 339-344
3. 김용로, 고로슬래그 미분말을 사용한 고강도고유동 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구, 충남대학교 석사학위논문, 2001. 2