

고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 탄산화 및 철근부식의 관계

The relation Between Carbonation and Rebar Corrosion of Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag

송형수*
Song, Hyongsoo

김형래**
Kim, Hyungrae

윤상천***
Yun, Sangchun

지남용***
Jee, NamYong

ABSTRACT

The glass of Ground Granulated Blast Furnace Slag(GGBFS) was released by the hydroxyl ions during the hydration of the Portland cement. That results in relatively less $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the concrete replaced with GGBFS than in ordinary portland cement concrete(OPCC). As the quantity of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is decreased, the rate of carbonation in the concrete replaced GGBFS is faster than OPCC. Therefore, it has been misunderstood that the concrete replaced GGBFS has negative effect on the corrosion of steel by carbonation.

Therefore, this study aimed at the relation between carbonation and rebar corrosion in the concrete with GGBFS, measuring air · water permeability, half cell, and corrosion rate by the depth of carbonation.

1. 서론

고로슬래그는 입자의 유리구조를 형성하고 있는 SiO_2 계의 3차원 망상구조체가 시멘트의 수화반응에 의한 수화생성물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 2차 수화물을 생성한다. 그러므로, 고로슬래그를 혼입한 콘크리트는 OPC만을 사용하는 경우에 비하여 경화콘크리트 중에 적은 양의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 포함하게 되고, 이에 따라 소량의 CO_2 로 콘크리트 내부의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 소진할 수 있으므로 탄산화 속도가 빨라지는 것으로 보고되고 있으며¹⁾, 이로 인해 대기중에 노출되는 부위에 있어 고로슬래그 미분말의 사용이 적절하지 않은 것으로 인식되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 탄산화와 철근부식의 관계를 평가하는데 그 목적이 있으며, 이를 위해 고로슬래그 치환률별로 촉진탄산화 조건하에서의 콘크리트 투수성 및 투기성 변화와 그에 따른 탄산화속도를 파악하고자 하며, 철근의 부식개시 여부와 부식속도에 대한 평가지표로서 탄산화 깊이별 자연전위 및 부식전류밀도를 측정하고자 한다.

* 정회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원

*** 정회원, 경주대학교 건축공학과 교수

**** 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

2. 실험

2.1 실험인자 및 수준

본 실험에서는 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 투기성 및 투수성을 파악하고 그에 따른 콘크리트의 탄산화속도와 철근부식의 관계를 규명하고자 하며, 이를 위한 실험인자 및 수준은 표 1과 같다.

표 1 실험인자 및 수준

실험인자	수준	수준 수	비고
고로슬래그미분말 치환율(%)	0, 15, 30, 45%	4	· 촉진탄산화 조건: CO ₂ 농도 20%, 온도 30℃, 습도 40% 조건에서 4일, CO ₂ 농도 20% 온도 60℃, 습도 90% 3일 총 7일을 1사이클로 한다.

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

시멘트는 KS L 5201에 규정된 H사의 보통포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였다. 화학조성 및 물리적 특성은 표2와 같다.

표 2 시멘트 화학조성 및 물리적 특성

비중	분말도 (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	응결시간		안정도	압축강도(kgf/cm ²)		
								초결(분)	종결(시간:분)		3일	7일	28일
3.15	3,273	21.7	3.02	61.0	3.2	1.9	5.60	220	5:25	0.08%	256	311	404

2.2.2 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말은 KS F 2563의 품질 규정에 따른 고로슬래그 미분말 화학조성 및 물리적 특성은 표 3과 같다.

표 3 고로슬래그미분말의 화학조성 및 물리적 특성

비중	분말도(cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃ (g)	Fe ₂ O ₃ (g)	CaO(g)	MgO(g)	SO ₃ (g)	lg-Loss	Cl ⁻ (%)
2.90	4550	34.69	15.42	0.23	41.98	6.36	-	0.04	0.002

2.2.3 골재

잔골재는 세척사이며, 굵은 골재는 안산암계 부순돌로서 최대크기를 13mm이하로 조정하였다. KS F 2531~2511의 시험방법에 따른 잔골재와 굵은골재의 물리적 성질은 표 4와 같다.

표 4 골재의 물리적 특성

골재	비중	흡수율(%)	단위용적중량(kg/m ³)	실적율(%)	최대치수(mm)	조립율
잔골재	2.59	0.89	1,675	64.39	5	2.64
굵은골재	2.63	1.15	1,442	57.30	13	5.62

2.2.4 철근

φ13mm인 원형철근의 표면을 JIS R 6251에 규정한 연마포를 이용하여 충분히 연마한 후, JIS K 8034에 따라 아세톤으로 닦아 양단부를 에폭시로 코팅하였다.

