

재생골재와 실리카흄을 이용한 탄소섬유보강 포러스콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구

An experimental study on the mechanical properties of carbon fiber reinforced porous concrete utilizing recycled aggregate and silica fume

김 정 환** 이 봉 춘** 김 상 혁** 박 승 범*
Kim, Jeong Hwan Lee, Bong Chun Kim, Sang Hyuk Park, Seung Bum

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze void ratio, coefficient of water permeability, and strength characteristics when silica fume and carbon fibers were added in order to improve the strength of porous concrete, and when recycled aggregates were used. Comparing with the case that recycled aggregate was not used, as the replacement ratio of recycled aggregate increased, the differences in void ratios and strength characteristics were decreased. In the case that silica fume was used, the content of 10% silica fume was most effective in improving strength. In the case that carbon fibers were used, the content of 3% carbon fiber were good to achieve the highest flexural strength, and Pan-derived CF was much better than pitch-derived CF in improving these effects.

1. 서 론

우리나라는 고도의 산업화와 공업화 과정을 거치면서 삶의 풍요로움을 누려왔으나 반면에 자연환경 훼손과 무절제한 부존자원의 활용으로 자원의 고갈현상을 초래하고 있으며, 또한 환경을 개발할 때에 환경에 대한 인식보다는 경제논리에 입각하여 개발이 추진되어 이로 인한 개발지역 주변이 오염이 심각하게 되어 생태계 파괴를 일으키게 되었다. 1992년 유엔환경개발 회의에서 단순히 환경보호 차원이 아닌 환경과 개발을 동시에 통합시켜야 한다는 주장이 제기되어 환경적으로 건전하고 지속 가능한 개발을 기본원칙으로 하는 「Rio Declaration」과 「Agenda 21」이 채택되어 전세계적으로 환경을 고려한 신개념·신기술에 대한 연구개발을 추진하게 되었다. 따라서 건설 분야에서도 도시개발시 환경문제의 해결 및 경관의 향상을 전제로 한 개발이 진행되고 있으며 콘크리트 구조물도 자연과의 조화가 요구되고 있다.¹ 이런 측면에서 콘크리트에 잔골재를 사용하지 않고 불연속 입도의 곱은골재를 사용하여 인위적으로 연속공극을 형성시켜 투수성, 투기성, 흡음성, 수질정화 및 식생능력 등의 다기능을 가진 포러스콘크리트에 주목하여 다방면에서 연구가 활발히 진행되고 있다.²⁻⁶ 그러나 포러스콘크리트는 내부에 다량의 연속공극이 형성되어 있어 보통콘크리트에 비해 강도특성과 내구성에 있어서 취약한 특성

* 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 충남대학교 토목공학과

을 보이고 있다⁴ 따라서 본 연구에서는 포러스콘크리트의 강도증진 및 재생골재의 적용가능성을 분석하기 위하여 탄소섬유와 실리카흙 혼입에 따른 물리·역학적 특성을 검토하였고 재생골재 혼입률에 따른 영향을 검토하였으며 녹화콘크리트로서의 사용가능성을 평가하였다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료

2.2.1 시멘트 및 골재

시멘트는 국내 D사 제품의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 골재는 충남 금산 H사에서 생산되는 최대치수 20mm의 부순돌을 사용하였고, 재생골재는 충남 H사에 제조된 최대치수 20mm를 사용하였으며 그 물리적성질 표1과 같다.

표 1 사용 골재의 물성

Items	Gradation (mm)	Specific gravity	Water absorption (%)	Absolute volume (%)	Unit weight (kg/m ³)
Crushed Aggregate	10~20	2.69	0.7	55.4	1,489
Recycled Aggregate	10~20	2.34	1.32	57.1	1,336

2.2.2 실리카흙 및 탄소섬유

실리카 흙은 호주의 Elkem Co. 제품의 초미분말 실리카흙을 사용하였으며, 탄소섬유는 일본 KOSKA(주)의 PAN계와 Pitch계 섬유를 사용하였으며 탄소섬유의 물리적 특성은 표2와 같다. 혼화제는 시멘트의 분산작용에 의해 콘크리트의 성질을 개선시키는 감수제로서, 일본 K사 제품의 나프탈렌 설폰산염 고축합물계 Mighty-150을 사용하였다.

