

# 제지 슬러지 소각회 인공골재의 콘크리트에의 적용

## Application on Concrete using Artificial Aggregate with Paper Sludge Ash

문 경주\*      백 명종\*\*      소 양섭\*\*\*  
Mun, Gyung-Ju      Baeg, Myung-Jong      Soh, Yang-Seob

### ABSTRACT

This study is described the experimental result of the development of artificial aggregate using paper sludge ash and the application of it in concrete. Artificial aggregates are prepared with crushed stone in the variety aspect. Therefore, Quality properties of artificial aggregate using paper sludge ash are fairly corresponded with it of crushed stone. For the application of artificial aggregate using paper sludge ash in concrete, Coarse aggregates are replaced with artificial aggregate using paper sludge ash in the constant of volume(0%, 30%, 70%, 100%). It is concluded from the test results that the artificial aggregate using paper sludge ash could be used replacement of coarse aggregate in concrete. Continuos study shoud be planned for improvement of it's quality.

### 1. 서론

본 연구는 제지공장에서 발생하는 제지 슬러지 소각회의 재활용 방안에 관한 것으로서, 소각회를 인공골재로 개발하여 건설재료로서 재활용하기 위한 것이다. 수행결과중 골재제조공정 개발 및 소각회 골재의 품질특성에 대해 검토한 결과는 이미 보고한 바 있다.

본 논문에서는 이미 확립되어 있는 상온 인공골재 제조기술과 인공골재의 품질특성을 이용하여 소각회 골재를 이용한 콘크리트의 품질특성을 규명하고, 콘크리트의 적용 가능성 여부를 확인하여 소각회 골재의 지속적인 성능향상 및 건설재료로서의 재활용을 위한 기초자료를 제공하기 위한 것이다.

### 2. 실험계획 및 방법

#### 2.1. 상온 골재생산 공정

---

\* 정희원, 전북대학교 건축공학과 석사과정  
\*\* 정희원, 주)대우건설기술연구소 기술지원팀 주임연구원  
\*\*\*정희원, 전북대학교 건축공학과 교수

본 연구실에서 이미 확립한 인공골재제조공정에서 골재형성을 및 믹서내벽에 부착되는 페이스트의 상태를 파악하여 골재제조 효율성을 높이기 위한 방법으로 미리 페이스트(시멘트+ 소각회 + 물)를 제작하여 믹서안에 투입하는 선페이스트법을 이용하고자 하였다.

점성을 가진 페이스트는 시멘트와 소각회 반죽이 서로의 점성에 의해 믹서안에 부착이 안되는 원리를 이용해서 이를 믹서안에 넣고 원심력을 주어 회전시키면 큰 반죽덩어리가 형성된다. 이에 시멘트와 슬러지를 혼합한 분말을 뿌려주면서 회전시키면 큰 반죽덩어리가 작은 골재로 분리되면서 골재가 형성되는 제조공정에 따라 골재를 제조하였다.

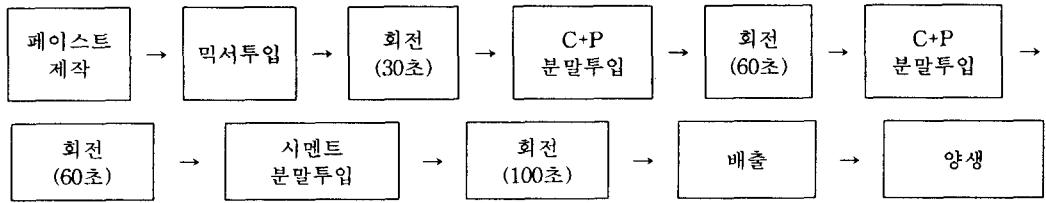


그림 1. 「골재제조 기본공정」

## 2.2 사용재료 특성

### 2.2.1 골재제도시 사용재료

제지 슬러지 소각회는 전주 H사 공장의 소각회를 사용하였으며 결합재로서 국내 S사 제품의 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 물은 일반 수도물을 사용하였다.

### 2.2.2 콘크리트 공시체 제도시 사용재료

시멘트는 국내 S사 제품의 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 소양산 강모래를 사용하였으며 굵은골재로는 제지 슬러지 소각회를 이용한 인공골재와 진안산 쇄석을 각각 사용하였다. 혼화제로는 J사의 나프탈렌계 AE감수제를 사용하였다.

