

석탄회를 활용한 저강도고유동화재의 일축압축강도 및 플로우 특성

Characteristics of Unconfined Compressive Strength and Flow in Controlled Low Strength Materials Made with Coal Ash

공진영¹ Kong, Jin-Young

강형남³ Kang, Hyoung-Nam

천병식² Chun, Byung-Sik

Abstract

Controlled low strength material (CLSM) is a flowable mixture and does not need to be compacted. It is produced by mixing portland cement, fly ash, fine aggregates, water and chemical admixtures. Sand is the most commonly used fine aggregates in the conventional CLSM, but it is getting more and more difficult to obtain sand in Korea. In this study, the characteristics of unconfined compressive strength, flow and applicability of a new CLSM that is produced by mixing of pond ash, fly ash, water, cement are examined. An unconfined compressive strength satisfies the standard unconfined compressive strength (0.5~1.0 MPa) were obtained when the mixture ratio of pond ash and fly ash is 30:70~70:30, cement ratio is 3.0~5.0%, and water content is 31~34%. The results of flow test indicate that the mixture ratio of pond ash and fly ash which satisfy the standard flow value (0.2 m) is 30:70~70:30.

요 지

저강도고유동화재는 다짐이 필요 없고 유동성이 큰 물질로 일반적으로 시멘트, 비회, 잔골재, 물, 혼화제 등을 혼합하여 만들어진다. 기존의 CLSM은 잔골재로 모래를 사용하고 있으나 때문에 모래가 점점 구하기 어려워지는 현재 우리나라 실정에서는 그대로 사용하기 곤란하다. 본 연구에서는 모래대신 매립회를 이용하여 매립회, 비회, 시멘트, 물의 혼합물로 만들어진 CLSM의 강도특성을 조사하여 사용가능성을 제시하고자 한다. 일축압축강도실험결과 기준 일축압축강도(0.5MPa~1.0MPa)를 만족하는 배합비는 매립회와 비회의 혼합비 0:100~70:30, 시멘트비 3.0~5.0%, 함수비 31~34%로 나타났다. 플로우시험 결과 매립회와 비회를 혼합하여 사용하는 모든 경우(매립회와 비회의 비 30:70~70:30)에서 기준 플로우값(0.2m)를 만족하였다.

Keywords : Controlled low strength material, Pond ash, Flow, Fly ash, Unconfined compressive strength

1. 서 론

국내 산업이 발전함에 따라서 산업부산물은 기하급수적으로 늘어가고 있으며, 대부분의 산업부산물들이

매립되고 있어 환경보호와 자원 재활용의 차원에서 커다란 문제로 대두되고 있는 실정이다. 한편, 석탄은 풍부한 매장량, 저렴한 가격, 공급원의 안정성 등으로 전 세계적으로 화력발전의 근간이 되는 원료로서 사용되

1 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Eng, Hanyang Univ.)

2 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng, Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

고 있으며 국내의 경우 석탄발전소, 열병합시설 증설 등으로 인하여 석탄회 발생량은 1999년 395만톤, 2007년 600만톤으로 증가하는 추세이다.

그러나 현재까지 석탄회를 재활용할 수 있는 용도는 시멘트원료, 레미콘 혼화재, 성·복토용 등으로 제한되어 있으며, 석탄회 중에서도 비회(fly ash, FA)는 재활용되는 반면, 저회(bottom ash)는 대부분 재활용되지 못하고 회처리장에 매립되는 실정이다. 이마저도 성질이 다른 저회와 비회를 바닷물에 같이 혼합해서 회처리장에 매립시키고 있기 때문에 매립된 석탄회(pond ash, PA)의 공학적 성질이 일정치 않아 재활용이 어렵다.

또한 최근 3년간 석탄회 재활용율은 2004년 67.9%, 2005년 59.4%, 2006년 67.7%으로 전체발생량에 비해 약 70%미만이며 현재 회처리장에 매립되어 있는 석탄회의 총량은 2008년 기준으로 약 7,200만톤에 달하는 것으로 추정된다(환경부, 2008).

따라서 현재 생산되는 석탄회의 재활용을 극대화시키기 위해 기존의 재활용 용도 이외에 대량으로 활용할 수 있는 방안 마련이 시급한 실정이다. 본 논문에서 석탄회 재활용 용도에 추가하고자 하는 저강도고유동화재(CLSM, controlled-low strength material)는 저강도콘크리트개념을 지반공학분야에 적용하여 만들어진 것으로 다짐이 필요 없고 유동성이 큰 물질이다. 일반적으로 잔골재(모래), 비회, 물, 시멘트, 혼화제 등을 혼합하여 만들어진다(ACI 229 Committee, 1994). 저강도고유동화재는 자기수평성(self-leveling), 자기다짐성(self-compacting), 유동성(flowability), 인위적인 강도조절, 시공 후 재굴착의 용이성 및 시공단계 단축에 의한 시공비 절감가능성

의 특징을 갖는다(ACI 229 Committee, 1994). 이러한 특성을 갖는 저강도고유동화재는 트렌치, 옹벽, 기초 등의 되메움재, 공동 채움재, 도로노상재 등의 용도로 토사 대신 사용되며 미국 등지에서는 산업화 되어 판매되고 있다. 최근 국내에서도 지반 및 도로분야에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다(원종필 2001, 조재운 2000, 박재현 등 2004, 이관호 등 2006 ; 2007, 임유진 등 2009).