표 2 탄소섬유의 물성

Type	length (mm)	diameter (μm)	Specific gravity	Young's modulus (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Elongation (%)
Pan derived carbon fiber	6.0	6.8	1.78	23.0	35,000	1.6
Pitch derived carbon fiber	6.0	14.5	1.63	3.8	7,800	2.1

2.3 시험방법

2.3.1 플로우 시험

플로우 시험은 포러스콘크리트 제조시 적정한 유동성을 확보하기 위하여 KS L 5111에 준하여 실리카흙 혼입률에 따른 고성능 유동화제량을 결정하였다.

2.3.2 공극률

포러스콘크리트의 공극률시험은 일본 에코콘크리트연구위원회의¹ 『포러스콘크리트의 공극률시험방법(안)』에 준하여 원주형 공시체의 표면건조상태의 중량을 측정한 (W₁)과 원주형 공시체의 측면과 바닥면을 완전히 밀봉하고 상부에서 물을 주입하여 공시체를 완전히 포수시킨 중량(W₂)을 측정하여 그 차를 공시체의 용적(V)으로 나눈 값을 사용하였다.

2.3.3 투수계수

포러스콘크리트의 투수계수 시험은 일본에코콘크리트연구위원회의¹ 『포러스콘크리트의 투수계수 시험방법』에 준하여 측정하였으며 투수의 정도를 투수계수로 표시하였으며 Darcy의 법칙에 근거하여 산출하였다.

2.3.4 단위용적중량

포러스콘크리트의 단위용적중량시험은 KS F 2409에 준하여 시편의 체적에 대한 중량으로, 포러스 콘크리트의 압축강도용 공시체에 대하여 체적에 대한 중량으로 계산하였다.

2.3.5 압축강도, 휨강도 및 휨인성

재령 28일에서 압축강도는 KS F 2405에 준하여 일본 M사 제품의 용량 100t의 유압식 만능시험기를 사용하여 측정하였으며 휨강도 및 휨인성은 KCI-SF-104에 준하여 일본 S사 제품의 B Type Autograph를 사용하여 측정하였다.

2.3.6 식생능력평가

포러스콘크리트의 식생능력평가는 40×40×10cm의 평판공시체를 제조하여 식생에 영향을 미치는 알칼리도를 감소시키기 위해 중성화 촉진시험기를 이용하여 중화처리를 하였다. 중화처리된 평판공시체에 발효과 피트머스 및 퇴비를 물과 혼합하여 보수성충진재를 제조하여 슬러리 상태로 충전하였다. 이때 보수성 재료의 충전률은 공극의 70%로 설정하였다. 박충복토는 발효, 피트머스, 유기질비료 및 물과 혼합하여 3cm 두께로 복토를 하였다. 각 배합별로 객토의 유무에 따라 초본류인 Paranal Ryegrass를 파종하여 식생능력을 평가하였다.

2.4 배합 및 믹싱

배합은 재생골재의 적용가능성과 고성능의 식생용 포러스콘크리트를 제조하기 위하여 10~20mm의 단입도의 골재에 대하여 재생골재는 혼입률을 50%, 100%로 변화시켰고, 실리카흙은 5%, 10%, 20%로 변화시켰으며, 2종류의 탄소섬유는 혼입률을 1%, 3%, 5%로 변화시켰다. 믹싱은 50ℓ의 강제식 팬형 믹서를 사용하여 먼저 골재, 결합재 및 탄소섬유를 투입하여 30초동안 건비빔을 실시한 후 물과 혼화제를 투입하여 1분 30초 동안 혼합하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 플로우