표 1. 골재의 물리적 성질

구분	비중(표건)	조립율(F.M)	흡수율(%)	단위용적중량	실적율(%)
잔골재 (세척사)	2.54	2.79	2.04	1,512	58.2
굵은골재 (20mm)	2.62	6.9	1.68	1,620	58.8

### 2.2.3 제지슬러지소각회골재의 품질특성

그림 1과 같은 공정으로 생성된 골재의 외관(사진 1참조) 및 품질특성은 표 2와 같다. 일반골재의 특성에는 다소 차이가 있는 것으로 나타났으나, 경량골재의 특성과 많이 부합되는 것으로 나타났다. 흡수율이 비중에 비해 상당히 높게 나타나 상온경화형 인공골재의 한계를 보여주고 있는 것으로 나타났다. 이는 제지 슬러지 소각회 자체의 높은 흡수성질을 가진 것과 결합재로서 시멘트를 사용했기 때문인 것으로 사료된다. 생성된 골재는 1일 기건양생, 28일 수중양생한후 표건상태로하여 사용하였다.

표 2. 생산된 소각회 골재의 품질특성 결과

비중(표건)	흡수율 (%)	단위용적중량 (t/m <sup>3</sup> )	입도범위(mm) (Min,Max)	형상	실적율 (%)	조립율 (%)	마모율 (%)
1.85	18.86	1.17	5~19	구형	63.39	6.85	37



사 진 1. 생성된 골재의 외관

### 2.3 배합계획 및 시험방법

제지 슬러지 소각회 인공골재를 이용한 콘크리트의 재료 역학적 특성을 규명하기 위해 쇄석을 사용한 일반 콘크리트와 쇄석이 차지하는 체적을 인공골재로 30%, 70%, 100%치환한 콘크리트 공시체를 제작하여 압축강도, 휨강도, 할렬인장강도를 비교하였다. 압축강도, 할렬인장강도 측정용 공시체의 제작은 KS F 2403에 따라 실시하였고, 휨강도 측정용 공시체는 KS F 2408에 따랐고, 3일, 7일, 28, 56일 강도로 각 재령별 3개씩 제작하였다. 제작된 공시체는 20±3℃의 항온수조에서 수중양생 하였다.

표 3. 계획 배합비

종류	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )				AE 감수제(g)	비고	
			W	C	S	G			
						일반 쇄석			소각회골재
A	57	39.7	170	299	696	1089	0	900 (C×0.3%)	치환율 0% (Fc=210kg/cm <sup>2</sup> )
B		41.1				763	233		치환율 30%
C		44.4				327	543		치환율 70%
D		47.3				0	775		치환율 100%

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 굳지않은 콘크리트의 성질

#### 3.1.1 슬럼프

소각회 골재 콘크리트의 슬럼프 시험결과 소각회 골재 혼입율이 높아질수록 슬럼프값은 증가하는 경향을 보였다. 이것은 소각회 골재의 입형이 구형이기 때문에 콘크리트의 유동성을 증진시켜주는 효과를 가져왔다 사료된다. 슬럼프값 증진 효과는 동일한 슬럼프 값에서 물시멘트비의 저감효과를 가져 오므로 소각회 골재를 이용한 콘크리트의 여러 특성을 향상시켜주는 효과가 있을것으로 판단된다.

### 3.1.2 공기량 시험결과

소각회 골재의 혼입율에 따른 콘크리트의 공기량은 3.7~4.3%로 적당하고 소각회 골재의 혼입율이 높아질수록 공기량은 약간 증가하는 경향을 보였으나, 큰 차이는 보이지 않고 있다.

### 3.1.3 단위용적중량

소각회 골재의 혼입율에 따른 콘크리트의 단위용적중량은 소각회 골재의 혼입율이 높아질수록 단위용적중량 감소효과를 나타내었다. 이는 소각회 골재의 비중이 쇄석에 비해 0.7이상 경량이기 때문이다. 소각회 골재의 혼입율이 0%에서는 단위용적중량이 2.36t/m<sup>3</sup>이었으나 소각회 골재의 혼입율이 100%에서는 2.07t/m<sup>3</sup>으로 보통콘크리트에 비해 1m<sup>3</sup>당 약 300kg정도의 자중감소 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

표 4. 콘크리트 시험결과

골재 함유 율	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위용적 중량 (t/m <sup>3</sup> )	강도시험결과(kg/cm <sup>2</sup> )											
				3일			7일			28일			56일		
				압축	할렬 인장	휨	압축	할렬 인장	휨	압축	할렬 인장	휨	압축	할렬 인장	휨
0	16	3.7	2.36	135.5	13.9	33.5	222.6	18.6	46.3	272.1	25.5	57.7	290.4	33.1	66.8
30	17	3.8	2.29	117.8	13.1	26.3	173.6	14.8	35.4	211.7	20.9	43.1	228.0	21.9	48.2
70	19	4.1	2.16	103.6	13.0	31.5	191.5	15.1	36.9	221	21.3	44.2	232.1	23.2	52.8
100	21	4.3	2.07	96.4	11.6	21.9	230.6	16.3	31.7	254.5	23.7	53.2	269.2	28.4	56.1

