

상동광산 광미를 콘크리트용 혼화재료로 사용하기 위한 품질특성 연구

A Study on the Quality Properties for Using Tailings from the Sangdong Tungsten Mine as Admixture for Concrete.

최연왕* 정문영** 정명채** 구기정***
Choi, Yun Wang Jung, Moon Young Jung, Myung Chae Koo, Gi Jung

ABSTRACT

This study has focused on the possibility for recycling tailings from the Sangdong tungsten mine as admixture for concrete. The XRD(X-ray diffraction analysis) and PSA(Particle size analysis) were performed to find mineralogical characteristics. As a result of XRD analysis, the tailings were composed of quartz, feldspars and muscovites, and C-S-H and quartz were found in cement mortar. As a result of KSLT for cement mortar mixed with tailings, most of heavy metals were determined as below the guide line for waste material. In addition, the setting time and compressive strength of cement mortar mixed with tailings were investigated. It was indicated that the initial and final set were retarded according to increasing replacement. The compressive strength of mortar was decreased with increasing replacement.

I.서론

현재까지 파악된 전국의 휴·폐 광산(석탄광 제외)은 모두 9백여 개에 이르고 이 가운데 휴광산 19개와 폐광산 108개 등 모두 1백 27개 광산에서 폐수와 폐석 유출 및 기계적·화학적 풍화작용에 노출되어 2차적 오염원으로 작용할 가능성이 제기되고 있다.^{1,2)} 이에 따라 환경부에서는 97년 이후 1500억원 규모의 오염방지 사업을 실시하였지만, 휴·폐 광산에 의한 피해정도에 비하여 복원대책은 미약하여 장기적이고 안정적인 해결방안이 강구되어야 할 실정이다.

한편, 산업자원부는 폐광된 국내 금속광산 가운데 오염물질 유출 가능성이 있는 50개 광산에 대해 2007년까지 5년간에 걸쳐 추가로 광해(鑛害)방지사업을 추진할 계획이다. 정부가 광해방지사업에 나선 것은 집중호우나 태풍 등 재해가 발생할 경우 휴·폐광산으로부터 중금속이 포함된 유출수가 대량으로 흘러나오는 등 주변지역의 피해가 심각하기 때문이다. 특히, 상동지역의 경우 대한중석이 회중석을 개발하면서 40년간 폐기하였던 광미가 약 1,200만톤 정도 적치되어 있어 광미댐의 국부적인 토사유출과 댐의 복부팽창 등에 의해 댐 전체의 구조적인 안정성이 문제되고 있다.

이에 대한 단기적인 대책으로는 국부적으로 댐을 보수하는 방법이 있지만 보다 장기적이고 안정적인 해결방법을 위해서는 광미를 재활용하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 특히 콘크리트에 적용함으로써 대단위의 소비와 값싼 대체 혼화재료로서 적용이 가능할 것으로 판단된다.³⁾ 더욱이 국내에 광범위하게 산재하고 있는 광산 폐재의 대부분이 미세한 분체들로 이루어져 있다는 점을 감안하여 광미의 중금속 용출특성을 파악하고 원료배합 및 특성을 연구 검토한다면 자원으로써의 활용 가능성은 극대

* 정희원, 세명대학교 토목공학과 부교수

** 정희원, 세명대학교 자원환경공학과 부교수

*** 정희원, 세명대학교 토목공학과 석사과정

화될 것으로 판단되며 콘크리트에 적용시 광미 속에 함유되어 있는 유해 중금속이 안정화 혹은 고정화 되어 외부환경에 영향을 주지 않아 대량으로 소비될 수 있을 것으로 생각된다.

그러므로 본 연구에서는 상동지역 중석광 광미를 콘크리트용 혼화재료로 사용 가능한지 여부를 알아보기 위한 연구의 일환으로 광미의 품질특성과 혼화재료로 사용한 모르타르의 기초적 특성에 대하여 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 사용재료

2.1.1. 시멘트 및 고로슬래그 미분말

시멘트는 비중 3.15의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 사용하였고, 고로슬래그 미분말(이하 SG로 약함)을 혼화재로 사용하였으며, 이들의 화학성분 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1 시멘트 및 고로슬래그 미분말의 화학성분 및 물리적 성질

Types \ Items	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Specific Gravity	Specific Surface Area (cm ² /g)
OPC	21.60	6.00	3.10	61.40	3.40	2.50	3.15	3,539
S G	32.30	14.80	0.40	44.12	5.50	1.00	2.88	4,580

2.1.2. 광미

광미(이하 TA로 약함)의 특성 평가는 X선 회절분석(이하 XRD로 약함)을 통하여 화학성분 및 광물 조성을 분석하였으며, 입도분석을 위하여 Particle Size Analyzer(이하 PSA로 약함)를 이용하였다. 광미의 화학성분 및 물리적 성질은 표 2와 같고 입도분포 곡선은 그림 1과 같다.