그러나 기존의 저강도고유동화재는 잔골재로 모래를 사용하기 때문에 모래가 점점 구하기 어려워지는 현재 우리나라 실정에는 다소 맞지 않는 면이 있다. 만약 모래대신 매립회를 이용하여 매립회, 비회, 시멘트, 물의 혼합물로 저강도고유동화재를 개발하여 공유수면매립재, 각종 구조물 채움재, 공동채움재 등으로 사용하면, 매년 증가하는 매립석탄회량을 재활용할 수 있어 환경을 보호할 수 있고, 새만금간척공사와 같은 매립 및 건설공사에 필요한 토사 대체재를 공급할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 매립회, 비회, 시멘트, 물의 혼합물로 만들어진 저강도고유동화재의 특성을 조사하여 사용가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

저강도고유동화재의 공학적 성질을 결정짓는 대표적인 인자들은 일축압축강도와 플로우값으로 플로우는 유동성을, 일축압축강도는 재굴착이 가능한지 여부를

표 1. 저강도고유동화재의 일축압축강도 적용사례

| 저자 | 일축압축강도 |
|---|--|
| ACI Committe 229(1994) | · 2,068kPa(300psi) 이하 |
| ASTM(2002) | · 인력굴착시 : 345kPa(50psi) · 기계굴착시 : 1,380kPa(200psi) |
| TRB(2008) | · 350~1,000kPa(51~145psi) |
| NRMCA(1995) | · 굴착시 : 1,034kPa(150psi) 이하 · 비굴착시 : 1,034kPa(150psi) 이상 |
| Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus(2004) | · 28일 강도 : 620~1,310kPa(90~190psi) |
| Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus(2002) | · 낮은강도 : 300~700kPa(44~102psi) · 중간강도 : 700~3,500kPa(102~508psi) · 높은강도 : 3,500~8,000kPa(508~1160psi) |
| Amster K. Howard, Jennifer L. Hitch(1998) | · 28일 강도 : 500kPa(73psi) 이상 |
| Sumio Horiuchi(1996) | · 경량 성토재 : 490kPa(71psi) · 인공섬 구축 : 840kPa(122psi) |
| 원종필(2001) | · 인력굴착시 : 686kPa 이하(7kgf/cm ² 이하) · 기계굴착시 : 686kPa~1372kPa(7kgf/cm ² ~14kgf/cm ²) |

판단하는 기준이다(TRB, 2008). 플로우값은 ACI 229 Committee(1994)에서 최소한 0.2m(≒8in)이상이라고 규정하고 있으며 TRB(2008) 등 다른 선행연구자들도 같은 기준을 적용하고 있기 때문에 본 연구에서도 목표 플로우값을 0.2m 이상으로 정하였다.

일축압축강도는 연구자들에 따라 기준이 다르다. ACI 229 Committee(1994)에 따르면 저강도고유동화재는 일축압축강도의 범위는 28일 재령 기준으로 약 2~8MPa(≒300~1200psi)이다. ASTM(2002)에서는 백호 등과 같은 굴착 장비를 이용하여 재굴착을 수행하는 경우 필요한 최소한의 강도를 약 1.38MPa(200psi)로 규정하고 있다. 또한 Amon(1990)은 재굴착이 가능한 기준강도로 1.05MPa(150psi)이하를 제시하였고, Sumio Horiuchi(1996)은 인공섬 축조시 필요한 강도를 0.84MPa(122psi)로 산정한 바 있다. 이처럼 여러 선행연구자들이 제시한 일축압축강도기준은 굴착 여부, 기계굴착 또는 인력굴착 여부에 따라서 다소 차이를 보인다. 일축압축강도에 대한

선행연구사례를 조사하여 표 1로 나타내었다.

따라서 이와 같은 결과를 바탕으로 본 연구에서 개발하고자 하는 저강도고유동화재의 기준 일축압축강도를 재굴착이 용이하면서 소정의 강도가 발현될 수 있는 범위를 고려하여 0.5~1.0MPa(≒70~150psi)로 산정하였다.

2.2 배합비

최적 배합비를 산정하기 위해 예비실험을 실시한 결과, 석탄회 만으로는 기준일축압축강도에 만족하지 못하므로 시멘트의 첨가가 불가피한 것으로 분석되었다. 따라서 시멘트 함량을 최소화하기 위한 시멘트량의 범위를 전체중량 대비 약 1.5~8.0%로 선정하였고, 매립회와 비회만의 배합비는 매립 석탄회량의 매립회와 비회의 혼합비율이 일정치 않으므로 비회와 매립회만의 상대적인 중량비로 0:100, 30:70, 50:50, 70:30, 100:0으로 선정하여 폭 넓게 산정하였다. 또한 저강도고유동화

