

전기로슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 황산염침식 저항성에 관한 연구

A Study on the Sulfate Attack Resistance of Concrete Using EAF Slag as Fine Aggregate

박 문 석* 김 영 수**

Park, Moon-Seok Kim, Young-su

Abstract

The purpose of this study is to investigate the sulfate attack resistance of concrete using the EAF(electric arc furnace) Slag as fine aggregate. In order to figure out the effects of magnesium sulfate solution on the durability of concrete using the EAF Slag as fine aggregate, the experiments for the immersing test in the 10% magnesium sulfate solution was executed by selecting factors such as aging processes, replacement ratio(0, 10, 20, 30, 50%), and duration of immersing. The specimens were made with various EAF slag replacements for fine aggregates and with W/C ratio fixed 0.45. compressive strength and S.D.F(Sulfate Deterioration Factor), weight change, and SEM(Scanning Electron Microscope) were tested. From the test results, EAF slag aggregate treated with accelerated aging is better than treated with air aging. The compressive strength and resistance to the sulfate attack is slightly improved with an increase in the EAF slag aggregate treated with accelerated aging replacement for aggregate.

키워드 : 전기로슬래그, 황산염침식, 내구성, 에이징, 치환율
Keywords : EAF Slag, Sulfate Attack, Durability, Aging, Replacement Ratio

1. 서론

콘크리트는 내구성이 우수한 반영구적인 구조재료로 널리 알려져 왔으나, 콘크리트 구조물이 염해, 화학적 침식, 동결 융해 및 중성화 등의 영향을 받아 성능저하를 일으키는 열악한 환경에 놓일 경우 내구성이 크게 떨어지는 심각한 문제점이 발생한다고 알려져 있다. 또한 해수에 근접한 지역 또는 산성 토양, 온천지역 및 오·폐수가 발생하는 지역 등과 같이 황산염을 함유한 환경 하에 콘크리트 구조물이 건설될 경우 황산염침식으로 인하여 콘크리트의 성능은 크게 저하된다.9)

콘크리트의 황산염침식을 억제하기 위해서는 알루미늄산3석회(C₃A)의 양을 줄이거나 콘크리트의 수밀성을 높이는 것이 중요하다. 이러한 방법으로는 내황산염시멘트를 사용하거나, 포졸란재를 혼입하는 방법 등이 있다. 특히 포졸란재를 혼입하는 경우에는 C₃A의 양을 저감시킬 수 있고, 포졸란 반응을 통해 수산화칼슘(Ca(OH)₂)을 규산칼슘수화물(C-S-H)로 변화시켜 치밀도를 높일 수 있기 때문에 산업부산물인 포졸란계 혼화재가 널리 사용되고 있다.

산업부산물 중 철강 산업의 부산물인 슬래그를 살펴보면 크게 고로슬래그와 제강슬래그로 분류되며, 제강슬래그는 다시 전로슬래그와 전기로슬래그로 구분된다. 전기로슬래그는 고로슬래그와 비교하여 실리카분이 적고 철분이 많아 밀도가 크며, 유리석회에 의한 팽창붕괴성을 나타내는 경향이 있어 재활용이 높지 않으며 대부분이 매립되어 왔다.

유리석회에 의한 팽창붕괴성은 전기로슬래그의 재자원화에 커다란 장애가 되어, 과거 콘크리트표준시방서에서는 전기로슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하여서는 안 된다⁶⁾고 규정하였다. 그러나 팽창붕괴성을 저감하는 기술, 즉 에이징 방법이 개발되어 팽창안정성을 확보할 수 있고, 골재 자체의 강도가 천연골재나 고로슬래그 골재보다 높을 뿐 아니라 에이징 과정 중 골재 내부공극이 반응생성물로 채워져 밀실해 진다는 연구결과가^{4,5)} 보고된 바 있어 전기로슬래그를 콘크리트용 잔골재로 사용할 경우 황산염침식 저항성에 도움이 될 것으로 판단되어진다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 전기로슬래그 잔골재의 에이징 방법과 치환율을 달리하여 압축강도, 중량변화를 실험을 실시하고, SEM촬영을 통한 미세구조를 관찰하여 비교 잔골재 치환 콘크리트와 비교·분석함으로써, 전기로슬래그를 사용한 콘크리트의 황산염침식 저항성을 평가하는데 그 목적이 있다.

