

석분토를 이용한 지하공동의 친환경적 충전재 개발과 충전 및 재료특성 평가

Development of the Environmentally Friendly Filling Material for the Underground Cavities using the Rock-dust and an Assessment on Filling and Material Characteristics

마 상 준¹ Ma, Sang-Joon

김 동 민² Kim, Dong-Min

Abstract

Recently, underground cavities such as limestone cavity and abandoned mine give rise to a lot of damage in SOC facilities. But there are many difficult problems such as delay of the working terms and enormous economic losses in finding a new method and changing construction design. In this study, a new filling material for underground cavities was developed using the stone-dust classified as industry waste polluting environment. As a result of test, filling material properties was that a compressive strength was 34~60 kgf/cm², a change ratio in length was 0.268~0.776% and water absorption was 34.3~46.9%. Also as a result of suspended mass test and pH test, it was confirmed that the developed filling material has a characteristic of non-separating in water and it was an environmentally friendly material.

요 지

최근 지하에 존재하는 석회공동이나 폐광산 채굴적과 같은 지하공동에 의한 사회간접시설물의 피해 사례가 많이 보고되고 있다. 특히 국내 건설 현장에서는 지하공동으로 인해 기존 설계 변경 및 새로운 대책공법 마련으로 과도한 공사비가 지출되는 등 많은 어려움을 겪고 있는 상황이다. 본 연구에서는 산업폐기물로 처리되어 국내 환경을 오염시키고 있는 석분토를 이용하여 새로운 지하공동 충전재를 개발하였다. 개발된 충전재의 재료시험결과 압축강도는 34~60kgf/cm², 길이변화율은 0.268~0.776%, 흡수율은 34.3~46.9%로 나타났다. 또한, 현탁물 질량시험과 pH 시험을 통하여 개발된 충전재가 수중에서 분리되지 않는 성질이 있으며 환경친화적인 재료임을 확인할 수 있었다.

Keywords : Abandoned mine, Filling material, Limestone cavity, Non-separating in water, Rock-dust

1. 서 론

국가 산업 발전이 가속화되면서 국민의 산업활동 영

역 또한 확대되고 이러한 수요를 충족시키기 위해 도로, 철도, 교량 및 터널과 같은 사회간접시설물의 건설도 증가하고 있다. 그런데, 최근 지하에 존재하고 있는

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT, sjma@kict.re.kr)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT, dmkim@kict.re.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

불특정 다수의 공동(cavity)으로 인해 야기되는 지반침하 및 함몰 등으로 사회간접시설물들이 치명적인 피해를 입는 경우가 증가하고 있다(건기연, 2005). 지하공동은 석회암 지대에서 지하수의 영향으로 오랫동안 생성된 석회용식공동과, 과거 광산지대에서 산발적으로 개발되었으나 지금은 폐광이 되어 확인 혹은 확인되지 않는 폐광산으로 구분할 수 있다. 지하공동은 지반의 침하와 함몰, 폐광산 갱내수로 인한 환경오염, 상부구조물과 인명에 대한 피해 등으로 사회기반시설에 심각한 타격을 줄 수 있는 재해 요인임에도 불구하고, 국내에서는 아직까지 지하공동 보강공법에 대한 체계적인 정립이 부족한 실정이다. 또한, 현재 국내에서는 대책공법으로 충전법이 일반적으로 적용되고 있으나, 아직까지 충전공법에 대한 체계적인 정리와 충전재료에 대한 효과적인 적용 및 검증이 부족한 현실이다(건기연, 2005).

본 연구에서는 지하공동에 의한 국내의 침하사례를 조사 및 분석하였다. 그리고 산업폐기물인 석분토를 재활용하여 새로운 충전재를 개발하였고 충전재의 재료 특성을 평가하였다.

2. 지하공동에 의한 지반피해

2.1 지반피해 사례

국내에서 발생한 지하공동에 의한 지반피해 사례를 살펴보면, 폐광 채굴갱도의 함몰과 지하수 유출 및 석회암 공동의 영향으로 발생한 경상북도 문경시 지방도로 함몰 사례, 강원도 정선군 철도 노반의 함몰 사례, 강원도 삼척군 심포리 폐탄광 지역의 지반함몰 사례, 터널 건설시 상부에 폐광산 갱도가 발견되어 보강공법이 적용된 사례, 교량기초 시공시 하부에 석회공동이 발견되어 보강공법이 적용된 사례 등이 보고되고 있다(김병찬, 1999 ; 건기연, 2005). 특히, 1989년 석탄산업합리화정책으로 1989년부터 1997년까지 총 351개의 탄광이 폐광된 이래로 채굴적으로 인한 지반침하 발생, 산성 갱내 지하수 유출로 인한 지하수 오염, 강우로 인한 폐석 유실 등 환경적인 면에서도 많은 문제점이 노출되고 있다(문현구, 1997).

국외의 경우에는 지반함몰 규모가 국내보다 더 크며 인명피해 및 사회기반시설의 피해도 더 크게 나타나고 있다. 영국 Ripon Bypass의 침하 사례, 영국 West Midland 광산지대의 침하 사례, 이탈리아 베이온트 댐 건설현장

의 침하 사례, 중국 Guizhou 지역의 침하 사례, 미국 켄터키 댐의 보강 사례, 미국 플로리다주의 침하 사례 및 미국 버지니아 간선도로의 침하 사례 등이 대표적인 경우이다(건기연, 2005).

