

석탄재의 강도 특성에 관하여

The Strength and Characteristic of PCC Bottom Ash

신 상 옥¹⁾ · S. Kumar²⁾ · 정 태 옥³⁾ · 신 방 웅[†]

Shin, Sanguok · Sanjeev Kumar · Jung, Teuok · Shin, Bangwoong

ABSTRACT : Coal combustion by-product (CCB) bottom ash, obtained from burning of pulverized coal, has physical properties which are similar to that of natural sand with particle sizes ranging from fine gravel to fine sand. Several studies have been completed to utilize pulverized coal combustion (PCC) bottom ash as a partial or full replacement of fine aggregate in cement concrete products. The objectives of this study were to develop air-entrained concrete composites using PCC bottom ash from burning of Illinois coal and to demonstrate the use of these composites on real-world projects. The results obtained show that the compressive, splitting-tensile, and flexural strengths of concrete composites is slightly lower than that of conventional concrete are early curing ages. However, after 60 days of curing, the strength of concrete composites is either equal to or slightly higher than that of an equivalent conventional concrete. The concrete composites showed lower resistance to chloride ion penetrability than that of an equivalent conventional concrete at early curing ages. However, after 28 days of curing, concrete composites showed better resistance to chloride ion penetrability compared to that of an equivalent conventional concrete.

Keywords : Pulverized coal combustion, Bottom ash, Ion penetrability

요 지 : 석탄재는 석탄이 타고 남은 재료써 물리적 성질은 고운 모래정도이며 입자의 크기는 고운 자갈에서 고운 모래 사이이다. 몇 가지 연구에서 석탄재는 건설재료의 하나인 모래와 대체 할 수 있다고 알려져 있다. 본 연구의 목적은 주입 공기 혼합 재를 사용한 석탄재의 혼합토를 직접 건설현장에 사용 하고자 하는데 있다. 실험 결과에 의하면 석탄재 혼합토는 압축, 인장 및 휨 강도가 양생기간 초기에는 표준 혼합토보다 낮은 수치를 보이지만 60일이 지난 후엔 표준 혼합토보다 강도가 더 커졌다. 또한 Chloride 이온 통과 실험에서 석탄재의 시료토가 양생 초기에는 적은 저항력의 수치를 보였지만 시간이 흐를수록 강한 저항력을 보였다.

주요어 : 연소된 석탄의 분해, 저회, 이온 침투

1. 서 론

산업 폐기물인 석탄재를 건설 재료로 사용하여, 환경보존은 물론 성토 또는 매립에 사용 할 수 있는 토질 특성인 강도에 대해 연구하였다. 석탄재는 화력발전소에서 석탄이 타고 남은 찌꺼기로서 두 가지 형태의 석탄재가 있다(천병식, 1992). 첫 번째는 저회(bottom Ash)이고 다른 것은 비회(Fly Ash)다. 본 연구에서 쓰인 석탄재는 저회(bottom Ash)로 미국 일리노이주 Springfield City Water Light & Power 발전소에서 생성된 석탄재이고, Illinois PCC Class "F" 건조된 저회로 구분이 된다(Kumar 등, 2003; Kumar 등, 2004). 석탄재의 성질을 개선한 후에 건설공사 재료로 사용하고자 시멘트 및 석회를 혼합하여 도로의 성토재료(GAI, 1988), 연약지반의 안정제 등에 활용할 수 있다(Kumar 등, 2003; Lovell 등, 1997; Seals 등, 1972). 또한 다른 건설재료와 달

리 단위체적중량이 작고 내화성이 크므로 지반의 지지력이 다소 부족한 곳에 성토재나 매립재로 사용 가능성에 대한 강도 특성을 규명하였다. 예비 실험을 통해서 실험 기간 및 방법을 결정하였으며, 실험은 배합 설계, 양생, 강도, 투수 실험 등의 과정으로 이루어졌다. 180일 동안의 양생된 실험공시체를 대상으로 압축강도, 인장강도 및 휨강도 등의 실험을 수행하였고, 투수능력을 평가하였다.