## 3.2 콘크리트의 강도시험 결과

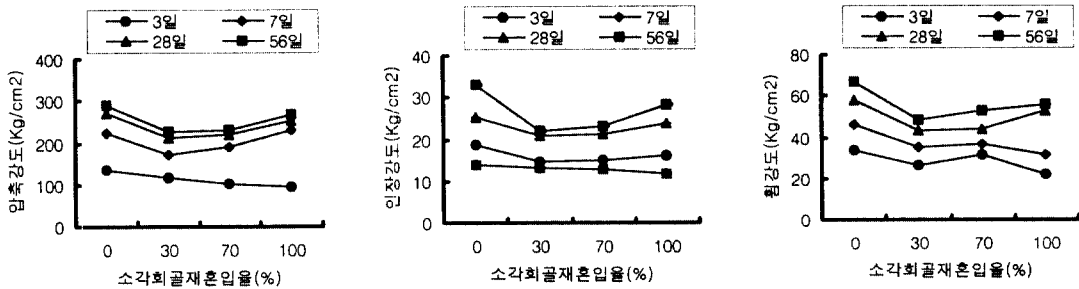
### 3.2.1 소각회 골재의 함유율에 따른 강도 발현현황

소각회 골재 혼입율에 따른 압축강도, 할렬인장강도, 휨강도의 발현현황을 표 4에 나타내었다. 쇄석만을 이용한 콘크리트(소각회 골재의 혼입율 0%)의 모든 강도가 가장 우수한 것으로 나타났다. 소각회 골재의 혼입율이 30~100%에서는 골재 함유율이 높아질수록 강도가 점차 저하되리라 예상하였는데 초기 3일강도에서만 소각회 골재의 혼입율이 높아질수록 강도가 저하하고 7일 이후 부터는 오히려 소각회 골재의 혼입율이 30~100%로 높아질수록 점차 강도가 증진되어 28일 이상의 재령에서는 현저한 결과를 보이고 있다. 그 원인은 초기에는 골재의 입형이 구형인 소각회 골재와 시멘트 페이스트와의 부착력이 쇄석보다 좋지않다가 재령이 지나면서 골재와의 부착력이 점차 향상되어지기 때문이라 사료된다. 또한 쇄석과의 혼합사용시 입형이 구형인 소각회 골재에 응력집중이 발생하고 입형과 비중이 서로 다르기 때문에 소각회 골재의 몰림현상도 발생하여 상대적으로 쇄석보다 강도가 적은 소각회 골재에서 먼저 파괴가 일어나는 것으로 판단된다. 그래서 소각회 골재의 혼입율이 높아지면서 균등한 분포를 이루게 되고 소각회 골재의 응력집중이나 몰림현상도 적게되어 강도가 회복되기 시작하여 함유율이 100%인 콘크리트에서는 일반 쇄석 콘크리트(함유율이 0%)와 거의 비슷한 강도를 나타낸 것으로 판단된다. 실제적으로 소각회 골재 혼입율이 30%일때는 골재자체의 계면파괴가 많이 발견되었으나

100%일때는 골재자체의 파괴보다 페이스트의 계면에서 파괴가 일어났다. 파괴강도가 250kg/cm<sup>2</sup>이하의 콘크리트에서는 응력집중이나 편심이 작용하지 않는다면 골재의 강도특성보다는 페이스트 강도에 의해 좌우된다는 것을 확인할 수 있었고 쇄석과의 혼합사용보다는 소각회 골재의 100%단독 활용 방안이 유리할 것으로 판단되었다.