2.2 피해 사례 분석

그림 1은 본 연구에서 조사된 국내의 지반피해 사례 51건을 근거로 지반피해의 종류별 발생빈도를 나타낸 것이다. 구조물 시공 중 지하에 공동이 발견되어 설계변경 및 추가적인 보강을 실시한 경우가 가장 많았고, 지하공동의 함몰이나 붕락이 발생한 경우가 다음으로 빈도가 높았다. 그림 2는 구조물별 발생빈도에 대해 나타낸 것인데, 폐광산 지대에서의 발생빈도가 가장 큰 것으로 나타나 폐광산 지대에 대한 지속적인 관리와 보강대책이 요구됨을 보여준다(건기연, 2005). 그림 3은 조사된 사례에서 보강대책의 종류별 적용빈도를 나타낸 것인데, 충전재를 지하공동에 주입하여 충전시키는 공법이 가장 많이 적용되었으며, 교량에서는 공동 내에 말뚝

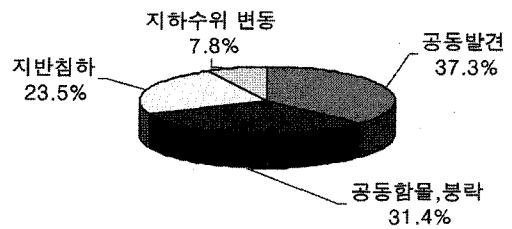


그림 1. 피해 종류별 발생 빈도

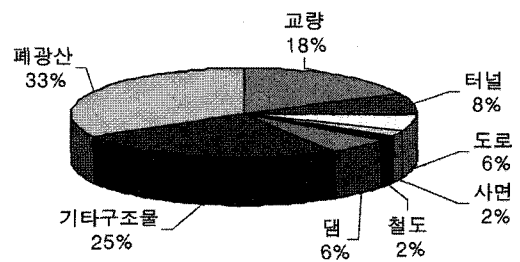


그림 2. 각 구조물별 지반피해 발생 빈도

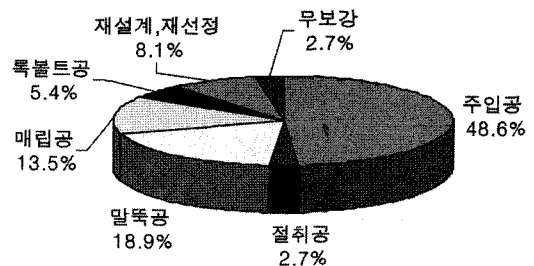


그림 3. 보강대책공법 적용 빈도

을 시공하여 교대의 하중을 기초에 전달시키는 말뚝공법이 많이 적용된 것으로 나타났다(건기연, 2005).

3. 지하공동 보강대책

지하공동에 대한 보강대책은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 지하공동 상부지반에 대한 보강이 주가 되는 국부보강법과 지하공동에 대한 보강이 주가 되는 충전법으로 구분할 수 있다. 그림 4는 일반적으로 현장에서 적용되고 있는 지하공동 보강대책공법의 종류를 보강 방법에 따라 구분하여 나타낸 것이다(건기연, 2005).

국부보강법은 지하공동의 일부분이나 상부 지반만을 보강하는 방법으로 공동상부 보강법, 깊은기초 보강법, 공동내에 건설되는 피어, 그라우트 기둥, 그라우트 케이스 등이 있다(문현구, 1999). 충전공법은 공학적 재료를 이용하여 지하공동을 충전하는 방법으로 수압식·공압식 충전법, 충전그라우트, 지하공동을 완전굴착 후 재충전하는 방법, 동적으로 함몰시키는 방법 등이 있다. 지하공동에 충전되는 재료는 상부지반 및 구조물의 하중을 공동상부 지반에 안전하게 전달할 수 있어야 한다. 또한, 환경적으로 안정되고 공학적 및 기술적으로 지하공동 내로 쉽게 주입되어 효과적인 지지를 할 수 있어야 한다.

지하공동에 의한 지반피해는 어느 하나의 원인에 의해 발생되기보다는 복합적인 원인에 의해 발생하는 경우가 대부분이다. 따라서 보강대책 또한 단일공법을 적용하기보다는 구조물의 유형, 공동 및 지반특성, 공법의 적용성 및 경제성 등을 고려하여 복합적인 보강대책 공법을 적용해야 한다.

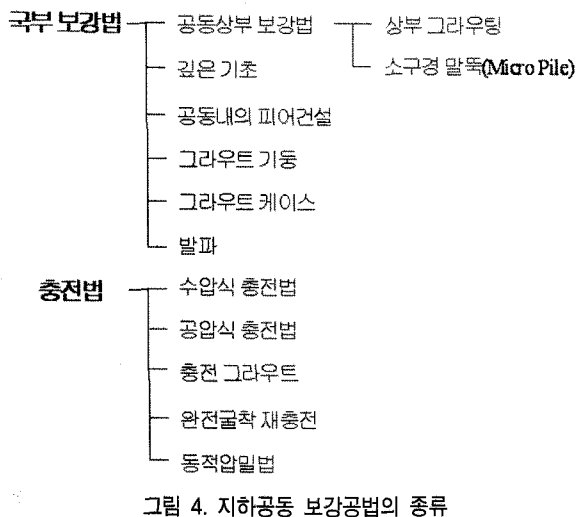


그림 4. 지하공동 보강공법의 종류

4. 산업폐기물을 이용한 지하공동 충전재 개발

본 연구에서는 경제적인 충전재 개발을 위해 기존 재료를 최대한 대체할 수 있으며, 경제성, 재료물성, 환경적인 무해성 및 시공성을 만족하는 재료들을 검토한 후 최종적으로 석분토를 이용하여 지하공동 충전재를 개발하기로 하였다. 그리고 개발된 충전재의 충전 및 재료 특성을 분석하였다.

4.1 석분토 발생현황 및 환경오염 실태

석분토는 석산에서 인공골재 생산을 위해 채취한 원석을 자갈 및 골재로 만드는 파분쇄 과정에서 발생되며, 그림 5는 석분토의 발생과정을 나타낸 것이다. 석분은 침전과정을 통해서 0.075mm 이하, 5~30%의 수분을 포함한 쇄석미분슬러지 부산물로 얻어지게 되며, 암질에 따라 다르지만 생산되는 인공골재의 건조중량 기준으로 약 20~30% 정도 발생되고 있다. 국내 건설현장의 자연골재 부족으로 인공골재 수요가 증가하고 있고, 그로 인해 석분토 발생량도 연간 80만~100만³ 이상 발생되고 있다. 이렇게 발생된 석분토는 산업폐기물로 분류되어 야적, 매립 등으로 처리되고 있다.