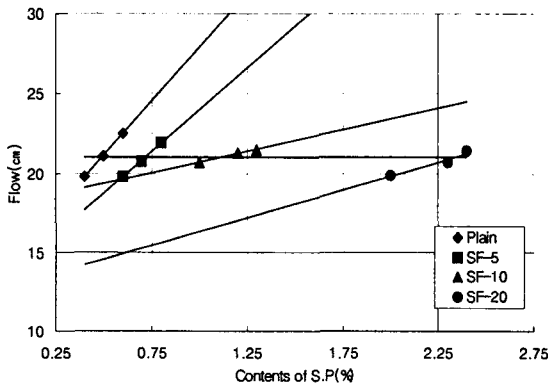


그림 1 플로우 시험결과

0%, 5%, 10%, 20%에 대하여 각각 시멘트에 대한 중량비로 0.50%, 0.75%, 1.20%, 2.40%로 나타났다.

3.2 공극률

그림 2는 재생골재 혼입률과 실리카흙 혼입률에 따른 공극률 시험결과로서 재생골재의 혼입률 0%, 50%, 100%에 대하여 실리카흙의 혼입률이 5, 10, 20% 증가함에 따라 공극률은 각각 1.8~5.2%, 2.7~5.3%, 2.1~4.8%로 감소하였다. 이는 실리카흙의 혼입률이 증가함에 따라 비중차에 의해 시멘트페이스트

포러스콘크리트는 내부에 연속공극을 가지고 있고 골재끼리 점점으로 연결되어 있기 때문에 연속공극을 유지하기 위해서는 시멘트페이스트는 적절한 유동성을 가지고 있어야 한다. 즉 시멘트페이스트의 흐름값이 너무 크게 되면 시멘트페이스트가 공극에 스며들어 연속공극을 감소시키며 반면에 흐름값이 작게 되면 시멘트페이스트가 골재와 섞이기 어려워지고 골재의 피복률이 저하한다. 따라서 적절한 유동성을 확보하기 위하여 실리카흙 혼입률에 따른 흐름값을 측정하였으며 그 결과는 그림 1과 같다. 이를 고찰하여 보면 실리카흙의 혼입률이 증가할수록 유동성이 감소하여 혼화제 첨가량이 증가하였다. 목표로 설정한 21cm의 흐름값을 만족시키는 고성능 유동화제의 첨가량은 실리카흙 혼입률

트의 용적이 증가하여 골재가 형성하는 공극이 감소했기 때문이다. 그림 3은 2종류의 탄소섬유 혼입물과 실리카흄의 혼입 유무에 따른 공극률시험결과로서 탄소섬유의 혼입률이 1, 3, 5% 증가함에 따라 실리카흄(10%)를 혼입한 경우와 혼입하지 않은 경우는 섬유를 혼입하지 않은 포러스콘크리트에 비하여 각각 공극률은 4.2%~12.3%, 0.03%~8.4% 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 탄소섬유혼입률이 증가함에 따라 골재가 형성하는 공극으로 탄소섬유가 충전되어 공극률이 감소한 것으로 판단된다.