표 2 광미의 화학성분 및 물리적 성질

Type \ Items	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Specific Gravity
T A	59.00	10.90	11.30	14.00	1.70	2.6

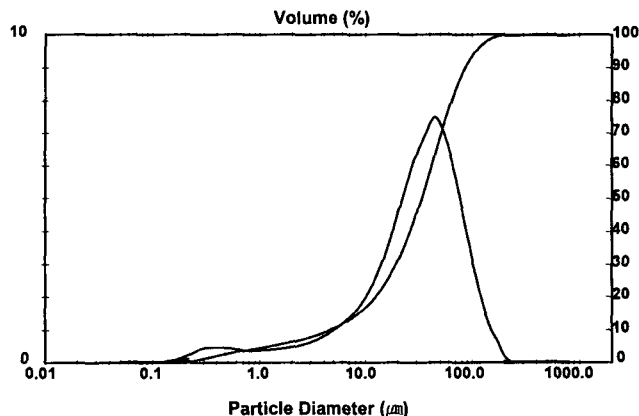


그림 1 TA 입도분포 곡선

2.1.3. 잔골재

KS L 5100에서 규정하고 있는 주문진산 표준사(이하 SS로 약함)를 사용하였으며 그 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3 골재의 물리적 성질

Type	Items	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.	Organic impurities	Unit weight (kgf/m ³)	Percentage of solids (%)
S S		2.60	0.89	2.00	O.K	1,462	56.2

2.2. 실험계획

상동광산 광미를 콘크리트용 혼화재료로 사용하기 위한 예비단계의 실험으로 광미의 혼합률을 달리 한 모르타르를 제조하여 재령 3, 7, 14 및 28일에서 압축강도를 측정하였다. 한편 TA의 중금속 함유 여부를 알아보기 위하여 국내용출시험법(KSLT)에 따라 용출시험을 실시하였다. 실험단계는 그림 2에 나타내었다.

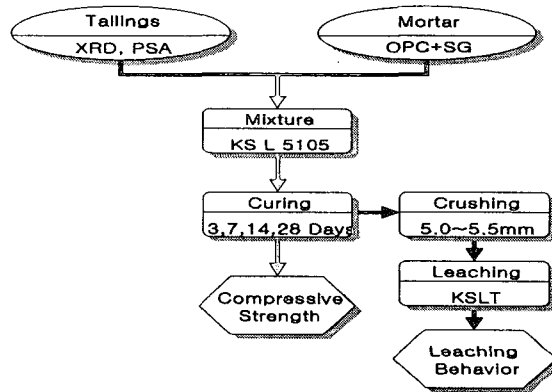


그림 2 실험 진행 단계

2.3. 실험방법

2.3.1. X선 회절분석

0.015mm(No.100체)를 통과하는 TA를 시멘트 중량의 50%로 혼합하여 물-결합재비를 50%로 제조한 시멘트 페이스트를 20℃에서 수증양생한 후 미분쇄하여 분말법에 따른 X선 회절분석을 실시하였다. 측정조건은 CuK(Ni, filter) 35kV, 20mA, Scan Speed 80°/min, 2θ=10°~55°로 측정하였다.

2.3.2. 용출 시험

TA의 혼합률과 SG의 혼합률을 변화시킨 모르타르를 23±2℃에서 표준양생 시킨 후 국내용출시험법(KSLT)에 따라 실시하였다. 제조된 모르타르는 5.0~5.5mm로 분쇄한 후 HCl을 첨가한 용매를 pH 5.8~6.3으로 조절하여 교반한 뒤 6시간이 지난 후에 중금속 순간분석기(PPV 3000, 호주산)를 이용하여 Cd, Zn, Cu 및 Pb의 용출량을 측정하였다.