표 2. 저강도고유동화재 배합비

| Only PA: FA (%) | Mixture | Average water ratio 31% | | | | | Average water ratio 32.5% | | | | | Average water ratio 34% | | | | |
|-----------------|---------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | case 1 (cement ratio 1.4%) | case 2 (cement ratio 3.2%) | case 3 (cement ratio 4.9%) | case 4 (cement ratio 6.6%) | case 5 (cement ratio 8.2%) | case 6 (cement ratio 1.4%) | case 7 (cement ratio 3.1%) | case 8 (cement ratio 4.8%) | case 9 (cement ratio 6.4%) | case 10 (cement ratio 8.0%) | case 11 (cement ratio 1.3%) | case 12 (cement ratio 3.0%) | case 13 (cement ratio 4.7%) | case 14 (cement ratio 6.3%) | case 15 (cement ratio 7.9%) |
| 0 : 100 (A군) | PA | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | FA | 66.2 | 65.0 | 63.8 | 62.7 | 61.6 | 64.7 | 63.5 | 62.4 | 61.4 | 60.3 | 63.3 | 62.2 | 61.1 | 60.1 | 59.1 |
| | Water | 32.4 | 31.8 | 31.3 | 30.7 | 30.2 | 33.9 | 33.3 | 32.8 | 32.2 | 31.7 | 35.4 | 34.8 | 34.2 | 33.6 | 33.1 |
| | Cement | 1.4 | 3.2 | 4.9 | 6.6 | 8.2 | 1.4 | 3.1 | 4.8 | 6.4 | 8.0 | 1.3 | 3.0 | 4.7 | 6.3 | 7.9 |
| | Total | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 30 : 70 (B군) | PA | 19.9 | 19.5 | 19.2 | 18.8 | 18.5 | 19.4 | 19.1 | 18.7 | 18.4 | 18.1 | 19.0 | 18.7 | 18.3 | 18.0 | 17.7 |
| | FA | 46.3 | 45.5 | 44.7 | 43.9 | 43.1 | 45.3 | 44.5 | 43.7 | 42.9 | 42.2 | 44.3 | 43.5 | 42.8 | 42.0 | 41.3 |
| | Water | 32.4 | 31.8 | 31.3 | 30.7 | 30.2 | 33.9 | 33.3 | 32.8 | 32.2 | 31.7 | 35.4 | 34.8 | 34.2 | 33.6 | 33.1 |
| | Cement | 1.4 | 3.2 | 4.9 | 6.6 | 8.2 | 1.4 | 3.1 | 4.8 | 6.4 | 8.0 | 1.3 | 3.0 | 4.7 | 6.3 | 7.9 |
| | Total | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 50 : 50 (C군) | PA | 33.1 | 32.5 | 31.9 | 31.4 | 30.8 | 32.3 | 31.8 | 31.2 | 30.7 | 30.2 | 31.6 | 31.1 | 30.5 | 30.0 | 29.5 |
| | FA | 33.1 | 32.5 | 31.9 | 31.4 | 30.8 | 32.3 | 31.8 | 31.2 | 30.7 | 30.2 | 31.6 | 31.1 | 30.5 | 30.0 | 29.5 |
| | Water | 32.4 | 31.8 | 31.3 | 30.7 | 30.2 | 33.9 | 33.3 | 32.8 | 32.2 | 31.7 | 35.4 | 34.8 | 34.2 | 33.6 | 33.1 |
| | Cement | 1.4 | 3.2 | 4.9 | 6.6 | 8.2 | 1.4 | 3.1 | 4.8 | 6.4 | 8.0 | 1.3 | 3.0 | 4.7 | 6.3 | 7.9 |
| | Total | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 70 : 30 (D군) | PA | 46.3 | 45.5 | 44.7 | 43.9 | 43.1 | 45.3 | 44.5 | 43.7 | 42.9 | 42.2 | 44.3 | 43.5 | 42.8 | 42.0 | 41.3 |
| | FA | 19.9 | 19.5 | 19.2 | 18.8 | 18.5 | 19.4 | 19.1 | 18.7 | 18.4 | 18.1 | 19.0 | 18.7 | 18.3 | 18.0 | 17.7 |
| | Water | 32.4 | 31.8 | 31.3 | 30.7 | 30.2 | 33.9 | 33.3 | 32.8 | 32.2 | 31.7 | 35.4 | 34.8 | 34.2 | 33.6 | 33.1 |
| | Cement | 1.4 | 3.2 | 4.9 | 6.6 | 8.2 | 1.4 | 3.1 | 4.8 | 6.4 | 8.0 | 1.3 | 3.0 | 4.7 | 6.3 | 7.9 |
| | Total | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 100 : 0 (E군) | PA | 66.2 | 65.0 | 63.8 | 62.7 | 61.6 | 64.7 | 63.5 | 62.4 | 61.4 | 60.3 | 63.3 | 62.2 | 61.1 | 60.1 | 59.1 |
| | FA | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | Water | 32.4 | 31.8 | 31.3 | 30.7 | 30.2 | 33.9 | 33.3 | 32.8 | 32.2 | 31.7 | 35.4 | 34.8 | 34.2 | 33.6 | 33.1 |
| | Cement | 1.4 | 3.2 | 4.9 | 6.6 | 8.2 | 1.4 | 3.1 | 4.8 | 6.4 | 8.0 | 1.3 | 3.0 | 4.7 | 6.3 | 7.9 |
| | Total | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |

재는 함수량의 변화에 따라 유동성에 상당한 차이를 보이므로 예비실험을 통하여 함수량은 전체중량의 30~35%로 정하였다.

따라서 매립회와 비회의 혼합비 변화(매립회:비회=0:100, 30:70, 50:50, 70:30, 100:0), 시멘트비의 변화(약 1.4%, 3%, 5%, 6.5%, 8%), 함수비의 변화(약 31%, 32.5%, 34%)를 고려하여 총 75가지 경우에 대해 공시체를 제작하여 시험하였으며 배합비를 백분율로 정리하여 표 2로 나타내었다.