활용석산의 경우 석분토 야적으로 인해 주변의 농지와 상수원을 오염시키고 있으며, 주민 생수용 수원의 수질도 악화시키고 있는 실정이다. 더욱 큰 문제는 석재 생산업체의 소유 야적장이 포화상태에 이르렀고, 지역 이기주의로 인해 매립장 확보가 어렵다는 것이다. 이로 인해 공유지 및 농지를 불법으로 점거하여 석분토를 야

표 1. 충전재용 재료에 대한 검토(건기연, 2000)

재료	특징	비고
○○社 폐석회	유해성분 과다	염소량이 과다하여 철근콘크리트의 부식 가속화 가능성
○○社 제지 애쉬	유해성분 과다	pvc 소각으로 염소량이 과다 함유
폐콘크리트	골재크기 문제	파쇄공정 추가시 비용 과다 발생, 현재 최소 5mm 골재 생산
○○ 플라이애쉬	적합함, 국지적분포	작업성 좋음, 경제적, 현재 시멘트 대용품으로 사용중
○○社 dust	재료 운반문제	기준치에는 미달하지만 중금속 함유
○○社 제강슬래그	Fe ₂ O ₃ 과다	Fe ₂ O ₃ 과다함유, 파분쇄 공정 요구, 도로 노반재로 사용중
석분토	경제성, 유해성 없음, 전국적 분포	경제적, 재료운반용이, 작업성 좋음

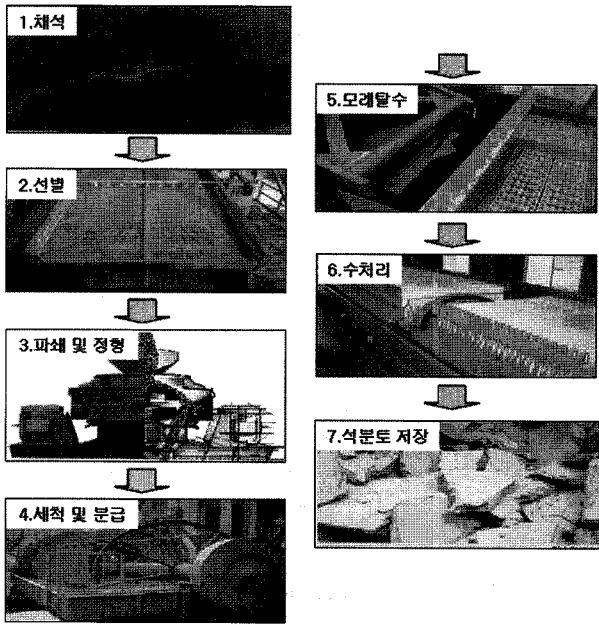


그림 5. 석분토의 발생 과정 모식도

적 및 매립하는 경우도 증가하고 있다. 따라서 새로운 재활용 기술의 체계적인 연구 외에는 계속적으로 증가하는 석분토 발생량을 감당하기는 어려운 상황이라고 할 수 있다.

4.2 충전재 개발을 위한 배합설계

4.2.1 초기배합설계

표 2는 실내시험에 사용된 개발충전재의 초기배합비를 나타낸 것으로 석분토액의 모르타르내 혼입율은 75, 80, 85, 90% 등 4가지로 하였다. 석분토는 석산에서 발

생될 때 수분을 함유하고 있는 케이크 형태로 배출되고 각 석산마다 함유비가 다르기 때문에, 그대로 사용하기에는 배합비 결정의 어려움과 혼합시의 문제점이 발생할 것으로 판단되었다. 따라서, 건조기에서 24시간 건조시킨 후 분쇄기로 미분쇄한 석분토에 일정량의 물을 혼입한 석분토액을 제조하여 실험에 사용하였다. 석분토액은 물과 석분토를 1:1.72 중량비율로 혼합하여 자체 비중을 1.6으로 고정하였다.

본 연구에서는 지하수로 침수되어 있는 지하공동에 대해서도 충전이 가능한 수중불분리 특성을 가지며, 주요 국소부위에 대한 충전만으로도 지반안정성을 확보할 수 있어 경제적 효과를 극대화할 수 있는 겔타입 조절이 가능한 충전재를 개발하였다.

충전재가 수중불분리 특성을 갖게 하기 위한 방법으로 혼화제를 사용하는 강제적인 방법보다는, 재료자체의 Thixotropy를 이용하여 수중에서 분리되지 않게 하는 방법이 경제적이며 석분토의 사용량도 증가시킬 수 있는 방법으로 판단된다. 속경(速硬)화혼화제인 CSA (Calcium Sulfo Aluminat)의 모르타르내 혼입율은 1.0, 1.4, 2.0, 2.5%의 4가지로, 수화반응을 촉진시켜 혼입량에 따라 재료의 경화속도를 조절할 수가 있다. 특히, 빠른 경화속도로 수중에서 흐트러짐을 방지할 수 있는 특성을 가지고 있다. CaCl₂의 분체내 혼입율은 1.0, 2.0, 3.0, 4.0%의 4가지로, 저온에서 시멘트의 수화를 촉진시켜 조강시멘트와 유사한 강도를 나타나게 하므로 지하공동이 침수되어 있는 곳에서의 사용이 적절할 것으로 판단된다.