2.3.3. 응결 시험

응결시간 변화는 KS L 5108에 따라 TA의 혼합률을 시멘트에 대하여 4수준(0, 10, 20 및 30%)으로 변화시켜 제조한 시멘트 페이스트로 측정하였다.

2.3.4. 모르타르 플로우 시험

TA의 혼합률을 시멘트에 대하여 중량비로 4수준(0, 10, 20 및 30%), SG를 4수준(0, 15, 30, 45%)으로 변화시켜 제조한 모르타르의 콘시스턴시를 KS L 5105 플로우 시험에 준하여 실시하였다.

2.3.5. 모르타르의 압축강도 시험

50×50×50mm의 모르타르 시험체를 제작한 후 23±2℃에서 표준양생을 실시한 후 재령 3, 7, 14 및 28일에 KS L 5105에 따라 압축강도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. TA의 품질 특성

그림 1은 상동지역 중석광산의 TA를 콘크리트용 혼화재료로 사용할 수 있는지의 여부를 알아보기 위해 PSA에 의한 입도분포를 나타낸 결과이다. 측정결과 D_{50} 이 $33.71\mu\text{m}$ 이며, 입도분포는 $0.09\sim 222\mu\text{m}$ 의 범위로 분포되고 있음을 알 수 있었다. 또한, 표 2는 TA의 화학성분 및 물리적 성질을 나타낸 것으로 주성분은 SiO_2 성분이 많은 규산염 광물임을 알 수 있었다.

그림 3은 구성광물을 알아보기 위해 XRD분석을 실시한 결과로서 TA는 대부분 암석에서 흔히 볼 수 있는 석영, 장석, 백운모 등으로 구성되어 있음을 알 수 있으며, 그림 4는 TA가 시멘트 수화에 미치는 영향을 알아보기 위해 시멘트 중량의 50%로 혼합한 XRD분석 결과로서 시멘트 수화생성물인 C-S-H와 TA의 주광물인 석영만 분석되고 있어 시멘트 수화에 영향을 미치는 유해한 수화생성물은 나타나지 않음을 알 수 있다.

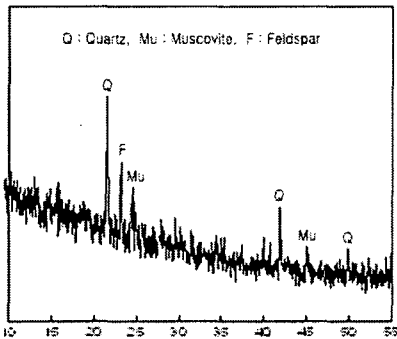


그림 3 TA의 XRD 분석

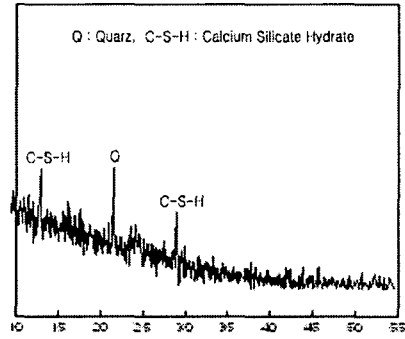


그림 4 TA를 혼합한 시멘트 페이스트의 XRD 분석

3.2. TA 혼합 모르타르의 특성

3.2.1. 용출특성

그림 5, 그림 6, 그림 7 및 그림 8은 TA를 혼합한 모르타르의 중금속 용출특성을 알아보기 위하여 재령 14일에 강도 측정 후 파쇄된 공시체를 $5.0\sim 5.5\text{mm}$ 로 분쇄한 다음 Cd, Zn, Cu 및 Pb의 화학성분을 KSLT에 따라 분석한 결과이다. 폐기물 관리법 시행규칙에서 제한하고 있는 유해물질 함유 기준값⁴⁾은 표 4와 같으며, OPC 및 SG를 혼합하여 제조한 모르타르의 경우, 그 함량이 기준값보다 낮게 측정되었다. 특히, SG의 혼합률이 증가할수록 TA 자체의 중금속 측정 농도보다 감소하는 결과를 나타냈는데, 이러한 경향은 시멘트 수화반응과 포졸란 반응에 의해 중금속 이온이 chemical fixation과 encapsulation을 일으켰기 때문인 것으로 판단되며⁵⁾, 또한 내부 공극이 밀실하게 채워져 중금속이 안정화 및 고정화 되었기 때문인 것으로 판단된다.