2.3 실험재료

2.3.1 석탄회

본 시험에서는 영흥화력본부에서 부산된 석탄회를 사

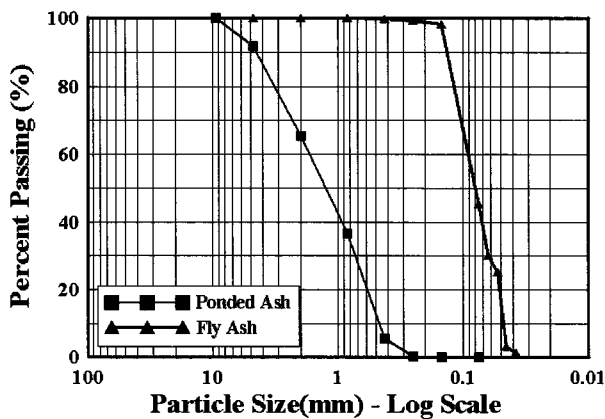


그림 1. 매립회와 비회의 입도분포

용하였고, 매립회의 경우 석탄회 매립장에 매립되어 있는 회를, 비회의 경우 재활용되는 정제회가 아닌 잔사회를 사용하되 매립되지 않은 석탄회를 대상으로 연구를 진행하였다.

저회와 비회의 공학적 성질은 입도분포, 비중 등에서 다르지만 현재 회매립장에는 저회와 비회를 별도의 구분 없이 같이 매립하고 있는 현실을 고려하여 매립회는 4번체(체크기 4.75mm) 통과량만을 잔골재 대용으로 사용하였다. 즉, 매립회는 잔골재로 간주하였는데 이는 비회의 경우 자경성이 있지만 매립회의 경우 예비실험 결과 자경성이 나타나지 않았기 때문이다.

연구에 사용된 석탄회의 입도분포곡선 및 물리적·화학적 특성을 그림 1과 표 3에 각각 나타내었다. 비중, 화학성분시험은 실험을 통해 결정하였고 강열감량(L.O.I.)은 석탄회를 제공해준 발전소의 자료를 사용하였다.

2.3.2 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 국내에서 많이 사용되는 ○○사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 품질 시험결과는 표 4와 같다.

2.4 실험방법

2.4.1 플로우시험

플로우 시험은 ASTM D 6103에 의거해 실시되었다.

표 3. 매립회와 비회의 물리 화학적 특성

| Physical properties | | | | | |
|--------------------------------|---------|------|--------------------------------|------|------|
| Specific gravity | | | L.O.I (%) | | |
| 매립회 (PA) | 비회 (FA) | | 매립회 | 비회 | |
| 1.84 | 2.23 | | 6.78 | 3.12 | |
| Chemical compositions (%) | | | | | |
| 성분 | 매립회 | 비회 | 성분 | 매립회 | 비회 |
| SiO ₂ | 50.6 | 52.8 | Al ₂ O ₃ | 24.7 | 22.7 |
| Fe ₂ O ₃ | 11.5 | 9.28 | CaO | 5.91 | 7.43 |
| K ₂ O | 1.75 | 2.33 | TiO ₂ | 1.72 | 1.55 |
| MgO | 0.85 | 1.17 | Na ₂ O | 0.37 | 0.57 |

표 4. 시멘트의 특성

| Fineness (m ² /kg) | Specific gravity | Stability (%) | Compressive strength (kPa) | | |
|-------------------------------|------------------|---------------|----------------------------|--------|--------|
| | | | 3days | 7days | 28days |
| 348.8 | 3.15 | 0.08 | 21,966 | 30,204 | 39,618 |
| Initial setting time (min) | | | 231 | | |
| Final setting time (min) | | | 407 | | |

CLSM 시료를 믹싱기로 혼합시킨 후 5분 이내에 직경 75mm, 높이 150mm인 원형실린더에 채우고 높이 30cm 까지 2~4초에 걸쳐 실린더를 들어 올린 후, 퍼진 시료의 최대반경과 이에 수직한 반경을 측정하여 평균을 구하였다. 측정 횟수는 1회로 하였다. 플로우 양 지름의 측정 차이가 5cm 이상인 경우는 재시험하였다.

2.4.2 일축압축강도시험

일축압축강도 시험방법은 ASTM D 4832에 준하여 실시되었다. 공시체는 배합비에 따라 저장도고유동화제를 배합하여 믹싱한 후 다짐 없이 슬러리 상태로 공시체에 주입하였고 $\varnothing 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 크기의 공시체를 배합비별로 각각 15개씩 제작하였다. 완성된 공시체는 16~27°C의 상온에서 72시간 동안 건조양생을 실시한 후 탈형하여 22±2°C의 수조에서 수중양생을 실시하였으며, 재령별(3일, 7일, 14일, 28일)로 3개 공시체의 일축압축강도를 측정하여 평균값을 구하였다. 시험기는 재하하중 3ton 용량의 변위제어 방식의 만능재하시험기

