

## 제지회를 이용한 벽돌재 개발

### Development of the Bricks using Paper Ash

이처근\* · 안광국\*\* · 허 열\*\*\*

Lee, Cheo-Keun · Ahn, Kwang-Kuk · Heo, Yol

#### Abstract

The production of industrial wastes have increased due to the growth of population and industrial development. Among these wastes, especially amount of paper ash has been increased year after year. If it is possible to reuse industrial wastes, it will be beneficial not only economically but also environmentally. In this study, the possibility of the utilization of paper ash were investigated as a construction materials through a series of laboratory testing carried out to evaluate physical properties, compaction, consolidation, permeability and compressive strength characteristics. Concrete bricks with replacement ratio of paper ash at 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20%, and clayey bricks with replacement ratio of paper ash at 5, 10, 15, 20, 25, 30% were used in the test in order to evaluate its quality. As a result of tests, it were shown that the maximum replacement ratio of paper ash satisfying the quality standards of concrete bricks and clayey bricks were 11.5% and 12%, respectively.

**Keywords** : Paper ash, Concrete brick, Clayey brick, Replacement ratio

#### 요 지

인구증가와 산업발달로 인해 산업폐기물의 발생량은 매년 증가하고 있으며, 이들 폐기물 중 제지회의 발생량도 증가하고 있다. 산업폐기물을 재활용할 수 있다면 경제적·환경적으로 유익할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 일련의 실내실험을 통하여 기본특성, 다짐, 압밀, 투수 및 압축강도 특성을 분석하여 제지회를 건설재료로서 활용하기 위한 방안을 연구하였다. 본 실험에서 콘크리트 벽돌과 점토 벽돌의 품질을 평가하기 위하여 제지회의 치환률을 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20%로 하여 제작한 콘크리트 벽돌과 제지회의 치환률을 5, 10, 15, 20, 25, 30%로 변화시키면서 제작한 점토 벽돌을 사용하였다. 시험결과, 콘크리트 벽돌과 점토 벽돌의 품질기준을 만족하는 제지회의 최대 치환률은 각각 11.5%와 12%로 나타났다.

**주요어** : 제지회, 콘크리트 벽돌, 점토 벽돌, 치환률

\* 정회원 · 충북대학교 공과대학 토목공학과 강사

\*\* Illinois Institute of Technology 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원 · 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수(043-261-2405, heoyol@yahoo.co.kr)

## 1. 서론

1970년대 급격한 산업발전 이후 관심 밖이었던 폐기물 관리에 대해 1990년대에 들어 국가적 차원의 노력을 기울이기 시작했으나 산업폐기물을 완벽하게 처리할 수 있는 방법을 제시하고 있지 못하는 실정이다. 그 이유로는 폐기물 처리 및 처분기술의 무분별한 도입, 폐기물 처리장소의 확보과정에서 발생하는 민원, 산업체와 정부 그리고 주민들의 폐기물 처리에 대한 인식결여 등을 들 수 있다. 폐기물 처리 방법으로는 단순매립, 소각 등 여러 가지 방법이 있으나 환경오염과 자연생태계의 파괴를 방지할 수 있는 최선의 방법은 되지 못한다.

산업폐기물 중 국내의 종이시장의 증가로 인하여 매년 제지산업폐기물의 발생량이 증가하고 있으며, 특히, 제지슬러지의 연간 발생량이 120만톤으로 이를 소각·매립 처리할 경우에 소유 매립지를 이용한다 하더라도 톤당 3만원 이상으로 450억원 이상의 처리비용이 소요된다. 또한, 사내 매립지를 보유하고 있지 않거나 소각시설을 보유하고 있지 않은 경우에 국가 매립시설을 사용할 경우 환경청 고시가 44,000원/톤, 폐기물 처리업체의 매립시설을 이용할 경우 90,000원/톤 이상이기 때문에 상당한 처리비용이 든다. 제지산업폐기물은 연간 발생량이 1,721천톤으로 나타나 있으며, 이중 제지회는 전체 발생량의 약 15.0%인 258천톤에 달하고 있으며, 이를 처리하기 위해 매년 172억원, 그리고 제지회의 처리에는 이중 15.0%인 약 26억원이 소요되고 있다(한국제지공업연합회, 1999).

이에 본 연구에서는 제지산업폐기물 중 제지회에 대하여 단순매립 처리 등 기존의 처리 방법이 아닌 재활용 가능성을 연구하고자 기본 물성시험 및 역학적 물성시험을 통하여 제지회의 특성을 규명하였으며, 제지회에 안정제로서 시멘트를 혼합하여 강도 특성을 검토하고, 제지회를 첨가한 콘크리트 벽돌과 점토 벽돌을 제작함으로써 건설재료로서의 활용방안을 연구하였다.

