

폐유리를 혼입한 콘크리트의 황산마그네슘 저항성에 관한 연구

Magnesium Sulfate Resistance of Concrete Containing Waste Glass

김 영 수* 정 유 진** 이 동 운***
Kim, Young-su Jeong, Yoo-jin Lee, Dong-un

Abstract

The magnesium sulfate solution digestion test carried out for resistance of concrete containing waste glass powder on magnesium sulfate attack. Moreover, it yielded S.D.F index was used for the criteria of quantitative assessment to the resistance of magnesium sulfate for the purpose of evaluation of chemical deterioration on concrete. Furthermore, to evaluate for micro-cracks within concrete and external corrosion, the weight variation of specimens and the dynamic elasticity were compared and analyzed and also the applicability was examined using the analysis of product of hydration through out observing external deformation and micro-structural deformation.

키워드 : 폐유리, 황산염 침식, 내구성, 치환율
Keywords: Waste Glass, Sulfate Attack, Replacement Ratio

1. 서 론

최근 건축물의 고층화, 대형화, 다기능화 추세에 따라 건축물을 구성하는 각 재료들의 고품질화가 요구되고 있으며 특히, 가장 중요한 구조 재료 중의 하나인 콘크리트의 성능과 품질향상에 대한 필요성이 점차 높아지고 있다. 콘크리트 구조물의 내구성 저하에 영향을 미치는 인자들 중 해수나 산성토양, 온천지역 및 대기오염으로 인한 산성비 등에 포함되어 있는 황산염이 가장 치명적이며 그 중에서도 황산마그네슘의 피해가 가장 심각한 것으로 알려져 있다.^{1),2)}

이러한 황산염은 암석을 구성하는 광물의 주요 구성성분으로서 환경 전반에 걸쳐 넓게 분포되어 있으며 특히 해수의 경우, 약 10~11%의 성분비를 보여 가장 높은 황산염 함유량을 보이는 것으로 알려져 있다.^{3),4)} 따라서 매립지 및 해안구조물 건설 증가에 따른 콘크리트 구조물의 장기적 내구성 확보를 위해 황산염침식이 콘크리트의 내구성에 미치는 영향에 대하여 규명할 필요가 있다.

산염부산물 중 폐유리의 경우, 유리제품의 활용이 증대됨에 따라 발생량이 증가하고 있으나 재활용률이 높지 않으며 매립지의 부족 등으로 환경문제를 야기할 수 있어 이를 재활용하기 위

한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 폐유리는 분쇄시 입형이 구형이고 화학성분의 70% 이상이 실리카(SiO_2) 성분으로 최근 연구에서 시멘트와의 수화반응시 포졸란 반응성이 확인되어 굳은 콘크리트의 물리적 성질을 향상시키고 굳지 않은 콘크리트의 레올로지 특성을 개선하며 블리딩의 저감, 수화열 억제등에 효과적인 것으로 보고되고 있다.⁵⁾

또한, 포졸란 반응에 의해 내부 조직이 치밀해져 투수성이 낮아지므로 황산염과 같은 유해물질이 외부로부터 침입하는 것이 어려워지고, 시멘트에 치환하여 사용함으로써 알루미나3석회(C_3A)의 양을 줄일 수 있다. 더욱이 콘크리트 내부로 황산염이 침투하였다 하더라도 황산염과 반응하는 수화생성물인 수산화칼슘의 생성을 억제하여 반응생성물의 양을 크게 저감시키므로 콘크리트의 내구성능을 증진시키는데 효과적인 것으로 판단된다. 그 밖에도 자원 고갈과 시멘트 제조 시 발생하는 CO_2 에 의한 환경문제가 대두되고 있는 실정에서 경제적이고 환경친화적인 폐기물 재활용의 일환으로 콘크리트 혼화재로서의 활용가치가 높다고 할 수 있다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 폐유리를 혼입한 콘크리트에서 폐유리의 입경과 혼입률이 황산염침식에 미치는 영향을 실험을 통해 알아보고, 기존의 포졸란재를 혼입한 콘크리트와 비교·분석함으로써 폐유리 혼입 콘크리트의 황산마그네슘 저항성에 대하여 평가하는 것을 그 목적으로 한다.

* 부산대학교 건축학부 교수, 공학박사, 주저자
** 부산대학교 건축공학과 공학석사
*** 동서대학교 건축토목 공학부 조교수, 공학박사, 교신저자
(ldu21@hanmail.net)

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

폐유리 혼입이 콘크리트의 황산염침식에 미치는 영향을 규명하기 위하여 폐유리의 혼입률과 입도를 주요 인자로 선정하였고, 폐유리 혼입 콘크리트와 비교하기 위하여 플레인 콘크리트 및 플라이애시, 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트에 대한 황산염침식 저항성 실험을 수행하였다.

배합시 설계강도는 40MPa이고 목표공기량 및 목표슬럼프는 각각 4.5 ± 1.5 , 100 ± 30 mm로 배합설계 하였다. 시험에 사용된 상세한 실험인자 및 평가항목은 표 1과 같으며 배합상세는 표 2에 나타나 있다.

