

매립석탄회를 활용한 인공어초 제조기술 개발

Development of manufacturing technology of Artificial Reef Mixed with Reclamation Coal Ash

한상묵* 조명석** 송영철***
Han, Sang-Mook Cho, Myoung-Suk Song, Young-Chul

ABSTRACT

Coal ash, which is generated as a byproduct at a coal thermal power plant, can be classified into fly ash and bottom ash. Most of fly ash is recycled as an admixture for concrete, while bottom ash is not recycled but dumped into an ash landfill disposal site. So, if a technology for recycling bottom ash efficiently, which is increasingly generated year by year, is not developed, environmental problems will take place as a matter course and further an enormous economical cost will be required for construction of additional ash landfill disposal sites. In this study an optimum mix proportion design and a quality control method for utilizing the reclamation coal ash as an aggregate for secondary concrete products such as an artificial reef was successfully developed.

1. 서론

세계적으로 석탄은 풍부한 매장량, 저렴한 가격, 공급원의 안정성 등으로 인해 화력발전소의 중요한 연료원으로 널리 사용되고 있으며 부존자원이 빈약한 우리나라의 경우, 향후 그 사용 비중이 더욱 확대될 것으로 전망되고 있다. 특히 석탄 소비량증가와 더불어 연소후 부산물로 발생하는 석탄회의 경우 폐기물이 아닌 이용가능한 제3의 자원으로 인식을 전환하여 국가적 차원에서 그 활용성에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

석탄회(Coal Ash)는 연소 후 포집되는 장소에 따라 크게 Fly Ash와 Bottom Ash로 구분된다. Fly Ash의 경우 발생회의 75~80%정도로서 대부분 재활용되고 있으나 Bottom Ash는 분쇄 후 재활용되지 못한 일부 Fly Ash와 함께 고압의 Pump로 회처리장으로 이송되어 매립되고 있으며 '04년도 국내 석탄회 총발생량 560만톤중에서 약 130만톤이 매립 처분되고 있다¹⁾. 따라서 매립석탄회(Bottom Ash + 비정제 Fly Ash)의 재활용 방안 개발이 절실히 시급한 상황이다.

본 연구에서는 매립석탄회 활용방안의 기초연구로 콘크리트 구성물질을 매립석탄회로 대체하여 인공어초를 제작하는 경우의 배합설계기법과 개발된 시제품이 해조류 및 어류위질을 위한 기질로서의 적합성 여부에 대한 평가 실험을 수행하였다.

2. 실험개요 및 방법

표-1에서 보는바와 같이, 매립석탄회(RA) 혼입 콘크리트의 사용 재료는 시멘트, Fly Ash, 매립석탄회, 썬석을 사용하였다. 매립석탄회는 삼천포화력발전소의 제2회처리장에 투기된 것으로서 위치별 대표적인 10여개의 시료를

* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 건전성평가그룹 선임연구원, 공학박사

** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 건전성평가그룹 선임연구원

*** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 건전성평가그룹장, 공학박사

채취하여 입도분포, 비중, 흡수율 등 콘크리트의 물성에 영향을 미치는 항목에 관하여 분석하였다. 분석을 위하여 세립분(5mm이하분)과 조립분(5mm이상분)으로 분류하여 실험을 수행하였다. 매립석탄회의 입도분포 및 물리적 특성을 각각 그림-1 및 표-2에 나타낸다. 상기 그림과 표에서 보는 바와 같이 흡수율이 매우 높아 타설시 매립석탄회의 표면수 관리가 매우 중요하다. 또한 세립분의 경우 0.3mm이하의 미립분이 많으며, 조립분의 경우 19mm 체를 거의 통과하여 19~25mm 입도가 부족하여 콘크리트의 작업성 및 재료분리를 유발할 수 있으므로 배합설계시 충분히 고려하여야 할 것으로 나타났다.

콘크리트의 최적배합법을 도출하기 위하여 일반해양구조물을 상정한 25-210-8을 목표로 W/C 65%에서 95%까지 변화한 후 Fly Ash를 매립석탄회에 대한 중량비 5수준으로 변화한 총 44종의 배합시험을 수행하였다. 콘크리트 배합은 최대한 매립석탄회를 소비하는 것을 목적으로 매립석탄회 실적율에 해당하는 양을 사용한 경우(단위 굵은 골재량 300kg/m³)와 일반배합을 상정한(단위굵은 골재량 1,050kg/m³) 두종류를 검토대상 배합으로 선정하여 각 재료가 콘크리트 강도 및 슬럼프에 미치는 영향을 파악하기로 하였다. 또한 상기 콘크리트배합에서 제시된 콘크리트 배합으로 콘크리트 시편 및 시제품을 제작하여 각각 해조류 부착특성과 어패류 위집효과에 대하여 조사 평가하기로 한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 배합설계기법 검토