표 4 국내 용출시험 판정기준

Items	Pb (mg/l)	Cu (mg/l)	As (mg/l)	Hg (mg/l)	Cd (mg/l)	Cr+6 (mg/l)	CN (mg/l)	Zn (mg/l)	organic matter (mg/l)	TCE (mg/l)	PCE (mg/l)
Standard	3	3	1.5	0.005	0.3	1.5	1	0.1	1	0.3	0.1

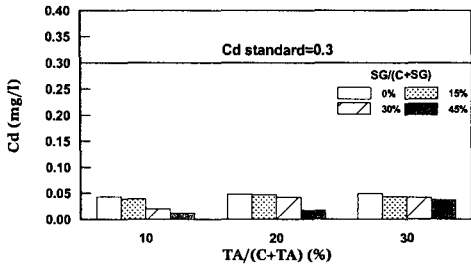


그림 5 Cd의 용출 특성

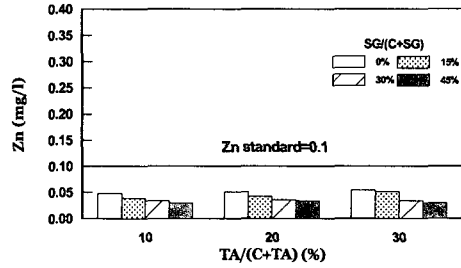


그림 6 Zn의 용출 특성

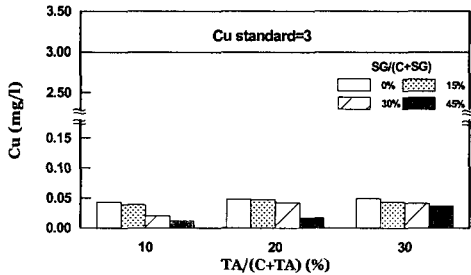


그림 7 Cu의 용출 특성

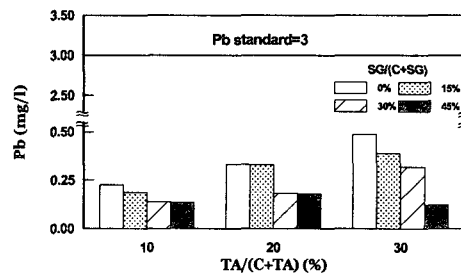


그림 8 Pb의 용출 특성

3.2.2. 응결특성

그림 9는 TA를 시멘트에 대하여 0, 10, 20 및 30%로 혼합하여 제조한 시멘트 페이스트의 응결시간 측정결과를 나타낸 것이다. 광미의 혼합률이 증가함에 따라 초결 및 종결 시간이 비례적으로 지연되고 있음을 알 수 있다.

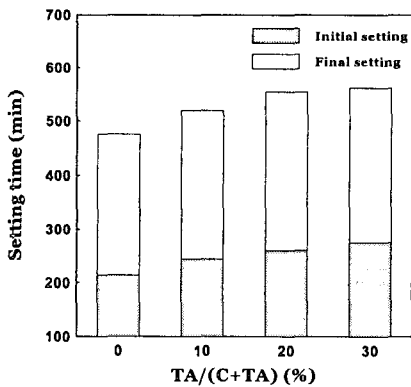


그림 9 TA를 혼합한 시멘트 페이스트의 응결시간

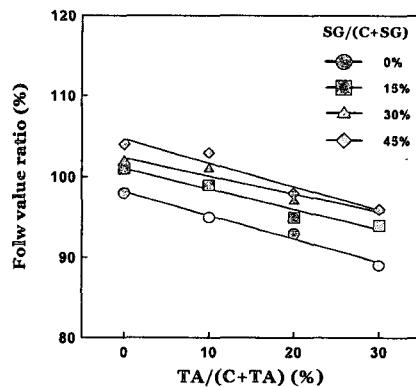


그림 10 TA 및 SG 혼합률에 따른 플로우비

3.2.3. 모르타르의 유동특성

그림 10은 TA를 시멘트 중량에 0, 10, 20 및 30%로 혼합한 후 SG를 각각 0, 15, 30 및 45%의 4수준으로 변화시켜 제조한 모르타르의 플로우 측정결과로서, TA의 혼합률이 증가할수록 플로우비가 비례적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, SG를 최대 45% 혼합할 경우 기준모르타르에 비해 약 6%

정도의 플로우비 증가 효과가 나타났는데 이러한 이유는, SG 표면의 불투성 산화피막 형성에 의한 윤택작용 때문인 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통해 TA를 분체로서 시멘트와 혼합할 경우 동일한 콘시스턴시를 얻기 위해서는 TA의 혼합률이 증가할수록 단위수량을 증가시키거나 SG를 혼합하여 사용하는 것이 적당할 것으로 판단된다.