2. 실험 재료

시험에 사용된 재료는 시멘트(Portland Cement Type I), 자연사, 자갈(crushed limestone), 물(tap water) 및 주입 공기액(micro-air)을 사용했다.

1) 정희원, RA Department of Civil Engineering Southern Illinois University at Carbondale

2) 정희원, Professor Department of Civil Engineering Southern Illinois University at Carbondale

3) 정희원, 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

† 정희원, 충북대학교 대학원 토목공학과 교수(E-mail : bwshin@chungbuk.ac.kr)

2.1 석탄재의 성질

실험에 사용된 석탄재는 Illinois PCC(Pulverized Coal Combustion) Class “F” 건조된 저회로 City water, Light & Power 발전소에서 생성된 석탄재로 Illinois Elkhart 석탄광산에서 운반 되어 온 것이다. 콘크리트에 일정한 물 배합을 하기 위하여 저회를 건조시켰다. 건조는 선풍기를 사용하였으며, 정기적으로 삼을 이용하여 뒤집어 주었다. 건조시킨 저회의 함수비는 1% 보다 작아야 된다. 습윤 콘크리트(Fresh concrete)를 혼합할 때는 항상 일정한 슬럼프 값을 유지하기 위하여 이와 같은 작업이 필수이다. 건설현장에서 쓰이는 저회는 공기건조 방법을 사용하였다. 많은 양의 석탄재를 바람으로 건조(fan-dry)를 하면 대기 공해를 유발하므로 적절한 방법이라 할 수 없다. 비가 많이 오는 장마철엔 비닐 덮개로 덮어 주어서 물의 접촉을 최대한 막아주는 것이 배합설계에 도움을 줄 수 있다. 석탄재의 함수비는 콘크리트를 혼합하기 전에 실험 하여 어느 정도 물의 양을 필요로 하는지 확인 할 수 있다.

2.1.1 화학 성질

실험에 사용된 저회는 silica, alumina, and iron이 주 화학성분이고 calcium, magnesium, sulfates와 적은양의 또 다른 화학재가 함유 되어 있다. 표 1은 저회에 함유되어 있는 석탄재들의 성분을 보여주고 있다.

2.1.2 물리적 성질

이 석탄재의 물리적 성분중 크기는 잔자갈 보다 작고 가는 모래 보다 크며, 보통 실트나 점토 정도의 크기로 나타났다. 체 가름시험 결과 양호한 입도 상태였으며, 표 2는 Illinois PCC 건조된 저회의 물리적 성질을 보여주고 있다.

표 1. 일리노이 PCC 건조된 저회의 화학적 성질(Alarcon, 2002)

Chemical Composition of Illinois PCC Dry Bottom Ash Compound	Composition
Silicon Dioxide (SiO ₂)	46.84
Aluminum (Al ₂ O ₃)	14.36
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	18.65
Total (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	79.85
Calcium Oxide (CaO)	7.24
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.33
Magnesium Oxide (MgO)	1.04
Loss on Ignition	4.21
Free Moisture	N/A
Available Alkalizes as Na ₂ O	1.73
Potassium Oxide (K ₂ O)	1.20
Others (P ₂ O ₅ , TiO ₂ , and etc.)	2.10

2.2 주입 공기액 혼합제(Micro Air)

주입 공기액 혼합제(Micro Air)는 콘크리트 양생과정에서 생길 수 있는 공기 공간(air-pocket)을 막아 주고 날씨와 같은 주변 환경적인 면에서 발생 할 수 있는 문제점을 막아준다. 저회의 입경분포가 작은 관계로 콘크리트의 공기 함유량이 적다. 이에 주입 공기액 혼합제를 이용하여 공기 함유량을 늘려 문제점을 해소할 수 있다. 장마철에는 강우로 인하여 콘크리트 속에 물이 있는 경우 공기구멍이 적은 콘크리트는 겨울철에 부피가 팽창한 얼음이 이동할 간극이 없어 콘크리트에 압력을 가하여 파손이 발생한다. 이에 주입 공기액 혼합제가 간극을 만들어 주어 이러한 문제점을 해소할 수 있다.