3.1.1 배합 보정

매립석탄회와 같은 다공질의 골재를 활용한 콘크리트에 있어서 표건상태의 정의가 가장 중요한 사항이며 중회귀분석과 같은 다양한 지수를 일괄적으로 추정하는 경우 해석결과 및 정도에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 다공질인 Bottom Ash 내부에 시멘트페스트의 혼입이 콘크리트 배합에 큰 영향을 미치게 된다.

따라서 본 연구에서 사용한 매립석탄회의 경우 페스트의 혼입에 의한 불확실 요인의 추정이 곤란하기에 표건상태의 정의에 있어서 비빔직후 콘크리트 밀도를 사용하여 1m³당 배합을 보정하기로 한다.

실제로 콘크리트의 배합상의 밀도와 비빔후의 밀도를 비교한 결과 각각 1.908과 2.030으로 나타났으며 이러한 원인은 매립석탄회 공극에 시멘트페스트가 혼입된 것으로 판단되며 이를 포함한 매립석탄회 밀도와 표면수를 보정하여 계산하기로 한다.

3.1.2 배합설계 평가 및 고찰

콘크리트 강도에 영향을 미치는 요인을 중회귀분석의 변수로 변화하여 배합설계를 검토하였으며, 배합에 영향을 미치는 요인으로는 표-3과 같이 결합재비와 골재량으로 나누어 살펴보도록 한다.

표-1 사용재료

사용재료	품 목
시멘트	쌍용양회 1종 시멘트
Fly Ash	삼천포산(KS 품질 만족)
매립석탄회	삼천포산(제 2회처리장)
쇄석	G _{max} =25mm

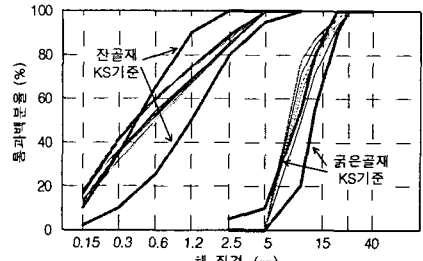


그림-1 매립 석탄회 입도분포

표-2 매립석탄회 물리적 특성

구분	절건 밀도	흡수율 (%)	조립 률	단위용 적중량 (kg/m ³)	실적률 (%)	공극 률 (%)
세립분	2.09	11.89	2.89	949	63.6	36.4
조립분	2.12	7.53	6.36	1,210	50.4	49.6

표-3 영향요인 변수

항 목	변 수
결합비	C/W 시멘트/물 비
	FA/W Fly Ash/물 비
	FA/C Fly Ash/시멘트 비
	RA1/W 매립석탄회 미립분/물 비
	RA1/C 매립석탄회 미립분/시멘트 비
골재	G 쇄석의 굵은골재량
	RA 매립석탄회양
	RA2 매립석탄회 조골재량
	RA2+G 총 굵은골재량
	RA2/G 매립석탄회/쇄석 비

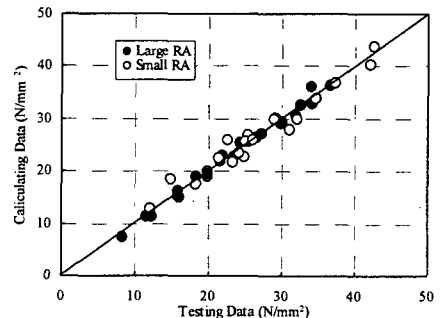


그림-2 압축강도 중회귀분석 결과

영향요인 분석 및 추정은 중회귀분석으로 수행하였다. 검토결과 콘크리트 강도 및 슬럼프는 물-결합재비와 골재량에 크게 지배된다는 것을 확인하였으며, 추정식은 식(1) 및 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{28} = 17.688(C/W + 0.141FA/W) - 0.036(G + RA) + 62.173 \quad (1)$$

$$SL = -6.348(C/W + 0.641FA/W) - 0.031(G + RA) + 92.250 \quad (2)$$

여기서 σ_{28} : 재령28일 압축강도 (N/m²)

SL : 슬럼프 (cm)

C/W : 시멘트-물 비 (%)

FA/W : Fly Ash-물 비 (%)

G : 조골재량 (kg/m³)

RA : 매립석탄회 혼입량 (kg/m³)