* 부산대학교 건축공학과 석사과정
** 부산대학교 건축학부 교수, 공학박사, 교신저자
(kys@pusan.ac.kr)

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

에이징 처리 전기로슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 황산마그네슘 침식에 미치는 영향을 검토하기 위하여 전기로슬래그 잔골재의 치환율과 에이징 방법을 주요 실험인자로 선정하여 황산염침식 저항성 실험을 실시하였다. 일반적으로 황산염에 의한 콘크리트의 열화는 황산마그네슘에 의한 열화가 가장 심각하게 나타나므로 본 실험에서는 10%의 황산마그네슘 용액을 사용하여 황산마그네슘 침식(이하 황산염침식) 저항성 실험을 실시하였다.

시험에 사용된 상세한 실험인자 및 평가항목은 표 1과 같으며 배합상세는 표 2와 같다.

표 1. 실험인자 및 평가항목

실험인자	물시멘트비(%)	45		
	에이징 방법	공기중, 촉진에이징		
	전기로슬래그 치환율(%)	공기중에이징	0, 25	
		촉진에이징	0, 10, 20, 30, 50	
	침지재령(일)	7, 28, 56, 91		
평가항목	압축강도	수중 및 침지재령별		
	황산염 열화지수(S.D.F)	수중 및 침지재령별		
	중량변화율	침지재령별		
	X선 회절분석(XRD)	재령 91일에 관찰		
	콘크리트의 미세구조(SEM)	재령 91일에 관찰		

표 2. 콘크리트의 배합표

시험체	W/C (%)	s/a (%)	단위질량(kg/m ³)				고성능 감수제 (%)	
			단위수량	시멘트	굵은골재	잔골재		
						강모래		치환모래
Plain						698	-	0.70
CS50						394	353	1.10
ACC10						629	86	0.75
ACC20						559	172	0.80
ACC30	45	42	185	410	991	489	258	0.80
ACC50						349	430	0.85
AIR25						517	228	0.75
COS30						489	274	0.60
BS30						489	211	0.90

주) CS(ACC, AIR, COS, BS) 10(0, 10, 20, 30, 50)
잔골재 치환율 0, 10, 20, 30, 50%

CS : 부순모래,
ACC : 촉진에이징 전기로슬래그 잔골재,
AIR : 공기중에이징 전기로슬래그 잔골재
COS : 동제련슬래그 잔골재
BS : 고로슬래그 잔골재

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 밀도 3.15g/cm³, 분말도 3,266cm²/g의 KS L 5102 1종 보통포틀랜드시멘트로, 압축강도는 3일 재령에서 19.2MPa, 7일 재령에서 27MPa, 28일 재령에서 37.4MPa를 기록하였다. 사용한 시멘트의 물리적 성질 및 화학적 성분에 관한 내용은 표 3과 같다.

표 3. 시멘트의 물리적 특성과 화학적 성분

종류	보통 포틀랜드 시멘트	
분말도(cm ² /g)	3,266	
밀도(g/cm ³)	3.15	
시멘트의 압축강도 (MPa)	3일	19.2
	7일	27.0
	28일	37.4
응결시간(분)	초결	230
	종결	380
화학적 조성(%)	SiO ₂	20.71
	Al ₂ O ₃	5.56
	Fe ₂ O ₃	3.03
	CaO	62.25
	MgO	3.40
	SO ₃	2.50
	L.O.I	1.42

2.2.2 골재

골재는 표준 입도 범위 안에 들도록 입도를 조정하여 사용하였다. 각각의 골재에 대한 물리적 성질은 표 4, 5와 같으며, 비교 잔골재의 물리적 성질 및 화학적 성분은 표 6, 7과 같다.

표 4. 골재의 물리적 성질

골재 종류	굵은골재	잔골재
최대입경(mm)	25	5
조립률(F · M)	6.80	2.85
표준밀도(g/cm ³)	2.67	2.60
흡수율(%)	1.32	2.33
단위용적질량(kg/m ³)	1694	1684
비고	쇄석	강모래

표 5. 전기로슬래그 잔골재의 물리적 성질

골재 종류	공기중에이징 전기로슬래그	촉진에이징 전기로슬래그
최대입경(mm)	5	5
조립률(F · M)	3.10	3.10
표준밀도(g/cm ³)	3.27	3.20
흡수율(%)	2.46	2.64
단위용적질량(kg/m ³)	1978	2008