고로슬래그의 분체내 치환율은 20%로 결정하였는데,

표 2. 실내시험에 사용된 개발충전재의 초기배합비

배합	S·W/M (%)	CSA/M (%)	CaCl ₂ (B×%)	BS (B×%)	Unit Weight (g/ℓ)				
					C	CSA	BS	S·W	CaCl ₂
1	75	1.4	2	20	594	40	149	1200	16
2	80	1.4	2	20	469	40	117	1280	13
3	85	1.4	2	20	343	40	86	1360	9
4	90	1.4	2	20	217	40	54	1440	6
5	80	1	2	20	479	29	120	1280	13
6	80	1.4	2	20	469	40	117	1280	13
7	80	2	2	20	454	57	113	1280	12
8	80	2.5	2	20	441	72	110	1280	12
9	80	1.4	1	20	469	40	117	1280	6
10	80	1.4	2	20	469	40	117	1280	13
11	80	1.4	3	20	469	40	117	1280	19
12	80	1.4	4	20	469	40	117	1280	25

주) S·W : 석분토액, CSA : 속경(速硬)화혼화제, CaCl₂ : 염화칼슘, BS : 고로슬래그, C : 시멘트
S·W/M : 석분토액의 분체내 혼입율

이는 충전재의 경제성 확보와 더불어 유동성 및 장기 내구성을 증가시키기 위해 혼입하였다.

4.2.2 초기배합비의 실내시험 결과

그림 6과 7은 석분토액 혼입율에 따른 기건 및 수중양생 시의 재령별 일축압축강도를 나타내는 것이다. 재령 7일, 28일 기건 및 수중양생 모두에서 석분토액 혼입율이 증가할수록 압축강도는 감소하였다. 기건양생의 경우 석분토액 75% 혼입시 28일 압축강도가 435kgf/cm²이고, 90% 혼입시에는 63kgf/cm²로서 85% 정도의 강도 저하를 보이고 있다.

지하공동 충전재는 공동을 충전하여 상부 지반에 작용하는 하중을 공동 하부지반에 전달하는 개념에서 접근하므로, 고가의 고강도 충전재를 사용하기보다는 적정 강도를 발휘하는 저가의 충전재를 사용하는 것이 더 유리하다고 판단된다. 국내에는 지하공동 충전재에 대한 물성규정이 없으나 하중을 전달하는 개념에서 터널 공동 뒤채움재와 유사하며, 뒤채움재의 압축강도는 10~20kgf/cm² 범위이다(건기연, 1998). 따라서, 경제적이며 저강도인 충전재 개발을 위해서는 석분토액의 모르타르 혼입율은 90%가 가장 적절할 것으로 판단된다.

그리고 이때의 압축강도는 40~50kgf/cm² 내외로 예상되며 하중 전달 개념에서 충분한 강도로 판단된다.

그림 8과 9는 석분토액의 모르타르 혼입율에 따른 생비중과 재령 7일, 28일 후의 비중 차이를 나타낸 것이다. 생비중은 재료를 배합한 직후의 비중으로서 석분토액 혼입율에 따라 1.79~1.94 정도이고, 7일 경화 후에는 1.62~1.88로 많은 차이를 보이지 않았다. 그러나 석분토액을 90% 혼입한 경우에는 재령 28일 비중이 1.44로 생비중 1.79에 비해 다소 많이 감소한 것을 알 수 있다. 충전재는 재료 특성상 시공성의 확보와 함께 공동 하부지반에 과도한 압력을 가하여 하부지반을 파괴해서는 안된다. 따라서, 단위중량이 작은 충전재료가 유리하다. 반면에 수중에서는 분리되지 않아야 하기 때문에 최소한의 단위중량은 유지하고 있어야 한다. 이러한 조건들을 모두 만족시키고 석분토 혼입량도 증가시켜 경제적 효과가 큰 석분토액 90% 혼입이 가장 적절한 배합으로 판단된다.

그림 10과 11은 CSA 혼입율에 따른 기건 및 수중양생 시의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 재령 7일, 28일 모두에서 CSA 혼입율이 증가할수록 압축강도는 감소하고 있다. 그러나, CSA 혼입율이 2.5%로 가장 많은 경우에도 압축강도는 50kgf/cm² 이상을 나타내고 있어 뒤채