식(1)의 강도추정치와 실측치의 관계를 그림-2에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 높은 정도로 추정이 가능하며, 총 44회의 실험결과 중에서 오차범위 5%이내가 32회로 측정되어 본 강도 예측식은 매우 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

식(2)의 슬럼프 추정식에 의한 실측치와 비교에서 상관계수가 0.832로 강도 추정식에 비해서 정도면에서 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 배합설계기법의 영향요인에서 살펴본 바와 같이 강도보다도 슬럼프의 경우 매립석탄회의 입도분포에 의해 크게 영향을 받는 것으로 사료되기에 보다 정도 높은 추정을 위해서는 입도분포별 배합을 선정하는 것이 적절하다고 판단된다.

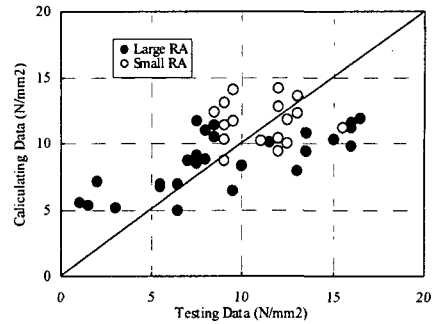


그림-3 슬럼프 중회귀분석 결과

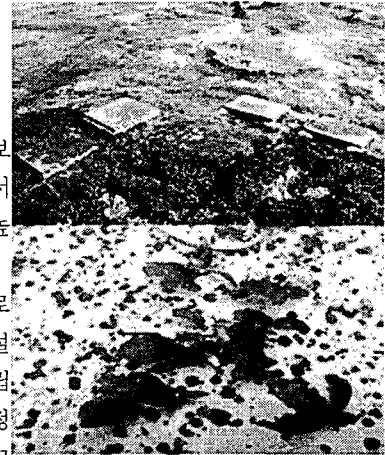


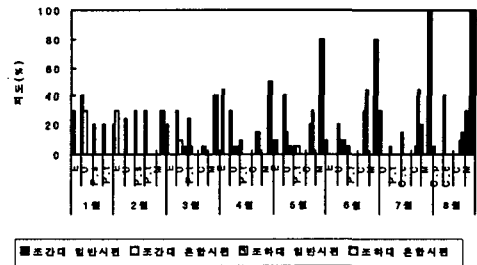
그림-4 해조류 부착 실험시편 (상: 조간대, 하: 조하대)

3.2 매립석탄회 혼입 콘크리트 어초의 기능성 평가

3.2.1 실험시편의 해조천이

일반 콘크리트 및 매립석탄회 혼입 콘크리트 시편의 해조류 부착능력 및 해조류 천이의 비교실험을 위하여 실험 시편을 제작하여 부산시 해운대구 동백섬 부경대학교 수산과학연구소 앞의 해안을 실험 장소로 선택하여 실험 시편을 설치하였다. 그림-4는 설치 3개월 후인 2004년 2월에 촬영한 사진으로 조간대 시편에 녹조류인 잎파래와 구멍갈파래가 초기 선구종으로 출현한 것을 확인하였다. 조하대의 시편에는 홍조류인 진두발이 새롭게 착생했고, 무절석회조류가 실험 시편을 넓게 피복하며 빠르게 착생하였다. 이러한 해조류는 일반 콘크리트보다 매립석탄회 혼입 콘크리트 시편에 좀 더 많은 개체수가 착생하였다.

그림-5는 본 실험시편에 나타난 해조 천이를 월별 조사하여 기록한 것이다. 일반적으로 천이의 패턴은 계절, 수심, 기질의 차이, 포자와 유배의 착생 등에 따라 차이를 보이는데, 본 연구에서는 조간대와 조하대에 설치한 시편의 기질의 차이에 의한 착생 해조류 종수와 피도 차이보다는 조간대와 조하대의 수심 차이에 의한 착생 및 피



E : *Enteromorpha linza*, U : *Ulva pertusa*, P.s : *Porphyra suborbiculata*
 P.t : *Porphyra tenera*, C : *Chondrus ocellatus*, C.c : *Chondria crassianalis*
 C.c : *Codium parvula*, M : *Melobesioidea*

그림-5 실험 시편에서 진행된 착생 해조류 피도 변화

도 차이가 더욱 크게 나타났다. 이는 매립석탄회 혼입 유무에 따른 두 기질이 해조류의 착생에 따른 선택성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 이러한 결과는 실험 시편으로 제작하여 실험에 사용했던 매립석탄회를 새로운 기질로 제작하여 활용할 경우, 기존의 일반 콘크리트 기질과 큰 차이 없이 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