표 6. 잔골재의 물리적 성질 비교

골재 종류	부순모래	동제련슬래그	고로슬래그
최대입경(mm)	5	5	5
조립률(F·M)	3.00	3.38	3.30
표건밀도(g/cm ³)	2.60	3.40	2.62
흡수율(%)	0.75	0.54	2.20
단위용적질량(kg/m ³)	1690	2246	1436

표 7. 잔골재의 화학적 성분 비교

구 분	화학적 성분							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe	MgO	Cu	S	SO ₃
전기로슬래그	17.72	20.53	7.20	33.15	6.01	-	-	0.17
동제련슬래그	33.05	5.48	4.46	46.80	0.73	1.0	-	-
고로슬래그	32.00	41.12	17.01	1.40	6.00	-	0.9	0.3

2.2.3 혼화제

실험에 사용한 고성능감수제의 물리적 성질은 표 8과 같으며 목표슬럼프(12±2.5cm)를 확보하기 위하여 혼화제의 혼입율에 따라 결합재 질량에 대해 0.60~1.10% 첨가하였다.

표 8. 혼화제의 물리적 성질

혼화제의 종류	고성능감수제
색상	암갈색
밀도(g/cm ³)	1.20 ± 0.05
상태	액체

2.3 실험방법

2.3.1 슬럼프

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프는 KS F 2402의 규정에 따라 측정하였다.

2.3.2 압축강도

수중 및 10%의 황산마그네슘 용액에 침지한 콘크리트의 재령별 압축강도를 알기위해 KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험방법 규정”에 따라 측정하였다. 소정의 양생기간을 거친 시편을 그라인딩식 캐퍼머신으로 2mm 내외의 표면연마를 통한 상부캐핑 작업을 행한 후, 최대 용량 200tf의 만능재료 시험기(Universal Testing Machine : UTM)를 이용하여 측정

하였다.

2.3.3 황산염 열화지수 (S.D.F:Sulfate Deterioration Factor)

수중 및 10%의 황산마그네슘 용액에 침지한 콘크리트의 측정된 압축강도를 이용하여 황산염침식에 의한 열화의 정도를 파악하기 위해, Rasheeduzzafar¹⁰⁾등이 제시한 S.D.F를 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$S.D.F = \frac{(SW-SS)}{SW} \times 100 \quad (1)$$

여기서, SW는 재령 t일에서 수중양생 시편의 압축강도이며, SS는 재령 t일에서의 10% 황산마그네슘 용액에 침지한 시편의 압축강도이다.

또한, 황산염침식 저항성을 평가하기 위한 황산염 용액 침지방법은 ASTM C 267, ASTM C 579에 의하여 실시하였으며, 침지용액은 황산마그네슘 1급시약을 10% 농도로 물과 혼합하여 제조하였다. 탈형 직후에 침지를 시작하였으며, 용액의 양은 각 침지조마다 침지용액(L)/시험체의 체적(V)의 비를 5로 고정하였고 온도는 23±2℃로 일정하게 유지하였다.

2.3.4 중량변화율

각 배합에 의한 콘크리트의 중량변화 측정은 ASTM C 267의 실험방법에 준하여 침지재령 7, 14, 28, 56, 91일에 실시하였다. 먼저 표면의 침전물의 제거하기 위해 화학섬유로 된 솔을 사용하여 세척한 후에 면직 타올로 표면 수분을 제거하였고, 20±3℃의 건조로에서 30분 동안 건조한 다음, 사용범위가 40~10,000gf인 전자저울을 사용하여 중량을 측정하였다.

2.3.5 미세구조 관찰

각 배합에 대한 콘크리트의 황산마그네슘 침식 전후의 미세구조를 관찰하기 위해 지름 5mm, 길이 10mm의 시편을 채취하고 HITACHI S-4200을 이용해 배율을 3,000배로 확대하여 콘크리트의 미세구조를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지않은 콘크리트의 유동특성

그림 1은 동일 슬럼프를 얻기 위한 각 배합에 따른 고성능감수제의 혼입량을 나타낸 것이다. 동제련슬래그를 치환한 콘크리트가 가장 적은 고성능감수제가 혼입되었고, 전기로슬래그의 치환율이 증가할수록 고성능감수제의 혼입량이 상대적으로

로 증가되는 경향을 보였다.