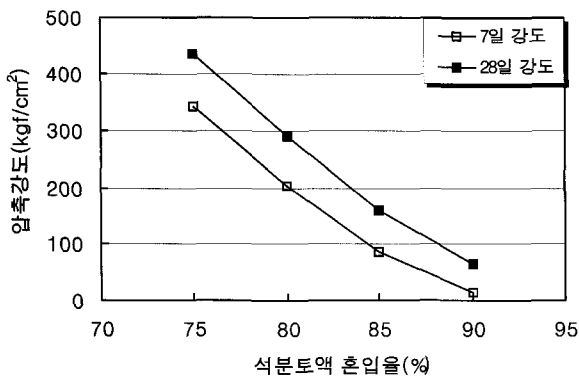


그림 6. 석분토액 혼입율에 따른 기건양생시의 압축강도

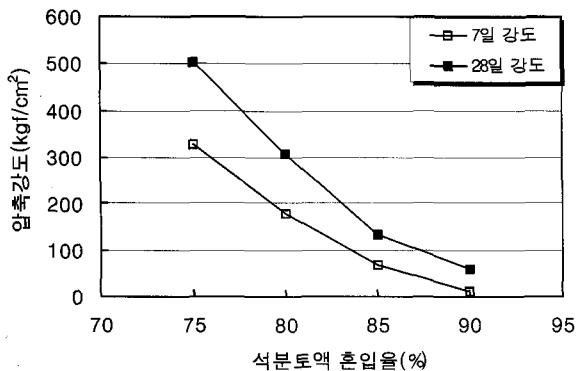


그림 7. 석분토액 혼입율에 따른 수중양생시의 압축강도

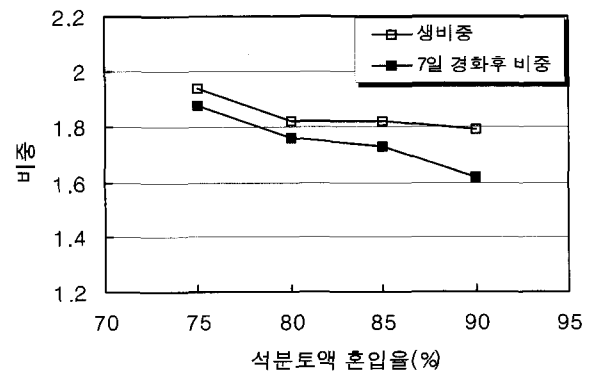


그림 8. 석분토액 혼입율에 따른 생비중과 7일 경화 후의 비중

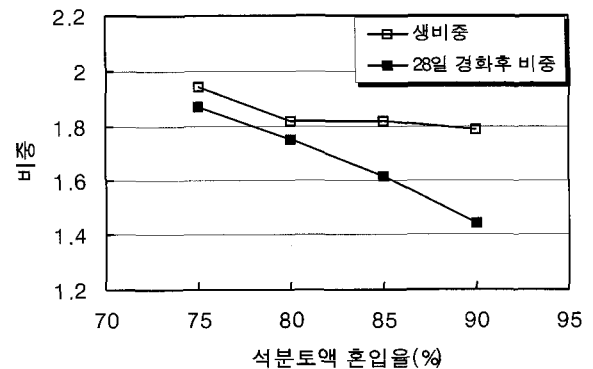


그림 9. 석분토액 혼입율에 따른 생비중과 28일 경화 후의 비중

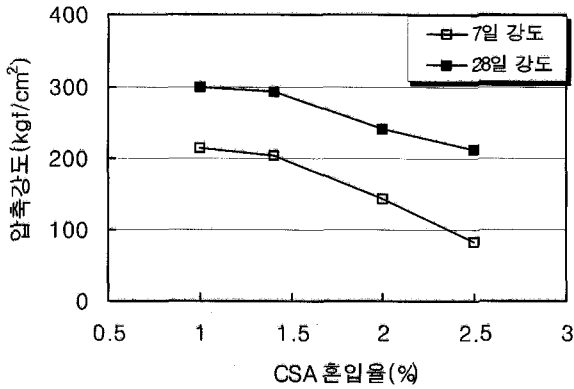


그림 10. CSA 혼입율에 따른 기건양생시의 재령별 압축강도

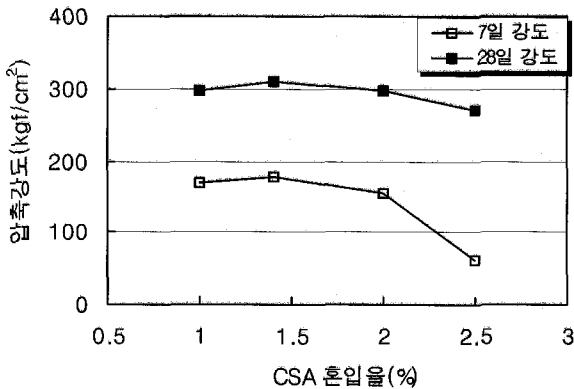


그림 11. CSA 혼입율에 따른 수중양생시의 재령별 압축강도

육재 물성규정을 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.

4.3 실내시험 결과를 통한 최종배합설계

실내시험에서 도출한 최종배합비는 표 3과 같다. 석

표 3. 실내시험 결과를 통해 결정된 개발충전재의 최종 배합비

배합	S·W/M (%)	CSA/M (B×%)	BS (B×%)	CaCl ₂ (B×%)	Unit Weight (g/ℓ)				
					C	CSA	BS	S·W	CaCl ₂
1	90	0	0	1	309	0	0	1440	3.1
2	90	12	0	1	272	37	0	1440	3.1
3	90	16	0	1	259	50	0	1440	3.1
4	90	20	0	1	247	62	0	1440	3.1
5	90	24	0	1	235	74	0	1440	3.1
6	90	12	10	1	241	37	31	1440	3.1
7	90	16	10	1	228	50	31	1440	3.1
8	90	20	10	1	216	62	31	1440	3.1
9	90	24	10	1	204	74	31	1440	3.1
10	90	12	20	1	210	37	62	1440	3.1
11	90	16	20	1	197	50	62	1440	3.1
12	90	20	20	1	185	62	62	1440	3.1
13	90	24	20	1	173	74	62	1440	3.1

주) S.W : 석분토액, CSA : 속경화혼화제, CaCl₂ : 염화칼슘, BS : 고로슬래그, C : 시멘트

분토액의 모르타르 혼입율은 초기배합에서 75, 80, 85, 90%로 고려하였는데, 실내시험 결과를 통해 석분토의 사용비율을 최대로 증가시켜 경제성을 만족시키고, 하중전달개념에서 충분한 강도를 갖는 혼입율 90%로 결정하였다. 석분토액은 초기배합에서와 같이 물과 석분토를 1:1.72의 중량비율로 혼합하여 비중을 1.6으로 고정하였다. CSA의 혼입율은 초기배합에서는 1.0, 1.4, 2.0, 2.5%로 설계하였는데, 혼입율을 증가시켜 개발충전재의 유동성을 감소시키고 충전재의 응결속도, 즉 겔타임을 조절하기 위해 최종혼입율은 12, 16, 20, 24%의 4가지로 결정하였다. 염화칼슘은 동계의 경우 저온에서 충전재의 수화반응을 촉진시키기 위해 최종배합에서 혼입율 1.0%로 결정하였다. 고로슬래그는 충전재의 경제성 확보와 더불어 유동성 및 장기 내구성을 증가시키기 위해 최종배합비에서 0, 10, 20%로 혼입율을 결정하였다.