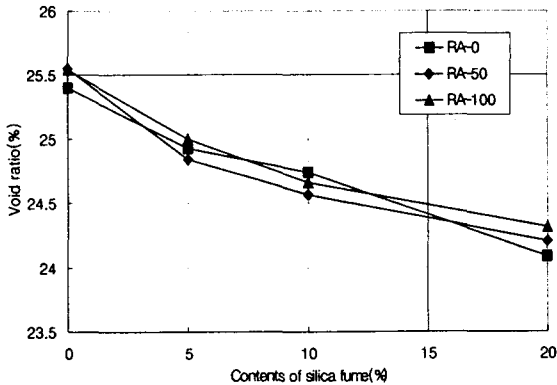


그림 2 실리카흄 혼입률에 따른 공극률

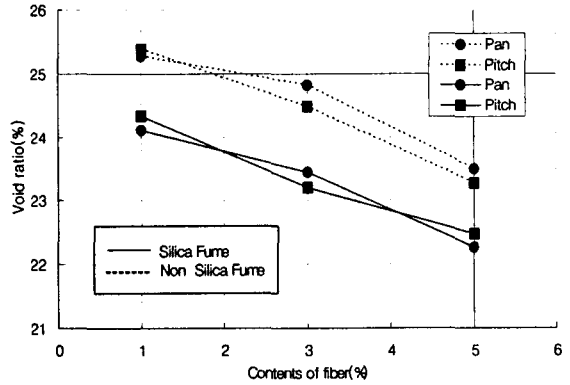


그림 3 섬유혼입률에 따른 공극률

3.3 투수계수

재생골재, 실리카흄 및 탄소섬유 혼입별 투수계수 시험결과는 그림 4~5와 같다. 그림 4는 재생골재 혼입률과 실리카흄 혼입률에 따른 투수계수시험결과로서 재생골재의 혼입률 0, 50, 100%에 대하여 실리카흄의 혼입률이 5%, 10%, 20% 증가함에 따라 투수계수는 각각 9.3~20.5%, 6.7~19.5%, 11.6~20.9%로 감소하였다. 또한 탄소섬유의 혼입률이 증가함에 따라 투수계수는 감소하는 경향을 나타내었으며 실리카흄을 혼입한 경우가 더욱 감소하였다. 이러한 경향은 탄소섬유의 혼입률이 증가할수록 공극이 감소하여 투수계수가 감소한 것으로 판단된다.

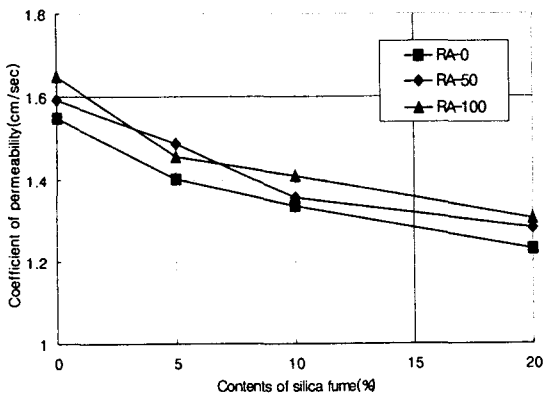


그림 4 실리카흄 혼입률에 따른 투수계수

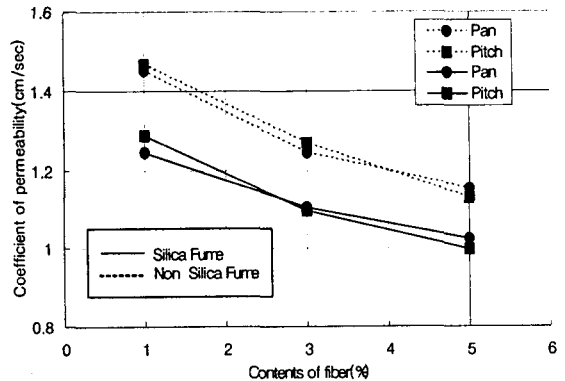


그림 5 섬유혼입률에 따른 투수계수

3.4 단위용적중량

재생골재, 실리카흄 및 탄소섬유 혼입별 단위용적중량 시험결과, 실리카흄을 혼입하지 않은 경우, 재생골재의 혼입률이 증가할수록 단위용적중량은 감소하였다. 이는 재생골재와 부순돌의 자체 단위용적

중량차이에 기인한 것으로 판단된다. 또한 실리카흙의 혼입률이 증가함에 따라 재생골재 혼입률별 단위용적중량은 약간 증가하였으나 그차이는 미비한 것으로 나타났다. 탄소섬유 혼입률과 실리카흙의 혼입 유무에 따른 단위용적중량의 시험결과, 탄소섬유의 종류에 관계없이 탄소섬유의 혼입률이 증가함에 따라 단위용적중량은 증가하는 경향을 나타내었으며 실리카흙을 혼입(10%)한 경우가 약간 크게 나타났다. 이러한 경향은 탄소섬유의 혼입률이 증가함에 따라 포러스콘크리트 내부에 탄소섬유가 충전되어 증가한 것으로 판단된다.