3. 실험

모든 실험은 ASTM(America Standard Test Material)의 과정에 따라 실시하였다(ASTM, 1989; ASTM, 1990a, ASTM, 1990b). 실험 과정은 셋으로 나눈다. 혼합, 양생 그리고 강도 실험으로 구성되어 있다.

3.1 실험 공시체 제작(casting) 과정

준비과정 중에 하나로 콘크리트를 제작하기 전에 실험 기간을 설정하고 혼합토 양을 결정하였다. 실내 실험은 제한된 공간과 규모가 작은 혼합기계로 인하여 많은 양의 혼합토를 만들 수 없으므로 본 실험전에 실험 기간의 설정을 위해서 28일 동안 실험할 공시체를 제작하였다. 일반 혼합토의 특성 중에 강도의 70% 정도가 7일 동안의 양생 과정에서 발현되고, 강도의 90%의 정도가 28일 양생으로 이루어진다. 이 실험에서 석탄재를 이용한 시험모형이 28일 이후에도 더 강한 강도로 양생이 되기에 실험 기간을 180일로 결정했다. 많은 양의 혼합토는 레미콘로 보급 받았고, 혼합이 끝난 후 슬럼프 시험과 공기 함유량 실험을 하였으며, 적당한 슬럼프와 공기함유량을 갖는 혼합토를 제조하

표 2. Illinois PCC 건조된 저회의 물리적 성질(Alarcon, 2002)

Property		Value
Specific Gravity	Oven Dry	2.04
	Saturated Surface Dry	2.52
Absorption (%)		10.00
Organic Impurities		None
Clay Lump & friable Particles (%)		9.80
Plasticity		None
Fineness Modules		2.67

였다. 많은 양의 혼합토를 만들기 때문에 쇠막대 대신 진동 다짐을 사용하였다. 많은 양의 혼합토를 빠른 시간 내에 실험모형제작을 하지 못하면 바로 배합된 혼합토가 굳어버리므로 빠른 시간 내에 완성해야 한다. 보통 100개의 공시체를 만드는데 소요된 시간이 30분 정도 소모 되었다.

실험실에서 공시체를 만들 경우 쇠막대를 사용하여 다짐을 하였다. 원주형 공시체의 경우 세 층으로 구분하고 매 층 마다 25번씩 다짐을 하였다. 25번의 다짐 후 9-10번 정도 가볍게 옆면을 두드려 주고 마지막 층에선 표면을 매끈하게 처리하였다. 표면처리가 잘 되지 않으면 강도 실험 결과에 영향을 주기 때문에 주의해야 한다. 직각기둥 공시체의 경우에는 두 층으로 구분하였고 원주형 공시체를 만들 때와 같다.

3.2 슬럼프(slump) 시험

슬럼프 콘을 적당한 양의 물로 적신 후 콘크리트를 삼분의 일로 채운 다음, 쇠막대로 25번의 다짐을 한 후 다시 삼분의 일의 양을 붓고 반복하였다. 이후 슬럼프 콘을 조심스럽게 들어내고 실험재의 높이를 측정하였다. 물 함유량이 많을 경우 실험재의 높이가 낮을 것이고, 물 함유량이 적을 경우 반대 현상이 나타난다. 용도에 따라서 배합 설계를 한다. 기초공사에는 물을 조금 사용하여 강도를 높이고 슬래브에는 물을 많이 사용하여 작업 효율성을 높일 수 있다. 이 실험에서 슬럼프 목표는 $114 \pm 13\text{mm}$ 이다.