표 1. 실험인자 및 평가항목

| | | |
|------|------------------|--------------------------------------|
| 실험인자 | 물결합재비 | 0.35 |
| | 폐유리 입도 | 150 μ m~75 μ m, 75 μ m이하 |
| | 폐유리 혼입률(%) | 0, 5, 10, 15, 20 |
| | 플라이애시 혼입률(%) | 15 |
| | 고로슬래그 미분말 혼입률(%) | 20 |
| | 침지재령(일) | 3, 7, 14, 28, 56, 84 |
| 평가항목 | 고성능감수제 혼입량 | 목표슬럼프 |
| | 압축강도 | 수중 및 침지 재령별 |
| | 질량변화 | 침지재령별 질량측정 |
| | 동탄성계수 | 침지재령별 질량측정 |
| | 미세구조 | 재령 84일에서 관찰 |

표 2. 콘크리트의 배합설계

| 시험체 | W/B (%) | s/a (%) | 단위수량 | 단위질량(kg/m ³) | | | | | 고성능감수제 (%) | |
|---------|---------|---------|------|--------------------------|-----|-----|-----|------|------------|------|
| | | | | 결합재량 | | | | 굵은골재 | | 잔골재 |
| | | | | 시멘트 | WG | F.A | G.S | | | |
| Plain | 35 | 40 | 175 | 500 | - | - | - | 1003 | 636 | 1.50 |
| 75WG5 | | | | 475 | 25 | - | - | 1001 | 635 | 1.30 |
| 75WG10 | | | | 450 | 50 | - | - | 1000 | 634 | 1.00 |
| 75WG15 | | | | 425 | 75 | - | - | 999 | 634 | 0.90 |
| 75WG20 | | | | 400 | 100 | - | - | 997 | 633 | 0.70 |
| 150WG10 | | | | 450 | 50 | - | - | 1000 | 634 | 0.70 |
| 150WG20 | | | | 400 | 100 | - | - | 997 | 633 | 0.45 |
| FA15 | | | | 425 | - | 75 | - | 987 | 626 | 1.50 |
| GS20 | | | | 400 | - | - | 100 | 999 | 634 | 1.50 |

주) 75(150) WG(FA, GS) 5(10, 15, 20)

└─ 혼입률
 └─ WG: 폐유리 혼입 콘크리트
 └─ FA: 플라이 애시 GS: 슬래그 분말
 └─ 75 :폐유리입도 75 μ m이하, 150:폐유리입도 150~75 μ m

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 밀도 3.15g/cm³, 분말도 3,266cm²/g의 국내 D사 제품을 선택하였다. 시멘트의 압축강도는 재령 3일에서 18.8MPa, 재령 7일에서 26.5MPa, 재령 28일에서 36.7MPa를 기록하였다. 사용한 시멘트의 화학적 성분과 물리적 성질에 관한 내용은 표 3과 같다.

표 3. 시멘트의 물리적 특성과 화학적 성분

| 회사명 | 국내 D사 | |
|-------------------------|--------------------------------|---------|
| 종류 | KS 1종 | |
| 분말도(cm ² /g) | 3,266 | |
| 밀도(g/cm ³) | 3.15 | |
| 시멘트의 압축강도 (MPa) | 3일 | 18.8 |
| | 7일 | 26.5 |
| | 28일 | 36.7 |
| 응결시간 | 초결 | 147분 |
| | 종결 | 4시간 23분 |
| 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 |
| 화합물 구성(%) | L.O.I | 1.42 |
| | C ₃ S | 48.2 |
| | C ₂ S | 23 |
| | C ₃ A | 9.6 |
| | C ₄ AF | 9.2 |

2.2.2 폐유리 미분말

폐유리 미분말은 폐유리수거 전문업체인 국내 K사의 것으로, 본 실험실에서 구비하고 있는 볼밀(Ball Mill)을 이용하여 분쇄한 것을 사용하였다. 물리적 특성과 화학적 성질은 표 4에 나타낸 바와 같다.

표 4. 폐유리미분말의 물리적 특성과 화학적 성분

| 회사명 | 국내 K사 | |
|-------------------------|--------------------------------|------------|
| 밀도(g/cm ³) | 2.84 | |
| 분말도(cm ² /g) | 150 μ m | 1,955 |
| | 75 μ m | 3,312 |
| 화학적 조성(%) | SiO ₂ | 71 \pm 1 |
| | Al ₂ O ₃ | 1.47 |
| | Fe ₂ O ₃ | 0.07 |
| | CaO | 8.91 |
| | MgO | 4.04 |
| | SO ₃ | 0.24 |
| | Na ₂ O | 13.10 |
| | K ₂ O | 0.83 |

2.2.3 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말은 KS F 2569의 규정에 만족한 것을 사용하였다. 사용된 고로슬래그 미분말의 물리적 특성과 화학적 성질은 표 5에 나타내었다.

표 5. 고로슬래그 미분말의 물리적 특성과 화학적 성분

| 회사명 | 국내 G사 | | |
|------------------------|-----------------|-------------|--------|
| 밀도(g/cm ³) | 2.91 | ≥ 2.80 | |
| 분말도(㎎/g) | 4,352 | 3,000~5,000 | |
| 강열감량(%) | 0.83 | ≤ 3.0 | |
| 염기도(%) | 1.89 | ≥ 1.60 | |
| 플로우비(%) | 102 | ≥ 95 | |
| 활성도지수 (%) | 7D | 84 | ≥ 55 |
| | 28D | 120 | ≥ 75 |
| | 91D | 123 | ≥ 95 |
| 주성분(%) | MgO | 4.45 | ≤ 10.0 |
| | SO ₃ | 2.98 | ≤ 4.0 |

2.2.4 플라이애시

플라이애시의 CaO 함유량은 1.82%로서 10%이상을 초과하지 않으므로 ASTM F급의 저칼슘 플라이애시이다. 사용된 플라이애시의 물리적 특성과 화학적 성분은 표 6과 같다.