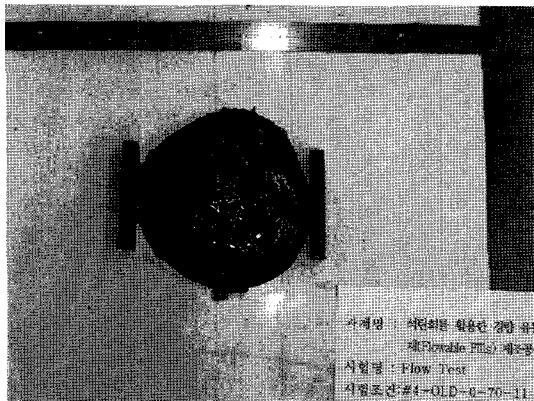
를 이용하였으며, 재하속도는 1mm/min로 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

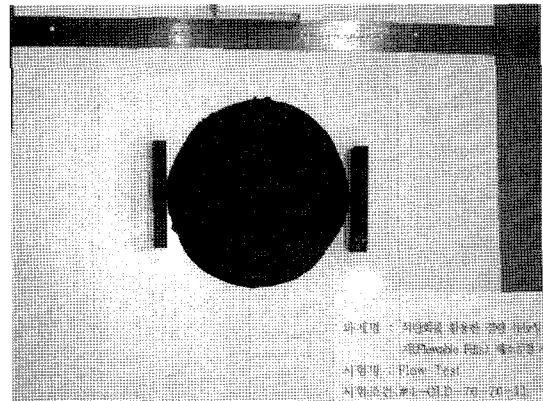
3.1 플로우

실험결과 매립회와 비회를 혼합하여 사용하는 경우(매립회:비회=30:70~70:30)는 모든 경우에서 기준값(0.2m)을 만족시켰으며 충분한 유동성이 확보되는 것으로 나타났다(표 5 참조). 매립회만을 사용한 경우(E군)는 플로우값이 기준치인 0.2m보다 작은 경우가 대부분이었으며 비회만을 사용하는 경우(A군)도 역시 끈끈한 성질을 보이며 혼합회하여 사용하는 경우(B~D군)보다 유동성이 감소하였다(그림 2 참조).

매립회와 저회의 혼합비에 따른 뚜렷한 경향은 찾기 어려웠으나 매립회 또는 저회만을 사용한 경우보다 이 둘을 혼합하여 사용한 경우 플로우값이 컸다(그림 3 참조). 매립회만을 사용하는 경우는 플로우 값이 대부분

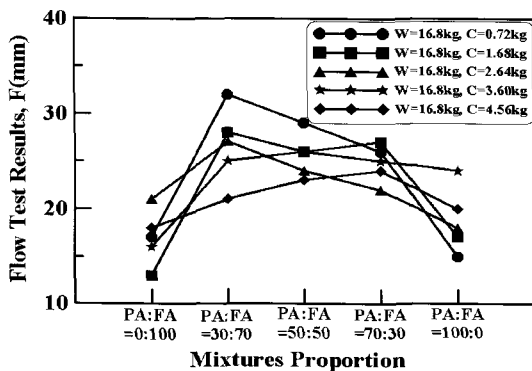


(a) A군의 case 3

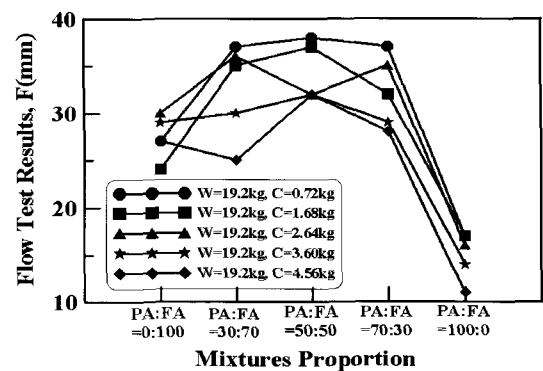


(b) D군의 case 3

그림 2. 플로우시험 전경



(a) 함수비 31%



(b) 함수비 34%

그림 3. 배합비에 따른 플로우 결과

0.2m 미만이었을 때 물과 매립회와 미시가 끝난 후에도 서로 혼합되지 않는 재료분리현상이 발생함을 육안으로 볼 수 있었다. 비회만을 사용한 경우는 혼합이 잘되지만 점성이 높아 유동성이 저하되는 것으로 확인되었다(그림 2 참조).

시멘트의 변화가 플로우에 미치는 영향을 알아보기 위해 함수비를 고정시킨 후 시멘트비를 1.4%에서 8.2%로 증가시켜 변화 양상을 분석하였다. 시험결과 플로우값은 시멘트량의 증감에 따라 증가 또는 감소의 경향이 나타나지 않고 다소 불규칙한 양상을 보였다(그림 4 참조). 따라서 1.4~8.2%의 시멘트비 변화는 플로우값의 변화에 거의 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

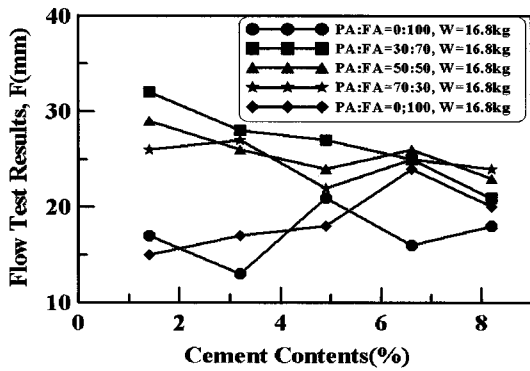
함수비의 영향을 파악하기 위해 시멘트비를 고정시킨 후 함수비를 30~35% 이내에서 변화시키면서 플로우시험을 실시하였다. 매립회만을 사용한 경우(E군)를 제외하고 함수비가 약 31%에서 34%로 증가함에 따라 플로우값은 약 3~10cm 증가하였고 매립회만을 사용한 경우는 함수비가 증가해도 플로우값은 약 1~9cm 감소하였다(그림 5 참조).