5. 개발충전재의 충전특성 평가

5.1 수중불분리 특성

지하공동이 침수되어 있는 경우 충전공법을 적용할 때는 충전재가 수중에 주입되어야 하며 수중에서도 흐트러지거나 분리됨이 없이 경화되어야 한다. 현재 지하공동 충전재로 많이 적용되고 있는 시멘트 모르타르 및 시멘트 밀크는 공동이 침수되어 있는 경우 수중에서 분리되어 충전효과가 떨어지며, 기존 수중불분리 모르타르가 개발되어 있지만 지하공동과 같이 대량으로 타설

되는 경우에는 적합하지 않다. 본 연구에서는 개발충전재의 수중불분리 특성을 파악하기 위해 초기배합실험에서 기건양생과 수중양생을 실시하였고, 충전재가 수

표 4. 수중불분리혼화제를 첨가한 콘크리트의 품질기준(콘크리트 표준시방서, 1999)

항 목		기준값	
블리딩율(%)		0.1 이하	
응결시간 (시간)	초 결	5 이상	
	종 결	30 이하	
압축 강도	수중제작 공시체에 의한 압축강도(kgf/cm ²)	재령7일	130 이상
		재령28일	230 이상
	공기중제작 공시체의 압축강도에 대한 수중제작 공시체의 압축강도비(%)	재령7일	60 이상
		재령28일	70 이상
휨강도	공기중제작 공시체의 휨강도에 대한 수중제작 공시체의 휨강도비(%)	재령7일	50 이상
		재령28일	60 이상
수중 낙하 시험	현탁물질량(mg/ℓ)	150 이하 ¹⁾	
	pH	12.0 이하	

¹⁾ 현탁물질량은 상수도물인 경우의 기준값이다.

표 5. 상수도물 이외 물에서의 수중불분리 특성 평가 기준(KS MISO 787-9)

항 목	품 질
현탁 물질의 양	2g/L 이하
용해성 증발 잔류물의 양	1g/L 이하
염소 이온량	150ppm 이하
시멘트 응결 시간의 차	초결은 30분 이내, 종결은 60분 이내
모르타르의 압축 강도비	재령 7일 및 재령 28일에서 90% 이상

※ 상수도물 이외의 물 : 현탁물 질량시험의 방법에 따라 시험하여 상수도물 이외의 물의 품질 기준에 적합하여야 한다. 다만, 수도법의 수질기준에 따라 상수도물의 품질을 만족시키고 있는 경우에는 상수도물에 준하여도 좋다.

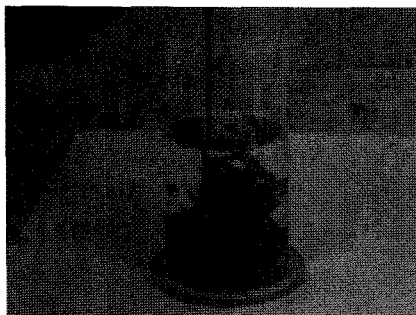


그림 12. 개발충전재의 수중낙하시험 모습

표 6. 개발충전재의 현탁물질량 시험결과(mg/L)

배합수준	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
결과	848	377	412	272	620	565	378	357	217	740	233	300	350

중에서도 기건상태와 차이 없이 경화하고 있음을 확인하였다. 이러한 특성은 속경화혼화제인 CSA의 작용으로 판단되며, CSA의 혼입율을 조절함으로써 개발충전재의 수중불분리 성질을 부여할 수 있음을 의미한다.

현재 국내 재료시험방법에서는 모르타르 재료의 수중불분리 특성 유무를 판별할 수 있는 정확한 시험방법이나 기준이 없는 실정이다. 일반적으로 수중불분리 특성을 파악하기 위해 적용되고 있는 것은 수중불분리성 혼화제를 사용한 콘크리트의 품질기준이다. 표 4는 콘크리트 표준시방서(대한토목학회, 1999)에 나와 있는 콘크리트용 수중불분리성혼화제의 품질기준인 KCI-AD-102를 나타낸 것이다. 이 표는 수중불분리성 혼화제를 첨가한 콘크리트의 수중불분리 성능을 평가하는데 적용하는 것이다. 본 연구에서는 개발충전재의 수중불분리 특성을 파악하기 위해 수중낙하시험을 실시하였고, 현탁물질량시험 및 pH 시험을 수행하였다. 그러나 표 4의 현탁물질량 기준값은 상수도물인 경우에 적용되는 기준인 반면, 지하공동 내에 침수되어 있는 지하수는 상수도물 이외의 물로서 구분되어야 한다. 표 5는 KS 기준에 명시되어 있는 상수도물 이외 물에서의 수중불분리특성 평가기준(KS MISO 787-9)을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 개발충전재의 수중불분리 특성을 표 4와 5에 준하여 평가하였다. 그림 12는 개발충전재의 수중낙하시험 모습이다.

5.1.1 현탁물 질량 시험

표 6은 개발충전재의 배합수준에 따른 현탁물 질량시험 결과이다. 표 5에 의해 상수도물 이외의 물에서 수중불분리 특성을 평가해 보면, 모든 배합에서 현탁물질량이 2g/L 이하로 나타나고 있어 개발충전재의 수중불분리 성능을 보여주고 있다. 특히 4, 9, 11번 배합이 수중분리에 대한 저항성이 높은 것을 알 수 있으며, CSA의 혼입율과 수중분리에 대한 저항성은 대체적으로 비례하는 것으로 나타나고 있다.

5.1.2 pH 시험

표 7은 개발충전재의 pH 시험 결과이다. 표 4에 의해 평가하면 모든 배합수준에서 pH가 12.0 이하로 나타나 개발충전재가 수중불분리 품질을 만족하고 있음을 알 수 있다.