표 6. 플라이애시의 물리적 특성과 화학적 성분

| 원산지 | 경남 S 화력발전소 | |
|------------------------|--------------------------------|-------|
| 종류 | ASTM F급 | |
| 분말도(㎎/g) | 4,847 | |
| 평균입경(μm) | 20 | |
| 밀도(g/cm ³) | 2.25 | |
| 화학적 조성(%) | SiO ₂ | 61.20 |
| | Al ₂ O ₃ | 24.92 |
| | Fe ₂ O ₃ | 4.63 |
| | CaO | 1.82 |
| | MgO | 0.62 |
| | SO ₃ | 3.09 |
| | L.O.I | 3.72 |

2.2.5 골재

골재의 공극률, 단위용적질량은 KS F 2505 “골재의 단위용적질량 시험방법”에 따라 측정하였으며, 입도는 KS F 2502 “골재의 체가름 시험방법”에 따라 구하였다. 골재의 물리적 성질에 대한 자세한 사항은 표 7에 나타내었다.

표 7. 골재의 물리적 성질

| 골재 종류 | 굵은 골재 | 잔골재 |
|----------------------------|-------|-------|
| 최대입경(mm) | 19 | 5 |
| 조립율(F·M) | 6.8 | 2.85 |
| 표건밀도(g/cm ³) | 2.69 | 2.56 |
| 흡수율(%) | 1.32 | 2.33 |
| 단위용적질량(kg/m ³) | 1,694 | 1,684 |
| 비고 | 쇄석 | 강모래 |

2.2.6 혼화제

본 실험에서는 주성분이 나프탈렌중합 폴리머인 암갈색의 고성능 감수제를 사용하였다. 고성능 감수제는 목표슬럼프(100±30mm)를 확보하기 위하여 혼화제의 혼입률에 따라 결합재 질량에 대해 0.45~1.3% 첨가하였다. 실험에 사용한 고성능 감수제의 물리적 성질은 표 8에 자세히 나타내었다.

표 8. 혼화제의 물리적 성질

| 혼화제의 종류 | 고성능 감수제 |
|---------|-------------|
| 색상 | 암갈색 |
| 밀도 | 1.20 ± 0.05 |
| 상태 | 액체 |

2.3 실험방법

2.3.1 압축강도

콘크리트 압축강도 시험은 KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험방법 규정”에 따라 측정하였다. 소정의 양생기간을 거친 공시체를 각각 수조에서 꺼내어 그라인딩식 캐핑머신으로 2mm 내외의 표면연마를 통한 상부캐핑 작업을 실시한 후, 최대 용량 200tf의 만능재료 시험기(Universal Testing Machine: U.T.M)를 이용하여 측정하였다.

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

수중 및 10%의 황산마그네슘 용액에 침지한 콘크리트의 측정된 압축강도를 이용하여 황산염 침식에 의한 열화의 정도를 파악하기 위해, Rasheeduzzafar 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 공시체의 압축강도이며, SS는 재령 t일에서의 황산마그네슘 용액에 침지한 공시체의 압축강도이다.

2.3.3 질량변화율

질량변화 측정은 ASTM C 267의 실험방법에 준하여 재령 7일, 14일, 28일, 56일, 84일에서 각각 실시하였다. 먼저 표면 침전물을 제거하기 위하여 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 질량을 측정하였다.

질량변화율은 식(2)를 이용하여 3개의 공시체에 대한 평균값을 구하였으며 반올림하여 0.01%까지 계산하였다.

$$\text{질량변화율(\%)} = \frac{W-C}{C} \times 100 \quad (2)$$

여기서, C는 침지 전 공시체의 질량(g)이며, W는 재령에 따른 침지후의 공시체의 질량을 나타낸 것이다.

2.3.4 상대동탄성계수

황산염침식을 받은 경우, 시험체내부의 밀실도에 변화가 발생하게 되는데, 침식 전·후의 상대적인 열화정도를 판단하고자 상대동탄성계수를 구하였다.

$$\text{상대동탄성계수} = \frac{\text{침지 후 동탄성계수}}{\text{침지 전 동탄성계수}} \times 100 \quad (3)$$

2.3.5 미세구조

페유리 혼입 콘크리트에 대한 황산마그네슘 침식 전후의 결정 생성, 조직의 변화 및 미세구조를 관찰하기 위해, 할열파괴한 시험체의 표면으로부터 깊이 25mm 지점에서 지름 5mm, 길이 10mm의 시편을 채취하여 HITACHI S-4200을 이용해 배율을 2,000~10,000배로 확대하여 콘크리트의 미세구조를 관찰하였다.