3.2 일축압축강도

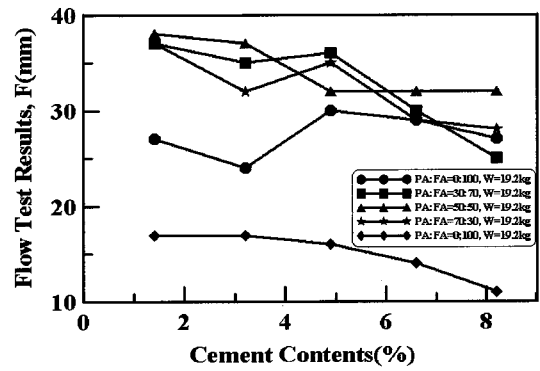
일축압축강도는 매립회와 비회 혼합비, 시멘트비, 함수비 등과 같은 각각의 요소에 의존하기 때문에 기준일축압축강도인 0.5~1.0MPa를 만족하는 배합비는 다양하다. 그 중에서 시멘트의 함량을 최소화하고 플로우값을 만족시키는 배합비 조건을 적정배합비로 제시하고자 한다. 매립회와 비회의 혼합비, 시멘트비, 함수비에 의한 일축압축강도변화를 요약해서 그림 6으로 나타내었다.

그림 6에서 y축에 평행하게 그려진 점선 중 하한선은 0.5MPa, 상한선은 1.0MPa를 의미한다. 상한선과 하한선 사이에 포함되어 있는 경우가 기준일축압축강도를 만족하는 경우이며 이 때의 배합비는 실험결과 매립회와 비회의 상대적 혼합비 0:100~70:30, 시멘트비 3.0~5.0%, 함수비 31~34%에 해당되는 것으로 나타났다.

기준을 만족하는 배합비 중에서 시멘트 함량을 최소화할 수 있는 최적배합비는 매립회와 비회의 혼합비 (PA:FA) 70:30, 시멘트비 3.1%, 함수비 31%이며 이는