3.3 습윤 콘크리트의 공기량 실험(Air-content of fresh concrete test)

공기 함유량(air-content test)은 습윤 콘크리트에 얼마 많은 공기가 들어 있는 지를 조사하는 것이다. 실험 방법은 두 가지 방법이 있으며, 본 연구에서는 압력 방법을 사용하였다. 먼저 에어미터를 적당한 양의 물로 적신다. 에어미터에 삼분에 일을 넣고 25번을 다짐을 한 후 9-10번 정도 옆면을 가볍게 두드린 후 위 층도 동일 한 방법으로 수행하였다. 실험재가 다 차면 덮개를 덮고 밸브로 물을 집어넣고 압력을 가한 후 압력을 측정하였다. 공기량 단위는 %(퍼센트)이고 3-5%의 공기량을 목표로 한다.

3.4 압축 및 인장 시험

이 실험에 사용 된 기계는 캐나다에 있는 M & L Testing Machines of Edmonton 회사에서 제작한 것이다. 압축 및 인장 강도 실험은 예비 실험과 현장 실험으로 실시하였다. 모든 예비 실험은 준비, 양생 및 실험을 실험실에서 이루어 졌고, 현장 실험은 모든 공시체를 건설현장에서 제작하여 양생과 실험을 실험실에서 실시하였다.

3.4.1 예비 실험

각기 다른 시료토의 배합으로 세 가지 종류의 혼합토를 만들어 강도 측정을 한 후 그 결과를 비교하였다. 석탄재를 사용하지 않은 혼합토는 표준 배합으로(CM으로 명칭) 다른 두 혼합은 100%의 저회와 50%의 저회를 모래 대신 사용하여 혼합토를 제작하였다. 이후 100%의 저회는 B100로 하고, 50%의 저회는 B50의 용어로 명명하였으며. 각 배합은 표 3과 같다.

실험 공시체 크게 두 가지 종류로 만들어 실험을 수행하였다. 원주형 공시체와 직각기둥 공시체이다. 원주형 공시체의 크기는 $152 \times 305\text{mm}$ 이고, 직각기둥 공시체의 크기는 $102 \times 102 \times 356\text{mm}$ 이다. 원주형 공시체는 압축강도, 인장강도 및 투수 실험을 하였고, 직각기둥 공시체는 휨 강도 실험을 하였다.



그림 1. 실험 모형 제작과정

표 3. 배합구성

Mix Designation	Binders (%)		Fine Aggregates (%)		Remarks
	Portland Cement	PCC Fly ash	PCC Dry Bottom ash	Natural Sand	
CM	100	0	0	100	Control Mix
B50	100	0	50	50	
B100	100	0	100	0	

3.4.2 본 실험

예비실험의 결과로 장기간의 실험 기간을 설정 후 다수의 공시체를 제작하였다. 본 실험의 기간은 180일이며 다수의 공시체를 만들기 때문에 콘크리트를 다짐을 할 때 진동 다짐을 하였다. 이 실험에서 쓰인 공시체 크기는 152 × 305mm 이다. 본 실험은 공시체 크기를 크게 해서 좀 더 나은 결과를 얻고자 하였다. 압력은 힘에서 면적을 나눈 것이기에 공시체 크기가 중요한 것은 아니지만 실제 공사에선 면적 단위가 크기 때문에 공시체의 크기를 102 × 203mm가 아닌 152 × 305mm로 결정하였다. 모든 실험은 예비 실험과 흡사하며 시간과 공시체 크기만 다르다.

4. 실험 결과 분석 고찰

4.1 단단한 시료토의 간극실험(hardened air and air-void structure tests)

습윤 콘크리트에서 공기 함유량 실험을 했을 때 3-5%의 공기 함유량을 유지한 혼합토가 굳은 후에 다시 검사를 하여 공기 분포가 잘 이루어 졌는지, 적당한 양의 공간이 있는지를 측정하였다. 배합에 따른 혼합토의 공기 함유량은 표 4와 같다.