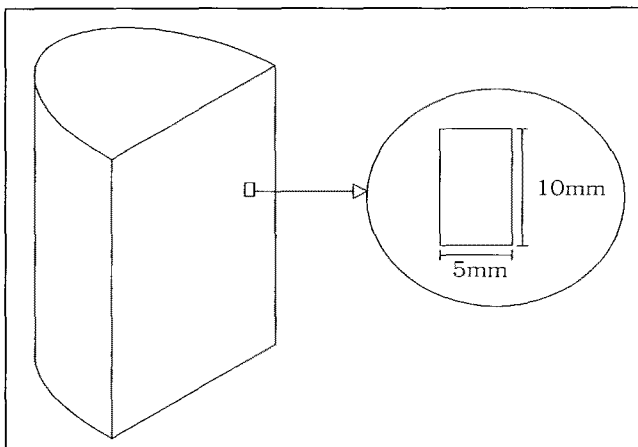


그림 1. 미세구조촬영을 위한 시편채취

3. 실험결과 및 고찰

3.1 콘크리트의 물리적 특성

3.1.1 굳지않은 콘크리트의 물리적 특성

페유리의 혼입이 배합 시 굳지 않은 콘크리트의 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 페유리 혼입 시 변화하는 공기량의 차이를 없애고 단위수량의 증가 없이 목표 슬럼프를 확보하기 위해 고성능감수제의 혼입량을 측정하여 시편별로 비교하였다.

그림 2는 페유리 혼입 콘크리트를 대상으로 페유리 혼입률에 따른 고성능감수제혼입량을 나타낸 것이다. 페유리미분말의 혼입률이 증가할수록 고성능감수제의 혼입량이 감소되어 페유리미분말을 혼입한 콘크리트의 작업성이 플레인 콘크리트보다 다소 유리한 것을 알 수 있는데 이는 유리의 낮은 흡수율과 높은 취성으로 인해 분쇄과정 시 입자 형태가 거의 원형에 가깝기 때문인 것으로 판단되며 페유리미분말의 S.E.M 촬영 결과에서 이를 확인하였다.

또한, 동일 혼입률의 경우 페유리 입경이 작을수록 고성능 감수제의 투입량이 약 30%정도 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 분말의 입경이 작을수록 비표면적이 커서 수화반응시 혼합수와의 접촉면적이 크기 때문인 것으로 판단된다.⁸⁾

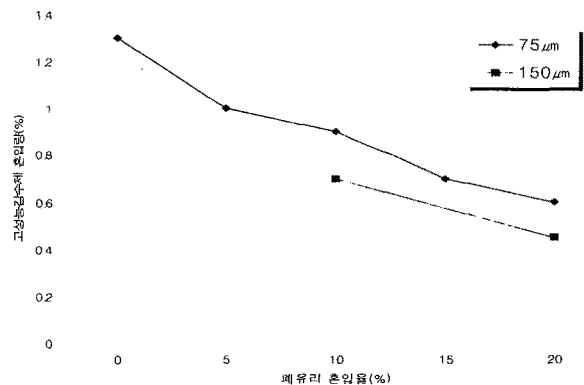


그림 2. 페유리 혼입률에 따른 고성능감수제 혼입량

3.1.2 경화콘크리트의 물리적 특성

페유리의 혼입이 경화 콘크리트의 물리적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 압축강도 시험을 실시하였으며 그 결과는 그림 3과 같다. 재령에 따른 압축강도를 살펴보면 재령 7일까지는 혼화재를 투입한 콘크리트의 압축강도가 플레인에 비해 다소 낮게 나타나며 재령 14일 이후부터 플레인 보다 높은 강도발현을 나타내는 것을 확인할 수 있는데 이는 장기재령으로 갈수록 포졸란재가 수화생성물 중의 일부인 수산화칼슘과 결합하여 규산칼슘 수화물을 더욱 많이 생성함으로써 전이지역과 모르타르의 내부

공극을 현저히 감소시켰기 때문인 것으로 판단된다.

폐유리의 입경에 따른 압축강도 특성을 살펴보면 입경이 75 μ m 이하인 경우, 재령 14일부터 플레인 보다 높은 강도발현을 나타내며 재령 84일에서는 일반적으로 널리 사용되고 있는 포졸란재인 플라이애시나 고로슬래그 미분말과 유사한 강도발현수준을 나타내었으며 특히, 혼입률 10%에서는 시편 중 강도가 가장 우수하게 나타나 폐유리미분말의 포졸란 반응성이 우수하였다.

또한, 폐유리 혼입률에 따른 강도발현 특성을 살펴보면 입경이 75 μ m 이하인 경우 재령 28일을 기준으로 혼입률이 10%까지는 강도가 증가하지만 그 이후로는 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 폐유리의 입경이 커지면 포졸란 반응을 하는 대신 알칼리 골재로서의 역할을 하여 ASR반응이 나타나게 되어 강도가 저하되는 것으로 판단된다.⁸⁾

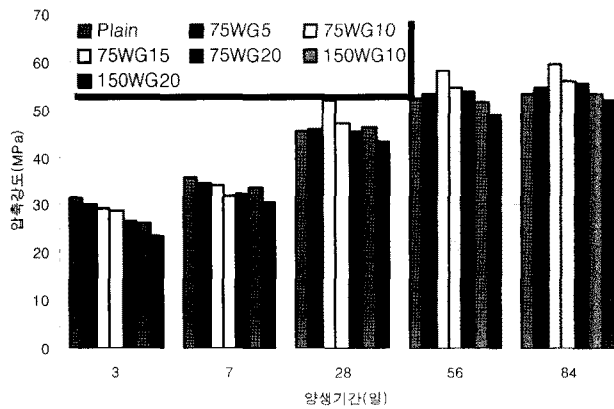


그림 3. 양생기간에 따른 시편별 압축강도

3.2 황산마그네슘 침식 저항성

일반적으로 콘크리트의 화학적 저항성을 평가하기 위하여 압축강도, 질량변화, 동 탄성계수 및 미세구조 관찰 등의 방법을 사용하고 있다. 압축강도의 변화는 콘크리트의 내구성 저하의 지표로, 그리고 동탄성계수 측정은 콘크리트 내부 미세균열의 지표로, 질량변화측정은 콘크리트의 외부열화의 지표로 사용된다. 이런 방법들을 통하여 폐유리 혼입 콘크리트의 황산마그네슘 침식에 대한 저항성을 분석, 평가하도록 한다.