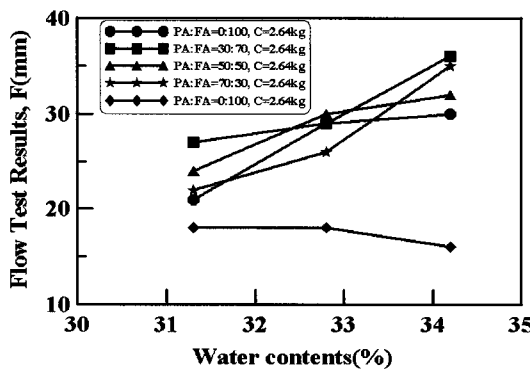


(a) 함수비 31%

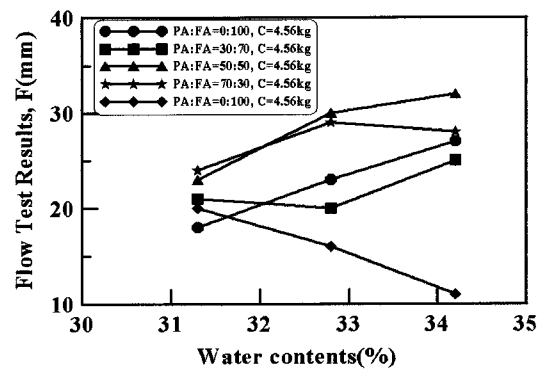


(b) 함수비 34%

그림 4. 시멘트 변화에 따른 플로우시험결과



(a) 시멘트비 5%



(b) 시멘트비 8%

그림 5. 함수비 변화에 따른 플로우시험결과

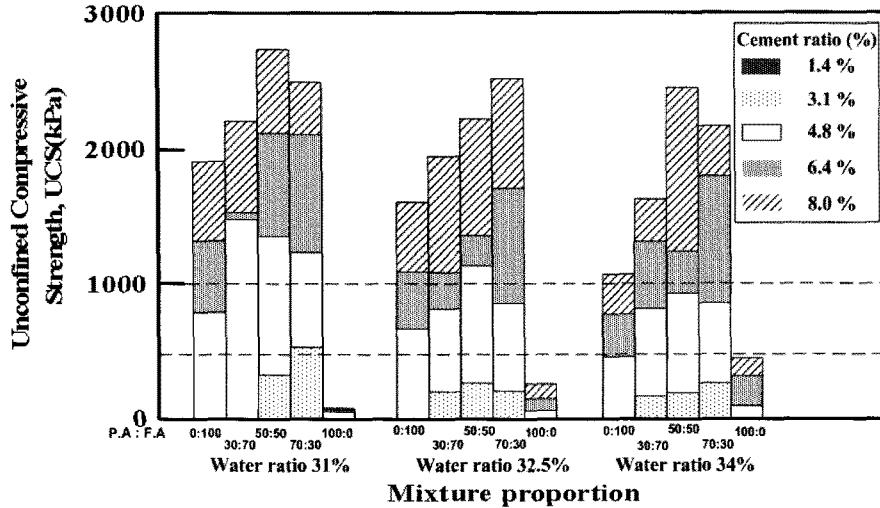


그림 6. 매립회와 비회의 혼합비, 시멘트비, 함수비에 따른 일축압축강도

전체중량대비 매립회가 약 42%, 비회 18% 내외에 해당한다. 그림 5의 왼쪽하단 함수비 31%에 해당하는 군 중에서 PA:FA=70:30인 경우이면서 점선으로 시멘트비 3.1%를 표시한 경우가 해당된다. 최적배합비는 시멘트함량을 최소화하여 경제적인 뿐만 아니라 회사장에 야적되어 있는 매립회를 상대적으로 더 많이 사용할 수 있는 배합이다. 현재 국내에서 발생하는 석탄회의 매립회와 비회 매립비는 70:30 정도로 매립회가 많이 매립되고 있는 실정이며 가능한 매립회를 많이 사용해야 할 필요성이 있기 때문이다.

따라서 기준강도를 만족하는 범위 내에서 일축압축강도, 경제성, 환경성을 고려하여 최적배합비로 매립회와 비회의 혼합비 70:30, 시멘트비 3.1%, 함수비 31%가 적정한 것으로 사료된다.

실험 case별로 살펴보면 기준 일축압축강도(재령 28일 기준 0.5~1MPa)를 만족하는 경우는 A군의 case 3 (0.81MPa), case 8(0.68MPa), case 14(0.78MPa), B군의 case 8(0.81MPa), case 13(0.81MPa), C군의 case 13(0.95MPa), D군의 case 2(0.55 MPa), case 8(0.89MPa), case 13(0.87 MPa)이었다.

또한 시멘트비를 약 1.4%로 배합한 경우 공시체를 수중양생시켰을 때 비회와 매립회의 혼합비에 상관없이 모두 공시체가 수중에서 재료분리되는 현상이 발생하였다.

함수비의 영향을 살펴보기 위해 배합비, 시멘트량을 고정시킨 후 함수량을 증가시켜 실험을 실시하였다(그림 7 참조). 실험결과 함수비가 31~34% 증가함에 따라 일축압축강도가 감소하는 것을 알 수 있으며 평균적으로 함수비가 1.5% 증가할 때 일축압축강도는 약 150~

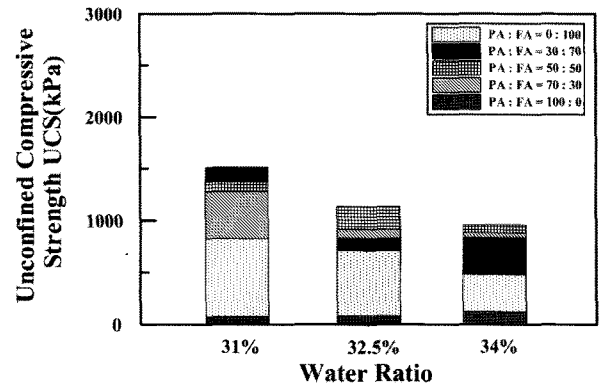


그림 7. 함수비 변화에 따른 일축압축강도변화

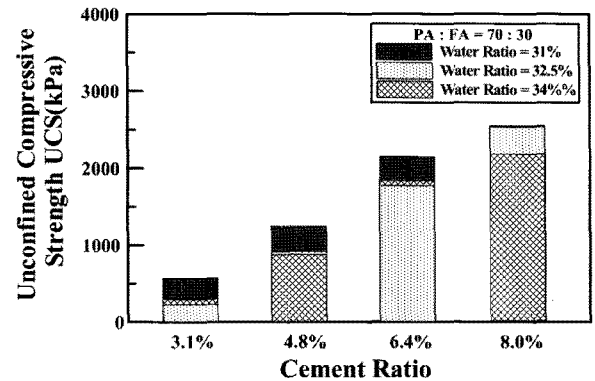


그림 8. 시멘트비 변화에 따른 일축압축강도변화

300kPa 감소하였다.

시멘트비의 영향을 살펴보기 위해 배합비, 함수비를 고정시킨 후 시멘트비를 증가시켜 실험을 실시하였다(그림 8 참조). 시멘트비가 약 3%에서 8%로 증가함에 따라 일축압축강도는 약 0.3MPa에서 2.5MPa로 증가하였다. 평균적으로 시멘트비를 약 1.5% 증가시킬 경우

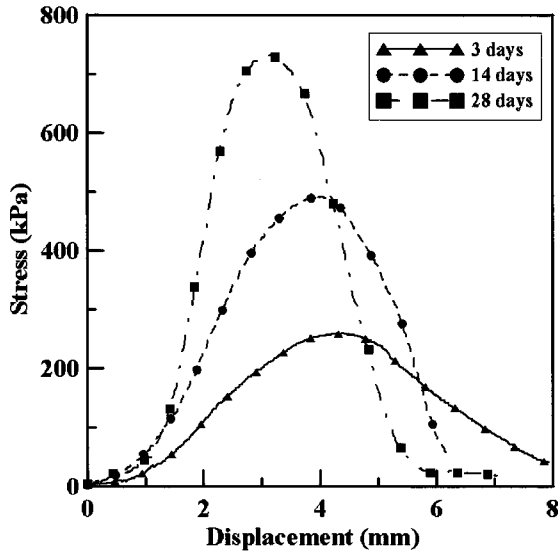


그림 9. 재령일에 따른 응력변위곡선(D군 case 3)

일축압축강도는 평균 약 300~600kPa 정도 증가하였다.