그림 2, 그림 3 및 그림 4와 같이 주입 공기액 혼합제를 사용하여 만든 실험모형에서 검은색 원형의 모양이 기포이다. 공기의 간극은 습윤 콘크리트 상태보다 줄어들지만 같은 비율로 분포 되어 있음을 알 수 있다. 혼합토 속에 있는 공기양이 적당히 있고 적당한 공기의 양은 혼합토를 오래 보존 할 수 있는 요소 중에 하나이다.

4.2 압축 강도 실험

압축강도 실험의 공시체 크기는 152 × 305mm로 강도를 실험 수행하였다. 양생과 강도 실험 기간은 3, 7, 28, 60, 90 및 180일로 결정했다. 그림 5 에서와 같이 28일 동안의 양생기간 강도가 빨리 발현되었다. 28일 이 이후에도 강도가 증가하지만 28일 이전에 비하여 서서히 증가한다.

CM의 경우 강도가 빨리 발현하지만 28일 이 지난 후에는 B50의 강도가 CM의 강도 발현보다 빨라져서 60일 이후 부터는 다른 실험공시체 강도보다 더 커진다. 양생기간이 짧



그림 2. 콘크리트 혼합재료 B50의 공기-간극 분포

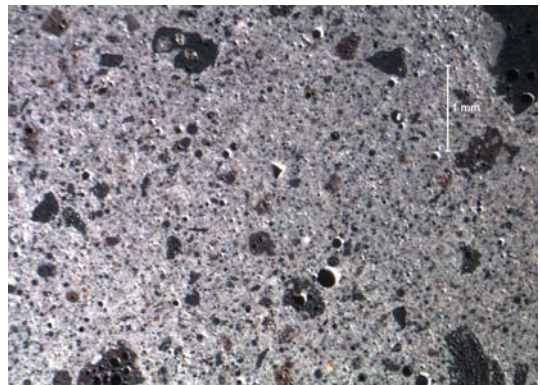


그림 3. 콘크리트 혼합재료 B100의 공기-간극 분포



그림 4. 콘크리트 혼합재료 CM의 공기-간극 분포

표 4. 공기함량

Sample	CM	B50	B100
Fresh Air Void Content (%)	4.3	6.5	3.9
Hardened Air Void Content (%) - Total	3.5	5.4	2.8
Entrained Air Void Content (%) - = 0.04 inch	3.2	4.5	2.3
Entrapped Air Void Content (%) - > 0.04 inch	0.4	0.8	0.4
Air Void / inch	0.004	0.003	0.004

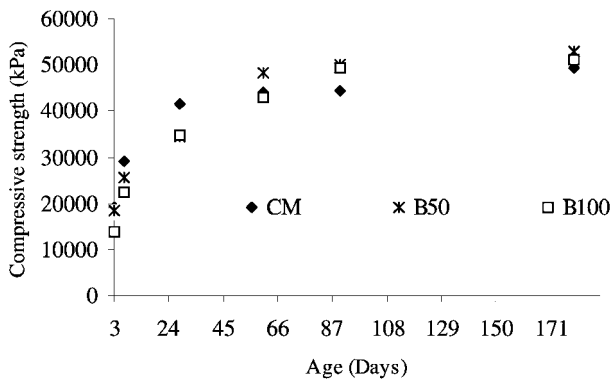


그림 5. 원주형 공시체 152×305mm의 양생기간 변화에 따른 압축강도

은 콘크리트는 수화 작용에 의해서 강도가 강해진다. 따라서 콘크리트가 양생할 때 물을 뿌려 주거나 젖은 물수건으로 물을 공급해주는 것이 강도가 큰 콘크리트로 만들 수 있게 도와준다. 실험실에서 양생을 할 경우 25°C의 온도를 유지시킨 물탱크에 넣어주면 충분한 물의 공급으로 인해 높은 강도를 획득할 수 있다. B50가 28일 이 후에 Pozzolanic Reaction으로 인해서 강도가 CM보다 강도가 더 크며, 90일의 양생기간동안 B100의 강도가 CM보다 조금 크게 나타났다.