3.2.1 압축강도

그림 4는 재령 28일의 수중양생한 플레인 콘크리트에 대한 폐유리 혼입 콘크리트의 압축강도비를 나타낸 것이며, 그림 5는 침지양생 재령 84일에서 플레인 콘크리트에 대한 폐유리 혼입 콘크리트 및 포졸란재 혼입 콘크리트의 압축강도비를 나타낸 것이다.

폐유리를 혼입한 콘크리트에서 폐유리의 혼입률 10%까지는 압축강도가 증가하는 것으로 나타났으나 10%이상일 때는 혼입률이 증가할수록 압축강도는 저하하는 것으로 나타났다. 또한 동일 혼입률에서는 폐유리의 입경이 작을수록 강도발현이 크게 나타나

는 것을 알 수 있다.

수중양생의 경우 재령에 따라 전체적으로 고른 강도증가를 보이고 있으며, 특히 폐유리 혼입률이 10%일 때 가장 우수한 강도 발현을 나타내었다. 이는 양생기간이 경과할수록 콘크리트 내부의 수산화칼슘과 플라이애시의 포졸란 반응에 의하여, 매트릭스의 미세구조가 칼슘실리케이트수화물의 생성으로 인해 더욱 치밀화되어 밀실한 구조를 형성하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 폐유리 입경이 75 μ m이하인 경우에는 그 반응성이 활발하여 우수한 포졸란 재료로 사용할 수 있음을 확인하였다.

황산마그네슘 용액에 침지시킨 경우에는 플레인 콘크리트와 폐유리 입경이 150 μ m~75 μ m인 경우를 제외하고는 수중양생과 유사한 강도발현을 나타내고 있으며 이는 포졸란 반응성이 우수한 혼화재를 사용할 경우 콘크리트의 황산마그네슘 침식에 대한 저항성이 매우 우수함을 확인하였다.

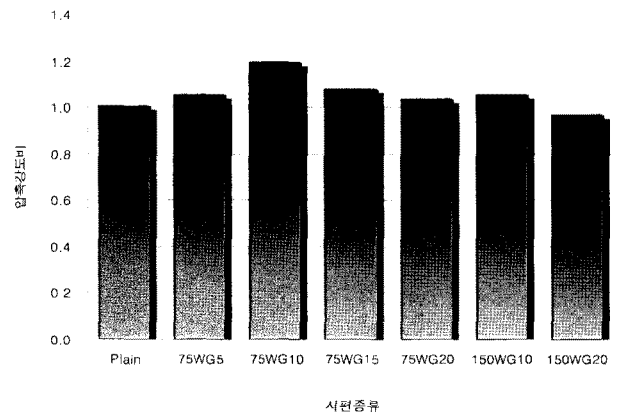


그림 4. 폐유리에 따른 침지양생 재령 28일의 압축강도비

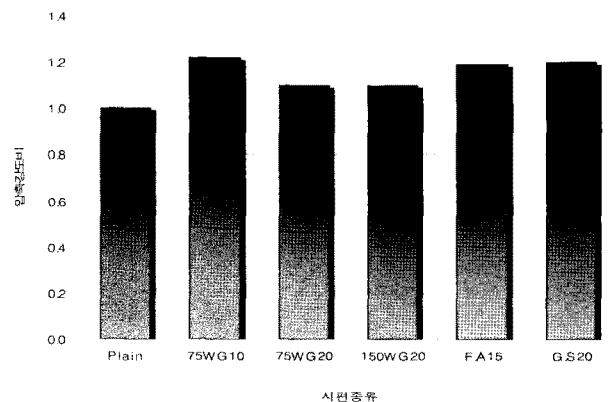


그림 5. 혼화재의 종류에 따른 침지재령 84일의 압축강도비

3.2.2 황산염 열화지수

황산염 열화지수는 황산염침식에 대한 열화의 지표로 사용되는 분석 인자이며, 큰 값일수록 열화의 진척정도를 의미하고, 낮은 값일수록 열화에 대한 저항성의 증가를 의미한다. 그림 6은 침지재령 28일과 84일에서의 S.D.F 인자를 나타낸 것이다. 침

지재령 28일에서는 플레인을 제외하고는 전체적으로 0.61~2.85%의 미소한 열화도를 보였으며, 플레인은 열화도가 4.39%로 다소 높게 나타났다. 침지재령 84일에서는 플레인 콘크리트와 폐유리 입경이 150 μm ~75 μm 인 경우 6%를 상회하는 매우 큰 열화도를 나타내어 앞서 살펴본 압축강도 변화에서 황산마그네슘에 침지한 경우라도 강도가 지속적으로 증가하였지만 상대적인 침식은 시편에 따라 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한, 폐유리 입경이 75 μm 이하인 경우, 치환율 20%를 제외하고는 포졸란 혼입 콘크리트와 비교하여 유사한 황산염 저항성을 나타내고 있어 콘크리트 구조물이 황산마그네슘 환경에 노출될 경우, 폐유리를 혼입하는 방법이 안정적인 성능을 발휘하는데 효과적인 것으로 기대된다.