3.5 압축강도, 휨강도 및 휨인성

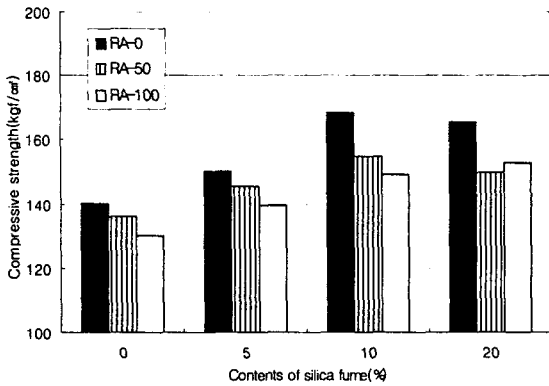


그림 6 실리카흙 혼입률에 따른 압축강도

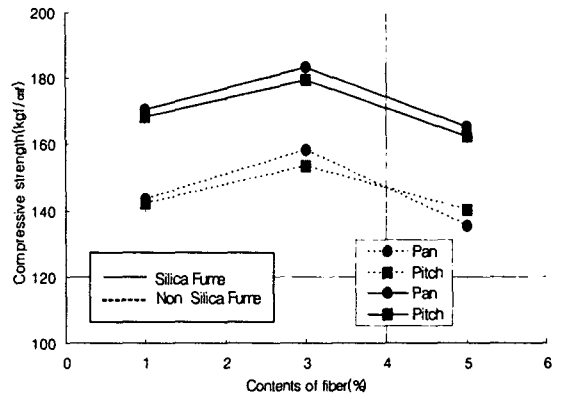


그림 7 섬유혼입률에 따른 압축강도

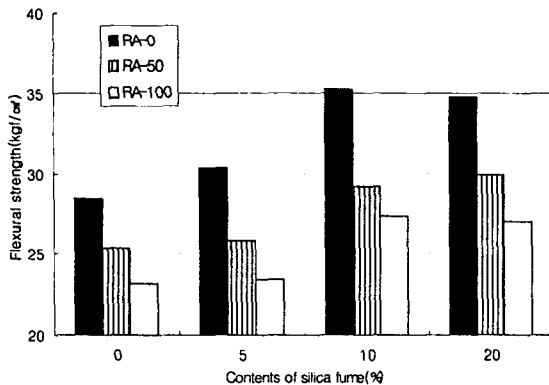


그림 8 실리카흙 혼입률에 따른 휨강도

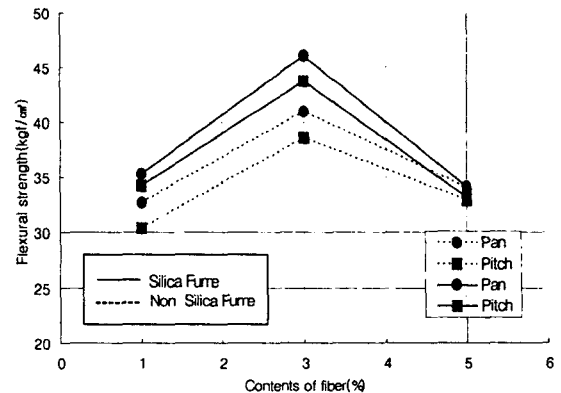


그림 9 섬유혼입률에 따른 휨강도

재생골재의 혼입률이 증가할수록 압축강도 및 휨강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 재생골재에 부착되어 있는 구제페이스트에 의해 시멘트페이스트와 결합력이 감소했기 때문이라 판단된다. 재생골재의 혼입률 0%, 50%, 100%에 대하여 실리카흙의 혼입률이 5%, 10%, 20% 증가함에 따라 압축강도는 각각 7.1%~20.0%, 6.7%~13.6%, 7.0%~17.3% 증가하였고 휨강도는 각각 6.7%~33.9%, 1.8%~17.9%, 1.4%~18.2% 증가하였다. 이는 초미분말인 실리카흙이 시멘트의 수화생성물(CaOH₂)과 조기에 포졸란 반응을 일으켜 그 수화물이 시멘트 입자사이에 겔층을 형성시켜 시멘트페이스트의 강도가 향상되어 강도가 증가된 것으로 판단된다. 또한 실리카흙 혼입률 10%의 경우가 가장 양호한 강도특성을 발현하였다. 그림 8~9는 탄소섬유 혼입률과 실리카흙의 혼입 유무에 따른 압축강도와 휨강도 시험결과로서, 탄소섬유 혼입률 3%까지는 강도는 증가하였는데 이는 탄소섬유의 혼입에 의해 내부의 공극이

충전됨으로서 강도가 향상된 것으로 판단된다. 반면에 혼입률이 5%의 경우 강도는 감소하였는데 이는 과도한 섬유혼입으로 페이스트와 골재와의 부착력이 저하되었기 때문이라 사료된다. 또한 섬유의 종류에 따라서는 Pan계 CF를 사용한 경우가 Pitch계 CF를 사용한 경우에 비하여 강도가 다소 높게 나타났다. 