## 2. 실험내용 및 방법

### 2.1 제지회의 물성시험

본 실험에 사용된 제지회는 충북 청원군 강외면에 위치한 대한제지 공장에서 채취하였으며, 제지회에 대한 건설

재료로서의 활용가능성을 알아보기 위하여 시료의 기본물성 시험인 함수비, 비중, 아터버그한계, 입도분석시험을 수행하였으며, 역학적 물성시험으로는 다짐시험, 일축압축시험, 압밀특성에 관한 물성 및 기대효과를 예측하기 위한 압밀시험, 토공재료로서 적절한 투수계수를 측정하기 위한 변수위투수시험, 노상토의 강도, 압축성, 팽창성 등을 알아보기 위한 노상토 지지력시험을 실시하였다. 그리고, 제지회의 전단특성을 알아보기 위하여 압밀배수 삼축압축시험을 실시하였으며, 제지회의 유해물질 함유량을 파악하기 위하여 폐기물 공정시험법에 의한 용출시험을 실시하였다. 또한, 제지회에 혼합제로 시멘트를 5, 10, 15, 20, 25, 30%까지 혼합하여 다짐시험과 일축압축시험을 실시하여 혼합비에 따른 다짐 및 강도특성을 규명하였다.

### 2.2 제지회 벽돌 제작

본 실험은 현재 건설시장에 출하되고 있는 콘크리트 2차 제품인 C종 2급 콘크리트 벽돌(190×90×57mm) 제조시에 산업폐기물인 제지회를 골재의 일부로 치환하여 제조한 벽돌과 제지회를 점토의 일부로 치환하여 제조한 점토 벽돌에 대하여 품질 특성을 파악하고자 하였다.

콘크리트 벽돌 제작의 경우 제지회의 치환률은 충북 청원군 옥산면 소재 S기업의 출하 제품의 배합설계를 기준으로 골재에 대해 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20%까지 치환하여 제품을 생산하였으며, 점토 벽돌 제작의 경우는 제지회의 치환률은 충북 진천군 덕산면 소재 S기업의 제품 배합설계를 기준으로 기존의 점토 벽돌 시료에 대해 5, 10, 15, 20, 25, 30%까지 치환하여 제품을 생산하였고, 생산된 제품에 대하여 각각 한국산업규격에 의하여 품질을 평가하였다.

#### 2.2.1 콘크리트 벽돌 제작

현재 국내의 콘크리트 벽돌에 관한 표준인 KS F 4004에 따르면 제품의 제조에 있어서 성형과 양생 방법에 관한 규정만이 명시되어 있을 뿐, 배합기준은 제품의 품질에 따라 업체의 자율로 위임하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 현재 제품을 출하하고 있는 기업의 배합설계를 참고하여 배합을 결정하였으며, 각각의 치환률에 따라 함수량은 벽돌 성형작업시 성형성과 내구성을 고려하여 결정하였

다. 시멘트는 비중이 3.15인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 골재는 비중이 2.52, 흡수율 2.88의 부순골재를 사용하였다. 시험에 사용한 골재의 물리적특성은 표 1과 같고, 골재의 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 표 2는 콘크리트 벽돌의 배합계획을 나타낸 것이다. 재료의 혼합은 용량 30ℓ인 믹서를 사용하여 부순골재, 시멘트, 제지회 순서로 믹서에 투입하여 1분간 건비빔을 실시하였으며, 물을 투입후 2분간 본 비빔을 실시하였다. 벽돌 제작은 S 기업의 기계를 이용하여 제작하였으며, KS F 4004 규정에 의거하여 증기 양생실에서 1차 실내양생을 하였고, 이후 상온상태에서 양생을 실시하였다.

제지회를 혼합한 콘크리트 벽돌의 품질 평가를 위해 KS F 4004의 규정의 의거하여 압축강도시험과 흡수율시험을 실시하였다. 압축강도시험은 제품 출하일을 기준으로 하여 재령 14일에서 실시하였으며, 시간경과에 따른 강도증가를 관찰하고자 재령 3일과 7일째 압축강도시험을 실시하였다. 표 3은 KS F 4004에 규정된 콘크리트 벽돌의 품질 규준을 나타내고 있다.

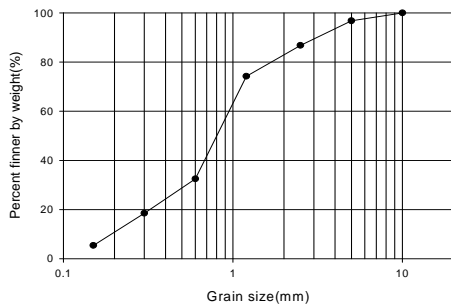


그림 1. 골재의 입도분포곡선

표 1. 골재의 물리적특성

물리적 특성	골재의 최대치수	비중	흡수율	조립율
부순골재	5mm	2.52	2.88	2.9

표 2. 콘크리트 벽돌의 혼합비

기호	골재에 대한 제지회 치환률(%)	표준 중량 배합(kgf/m <sup>3</sup> )			
		W	C	제지회	부순골재
AS-1	2	125.0	212.5	38.75	1893.3
AS-2	4	142.5	212.5	77.25	1854.8
AS-3	6	155.0	212.5	116.0	1816.0
AS-4	8	187.5	212.5	154.5	1777.5
AS-5	10	225.0	212.5	192.5	1739.5
AS-6	12	237.5	212.5	232.5	1697.5
AS-7	14	250.0	212.5	270.0	1662.5
AS-8	16	262.5	212.5	310.0	1622.5
AS-9	18	250.0	212.5	347.5	1585.0
AS-10	20	237.5	212.5	387.5	1545.0