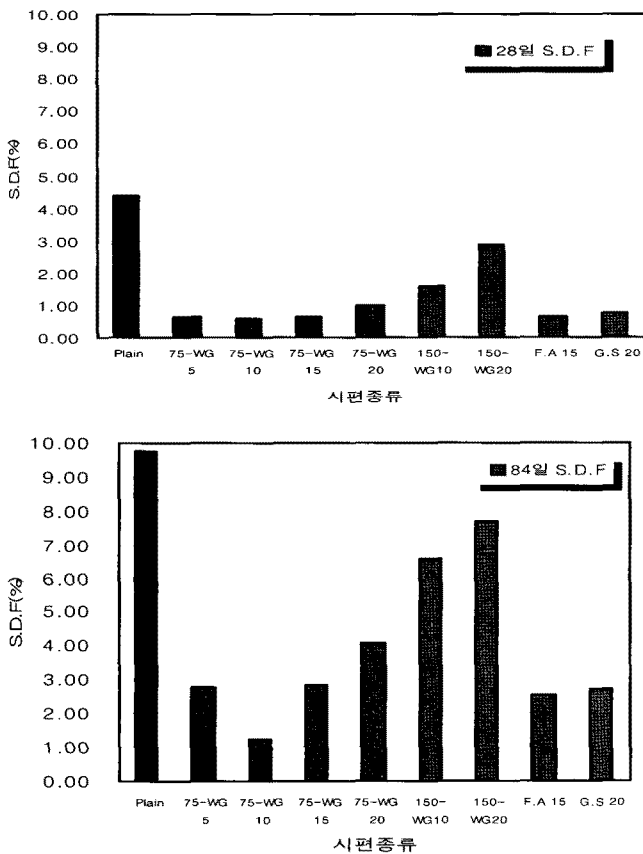


그림 6. 침지재령에 따른 시편별 S.D.F

3.2.3 질량변화율

황산마그네슘 침식에 의한 열화는 규산마그네슘수화물의 생성으로 인해 표면열화 현상이 지배적인 열화메커니즘으로 발현한다. 따라서 외부열화의 지표로 사용되는 질량변화를 측정, 분석하여 황산마그네슘 침식에 의한 콘크리트의 열화의 정도를 평가할 필요가 있다.

그림 7은 침지기간에 따른 질량변화율을 나타내었고, 그림 8은 재령 84일에서의 수중양생 콘크리트와 황산마그네슘 용액 침

지 콘크리트의 질량변화율을 나타내었다. 모든 시편에서 침지재령 28일 이후 뚜렷한 질량변화를 보였는데, 이는 콘크리트가 황산마그네슘 침식을 받을 경우에는 질량변화가 압축강도보다 황산염침식에 의한 열화의 정도를 나타내는데 더 적합할 수 있다는 Hansen⁶⁾ 등의 연구결과와도 일치하였다.

황산마그네슘 침지재령에 따른 질량변화를 고찰하면 플라이애시 혼입 콘크리트와 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 경우 일반적으로 알려진 것과 같이 질량감소가 나타나지 않아 황산염에 저항성을 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 압축강도 결과와 마찬가지로 75WG10의 경우 포졸란재 혼입 콘크리트와 유사한 경향을 보이며, 재령에 따른 질량변화율의 증가는 포졸란 반응의 활성화에 의한 것으로 사료된다.

또한 재령 84일에서의 질량변화율을 살펴보면 플레인 콘크리트의 질량변화율이 (-)5.05%로써 황산마그네슘에 의한 열화가 가장 심각한 수준임을 알 수 있으며, 폐유리 혼입률이 10%이상 일 때에는 혼입률이 증가함에 따라 열화정도가 심해짐을 알 수 있다.

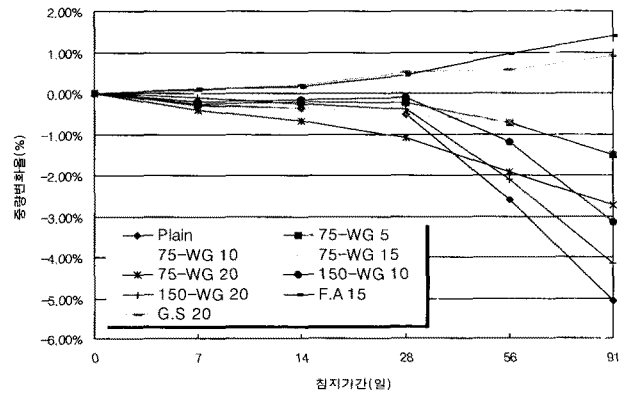


그림 7. 용액침지재령에 따른 질량변화율

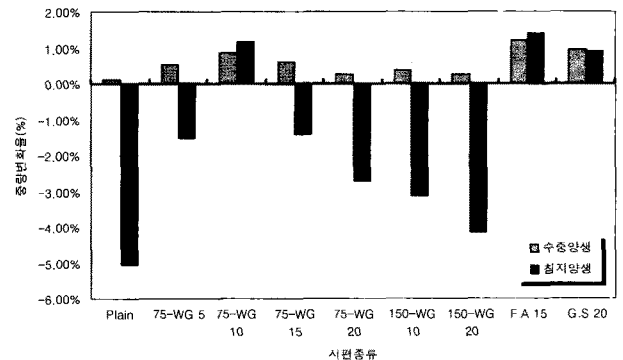


그림 8. 시편별 재령 84일에서의 질량변화율

3.2.4 상대동탄성계수

상대동탄성계수측정은 콘크리트의 내부 미세균열의 지표로 사용

된다. 따라서 황산마그네슘 침식에 의한 콘크리트의 내부 열화의 정도를 평가하기 위해 상대동탄성계수를 측정하여 분석하였다.