동제련슬래그의 경우 입형이 구형이기 때문에 고성능감수제가 적게 혼입된 것으로 판단되는 반면, 전기로슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 고성능감수제 혼입량의 증가는 그림 2에서와 같이 골재 자체가 모가 나고 표면이 거칠기 때문인 것으로 판단된다.

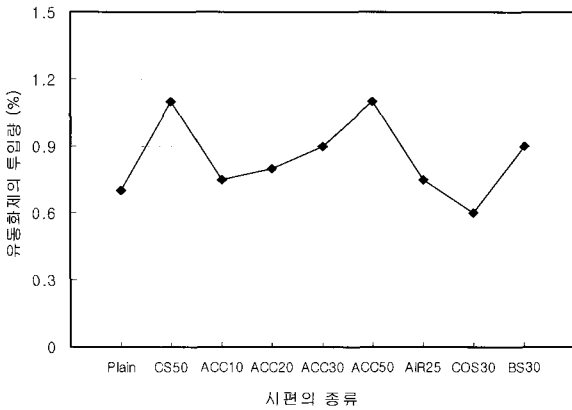
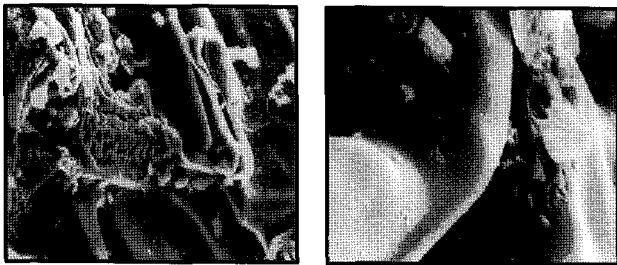


그림 1. 각 배합에 따른 고성능감수제 투입량



(a) 전기로슬래그 골재의 표면 (×1000) (b) 전기로슬래그 골재의 표면 (×6000)

그림 2. 전기로슬래그 골재의 표면조직

3.2 콘크리트의 압축강도

그림 3은 수중양생한 콘크리트의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 재령 91일에 축진에이징 전기로슬래그를 사용한 콘크리트가 57.2MPa의 가장 높은 압축강도를 나타내었으며, 플레인 콘크리트가 51.6MPa의 가장 낮은 압축강도를 보였다. 전기로슬래그의 에이징 방법에 따른 압축강도 측정결과 축진에이징 전기로슬래그가 공기중에이징의 경우보다 높은 압축강도를 보였다.

그림 4는 축진에이징 전기로슬래그의 치환율에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것으로, 같은 에이징을 실시한 전기로슬래그라 하더라도 치환율에 따라 압축강도가 상이함을 알 수 있다. 전기로슬래그의 치환율이 30%까지 증가할수록 압축강도 또한 증가하는 경향을 보였으나, 치환율 50%일 때 압축강도가 급격히 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 결과로 부터 전기로슬래그의 치환율이 콘크리트의 성능에 비교적 큰 영향을 미침을

알 수 있다.

축진에이징 전기로슬래그를 사용한 콘크리트의 압축강도를 동제련슬래그와 고로슬래그를 사용한 콘크리트와 비교해 보았을 때, 재령 91일에서 고로슬래그보다 107.6%에 해당하는 높은 압축강도를 나타내고 있으며, 동제련슬래그 보다도 동등 이상의 압축강도를 보여 축진에이징 전기로슬래그를 잔골재로 사용하였을 때 우수한 압축강도가 기대됨을 알 수 있다.