표 3. 콘크리트 벽돌의 품질기준

구 분	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	흡수율(%)
A종 벽돌	82	-
B종 벽돌	122	-
C종 벽돌	1급	7이하
	2급	10이하

## 2.2.2 점토 벽돌 제작

점토 벽돌 제작은 KS 인증 회사로써 제품을 출하 중인 충북 진천군 덕산면 소재 S공장의 점토 벽돌 공정도에 의하여 제품을 제작하였다. 본 시험에서는 점토와 규사로 이루어진 원토에 제지회를 5, 10, 15, 20, 25, 30%까지 증가시키면서 첨가하여 시험체를 제작하였다. 제작한 벽돌은 온도 60±10℃, 습도 85±10%인 건조실에서 60±2 시간동안 건조한 후 소성로에서 1070±20℃의 온도로 48시간 소성시켜 벽돌을 제작하였다. 표 4는 점토 벽돌 시험체의 제작에 사용된 1m<sup>3</sup>당 중량 배합을 나타낸 것이다.

제지회를 혼합하여 제작한 점토벽돌의 품질 평가시험으로 KS L 4201의 규정에 의거하여 압축강도와 흡수율시험을 실시하였으며, 흡수율시험은 24시간 침수시켜 흡수율을 구하는 방법을 선택하였다. 표 5는 KS L 4201에 규정

된 점토 벽돌의 품질기준을 나타낸 것이다.

표 4. 점토 벽돌의 혼합비

구분	제지회 치환률(%)	표준 중량 배합(kg/m <sup>3</sup> )			
		점토	규사	제지회	물
CS-1	5	1330	570	100	500
CS-2	10	1260	540	200	560
CS-3	15	1190	510	300	620
CS-4	20	1120	480	400	690
CS-5	25	1050	450	500	710
CS-6	30	980	420	600	780

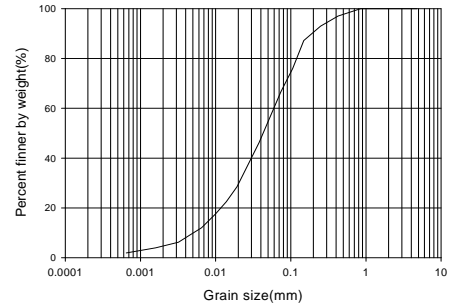


그림 2. 제지회의 입도분포곡선

표 5. 점토 벽돌의 품질기준(KS L 4201)

종류 품질	종류			
	1종	2종	3종	비고
흡수율(%)	10이하	13이하	15이하	24시간
	13이하	16이하	18이하	3시간
압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	210이상	160이상	110이상	

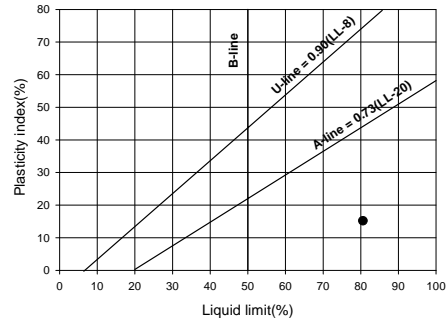


그림 3. 소성도표

### 3. 결과분석 및 고찰

#### 3.1 제지회의 물성특성

##### 3.1.1 기본물성특성

제지회에 대한 입도분석 결과 그림 2에 나타낸 바와 같이 0.074mm체 통과율은 66.63% 정도이고, 유효경 ( $D_{10}$ )은 0.0052mm, 균등계수는 10.54, 곡율계수는 1.55로 입도분포가 양호하며, 통일분류법으로 MH로 분류된다. 제지회의 액성한계는 80.6%, 소성지수는 15.2%로 나타났다(그림 3). 제지회의 활성도는 2.3 정도로 다소 높게 나타나므로 활성도를 이용한 간접적인 안정성 평가에 있어서는 제지회에 활성도를 낮출 수 있는 재료를 혼합시킨다면 내구성이 증진될 수 있을 것으로 보인다.

#### 3.1.2 다짐특성

그림 4는 제지회에 대한 다짐시험 결과를 나타낸 것으로 최대건조단위중량은 A다짐과 D다짐에서 각각 0.87gf/cm<sup>3</sup>과 0.93gf/cm<sup>3</sup>을 나타내고 있다. 이와 같이 다짐한 제지회의 경량성은 원지반이 연약층일 경우 원지반의 침하와 관련하여 볼 때 그리고 구조물의 뒷채움재로 사용할 경우 토압면에서 볼 때 일반 토공재에 비해 우수한 특성을 갖는다고 할 수 있다. 즉, 제지회를 경량성토재로 활용가능성이 있다고 생각된다. 한편, A다짐시험결과 제지회의 최적함수비는 63.6% 정도이며, D다짐시험 결과 제지회의 최적함수비는 58%로 평가되었다.