그림 9는 황산마그네슘 용액 침지재령에 따른 상대동탄성계수를 나타낸 것이다. 침지재령 84일에서 폐유리 10% 혼입 콘크리트와 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 상대동탄성계수가 142.79%와 144.64%로 가장 크게 나타났으며, 플라이애시 혼입 콘크리트도 134.95%로 유사한 동 탄성계수 증가를 나타내고 있었다. 이러한 수치는 황산마그네슘 침식에 관계없이 포졸란 반응에 의한 콘크리트 내부 구조의 균질화가 이루어지는 것으로 사료되며, 입도가 75 μm 이하인 폐유리미분말의 우수한 포졸란 반응성을 확인하였다.

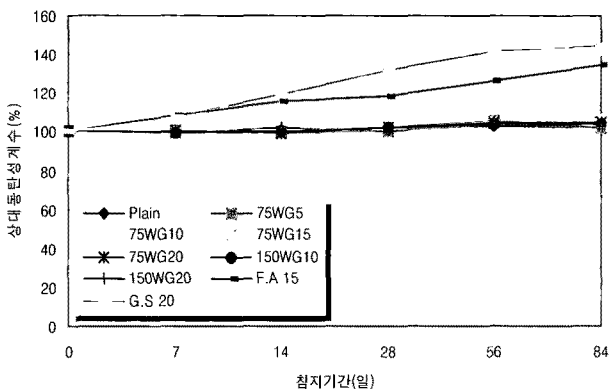


그림 9. 용액침지재령에 따른 상대동탄성계수

3.2.5 미세구조

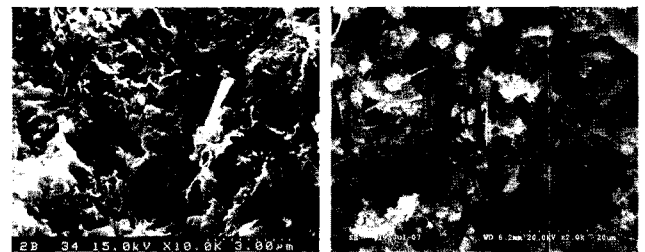
그림 10의 (a), (c), (e)는 각각 재령 84일까지 수중양생을 시킨 Plain콘크리트와 폐유리 혼입 콘크리트의 S.E.M 촬영 결과이며, (b), (d), (f)는 용액 침지재령 84일에서의 각 콘크리트 침지 시험체의 표면부위를 2,000~10,000배 확대하여 S.E.M 촬영한 것을 비교한 것이다.

수중 양생한 Plain 콘크리트의 경우(그림 10(a)), 미수화 시멘트 입자 사이에 형성된 별집형태의 칼슘실리케이트수화물을 확인할 수 있는데, 이는 폐유리 혼입 콘크리트(그림 10(c), (e))에 비해 상대적으로 엉성한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 미세구조의 차이는 폐유리의 포졸란 반응의 결과로 인한 지속적인 칼슘실리케이트수화물의 생성에 기인한 것으로 사료된다.

황산마그네슘 용액 침지 84일 이후, Plain 콘크리트(그림 10(b))에서는 여러 개의 다발로 뭉쳐져 있는 얇은 판상형 결정의 석고와 가는 침상형 결정의 에트링가이트를 확인할 수 있으며, 이로 인한 미세 균열의 발생이 관찰되었다. 또한, 폐유리 입경이 150 μm ~75 μm 의 콘크리트(그림 10(f))에서는 알칼리-실리카 젤의 형성이 확인되었는데 이는 폐유리의 입경이 큰 경우 포졸란 반응성을 나타내기 전에 반응성 골재로서 작용하여 알칼리-실리카

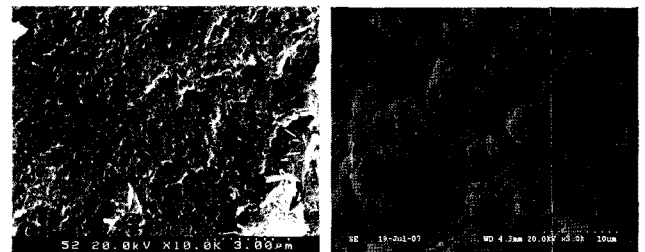
젤을 형성한다는 기존의 연구와도 일치하는 결과임을 알 수 있다.⁹⁾

폐유리 입경이 75 μm 이하인 콘크리트(그림 10(d))의 경우에는 밀집한 형태의 칼슘실리케이트수화물을 확인할 수 있었으며 에트링가이트의 생성은 거의 관찰되지 않아 황산마그네슘 침식에 대한 저항성이 큰 것을 알 수 있다. 이는 또한 황산염 열화지수(S.D.F)를 비롯한 앞선 실험들의 결과와 일치하는 것으로서 이에 대한 신빙성을 제공하는 것으로 볼 수 있다.