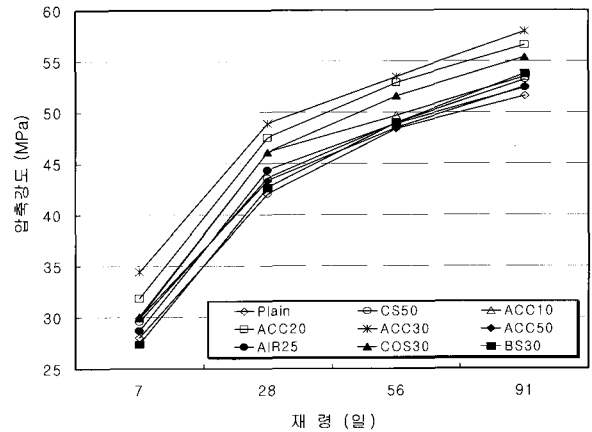


그림 3. 수중양생 콘크리트의 재령별 압축강도

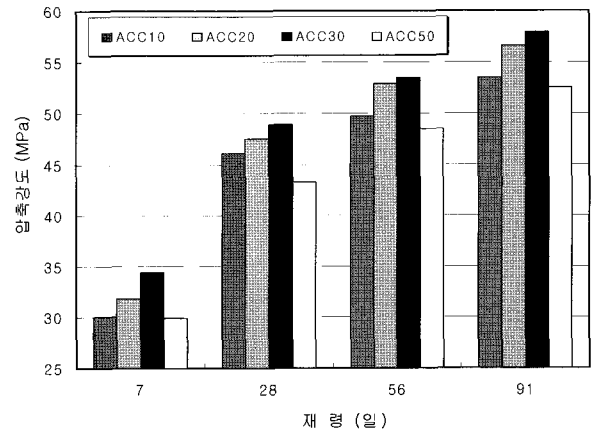


그림 4. 축진에이징 전기로슬래그의 치환율에 따른 재령별 압축강도

그림 5는 10%의 황산마그네슘 용액에 침지한 콘크리트의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 침지재령 28일까지는 각 배합에 대해 미소한 압축강도 변화를 보이고 있으나 침지재령 28일부터 열화가 촉진되어 침지재령 91일에는 평균 4MPa 정도의 압축강도 감소를 보임을 알 수 있다. 이는 기존의 여러 연구 결과^{7,10)}에서 침지재령 28일후부터 황산염침식에 의한 열화가 급격하게 진행된다는 경향과 일치하는 결과이다.

전체적으로 수중양생한 콘크리트의 압축강도보다 감소하는 경향을 보이고 있으나 압축강도의 발현이 매우 유사함을 알 수 있다. 축진에이징 전기로슬래그를 30% 치환한 콘크리트가

54.1MPa에 해당하는 가장 높은 압축강도를 나타내고 있으며, 이는 그림 6에서와 같이 동제련슬래그와 고로슬래그를 사용한 콘크리트의 52.4, 50.3MPa보다 높은 값으로, 축진에이징 전기로슬래그가 상대적으로 높은 압축강도를 보임을 알 수 있다.

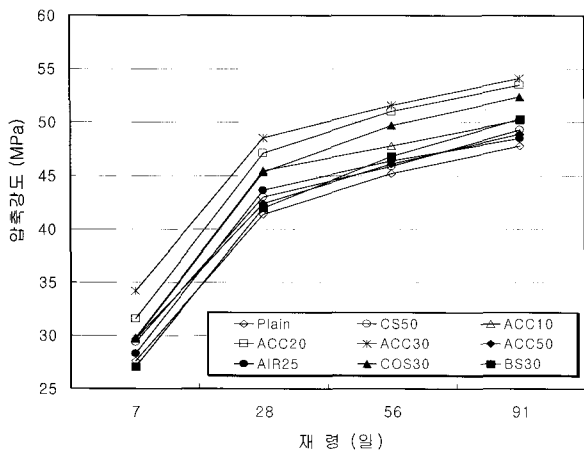


그림 5. 황산마그네슘 용액에 침지한 콘크리트의 재령별 압축강도

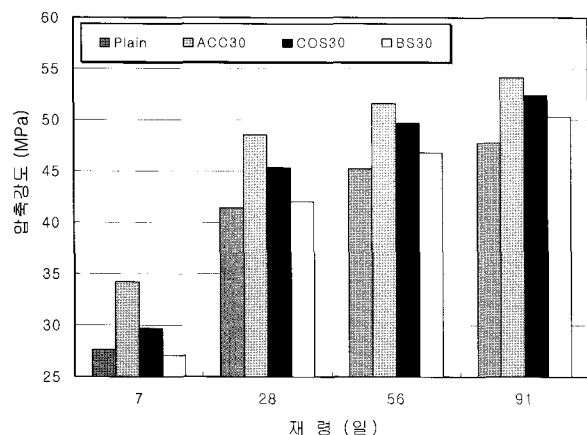


그림 6. 황산마그네슘 용액에 침지한 콘크리트의 재령별 압축강도 비교

3.3 황산염침식 저항성

3.3.1 황산염 열화지수(S.D.F)

S.D.F는 황산염침식에 대한 열화의 지표로 사용되는 분석 인자로, 양의 값은 열화의 진척정도를 의미하며, 음의 값은 열화에 대한 저항성의 증가를 의미한다.