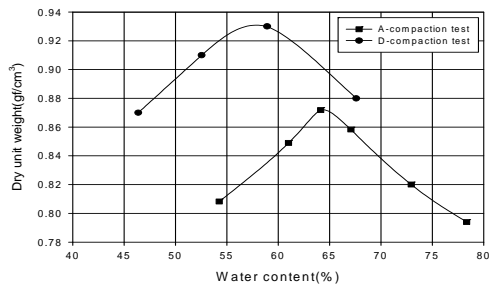


그림 4. 제지회의 다짐곡선

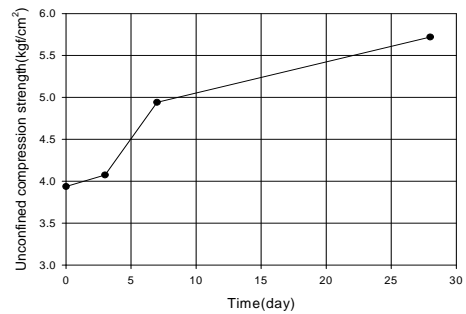


그림 6. 시간경과에 따른 제지회의 일축압축강도

### 3.1.3 강도특성

제지회의 강도특성은 일축압축시험을 통하여 규명하였으며, 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 제지회에 대한 일축압축시험 결과 응력과 변형률의 관계는 파괴가 발생하기 직전의 변형률까지 거의 비례적인 관계를 나타내었다.

공시체 제작직후 측정된 제지회의 일축압축강도는 3.94 kgf/cm<sup>2</sup>로 복토재의 일축압축강도 기준(0.5kgf/cm<sup>2</sup>이상)을 만족하며, 군산, 장항지역 연약점토의 평균 일축압축강도인 0.38kgf/cm<sup>2</sup>(박성영, 1998)에 비해 10배 이상 큰 강도를 나타내었다. 이와 같이 비교적 단위중량이 작고 높은 함수비임에도 불구하고 큰 강도를 나타내는 것은 제지회에 포함되어 있는 석회성분에 의한 자경효과 때문이라고 생각된다. 그림 6은 시간경과에 따른 제지회의 일축압축강도의 변화를 나타낸 것으로 시간경과에 따라 일축압축강도가 증가하며, 28일 경과후의 일축압축강도는 5.72kgf/cm<sup>2</sup>으로 제작 직후에 비해 45% 정도 증가하였다. 한편, 제지회의 파괴시 변형률은 1.2~2.5% 정도로 시간경과에 따라 감소하였다.

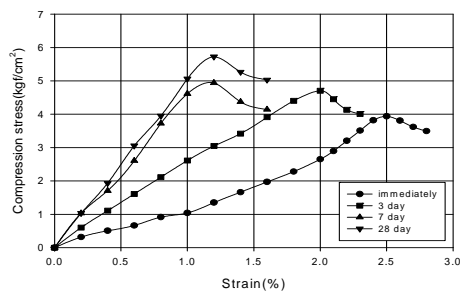


그림 5. 제지회의 일축압축시험 결과

### 3.1.4 압밀특성

제지회에 대한 압밀특성을 구하기 위하여 3가지 조건, 즉, 최적다짐상태와 최대건조단위중량의 95%에 대응하는 건조 및 습윤축 함수비에 대하여 표준압밀시험을 실시하였다. 그림 7에 나타낸 바와 같이 재하단계동안의 간극비의 변화량은 시료의 함수비가 58, 63, 71.5%인 경우 각각 0.174, 0.226, 0.235로 함수비가 증가할수록 증가함을 알 수 있으며, 또한, 초기간극비에 대한 간극비의 변화량의 비는 시료의 함수비가 58, 63, 71.5%인 경우 각각 9.03, 12.34, 12.20%로 일반적인 연약점토에 비해 작은 값을 나타내고 있다. 제지회의 압축지수는 0.099~0.141로 군산, 장항지역 연약점토의 평균 압축지수인 0.51(박성영 등, 1998)에 비해서는 상당히 작은 값을 나타내고 있어 제지회의 압축성은 적은 것으로 판단된다. 한편, 제지회의 팽창지수는 0.025~0.030로 압축지수의 21.3~25.3% 정도를 나타내었다.

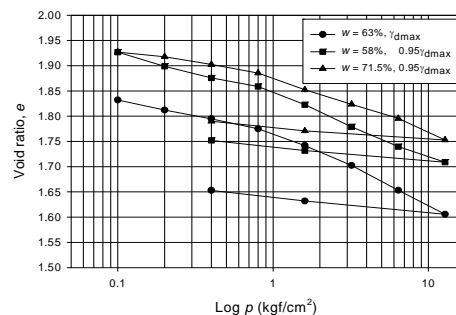


그림 7. 제지회의 e-log p 곡선

### 3.1.5 투수특성

제지회의 투수특성을 파악하기 위하여 시료의 함수비를 50, 55, 60, 65, 70, 75%로 변화시켜 가면서 변수위투수시험을 실시하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 여기에 나타낸 투수계수는 시간경과에 따른 변화를 측정하여 일정한 값으로 수렴할 때의 값을 나타내었다. 그림 8로부터 투수계수는 함수비의 변화에 따라 많은 변화를 보이고 있다. 즉, 제지회의 투수계수는 최대건조단위중량의 95%에 해당하는 습윤층 함수비까지는 함수비가 증가함에 따라 감소하였으며, 그 이후부터 투수계수는 증가하는 경향을 나타낸다. 최소투수계수는 최적함수비에서 약간 습윤층 함수비인 70%에서 나타나고 있어 제지회는 차수목적으로 이용하는 경우 최적함수비보다 약간 습윤층 함수비에서 시공하는 것이 투수계수 감소에 효과적일 것으로 판단된다. 함수비 70%에서 측정된 투수계수는  $3.9 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로 차수재 기준( $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하)을 만족하지 않는 것으로 나타났다.