2.3 콘크리트의 배합

배합강도는 210kgf/cm²로서 물결합재비를 0.6으로 하였으며, OPC만을 사용한 콘크리트를 기준으로 슬럼프 15±2.5cm, 공기량 4.5±1.5%로 하였다. 또한, 고로슬래그 미분말을 시멘트의 중량비로 혼입하였으며, 콘크리트의 배합표는 표 5와 같다.

표 5 콘크리트 배합표

배합기호	s/a (%)	W/(C+BF)	감수제 (C×0.1%)	단위중량(kg/m ³)					슬럼프 (cm)	공기량 (%)
				W	C	BF	S	G		
opc	0.5	0.60	308g	185	308	0	870	877	15.1	5.0
BF/(C+BF) : 0.15	0.5	0.60	308g	185	262	46	869	875	16.5	4.0
BF/(C+BF) : 0.30	0.5	0.60	308g	185	216	93	867	974	17.1	3.9
BF/(C+BF) : 0.45	0.5	0.60	308g	185	170	139	865	872	18.2	3.6

2.4 시험체 제작 및 양생

축진탄산화 시험재령별 자연전위와 부식전류밀도의 측정을 위해 100×100×150mm의 각주형 시험체를 제작하였으며, 압축강도, 탄산화깊이 및 투기·투수성 측정을 위한 φ100×150mm의 원주형 시험체를 제작하였다. 각주형 시험체와 탄산화깊이 측정용 원주형공시체는 1방향으로 탄산화시키기 위해 CO₂가스 침투면을 제외한 면을 에폭시로 코팅하였다. 철근매입 각주형 시험체의 형상 및 크기는 그림 1과 같다. 제작된 시험체는 4주간 수중양생 후 축진탄산화 시험에 앞서 시험체 내부의 함수상태가 일정하게 되도록 2주간 자연상태에서 정착하였다.

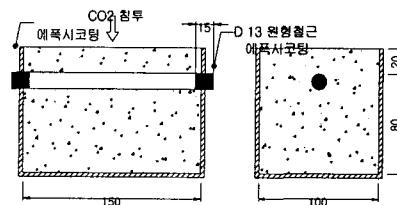


그림 1 각주형 시험체 형상

2.5 측정항목 및 방법

2.5.1 압축강도

KS F 2405에 따라 원주형 시험체를 대상으로 7일, 14일, 28일에 측정하였다.

2.5.2 탄산화깊이 측정

원주형시험체를 할렬하여 촉진탄산화 재령 7일 간격으로, JIS K 8006 규정에 따라 만든 페놀프탈레인 용액을 분무한 후 3곳에 대한 측정결과를 평균하여 구하였다.

2.5.3 자연전위 측정

100×100×150mm의 각주형시험체를 대상으로 촉진탄산화 재령 7일 간격으로, 내부철근의 부식개시점을 비파괴에 의한 방법으로 평가하기 위하여 하프셀에 의한 자연전위를 측정하였으며, 측정방법은 ASTM C 876에 따랐다.

2.5.4 철근의 부식전류밀도

100×100×150mm의 각주형시험체를 대상으로 분극저항법에 의한 부식전류밀도 측정기인 JAMES INSTRUMENTS INC.사의 GECOR-6를 사용하여 촉진탄산화 재령 7일 간격으로, 철근의 부식속도의 평가지표인 부식전류밀도를 측정하였다.

2.5.5 투기성

촉진탄산화 재령 7일, 14일, 28일에 JAMES INSTRUMENTS INC.사의 투기시험기를 사용하여 건조기에서 105℃ 24간 동안 건조한 후 데시게이터안에 2시간 동안 식힌 콘크리트 원주형공시체를 중앙에 4cm깊이를 천공해 55KPa의 압력을 가하여 50KPa까지 되는 초를 계산하였다.

$$\text{투기계수} = \frac{5Kpa}{A} \text{ (Kpa/sec)}$$

A : 55Kpa이 50Kpa로 되는데 걸리는 시간(초)