그림 7 및 8은 침지재령 28일과 91일에서의 S.D.F를 나타낸 것이다. 침지재령 28일의 S.D.F 측정 결과 부순모래를 사용한 콘크리트가 가장 높은 S.D.F를 나타내었으며, 축진에이징 전기로슬래그 잔골재를 30% 치환한 콘크리트가 가장 낮은 S.D.F를 나타내었다. 또한 동제련슬래그를 30% 치환한 시편

이 상대적으로 낮은 S.D.F를 보였으며, 이러한 결과는 침지재령 91일에서도 유사한 경향을 보였다.

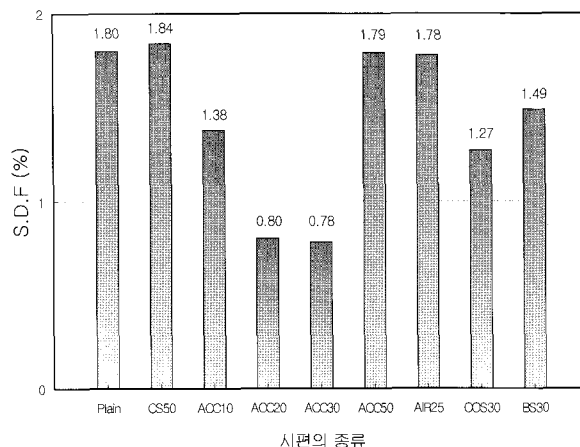


그림 7. 각 배합에 대한 재령 28일의 S.D.F

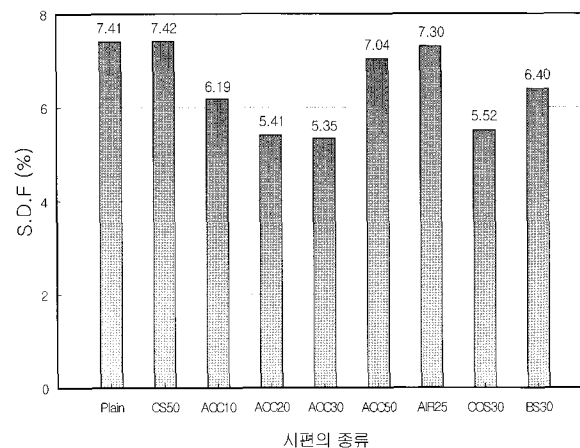


그림 8. 각 배합에 대한 재령 91일의 S.D.F

전기로슬래그의 에이징 방법에 따른 S.D.F를 비교해 보면 공기중에이징 전기로슬래그를 사용한 콘크리트보다 축진에이징 전기로슬래그를 사용한 콘크리트가 상대적으로 낮은 S.D.F를 보임을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 축진에이징 전기로슬래그를 사용하는 것이 압축강도와 황산염침식 저항성 측면에서 훨씬 유리함을 알 수 있다.

축진에이징 전기로슬래그의 치환율에 따른 S.D.F를 측정된 결과, 치환율이 30%까지 증가할수록 낮은 S.D.F를 보였으나 치환율 50%일 때 상대적으로 높은 결과를 나타내었다. 이는 압축강도 측정결과와 동일한 경향으로, 축진에이징 전기로슬래그의 적정 치환율이 존재함을 알 수 있다.

또한, 재령 91일의 축진에이징 전기로슬래그를 30% 치환한 콘크리트의 S.D.F 측정값은 5.35%로, 동일 재령의 고로슬래그, 동제련슬래그를 치환한 콘크리트의 6.40%, 5.52%보다 낮은 S.D.F를 보여 가장 우수한 황산염 저항성을 보였다.

따라서 본 연구에서는, S.D.F를 기준으로 보았을 때 축진에 이징 전기로슬래그를 사용하는 것이 유리하며, 적정 치환율은 30%인 것으로 조사되었다.

3.3.2 중량변화율

황산마그네슘 침식에 의한 열화는 규산마그네슘수화물의 생성으로 인한 표면열화 현상이 더욱 지배적인 열화메커니즘으로 작용한다. 따라서 외부열화의 지표로 사용되는 중량변화를 측정, 분석하여 황산마그네슘 침식에 의한 콘크리트의 열화 정도를 평가할 필요가 있다. 또한 Hansen¹¹⁾ 등의 연구 결과에 의하면 콘크리트가 황산마그네슘 침식을 받을 경우에는 중량변화가 압축강도보다 황산염침식에 의한 열화의 정도를 나타내는데 더 적합할 수 있다고 지적하고 있다.