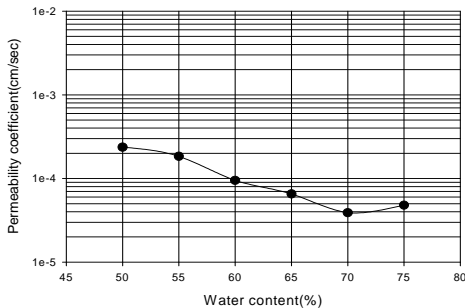


그림 8. 함수비에 따른 투수계수 변화

### 3.1.6 노상토 지지력특성

그림 9는 노상토 지지력 시험결과 CBR값과 건조단위중량과의 관계를 나타낸 것이다. 이로부터 4일 수침 후의 제지회의 최대건조단위중량의 95%에 대응하는 수정 CBR 값은 34%로 도로공사 표준시방서(1986)에 규정되어 있는 토공용 재료의 품질기준(하부노상 5이상, 상부노상 10 이상)을 만족하는 높은 CBR 값을 갖고 있기 때문에 도로의 성토에 사용 가능할 것으로 여겨진다. 그러나, 이러한 분석은 수정 CBR 값만을 기준으로 살펴본 것이므로 실제

시공가능성을 위해서는 내구성, 동상성에 관한 검토가 추가적으로 이루어져야겠다. 한편, 제지회의 단위중량이 일반 성토재에 비해 훨씬 낮고, 높은 함수비임에도 불구하고 높은 수정 CBR 값을 나타내는 것은 제지회에 포함되어 있는 SiO<sub>2</sub>와 CaO 성분의 포졸란 반응에 의한 자경성 때문이라고 생각된다.

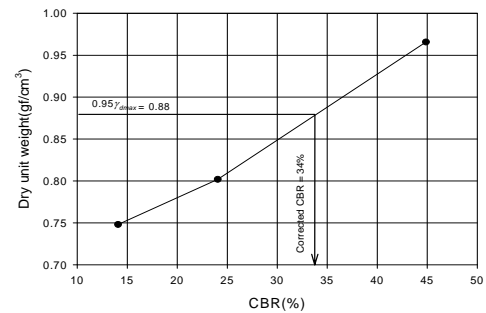


그림 9. 제지회의 CBR값과 건조단위중량 관계

### 3.1.7 전단특성

제지회의 전단특성을 알아보기 위하여 최대건조단위중량의 95%로 시료를 성형하여 0.1, 1.0, 2.0, 3.0kgf/cm<sup>2</sup>의 구속압력하에서 압밀배수삼축압축시험을 실시하였다. 그림 10과 그림 11에 나타낸 바와 같이 최대축차응력은 약 2.5~6%의 축변형률에서 발생하며, 구속압력이 증가할수록 최대축차응력이 발생하는 변형률이 증가하였다. 축변형률에 따른 체적변화율은 구속압력이 적은 경우에 초기에는 압축현상을 보이다가 압축에서 팽창하는 다이러턴시 현상이 크게 발생하고 있으며, 구속압력이 큰 경우에는 축변형률의 증가에 따라 지속적인 압축현상을 나타내고 있다.

그림 12는 삼축압축시험 결과 p-q 공간상에 K<sub>f</sub>선을 나타낸 것이다. 이 최대 전단응력점을 연결한 선의 경사각 φ와 절편으로부터 구한 내부마찰각은 30.4°이며, 점착력은 0.329kgf/cm<sup>2</sup>으로 평가되었다.