4.3 인장 강도 실험

인장 강도 실험에서 사용된 공시체는 152 × 305mm 이다. 콘크리트의 인장 강도는 압축 강도에 비해 아주 적으므로 양생 3일의 경우 강도 실험을 하지 않았다. 3일간의 실험을 뺀 나머지 실험 기간은 압축 강도 실험과 같다. 인장강도 실험 결과도 압축 강도 실험의 결과와 아주 유사하게 나타났다. 28일간의 실험에서 CM의 강도가 큰 반면, 28일 지난 후엔 B50의 강도가 다른 두 공시체보다 크게 나타났다. 또한 B100의 강도가 CM 보다 더 큰 강도로 측정 되었다.

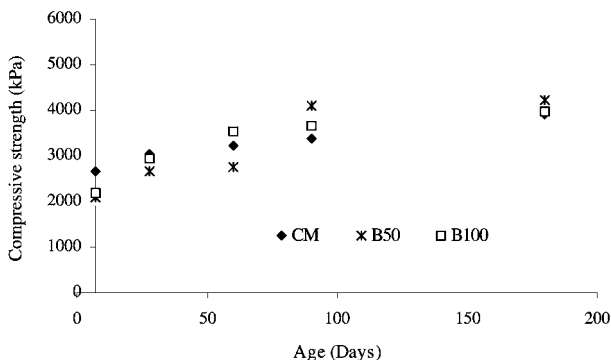


그림 6. 원주형 공시체 152×303mm의 양생기간에 따른 인장강도

4.4 휨(Flexural) 강도 실험

이 실험의 공시체 크기는 102 × 102 × 356mm이고 삼등분 실험(a third-point loading test)을 수행하였다. 양생 기간은 7, 28 및 60일이며, 그림 7과 같이 압축과 인장강도 실험의 결과와 비슷하게 나타났다. 실험 결과는 그림 7을 참조하기 바란다.

4.5 투수(Permeability) 실험

이 실험은 혼합토의 투수능력을 확인 하는 실험으로 혼합토에 물이 잘 스며들면 철근을 녹슬게 해서 인장 강도를 약하게 한다. 내구성이 강한 혼합토는 물의 흐름이 잘 이루어지지 않아야 좋은 혼합토라 할 수 있다. 실험의 결과를 빨리 알기위해 전기의 전도력을 사용하여 실험시간을 단축시키는 방법으로 원주형 공시체(102 × 203mm)를 51mm 두께로 자른 후 한 시간 동안 진공상태에 놓는다. 진공상태에서 물을 밸브를 통해 진공 통으로 흡입 시키면 콘크리트의 공기 공간으로 물이 스며들어 불순물을 없애주면서 그 공간에 물이 채워져 실험에 좋은 결과를 가져 올수 있다. 이 실험에 쓰이는 화학용액은 3% sodium chloride solution과 1.2% sodium hydroxides solution을 쓴다. 전도력(electrical conductance) 실험을 위하여 그림 9와 같이 두 화학용액 사이에 콘크리트 실험모형을 두고 실험을 수행하였다. 6시간 동안 총 전기력의 통과 량을 측정해서 혼합토의 투수를 계산하였다.

실험 결과 그림 10에서와 같이 양생시간에 따라 전도력이 약하게 흐르는 것을 알 수 있었다. 양생기간이 짧은 혼합토에서 높은 전도력을 나타내지만 시간이 흐를수록 전도력의 약화로 180일 된 혼합토는 거의 전도력이 없어지는 상태에 놓인다. B50의 평균 전도력이 28일 동안 현저히 떨어 졌음을 알 수 있었다. 3일에서 7일 사이에 평균 전도력이 6,765에서 5,381로 떨어졌으며, 7일간의 양생기간의 전도력은 상당히 높은 것으로 나타났다. 그러나 28일 후에