2.5.6 투수성

촉진탄산화 재령 7일, 14일, 28일에 건조기에서 105℃로 24간 동안 건조하고 데시게이터안에 2시간 동안 식힌 후 KS F 2451 시험방법에 준하여 투수시험기에 1시간동안 3.1kgf/cm²의 수압을 가하여 콘크리트 시험체(φ100mm×40mm)의 투입량을 구하여 투수계수를 구했다.

$$\text{투수계수} = \frac{A-B}{3600} \text{ (g/sec)}$$

A : 시험 전의 시험체 중량, B : 시험 후의 시험체 중량

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 압축강도 발현 특성

그림 2는 재령 28일까지의 고로슬래그 미분말의 치환률별 재령에 따른 압축강도 발현을 나타낸 것으로 14일까지의 초기재령에서는 OPC 콘크리트(치환율 0%)에 비해 압축강도가 낮게 나타났다. 재령 28일에서는 모든 치환율에서 OPC 콘크리트의 압축강도를 상회하는 결과가 나타났는데, 이는 고로슬래그 미분말의 주요 성분인 SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO가 시멘트 수화생성물인 Ca(OH)₂반응하는 잠재수경성반응에 의하여 압축강도가

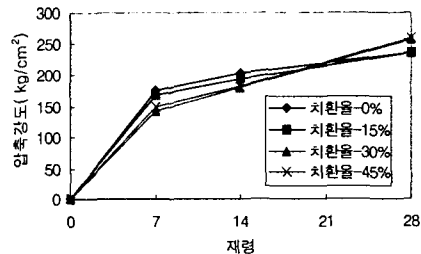


그림 2 재령에 따른 압축강도

발현된 것으로 판단된다.

3.2 콘크리트의 촉진탄산화 깊이

그림 3은 촉진탄산화 시험재령별 콘크리트의 탄산화 깊이를 나타낸 것이다. 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트는 고로슬래그 미분말의 잠재수경성으로 인해 압축 강도는 OPC보다 크지만, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 생성량이 상대적으로 적어진다. 또한, OPC의 일부가 CaO 함유량이 적은 고로슬래그 미분말로 치환되는 것에 의해서도 수화물 중의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 생성량이 적게된다. 그러므로, 치환율이 증가할수록 콘크리트 내부 pH가 저하되어 탄산화 깊이가 커진 것으로 판단된다.

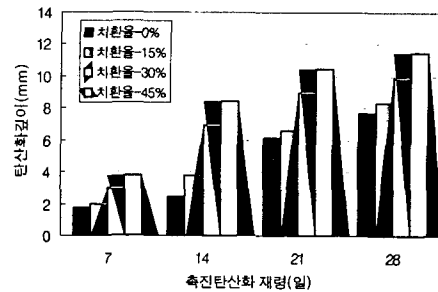


그림 3 촉진탄산화 재령에 따른 탄산화깊이

3.3 투기·투수성

콘크리트의 투과성은 세공용적과 세공경의 크기분포에 달려있는 것으로 보고되고 있다.⁴⁾ 그림 5 및 그림 6과 같이 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트는 투기·투수성이 OPC콘크리트보다 작은 경향을 보였다. 이는 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 경우 잠재수경성에 의해 추가로 생성된 C-S-H가 OPC에 의한 C-S-H에 비해 밀실한 겔조직을 형성할 뿐만 아니라, 부분적으로 미세한 공극을 충전함으로써 OPC 콘크리트에 비하여 세공경 및 총세공용적이 감소되어 밀실한 구조를 갖기 때문인 것으로 판단된다. 또한, OPC 콘크리트와 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 투기성과 투수성이 재령증가에 따라 감소하는 것은 탄산화반응에 의해 생성된 반응생성물(CaCO_3 , H_2O)의해 내부조직이 밀실화되고 미수화 화합물을 수화시켜 표면의 투과성을 감소시키는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