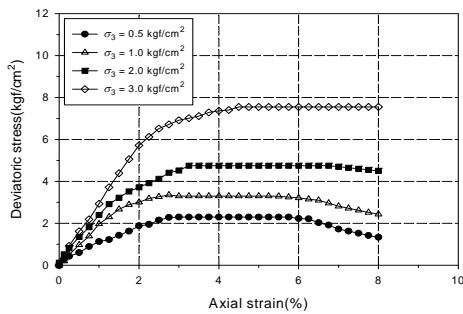


그림 10. 축차응력-축변형률 곡선

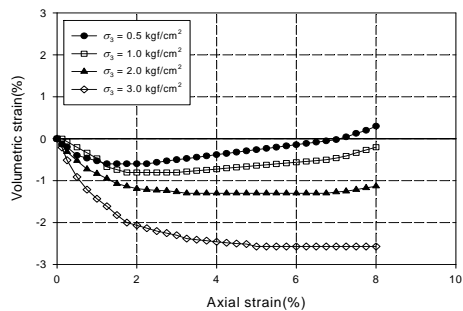


그림 11. 체적변형률-축변형률 곡선

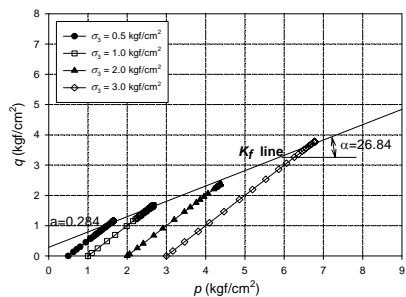


그림 12. 제지회의 p-q 응력경로

### 3.1.8 용출특성

용출시험 결과 유해물질이 기준치 이상 함유되어 있으면 지정폐기물로 취급되어 재활용이 불가능하게 된다. 본 제지회의 유해물질 함유량을 파악하기 위해 실시한 용출시험

결과를 나타내면 표 6과 같다. 표 6에서 알 수 있는 바와 같이 모든 평가항목에서 유해물질 함유량이 거의 없거나 기준치 이하로 나타남으로서 일반폐기물로 분류할 수 있으며, 본 시료를 토공재 등으로 활용시 중금속에 의한 문제를 야기시키지 않을 것으로 판단된다.

표 6. 제지회의 용출시험결과

Examination item	Standard value (mg/l)	Paper ash (mg/l)
Cd	0.3	0.011
Pb	3.0	0.032
Cu	3.0	0.002
Hg	0.005	ND*1)
CN	1.0	ND
Cr6+	1.5	0.055
As	1.5	0.001
Org.P	1.0	ND
Trichloroethylene	0.3	ND
Tetrachloroethylene	0.1	ND

### 3.1.9 화학성분 분석

표 7은 EDS분석 결과 제지회의 화학성분을 나타낸 것으로 제지회는 실리카(SiO<sub>2</sub>), 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 석회(CaO)가 전체의 80% 이상을 차지하는 주성분이고, 그밖의 성분으로 산화제2철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 고토(MgO) 등이 존재한다. 특히, 제지회에는 석회의 구성비율이 18.49%로 비교적 높게 나타나 포졸란 반응에 의한 자경효과가 클 것으로 판단된다.

표 7. 제지회의 화학성분

Element	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Total
Weight(%)	37.2	26.05	18.49	6.20	2.98	0.59	96.39

### 3.2 시멘트 혼합비에 따른 제지회의 강도특성

단위중량이 비교적 작은 제지회를 토압 경감효과 측면에서 경량 성토재나 구조물의 뒷채움재로 이용하는 경우 소요의 지반강도를 필요로 하게 될 수도 있기 때문에 제지회

의 강도증가를 목적으로 제지회에 시멘트를 안정제로 첨가하여 시간경과(3, 7, 28일)에 따른 일축압축시험을 실시하였다. 그림 13은 시간경과에 따른 제지회의 일축압축강도를 나타낸 것으로 시멘트의 혼합비가 증가할수록, 시간이 경과함에 따라 일축압축강도가 증가한다는 것을 알 수 있다.

그림 13으로부터 시멘트의 혼합비 10%까지는 시간경과에 따른 강도의 증가현상이 미소하지만, 혼합비가 15%부터 강도증가 현상이 크게 나타났다. 즉, 시멘트의 혼합비가 10%인 경우 28일 강도는 20.33kgf/cm<sup>2</sup>으로 3일 강도에 비해 약 3% 정도 증가하지만, 혼합비가 15%에서 28일 강도는 29.4kgf/cm<sup>2</sup>으로 3일 경과 후의 강도에 비해 20% 정도 크게 평가되었다. 시멘트의 혼합비가 30%인 경우 28일 후의 일축압축강도는 65.85kgf/cm<sup>2</sup>으로 시멘트를 첨가하지 않은 경우에 비해 10배 이상 강도 증가 효과가 발생하였다.

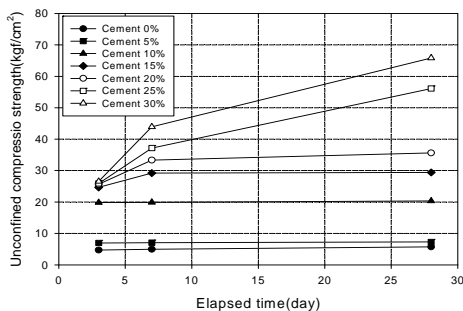


그림 13. 시간경과에 따른 제지회의 일축압축강도

### 3.3 제지회를 이용한 벽돌의 품질특성

#### 3.3.1 콘크리트 벽돌의 품질특성

제지회를 2~20%로 혼합하여 제작한 콘크리트 벽돌에 대한 품질평가를 위하여 KS F 4004에 의한 압축강도시험과 흡수율시험을 실시하였으며, 그 결과를 그림 14와 그림 15에 나타내었다. 그림 14에 나타낸 바와 같이 제지회의 치환률이 증가함에 따라 압축강도가 감소하고, 시간경과에 따라 압축강도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 14로부터 골재에 대한 제지회의 치환률이 18%(AS-9)인 경우 14일 경과후의 압축강도는 88kgf/cm<sup>2</sup>으로 C종 2급 콘크

리트 벽돌의 압축강도 품질기준인 82kgf/cm<sup>2</sup>을 만족하는 것으로 나타났다. 7일 압축강도를 기준으로 하면 제지회의 치환률이 12% 정도에서 C종 2급의 품질기준을 만족하고 있다. 이와 같이 비교적 높은 강도를 나타내는 것은 제지회의 성분분석결과에서 알 수 있는 바와 같이 제지회에 포함되어 있는 SiO<sub>2</sub>와 CaO 성분에 의한 자경효과 때문이라고 판단된다.