### 3.2.2 재령에 따른 강도 발현현황

소각회 골재 혼입율에 관계없이 재령이 증가함에 따라 압축강도, 인장강도, 휨강도는 모두 증가하였다. 그리고 소각회 골재 혼입량에 상관없이 설계기준강도인 210kg/cm<sup>2</sup>를 만족하는 것으로 나타났다. 쇄석만을 이용한 콘크리트(소각회 골재의 함유율 0%)의 모든 강도가 각 재령에 따라 초기강도부터 장기강도까지 가장 우수한 것으로 나타났고 쇄석과 소각회 골재를 혼합하여 사용한것보다는 골재를 단일화하여 사용한 콘크리트가 재령이 지남에 따라 강도가 더 높게 발현됐다. 특히 소각회 골재 혼입율이 100%인 콘크리트에서는 압축강도와 인장강도가 초기재령 3일강도는 다른 종류의 콘크리트보다 제일 낮았으나 재령 7일에서 급격한 강도를 발현하여 재령 7일 이후 쇄석만을 이용한 콘크리트(함유율 0%)의 강도와 거의 비슷하거나 약간 낮은 결과를 나타냈고, 휨강도도 쇄석과 혼합 사용한 콘크리트에 비하여 초기재령은 강도가 더 낮았으나 재령 28일에서는 강도가 더 높게 나타났다. 이것은 사용골재를 단일화 하여 사용한 콘크리트가 재령이 지남에 따라 전체 균질성을 확보한 것이라 사료된다.



a) 압축강도

b) 인장강도

c) 휨 강도

그림 2. 소각회 골재 혼입율에 따른 압축강도, 인장강도 및 휨강도

## 4. 결론

### 4.1 골재의 품질성능

생산된 골재의 품질은 일반골재의 특성에는 다소 차이가 있는 것으로 나타났으나, 경량골재의 특성과 부합되는 것으로 판단되고, 흡수성능이나 마모성능면에서는 상온경화형 인공골재의 한계를 보이고 있어 파괴강도 250kg/cm<sup>2</sup>이하의 콘크리트의 적용에 적합할 것으로 판단된다. 고강도 콘크리트의 적용을 위해서는 표면처리나 배합성능, 양생방법을 달리하여 골재의 품질을 개선시킬 필요성이 있다.

## 4.2 슬럼프 특성

소각회 골재의 함유율이 증가할수록 슬럼프는 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 소각회 골재의 입형이 구형이기 때문에 워커빌리티가 좋아지지 때문이다. 슬럼프 증진효과는 동일한 슬럼프값에서 몰시멘트비의 저감효과를 가져오므로 소각회 골재 이용한 콘크리트의 여러특성을 향상시켜주는 효과가 있을 것으로 판단된다.

## 4.3 공기량 및 단위용적중량

소각회 골재 콘크리트의 공기량은 소각회 골재의 혼입율이 높아질수록 공기량은 약간 증가하는 경향을 보였으나 큰 차이는 보이지 않고, 소각회 골재의 혼입율에 따른 콘크리트의 단위용적중량은 소각회 골재의 혼입율이 높아질수록 단위용적중량 감소효과를 나타내었다. 이는 소각회 골재의 비중이 쇄석에 비해 0.7이상 경량이기 때문이다. 소각회 골재의 혼입율이 0%에서는 단위용적중량이 2.36t/m<sup>3</sup>이었으나 소각회 골재의 혼입율이 100%에서는 2.07t/m<sup>3</sup>으로 보통콘크리트에 비해 1m<sup>3</sup>당 약 300kg정도의 자중감소 효과를 얻을 수 있을 것이다.

## 4.4 콘크리트의 강도특성

소각회 골재를 쇄석과 혼합하여 사용하는 것보다 소각회 골재를 단독 활용하는 것이 유리하고 굵은 골재를 100% 소각회 골재로 대체하면 워커빌리티 향상 및 자중감소등의 이점이 있으며 일반콘크리트에서 쇄석과 비슷한 강도를 얻을 수 있다. 그러므로 현재 정도의 특성을 가지고도 적용할 수 있다고 판단되는 활용처를 확대시키는 방안도 고려해야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 소양섭외 3인, “시멘트와 제지슬러지 소각회를 이용한 인공골재 개발에 관한 연구” 대한건축학회학술발표논문집, 제18권 1호, pp.909~914, 1998. 4
2. 소양섭외 3인, “ 소각회 인공골재 개발 및 품질성능” 한국콘크리트학회발표논문집 제19권 1호 pp.69~75, 1998. 5
3. 백명중 외 3인, “제지 슬러지 소각회를 이용한 경량 탄소섬유보강 폴리머 시멘트 콘크리트에 관한 연구”, 대한건축학회학술발표논문집, 제 13권 제 2호, PP. 603~606, 1993. 10

## 감사의 글

본 연구는 환경부 G-7환경공학 기술개발 과제로 선정되어 현재 수행중인 연구과제이며, 본 논문에 관련된 골재제조공법 및 제조기기는 특허출원중입니다. 본 과제를 수행하는데 많은 도움을 주신 국립환경연구원 G-7기획과 직원 및 연구위원, 현대콘크리트, 전일제지 관계자들에게 깊은 감사를 드립니다.