그림 9는 10%의 황산마그네슘 용액에 침지시킨 콘크리트의 재령별 중량변화율이다. 모든 시편들이 침지재령 7일에서는 미소한 중량 증가 현상을 보였으나 침지재령 28일부터 중량 감소가 나타나기 시작했다.

침지재령 91일에서의 중량변화율을 살펴보면 부순모래 콘크리트의 중량변화율이 (-)4.33%로, 황산염 이온에 의한 열화가 가장 많이 진행되었음을 알 수 있으며, 축진에이징 전기로슬래그를 30% 치환한 시편이 (-)3.35%의 가장 적은 중량 변화율을 보였다. 이러한 결과는 고로슬래그 및 동제련슬래그를 치환한 콘크리트의 중량변화율 보다 낮은 수치로, 축진에이징 전기로슬래그가 비교 잔골재 보다 우수한 성능을 발휘함을 재확인 할 수 있었다.

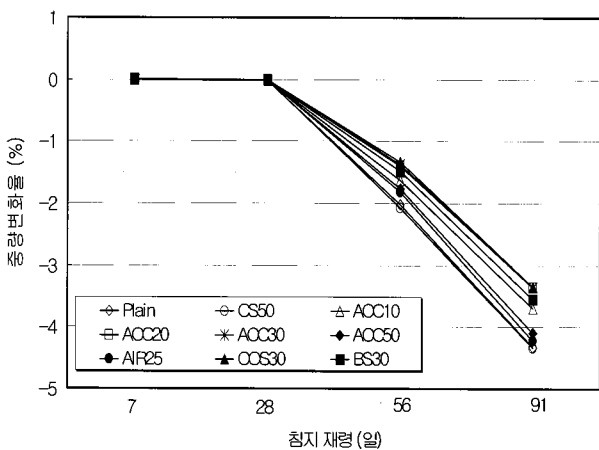


그림 9. 황산마그네슘 용액에 침지한 콘크리트의 재령별 중량변화율

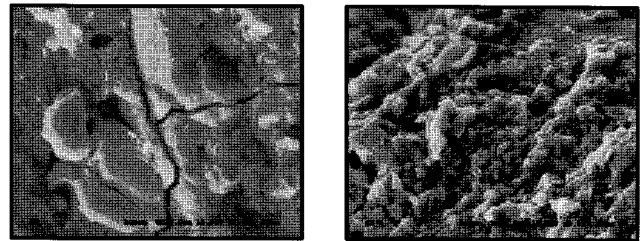
3.3.3 콘크리트의 미세구조 관찰

그림 10은 10%의 황산마그네슘 용액에 91일 동안 침지시킨 시편의 미세구조 촬영 결과이다.

그림 (a)는 플레인 콘크리트의 미세구조를 나타낸 것으로

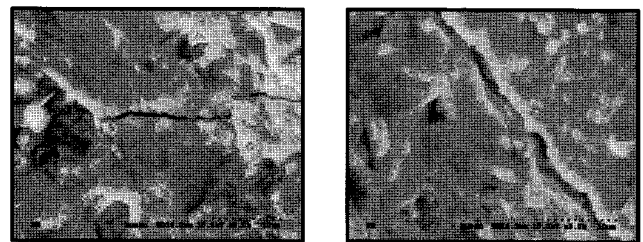
기존의 여러 연구 결과^{1,2,7)}에서와 동일하게 많은 미세균열이 존재함을 알 수 있다.

압축강도와 S.D.F 등 우수한 성능을 보인 축진에이징 전기로슬래그를 30% 치환한 콘크리트의 미세구조를 나타낸 것이 그림 (b)로서, 밀실한 구조를 가진 C-S-H를 확인할 수 있으며, 다른 시편에 비해 양호한 내부구조를 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) Plain 시편의 미세구조