한편, 그림 15에 나타낸 바와 같이 제지회의 치환률에 따른 흡수율시험결과 KS F 4004에 규정되어 있는 C종 2급 콘크리트 벽돌의 흡수율 기준(10% 이하)을 만족하는 골재에 대한 제지회의 치환률은 10% 정도이며, 제지회의 치환률이 12%인 AS-6 시험체의 흡수율은 10.06%로 품질기준을 약간 초과하는 것으로 나타났다. 그림 15로부터 제지회의 치환률이 증가할수록 흡수율이 증가하며, 제지회의 치환률이 14% 이상에서 급격하게 증가하며, 이는 제지회의 입도분석결과에서 알 수 있는 바와 같이 제지회의 미세립자 함유량이 높기 때문이라고 생각된다.

이상과 같이 제지회를 혼합하여 제작한 콘크리트 벽돌에 대한 품질시험 결과 C종 2급 콘크리트 벽돌의 품질기준(압축강도 82kgf/cm<sup>2</sup> 이상, 흡수율 10% 이하)을 만족하는 골재에 대한 제지회의 최대 치환률은 11.5% 정도인 것으로 판단된다.

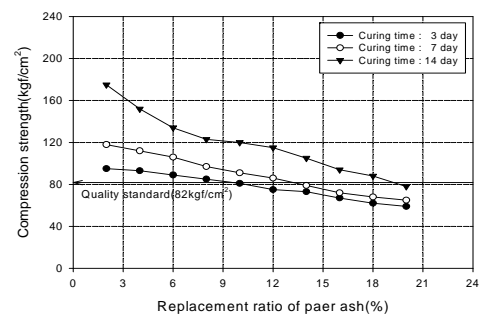


그림 14. 제지회의 치환률에 따른 콘크리트 벽돌의 압축강도



재활용하는 경우 최대치환률은 12% 정도라고 판단된다.

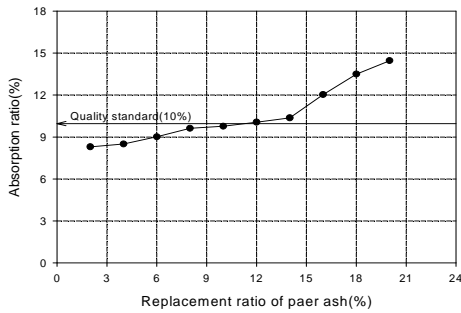


그림 15. 제지회의 치환률에 따른 콘크리트 벽돌의 흡수율

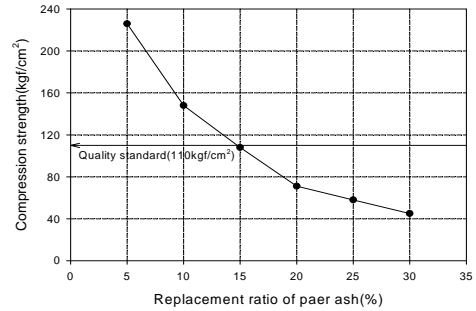


그림 16. 제지회의 치환률에 따른 점토 벽돌의 압축강도

### 3.3.2 점토 벽돌의 품질특성

그림 16과 그림 17은 각각 점토 벽돌에 대한 품질시험 결과 제지회의 치환률에 따른 점토 벽돌의 압축강도와 흡수율의 변화를 나타낸 것으로 제지회의 치환률이 증가함에 따라 압축강도는 감소하고, 흡수율은 증가한다는 것을 알 수 있다. 그림 16으로부터 점토와 규사토로 이루어진 원토에 대한 제지회의 치환률이 5%(CS-1)인 점토 벽돌의 압축강도는 226kgf/cm<sup>2</sup>으로 1종 점토 벽돌의 압축강도 기준인 210kgf/cm<sup>2</sup> 이상을 만족하고 있으며, 치환률이 10%(CS-2)인 경우 압축강도는 148kgf/cm<sup>2</sup>로 3종 점토 벽돌의 압축강도 기준(110kgf/cm<sup>2</sup> 이상)을 만족하고 있다. 한편, 제지회의 치환률이 10% 이상인 경우에는 압축강도가 기준에 미치지 못하는 것으로 평가되었다.

그림 17로부터 제지회의 치환률이 5%인 CS-1의 흡수율은 8.86%로 1종 점토 벽돌의 품질기준을 만족하며, CS-2의 흡수율은 13.84%로 3종 점토 벽돌의 기준을 만족하고 있다. 한편, 제지회의 치환률이 10% 이상인 경우에는 흡수율이 17% 이상으로 품질기준을 초과하는 것으로 나타났다.