표 7. 개발충전재의 pH 시험결과

배합수준	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
결과	11.6	10.6	10.6	10.8	10.1	10.8	9.7	10.5	10.3	11.4	10.9	9.5	9.7

5.2 겔타임 조절 특성

개발충전재의 겔 형성은 시간이 주요한 요소로 작용하므로 겔 형성을 확인할 수 있는 방법으로 플로우(Flow) 시험을 통한 경시변화를 관찰하였다. 그림 13은 개발충전재의 배합수준에 따른 경시변화를 각 시간 인자에 따라 나타낸 그래프이다. 1번 배합의 경우 시간의 경과에 따라 경시변화가 거의 없으나, 다른 배합들은 시간이 경과함에 따라 경시변화가 확연히 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 14는 CSA 혼입율이 2번부터 5번 배합의 경시변화를 나타낸 것이다. CSA 혼입율이 증가할수록 배합수준에 따른 플로우 값이 감소하며 경시변화가 작게 나타나고 있다.

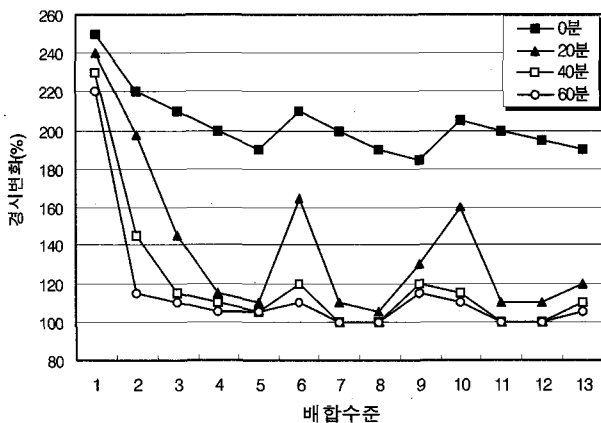


그림 13. 시간에 따른 개발충전재의 경시변화

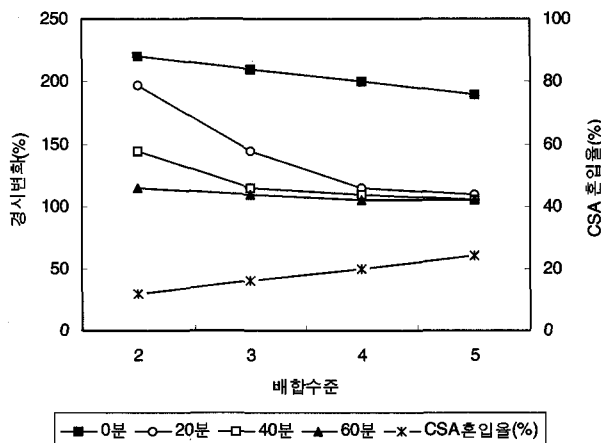


그림 14. CSA 혼입율에 따른 경시변화

이것은 CSA 혼입율이 증가하면서 개발충전재의 반응속도가 증가하고 유동성이 감소함을 보여준다. 이와 같은 결과는 최종배합 6번부터 13번까지 에서도 동일하게 나타났다.

그림 15는 CSA 혼입율이 12%일 때 BS 혼입율에 따른 배합수준의 경시변화를 나타낸 것이다. BS 혼입율이 증가할수록 시간 경과에 따라 경시변화는 작게 나타나고 있다. CSA와 BS 혼입율 변화를 통해 나타나는 경시변화는 개발충전재의 경화속도를 CSA와 BS로 조절이 가능함을 보여주며, 충전재 주입시 현장상황, 시공여건 및 지하공동의 환경에 따라 겔타임 조절이 가능할 것으로 판단된다.

6. 개발충전재의 재료물성 평가

6.1 압축강도 시험

표 8은 최종배합비에 따른 개발충전재의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 시험 결과 배합수준에 따라 재령 7일 압축강도는 3.1~21.6kgf/cm², 재령 28일 압축강도는 34~60kgf/cm²의 범위로 나타났다. 이러한 강도특성은 상부지반의 하중을 공동 하부지반에 전달하는 충전재의 개념을 충분히 만족시키는 것으로 판단된다.

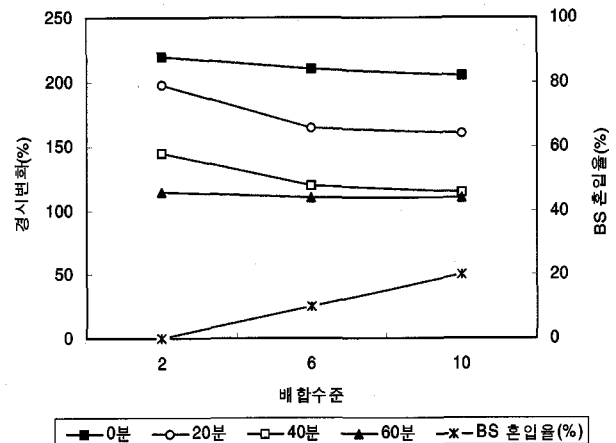


그림 15. CSA 혼입율이 12%일 때 BS의 혼입율에 따른 경시변화

표 8. 개발충전재의 배합수준에 따른 일축압축강도 시험결과(kgf/cm²)

배합수준	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
재령 7일	21.6	20.4	3.4	3.1	4.3	17	3.2	4.7	5.5	13	2.8	5.2	5.2
재령 28일	48	38	42	49	34	41	56	51	37	49	60	44	40

6.2 유해성분 용출시험

표 9는 개발충전재의 유해성분 용출시험 결과를 나타낸 것이다. 시험은 최종배합 11번에 대해서 실시하였다. 시험결과 개발충전재는 수중에서 유해성분이 전혀 검출되지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발한 충전재는 산업폐기물을 재활용하여 개발되었으나 지하수가 충수되어 있는 지하공동에 주입되었을 때, 충전재로 인한 지하수 및 지반의 오염 가능성이 전혀 없음을 의미하며 친환경적인 재료임을 보여준다.

6.3 길이변화를 시험

충전재가 지하공동에 주입되었을 경우 모르타르 경화에 의한 수분의 감소가 발생하고, 수분의 양에 따라 모르타르의 길이변화가 발생하게 된다. 표 10은 개발충전재의 배합수준에 따른 길이변화율 시험 결과인데 0.26~0.77% 범위에서 수축이 발생하였다. 따라서, 개발충전재의 수축에 의한 길이변화율은 미소하며 보강된 지하공동이나 상부 지반에 미치는 영향이 미비한 것으로 판단된다.