(b) ACC30 시편의 미세구조



(c) ACC50 시편의 미세구조

(d) AIR25 시편의 미세구조

그림 10. 황산마그네슘 용액에 침지 후의 콘크리트 미세구조

그림 (c)와 (d)는 축진에이징 전기로슬래그를 50% 치환한 콘크리트와 공기중에이징 전기로슬래그를 25% 치환한 콘크리트의 미세구조로, 플레인 콘크리트와 마찬가지로 미세균열이 많이 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전기로슬래그 잔골재의 에이징 방법 및 치환율에 따른 콘크리트의 황산염침식 저항성을 평가하기 위하여 황산마그네슘 침지실험을 실시하였으며, 압축강도 및 황산염 열화지수를 구하여 황산염 저항성을 평가하였다. 또한 콘크리트의 중량변화율 및 미세구조의 비교·분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 잔골재의 종류에 따른 동일 슬럼프를 얻기 위한 고성능 감수제의 혼입율을 측정된 결과, 전기로슬래그의 치환율이 증가함에 따라 고성능감수제의 혼입율이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 전기로슬래그 잔골재 자체가 모

가 나고 표면이 거칠기 때문인 것으로 판단된다.

- 2) 전기로슬래그의 에이징 방법에 따른 압축강도, S.D.F 및 중량변화율을 측정한 결과, 촉진에이징 전기로슬래그를 사용한 콘크리트가 공기중에이징 전기로슬래그 보다 훨씬 우수한 성능을 보여, 전기로슬래그를 콘크리트용 잔골재로 사용할 경우 촉진에이징을 실시한 전기로슬래그를 사용하는 것이 우수한 성능을 발휘할 것으로 판단된다.
- 3) 촉진에이징 전기로슬래그를 사용한 콘크리트의 침지재령 91일에서의 S.D.F를 측정한 결과, 치환율이 30%까지 증가할수록 S.D.F는 감소하였으나, 50%일 때 오히려 증가하는 경향을 보였다. 따라서 전기로슬래그를 콘크리트용 잔골재로 사용할 경우 치환율을 30% 이내로 사용하여야 함을 알 수 있었다.
- 4) 침지재령 91일에서의 중량변화율을 측정한 결과, 부순 모래 콘크리트가 (-)4.33%로 가장 높게 나타났으며, 촉진에이징 전기로슬래그를 30% 치환한 콘크리트가 (-)3.35%의 가장 적은 중량변화율을 보였다. 이는 비교 잔골재 고로슬래그 및 동제련슬래그를 사용한 콘크리트의 중량변화율 보다 낮은 수치로, 촉진에이징 전기로슬래그를 사용하는 것이 상대적으로 우수한 황산염침식 저항성을 보일 것으로 판단된다.

pp.528~534, 2006. 3

9. P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, CONCRETE Structure, Properties and Materials, Prentice-Hall, Inc., 1993
10. W. A. Rasheeduzzafar, Sulfate Resistance and Chloride Penetration Characteristics of High-Strength Concrete, SP-149, ACI, Detroit, pp.123~129, 1994, 2
11. W. C. Hansen, Attack on Portland Cement Concrete by Alkali Soils and Waters - A Critical Review, High Research Record, pp.1~32, 1966

(접수 2008. 10. 31, 심사 2008. 12. 1, 게재확정 2008. 12. 8)

참 고 문 헌

1. 강수근, 김영수, High-Volume 플라이애쉬 콘크리트의 황산 마그네슘 저항성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 18권 3호, pp.71~78, 2002. 3
2. 광미숙, 김영수, 3성분계 모르타르의 포졸란재 혼입율이 황산염침식에 미치는 영향, 대한건축학회 논문집, 21권 5호, pp.89~96, 2005. 5
3. 김용성, 김이동, 강병훈, 김성식, 임남기, 정상진, 동제련 슬래그 잔골재를 치환한 고강도 콘크리트의 현장적용을 위한 기초적 연구, 대한건축학회 논문집, 22권, 1호, pp.369~372, 2002. 4
4. 문한영, 유정훈, 콘크리트용 골재로서 전기로슬래그의 적용성에 대한 연구, 콘크리트학회 논문집, 11권, 3호, pp.101~111, 1999. 6
5. 이정국, 김완기, 소양섭, 전기로슬래그 골재를 이용한 시멘트 모르타르 및 콘크리트의 강도특성, 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, 21권, 2호, pp.355~358, 2001. 10
6. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서해설, 2000
7. E. E. Hekal, Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances, Cement & Concrete Research, pp.1421~1427, 2002. 3
8. J. M. Manso, Durability of concrete made with EAF slag as aggregate, Cement & Concrete Composites,