저강도고유동화재는 일반적으로 초기재령에서는 흙과 유사한 강도특성을 보이다가 재령일이 증가하면 시멘트와 유사한 거동을 하는 것으로 알려져 있다(TRB, 2008). 본 연구에서도 그림 9와 같이 재령3일에서는 응력변위 곡선이 재령 28일에 비해 흙과 유사한 거동을 보이며 보다 연성적인 거동을 보인다. 그러나 양생일수가 지날수록 콘크리트와 유사한 응력변위곡선 양상이 나타나며 항복강도도 약 2~4배 증가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 석탄회 매립장에 매립되어 있는 석탄회를 대량 유효활용하고자 석탄회를 활용한 저강도고유동화재의 강도특성을 조사하여 사용가능성을 제시하고자 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 플로우시험 결과 매립회와 비회를 혼합하여 사용하는 모든 경우(매립회:비회=30:70~70:30)에서 기준값(0.2m)을 만족시켰으며 충분한 유동성이 확보되는 것으로 나타났다.
- (2) 일축압축강도실험결과 기준 일축압축강도(0.5MPa~1.0MPa)를 만족하는 배합비는 매립회와 비회의 혼합비 30:70~70:30, 시멘트비 3.0~5.0%, 함수비 31~34%로 나타났다. 일축압축강도, 경제성, 환경성을 고려하여 최적배합비로 매립회와 비회의 혼합비 70:30, 시멘트비 3.1%, 함수비 31%가 적정한 것

으로 사료된다.

- (3) 시멘트비를 1.5% 증가시킬 경우 일축압축강도는 평균 약 300~600kPa 증가하였고 함수비가 1.5%증가하면 일축압축강도는 평균 약 150~300kPa 감소하였다.
- (4) 재령3일에서는 응력변위 곡선이 재령 28일에 비해 흙과 유사한 거동을 보이며 보다 연성적인 거동을 보인다. 그러나 양생일수가 지날수록 콘크리트와 유사한 응력변위곡선 양상이 나타나며 항복강도도 약 2-4배 증가하였다.

본 논문의 연구결과를 통하여 모래를 사용하지 않고 석탄회, 물, 소량의 시멘트를 이용하여 개발한 저강도고유동화재가 기존의 저강도고유동화재를 대체하여 사용가능함을 알 수 있었다. 본 논문에서는 일축압축강도 및 플로우 결과만을 다루었고 환경영향평가에 대한 실험 등이 진행 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부가 지원하고 한국에너지기술평가원이 시행하는 전력산업연구개발 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 박재현, 이관호, 조재윤, 김석남 (2004), “현장발생도 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형”, 한국지반공학회논문집, 제20권 3호, pp.129-139.
2. 조재윤, 이관호, 이인모 (2000), “유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 용벽뒹개움재 연구”, 한국지반공학회논문집, 제16권 4호, pp.17-30.
3. 원종필, 이용수 (2001), “Bottom Ash를 혼합한 저강도 고유동 충전재의 특성”, 콘크리트학회논문집, 13권 3호, pp.294-300.
4. 이관호, 송창섭 (2006), “현장발생토사 재활용 유동성채움재를 이용한 지하매설관의 거동평가”, 한국도로학회 논문집, 제8권 2호, pp.1-12.
5. 이관호, 김주득, 현성철, 송용선, 이병식 (2007), “해양준설토를 CLSM을 이용한 지하매설관 변형특성”, 한국방재학회논문집, 제 7권 5호, pp.129-137.
6. 임유진, 서창범 (2009), “화강풍화토를 이용한 CLSM의 공학적 특성평가”, 한국방재학회논문집, 제9권 3호, pp.19-26.
7. 환경부 (2008), “제4차자원재활용기본계획”, 환경부, pp.100-102.
8. ACI Committee 229 (1994), “Controlled Low Strength Materials (CLSM)”, American Concrete Institute, 229R-2. pp.1-12.
9. Amster K. Howard, Jennifer L. Hitch (1998), “The design and application of controlled low-strength materials (flowable fill)”, ASTM international”, pp.156-162.
10. Amon, J. A., Controlled Low-Strength Material, The Construction

Specifier, December 1990, pp.98-101.

11. ASTM (2002), "Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders", ASTM D 4832, American Society for Testing Materials.
12. ASTM (2004), "Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material (CLSM)", ASTM D 6103, American Society for Testing Materials.
13. NRMCA (1995), "Guide Specification for Controlled Low Strength Materials (CLSM)", National Readymixed Concrete Association, pp.5-7.
14. Sumio Horiuchi (1996), "石炭灰の水域埋立てへの利用に関する研究", 堀内澄夫 pp.97-131.
15. Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus (2002), "Properties of Flowable Slurry Containing Wood Ash", Report No. CBU-2002-14, pp.5-9.
16. Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus (2004), "Properties of Flowable Self-Compacting Slurry Using Quarry By-Products and Ponded CCPs", Publication SP, v.221, pp.523-538.
17. TRB (2008), "Development of a Recommended Practice for Use of Controlled Low-Strength Material in Highway Construction", NCHRP Report 597, U.S. Transportation Research Board, pp.3-59.

(접수일자 2009. 11. 30, 심사완료일 2010. 1. 26)