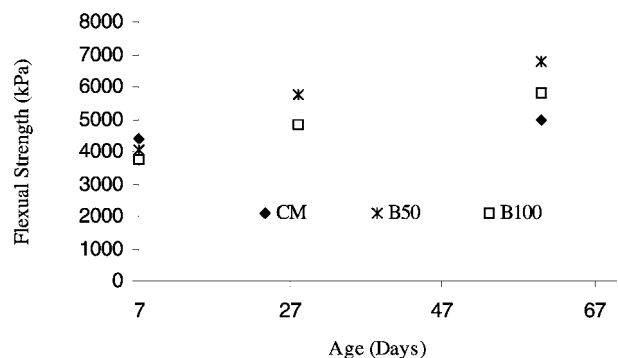


그림 7. 양생기간에 따른 휨강도

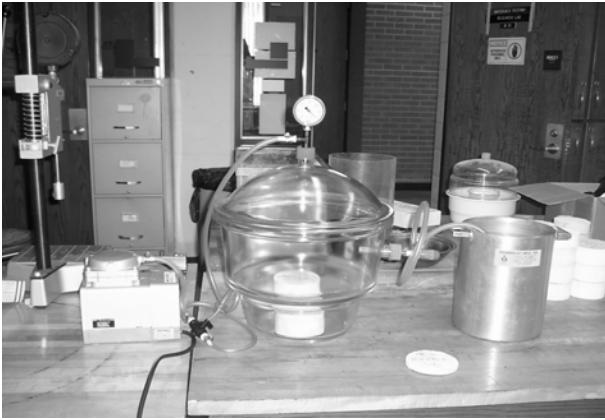


그림 8. 진공펌프, 데시케이터 및 증류수 용기

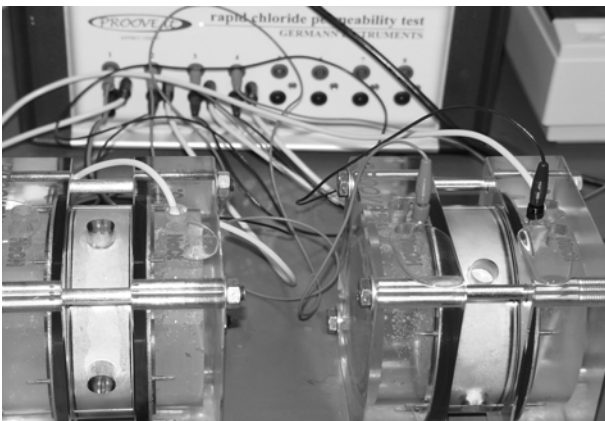


그림 9. Chloride 이온투수시험 셀

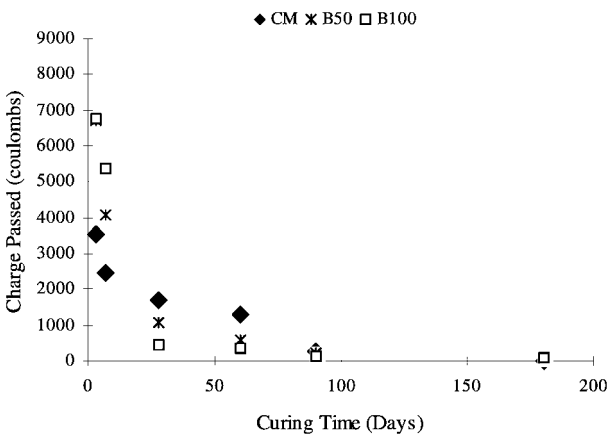


그림 10. Chloride 이온 투수에 의한 양생기간에 따른 영향

는 전도력이 432로 그리고 180일이 되었을 때 72로 떨어졌다. CM과 B100도 B50과 비슷한 결과를 보이고 있다. 결과적으로 모든 실험모형이 28일을 기점으로 현저히 좋은 상태로 발전함을 알 수 있었다. 모든 시편이 180일이 되었을 때 전도력이 거의 나타나지 않으므로 철근을 부식시키는 물의 흐름이 적어 인장력 저하방지에 도움이 될 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 실험의 목적은 저회(bottom Ash)를 사용한 실험 공시체에 주입 공기액 혼합제를 부과 시켜 어떠한 결과를 나타내는지 관찰했으며 결과는 다음과 같다.