6.4 흡수율 시험

표 11은 개발충전재의 배합수준에 따른 흡수율 시험 결과인데, 흡수율은 34.3~46.9% 범위로 나타났다. 석

표 9. 개발충전재의 유해성분 용출시험결과(ppm)

시험항목	Pb	As	Cu	Cr ⁺⁶	Hg	Cd
11번 배합	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨	검출 안됨

표 10. 개발충전재의 배합수준에 따른 길이변화율 시험결과(28일 경과 후, %)

배합수준	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
결과	-0.59	-0.59	-0.77	-0.65	-0.38	-0.57	-0.74	-0.39	-0.26	-0.33	-0.37	-0.33	-0.30

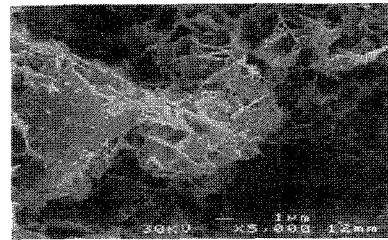
표 11. 개발충전재의 배합수준에 따른 흡수율 시험결과(%)

배합수준	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
결과	44.4	43.3	44.0	42.7	39.1	34.3	36.7	38.8	40.2	46.9	42.7	45.2	45.9

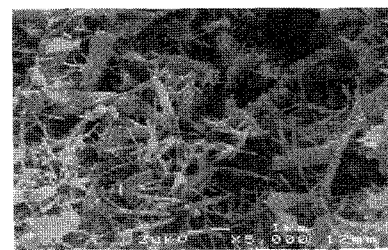
분토를 이용하여 개발된 지하공동 충전재는 주요 분체가 시멘트와 석분토만으로 구성되어 있어서 흡수율 또한 상대적으로 크게 나타나며, 기포 콘크리트와 비슷한 수준으로 판단된다.

6.5 화학분석 시험

그림 16은 개발충전재 10번 배합의 7일 및 28일 경과 후의 SEM 촬영사진이다. 7일 경과 후에는 시멘트의 초기 수화반응시 생성되는 물질인 에트링가이트(Ettringite)의 형성이 거의 일어나지 않고 있으나, 28일 경과 후에는 에트링가이트 형성이 월등히 많은 것을 확인할 수 있다. 이는 충전재가 조직내에서 수화반응을 통해 강도발현이 활발히 진행되었음을 보여준다.



(a) 7일 경과



(b) 28일 경과

그림 16. 개발충전재의 SEM 촬영사진

7. 결론

본 연구에서는 지하공동에 의한 지반피해 및 구조물 피해 사례를 조사 및 분석하고 지하공동 보강대책에 대해 살펴보았다. 그리고 산업폐기물로 처리되어 야적, 매립 등으로 국토환경을 훼손 및 오염시키고 있는 석분토를 이용하여, 지하공동의 충전보강공법에 적용될 수 있는 충전재를 개발하였다. 또한, 개발된 충전재에 대한 충전특성 및 재료물성 평가를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 산업폐기물로 분류되어 재활용이 전무한 석분토를 이용하여 환경오염을 줄이고 경제적이며 친환경적인 지하공동 충전재를 개발하기 위해 초기배합설계와 실내시험을 수행하였고 최종배합비를 결정하였다.
- (2) 석분토를 이용하여 개발된 충전재는 CSA와 BS의 혼입율을 변화시킨 경시변화 관찰을 통해 겔타임 조절 능력을 가지고 있음을 알 수 있었고, 현탁물 질량시험과 pH 시험을 통해 수중에서 불분리되는 특성이 있음을 확인하였다.
- (3) 개발된 충전재는 재령 7일 압축강도가 $3 \sim 21 \text{kgf/cm}^2$, 재령 28일 압축강도는 $34 \sim 60 \text{kgf/cm}^2$ 정도로 나타났다. 상부지반 하중을 공동 하부지반에 전달하는 충전재의 개념에서 적절한 강도를 가지는 것으로 나타났다.
- (4) 개발충전재의 유해성분 용출시험 결과 중금속 성분이 전혀 검출되지 않았고 지하수로 침수되어 있는

지하공동에 주입되었을 때에 지하수 및 지반의 오염 가능성이 전혀 없으며 친환경적인 재료임을 알 수 있었다.

- (5) 개발충전재의 재령 기간에 따른 SEM 촬영 결과 시간이 경과할수록 충전재 조직 내에서 수화반응이 활발하게 진행되고 있으며, 충전재 내의 에트링가이트의 형성을 통해 강도 발현이 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 시행한 청정생산기술사업의 지원 연구비로 수행된 것으로 연구를 가능케 한 산업자원부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김병찬 (1999), *광산침하 메커니즘 및 침하예측에 관한 연구*, 석사학위논문, 한양대학교, pp.15-32.
2. 대한토목학회 (1999), *콘크리트 표준 사양서*, 건설교통부.
3. 문현구 (1997), *폐광지역 지반침하 메커니즘 및 침하방지공법에 관한 연구*, 석탄산업합리화사업단, 한양대학교, pp.36-152.
4. 석탄산업합리화사업단 (1999), *고사리지역 지반보강공사지반조사 보고서*, pp.52-153.
5. 한국건설기술연구원 (1998), *국내 터널 설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구(1)*, 건설교통부, pp.347.
6. 한국건설기술연구원 (2000), *고속전철 구조물 안전성 기술 개발 (터널부문)*, 건설교통부, pp.124-126.
7. 한국건설기술연구원 (2005), *석분토를 이용한 지하공동의 친환경적 충전재 및 충전보강공법개발연구*, 산업자원부, pp.11-21, pp.28-90.

(접수일자 2005. 4. 15, 심사완료일 2005. 11. 15)