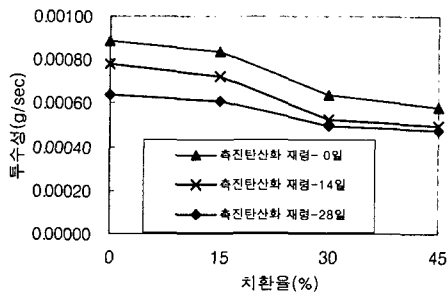


그림 4 촉진탄산화 재령에 따른 투수성의 변화

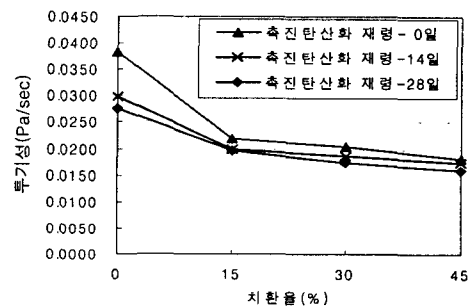


그림 5 촉진탄산화 재령에 따른 투기성의 변화

3.4 부식전류밀도 및 자연전위

철근의 부식전류밀도는 그림 6에서 보는 바와 같이 전반적으로 탄산화의 진행에 따라 증가하는 경향을 보였다. 한편, 위에서 언급하였듯이 고로슬래그 미분말의 치환율이 클수록 탄산화속도가 빠른 경향을 보였지만, 탄산화깊이에 반비례하여 고로슬래그 미분말의 치환율이 클수록 부식전류밀도는 오히려 작은 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말 혼입에 의해 세공용적 및 세공경 감소함에 따라 콘크리트 내부 철근의 부식영향인자인 H_2O 와 O_2 의 투과성이 낮아졌기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 그림 7의 탄산화깊이에 따른 자연전위(half-cell potential)는 대체로 재령의 증가 및 콘크리트의 탄산화

깊이에 따른 변동이 거의 없는 것으로 판단되며, 전반적으로 철근부식 가능성이 90% 이상인 것으로 판정하는 -350mV 에 비하여 낮은 수준을 보이고 있어 본격적인 철근부식이 개시된 것으로 보기는 어렵다.

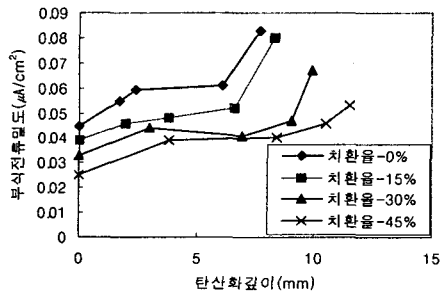


그림 6 탄소화깊이에 따른 부식전류밀도

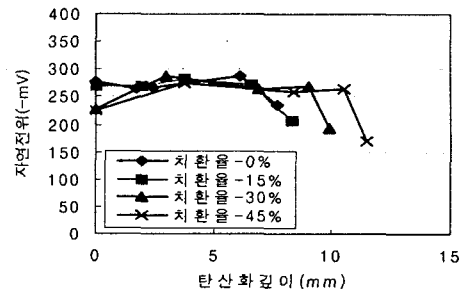


그림 7 탄소화 깊이에 따른 자연전위

4. 결론

이상과 같은 실험결과 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 수중양생시킨 고로슬래그 미분말 치환 콘크리트의 압축강도 발현성은 14일 이내의 초기재령에는 OPC 콘크리트에 비해 낮았지만, 재령 28일에는 모든 치환율 범위에서 OPC 콘크리트를 상회하였다.
- 2) 탄소화깊이는 고로슬래그 미분말의 치환율이 클수록 커지는 것으로 나타났으며, 모든 치환율 범위에서 탄소화깊이가 OPC 콘크리트에 비해 큰 것으로 나타났다.
- 3) 콘크리트의 투기성과 투수성은 고로슬래그 미분말이 치환율이 증가할수록 작아지는 경향을 보였다. 또한, 촉진탄산화 시험조건하에서의 재령증가에 따라 투수성과 투기성은 지속적으로 낮아졌으며, 전반적으로 OPC 콘크리트에 비해 낮은 투과성을 보였다.
- 4) 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따라 콘크리트의 탄소화깊이가 커지는데 비하여 철근의 부식 전류밀도는 감소하는 경향을 보여, 고로슬래그 미분말의 혼입으로 인한 내부조직의 밀실성이 부식 인자의 투과성을 낮춰 부식의 진행속도를 저하시키는 것으로 판단된다.

▣ 본 연구는 한양대학교 부설 초대형구조시스템연구센터와 한국기술연구원의 연구비 지원으로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) ACI 233R-15 Chapter 5-5.12
- 2) Th.A. BEIR, Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement paste, Materials Research Society Symposium, 85, pp.123-34(1987)
- 3) Metha, P. Kumar, "Durability of Concrete in Marine Environment-A Review, "Performance of Concrete in Marine Environment, SP65, American Concrete Institute, Detroit, 1980, pp.1-20. 5
- 4) ACI 226.1R-87, Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of concrete.
- 5) A.M. Neville "Property of Concrete," Concrete Containing Ground Granulated Blastfurnace Slag.