- (1) 압축, 인장 그리고 휨강도 실험에서 표준 혼합토(CM)의 양생기간 28일 강도가 크게 나타났지만, 28일 이후엔 B50의 강도가 다른 공시체 보다 더 큰 결과를 얻었다. 또한 모든 실험 공시체의 강도가 28일이 되었을 때 27,600 kPa 보다 컸다.
- (2) Illinois PCC 저회를 사용한 혼합토가 chloride 이온 투수 실험에서 조금 높은 전도력을 보여 주고 있다. 그러나 28일이 지난 후엔 저회 시료토의 전도력이 CM 보다 낮거나 비슷한 전도력을 나타내고 있다.
- (3) 약 60-180일 사이에 B100의 모형의 강도가 CM보다 더 큰 강도로 양생이 되었다. CM의 경우 초기의 양생 과정에서 큰 강도로 발현되지만, 장기간 양생되면 저회의 혼합토 강도가 더 커서 대체 자원으로 기능 하다는 결론을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 충북대학교 학술 연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. 신방웅(2001), *토질역학*, 구미서관, 서울, pp. 55~69.
2. 천병식, 이은수, 고용일(1992), 비회와 저회의 적정 혼합비로 다짐한 석탄회의 강도와 내구성, *대한토목학회논문집*, 제 12 권 제3회, pp. 207~213.
3. ACAA(2003), 2003 Coal Combustion Products Production and use Figures, *American Coal Ash Association*.
4. Alarcon, C.(2002), Performance of Concrete Composites made with Illinois PCC Dry Bottom Ash in Pre-Cast Concrete Piles, Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master of Science Degree, Southern Illinois University Carbondale.
5. American Society for Testing and Materials(1989), Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens(ASTM C 167), *Annual Book of ASTM Standard*, ASTM, Vol. 4.02, Philadelphia, pp. 292~295.
6. American Society for Testing and Materials(1990a), Standard Test for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete(ASTM C457), *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, Vol. 4.02, Philadelphia, pp.242-255.

7. American Society for Testing and Materials(1990b), Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method(ASTM C231), *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, Vol. 4.02, Philadelphia.
8. GAI(1988), Waukegan Embankment, Project Number E-2, Proceedings of the High-Volume Fly Ash Utilization Projects in the United States and Canada, GAI Consultants, Inc, Monroeville, Pennsylvania.
9. Kalyoncu, R.S.(2003), Coal Combustion Products, *United States Geological Survey Mineral Yearbook 2001*, pp. 19.1~19.5.
10. Kumar, S. and Stewart, J.(2003a), Geotechnical Engineering Characteristics of Illinois PCC Dry Bottom Ash Amended with Bentonite, *ASCE Journal of Energy Engineering*, to be published in Vol. 129, No. 2.
11. Kumar, S., Stewart, J., and Mishra, S.(2004), Strength Characteristics of Illinois Coal Combustion By-Product: PCC Dry Bottom Ash, *International Journal of Environmental Studies*, Taylor and Francis Publishers, Vol. 61, No. 5, pp. 551~562.
12. Kumar, S., and Vaddu, P.(2003), Time Dependent Strength and Stiffness Characteristics of Bottom Ash-Bentonite Mixtures, *Soil and Sedimentation Contamination: an International Journal*, Vol. 13, No. 4, pp. 405~413.
13. Lovell, C. W., Ke, T., Huang, W., and Lovell, J.E.(1997), Bottom Ash As Highway Material, Presented at the 70th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January.
14. Seals, R.K., Moulton, L.K., Ruth, B.E.(1972), Bottom Ash An Engineering Material, *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division* 98, SM4, pp. 311~325.

(접수일: 2007. 1. 30 심사의회일: 2007. 2. 5 심사완료일: 2007. 3. 13)