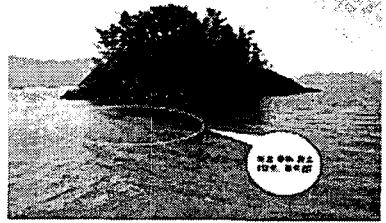
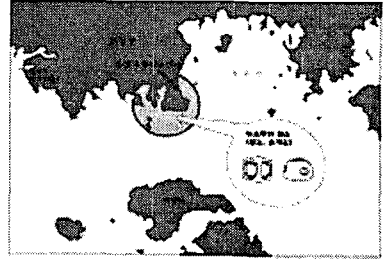
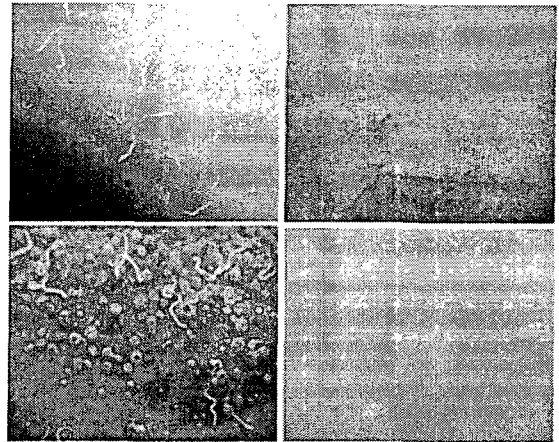


그림-6 실험 인공어초 투하지역

3.2.2 실험 인공어초 투하

일반 콘크리트 및 매립석탄회 혼입 콘크리트로 제작한 인공어초의 효과에 대한 비교실험을 위하여 사각형 어초 및 반구형 어초를 각각 10개씩 총 20개의 실험 인공어초를 제작하여 경남 고성군 동화리 부경대학교 수산과학기술센터 인근의 묘도를 실험 장소로 선택하여 투하하였다(그림-6 참조).

그림-7은 어초 설치 4주 뒤인 10월 8일의 2차 조사 결과를 나타낸 것으로 각 인공어초에는 극피동물인 별불가사리, 아무리불가사리, 태형동물인 이끼벌레류, 환형동물인 갯지렁이류, 연체동물인 딱개비류, 어류의 작은 치어 등이 확인되었다. 어초의 주변에는 어류의 성체와 치어가 자주 발견되어, 어류 성육장으로서의 역할을 수행하고 있음을 알 수 있었다. 또한 어초마다 부니로 뒤덮인 모습을 쉽게 확인할 수 있었다. 이번에 실시된 조사결과에서는 어초 표면적이 대부분 따개비류나 태형동물류가 선점하고 있는 것으로 나타났다. 재질에 관한 측면에서는 현재까지 무척추동물들이 어초 표면에 착생함에 있어서 어초의 재질보다는 경쟁 종과의 초기 경쟁을 통한 공간 선점에 우선하는 것으로 판단되어, 재질에 따른 특이사항은 확인할 수 없었다. 재질 차이에 관한 생물의 선택성은 앞으로 지속적인 모니터링을 통한 조사를 통하여 얻어야 할 과제라 할 수 있다.



왼편 상단: 갯지렁이, 오른쪽 상단: 부니
왼편 하단: 딱개비류, 오른쪽 하단: 어초 주변 치어
그림-7 설치 4주후 모여든 생물상

4. 결론

본 연구에서는 회처리장에 투기된 매립석탄회를 콘크리트용 골재로 대량 치환하여 인공어초를 제작하는 방안을 검토한 것으로 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 매립석탄회를 콘크리트용 골재로 대량 치환한 배합에 있어서 플라이 애쉬를 고려한 유효 결합재-물비에 따른 압축강도식을 도출하였으며 중회귀분석 결과 강도추정식에 의한 강도와 배합시험 강도는 높은 신뢰성을 가지는 것을 확인하였다.
- 2) 일반 콘크리트 및 매립석탄회 혼입 콘크리트 시편 및 인공어초를 제작하여 투입한 결과 해조류의 종수와 피도는 실험 시편의 재질에 의한 차이는 미비한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 매립석탄회를 새로운 기질로 어초를 제작하여 활용할 경우, 기존의 일반 콘크리트 기질과 큰 차이 없이 사용될 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) 최대실, "석탄회 재활용 현황", 업무보고서, 한국남동발전(주) 발전처, 2004