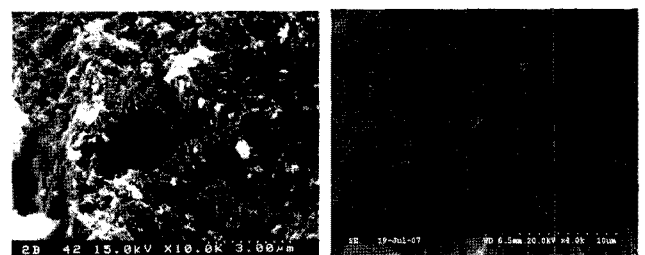
(a) 수중양생 84일 Plain

(b) 용액침지 84일 Plain



(c) 수중양생 84일 75WG10

(d) 용액침지 84일 75WG10



(e) 수중양생 84일 150WG20

(f) 용액침지 84일 150WG20

그림 10. 황산마그네슘 침식에 의한 콘크리트 미세구조

4. 결론

본 연구에서는 폐유리 혼입 콘크리트의 황산마그네슘침식 저항성을 평가하기 위하여 황산마그네슘용액 침지시험을 실시하였으며, 측정된 압축강도를 이용하여 구한 황산염 열화지수를 황산염 저항성에 대한 평가의 기준으로 삼았다. 또한 콘크리트 내부 미세균열과 외부 열화에 대한 평가를 위해 시험체 질량변화를 및 상대동탄성계수를 구하여 폐유리 혼입 콘크리트의 침지재령에 따

른 열화의 정도를 플레인 콘크리트, 플라이애시, 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트와 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 폐유리의 입경이 75 μ m, 혼입률은 10%로 하였을 때 황산염 열화지수 값이 가장 낮게 나타나 가장 우수한 성능을 발현하였으며, 기존의 포졸란제인 플라이애시나 고로슬래그 미분말과 유사한 성능을 나타내었다.
- 2) 폐유리의 입경이 150 μ m일 때 콘크리트의 황산마그네슘 저항성은 입경 75 μ m인 경우에 비해 동일 혼입률에서 낮게 나타났다며 혼입률이 증가할수록 강도발현 및 황산염침식 저항성도 저하하였다.
- 3) 침지후의 압축강도, 질량변화, 상대동탄성계수는 서로 높은 상관성을 보이며 변화하였으며, 이러한 경향은 향후 콘크리트의 황산마그네슘 저항성에 대한 정량적인 평가 기준으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.
- 4) SEM촬영 결과, 콘크리트가 황산마그네슘 침식에 의한 피해를 입었을 경우, 플레인 콘크리트에서는 석고와 에트링가이트가 동시에 형성되는 것을 관찰할 수 있었으며, 입경 75 μ m의 폐유리 혼입 콘크리트의 경우 다량의 C-S-H 겔의 형성을 확인하였다.

위 결과를 종합해 보면 폐유리 혼입 콘크리트가 황산염침식에 대해 충분한 저항성을 가지기 위해서는 75 μ m의 혼입률 10%일 때가 가장 유리하며, 본 연구결과에서 보듯이 입도와 혼입률이 저항성능에 영향을 미치는 주요 인자이므로 실제로 사용하기 위해서는 폐유리의 분쇄과정 배합과정에서의 품질관리가 중요할 것으로 사료된다.

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비 지원(2년)하에 이루어진 연구의 일부로 본 연구실험에 많은 도움을 주신 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 박영식 외 3인, 황산염의 침해를 받은 고강도 콘크리트의 강도특성과 물성변화, 콘크리트학회지, 제10권 제5호, pp.117~128, 1998
2. 배수호 외 1인, 폐유리 분말을 혼입한 유리 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 제13권 제1호, pp.54~61, 2001
3. 서동훈 외 5인, 폐유리 분말을 이용한 콘크리트 제품 개발을 위한 실험적 연구, 대한건축학회논문집, 제18권 제12호, pp.75~82, 2002
4. 윤보현 외 1인, 규사 분말을 치환한 콘크리트의 내화특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제13권 제6호,

pp.351~361, 1997

5. 용태형 외 3인, 고강도경량콘크리트의 황산염저항성과 중성화에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제13권 제2호, pp.625~628, 1993
6. D. Bonen, M. D. Cohen, Magnesium Sulfate Attack on Portland Cement Paste-I. Microstructural Analysis, Cement and Concrete Research, Vol.22 No.2, pp.169~180, 1992
7. Johnson, C. D, Waste Glass as Coarse Aggregate for Concrete, Journal of Testing and Evaluation, Vol.2 No.5, 1974
8. M. D. Cohen, A. Bentur, Durability of Portland Cement-Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Solutions, ACI Material Journal, Vol.85 No.3, pp.148~158, 1988
9. M. D. Cohen, B. Mather, Sulfate Attack on Concrete -Research Needs, ACI Material Journal, Vol.88 No.1, pp.62~69, 1991
10. M. A. Al-Khaja, W. A. Rasheeduzzafar, M. H. Al-Sayed, A. A. Al-Khoder, Sulfate Resistance and Chloride Penetration Characteristics of High-Strength Concrete, High Performance Concrete, SP-149, American Concrete Institute, Detroit, pp.123~129, 1994
11. P. K. Mehta, Effect of Fly Ash on Sulfate Resistance of Cement, ACI Material Journal, Vol.83 No.6, pp.994~1000, 1986
12. W. C. Hansen, Attack on Portland Cement Concrete by Alkali Soils and Waters - A Critical Review, High Research Record, Vol.73 No. 113, pp.1~32, 1966

(접수 2009. 4. 20, 심사 2009. 5. 20, 게재확정 2009. 5. 27)