3.2.4. 모르타르의 강도특성

그림 11은 TA를 시멘트 중량에 0, 10, 20 및 30%의 4수준으로 변화시켜 제조한 모르타르의 재령 3, 7, 14 및 28일 압축강도를 정리한 것이다. 그림 11의 결과 TA의 혼합률이 증가함에 따라 TA를 혼합하지 않은 기준모르타르에 비해 초기재령 및 기준재령일 모두 강도 저하현상이 나타났으며, 또한 TA를 최대 30% 혼합한 경우 약 50%정도의 강도저하현상이 나타남을 알 수 있다.

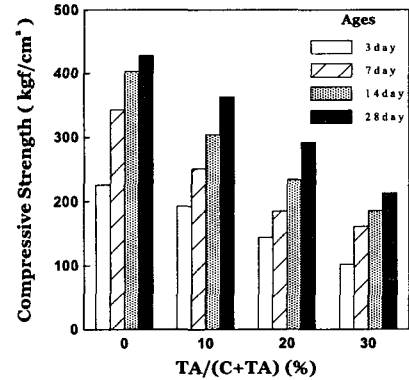


그림 11 TA 혼합률에 따른 압축강도

4. 결론

- 1) 상동지역 중석광산 광미의 XRD분석 결과 SiO₂ 성분이 가장 많은 규산염 광물로 나타났으며 이외에도 석영, 장석, 백운모 등과 같은 광물성분들이 조사되었다. 또한, 광미를 혼합한 시멘트 페이스트의 XRD분석 결과 시멘트 수화에 유해한 수화생성물은 나타나지 않음을 알 수 있다.
- 2) TA를 혼합한 모르타르의 Cd, Cu, Zn 및 Pb의 화학성분을 KSLT에 따라 분석한 결과, 폐기물 관리법 시행규칙에 제시된 유해물질 함유 기준값 보다 낮은 결과를 나타내었으며, SG의 혼합률이 증가할수록 중금속의 농도는 감소함을 알 수 있다.
- 3) TA의 혼합률이 증가함에 따라 응결시간이 지연되는 것으로 나타났으며, 모르타르의 플로우는 기준 모르타르에 비해 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, SG의 혼합률이 증가함에 따라 플로우비가 증가함을 알 수 있다.
- 4) TA의 혼합률이 증가함에 따라 TA를 혼합하지 않은 기준모르타르에 비해 강도저하현상을 나타내었으며, TA를 최대 30% 혼합할 경우 약 50%의 강도저하현상이 나타남을 알 수 있다.

이상의 실험 결과를 통하여 상동광산 광미는 재료분리저항성(점성)을 필요로 하는 자기충전 콘크리트(Self-Compacting Concrete ; SCC)용 분체로 사용하는 것이 적당할 것으로 판단되며, 상동광산 광미를 효율적으로 재활용 할 수 있어 대단위의 값싼 대체 혼화재료로서 적용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초 연구과제 「폐금속광 폐기물의 환경오염 평가 및 저감화 기술 개발」에 관한 일련의 연구로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박용하, “휴·폐광된 금속광산지역의 오염관리대책,” 한국 환경기술개발원, 1994, pp.14.
2. Kimball, B.A., Callender, E. and Axtmann, E.V, “Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River,” Colorado, U.S.A. Appl. Geochem, 1995, v.10, pp.285~306.
3. 최연왕, 정문영, “중석광 폐광미를 활용한 콘크리트의 특성에 관한 연구,” 한국자원공학회지, 1998, 제35권, p.90~95.
4. 폐기물 관리법 시행규칙 제 2조, 지정폐기물의 유해물질함유기준.
5. 윤석표, 고희화된 중금속 슬러지의 해수에 의한 용출특성, 한국과학기술원 석사논문, 1989.