제지회의 치환률에 따른 점토 벽돌에 대한 품질평가시험 결과 제지회의 치환률이 5%인 경우 압축강도와 흡수율은 1종 점토 벽돌 기준을 만족하고 있으며, 치환률이 10%인 경우에는 3종 점토 벽돌 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이상과 같이 점토 벽돌에 대한 품질시험 결과 3종 점토 벽돌의 품질기준을 만족하는 제지회의 최대 치환률은 약 12%이며, 2종 벽돌의 품질기준을 만족하는 제지회의 치환률은 9% 정도이다. 따라서, 제지회를 점토 벽돌 재료로

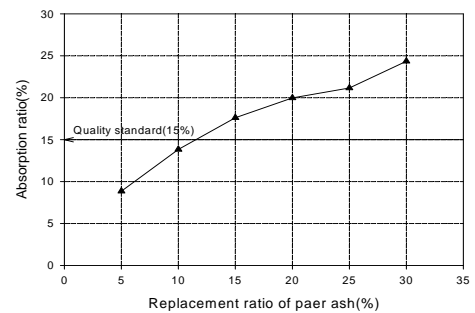


그림 17. 제지회의 치환률에 따른 점토 벽돌의 흡수율

## 4. 결 론

본 연구에서는 제지공장에서 슬러지를 소각하여 발생하는 제지회에 대하여 기본물성 및 역학적 물성시험을 실시하여 제지회의 토질공학적 특성을 분석하였고 또한, 제지회를 혼합하여 제작한 콘크리트 벽돌과 점토 벽돌에 대한 품질특성을 분석하여 건설재료로서의 재활용방안을 연구하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제지회는 통일분류법으로 MH, AASHTO 분류법으로 A-7-5로 분류되며, 최대건조단위중량은 일반 토사에 비해 작게 나타나 경량성토재로서 활용가능성이 있다고 생각된다. 또한, 수정 CBR값만을 기준으로 할 때 제지회는 토공재료의 품질기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

2. 공시체 제작직후의 제지회의 일축압축강도는 3.94

kgf/cm<sup>2</sup>으로 비교적 큰 강도를 나타내고 있어 복토재의 일축압축강도기준을 만족하고 있다. 제지회는 실리카(SiO<sub>2</sub>), 알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 석회(CaO)가 주성분이고, 특히, 석회의 구성비율이 18.5% 정도로 비교적 높게 나타나 포졸란 반응에 의한 자경효과가 클 것으로 판단된다.

3. 제지회를 혼합하여 제작한 콘크리트 벽돌에 대한 품질시험 결과 C종 2급 콘크리트 벽돌의 품질기준을 만족하는 골재에 대한 제지회의 최대치환률은 11.5% 정도로 평가되었다.

4. 점토 벽돌에 품질시험 결과 3종 점토 벽돌의 품질기준을 만족하는 제지회의 치환률은 약 12%이며, 2종 벽돌의 품질기준을 만족하는 제지회의 치환률은 9% 정도로 나타났다. 즉, 제지회를 점토 벽돌 재료로 재활용하는 경우 최대 치환률은 12% 정도라고 판단된다.

(접수일자 : 2003년 3월 24일)

## 참 고 문 헌

1. 건설부(1986), 도로공사 표준시방서, pp. 74~79.
2. 박성영, 오다영(1998), 국내 연약지반의 지역별 공학적 특성, 대한토목학회지, Vol.46, No.9, pp. 76~79.
3. 한국건설기술연구원(1996), 인공차수재 및 복토재개발, pp. 17~435.
4. 한국제지공업연합회(1996), 제지산업 폐기물발생 및 처리현황 조사보고서.
5. 한국제지공업연합회(1999), 제지산업 폐기물발생 및 처리현황 조사보고서, pp. 1~12.
6. 한국제지공업연합회(1997), 펄프지류 통계월보.
7. 허열, 이처근, 안광국, 김민호(2000), 산업폐기물 제지회의 지반공학적 특성 및 활용가능성, 한국지반환경공학회 논문집, 제1권, 제1호, pp. 19~26.
8. Alleman, J. E., and Berman, N. A.(1984), Constructive Sludge Management : Biobrick, Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol.110, No.2, pp. 346~359.
9. Daniel, D. E.(1993), Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapman & Hall, New York.
10. Lin, D. F., and Weng, C. H.(2001), Use of Sewage Sludge Ash as Brick Material, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No.10, pp. 922~927.
11. Moo-Young, H.K., and Zimmie, T.F.(1996), Geotechnical Properties of Paper Mill Sludge for Use in Landfill Cover, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.122, No.9, pp. 768~775.
12. U.S. Environmental Protection Agency(1986), "Construction Quality Assurance for Hazardous Waste Land Disposal Facilities, Technical Guidance Document", EPA/530-SW-86-031, US EPA, Washington D.C.
13. Ullrich, C. R., and Hagerty, D. J.(1987), "Stabilization of FGC Wastes", Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, No.13, pp. 797~796.