휨인성을 평가한 결과, 모두 보통의 포러스콘크리트 보다 양호한 휨인성계수를 나타냈으며 전반적으로 PAN계 CF로 보강한 경우가 Pitch계 CF를 보강한 경우에 비하여 다소 양호한 경향을 나타내었다. 특히 혼입률 3%에서 가장 높은 값을 나타내었다. 따라서 적정량의 탄소섬유 혼입은 포러스콘크리트의 변형능력 향상에 효과가 있을 것으로 판단된다.

3.6 식생능력평가

각 배합별로 복토의 유무에 따라 초본류인 Paranal Ryegrass를 파종하여 발아후 3개월까지의 생육상태를 평가한 결과, 발아후 1주일까지는 복토의 유무에 관계없이 거의 동일하게 성장하지만 2주일부터는 복토를 실시한 경우가 잔디의 생육이 더욱 양호하였다. 발아후 2주일의 경우, 복토를 한 경우는 잔디의 생육길이는 각 배합에 관계없이 11.1~14.3cm로 나타났으며 복토를 실시하지 않은 경우는 3.3~4.1cm로 나타났다. 발아 후 3개월의 경우 잔디의 생육길이는 복토의 유무에 따라 약 20cm의 차이가 발생하였다. 따라서 포러스콘크리트 적용된 식물의 성장은 같은 골재입경과 공극률의 경우 복토의 유무에 따라 좌우됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

재생골재, 실리카흙, 및 탄소섬유 혼입률별 포러스콘크리트의 물리·역학적 특성과 식생능력을 평가한 결과는 다음과 같다.

(1) 재생골재 혼입률과 실리카흙 혼입률에 따른 공극률 및 투수계수는 재생골재의 혼입률에 관계없이 실리카흙의 혼입률이 증가함에 비중에 의한 시멘트 페이스트의 용적의 증가에 기인하여 골재 공극이 감소하여 감소하였다. 또한 탄소섬유 혼입률이 증가할수록 골재가 형성하는 공극으로 탄소섬유가 충전되어 공극률이 감소하였다.

(2) 재생골재의 혼입률이 증가할수록 압축강도 및 휨강도는 재생골재와 시멘트페이스트의 결합력이 저하되어 감소하였고, 실리카흙을 혼입한 경우는 포졸란반응에 의한 시멘트페이스트의 강도향상으로 재생골재의 혼입률에 관계없이 증가하였다. 특히 실리카흙 혼입률 10%의 경우가 가장 양호한 강도특성을 발현하였다. 탄소섬유를 혼입한 경우는 혼입률 3%까지는 탄소섬유의 혼입에 의해 내부의 공극이 충전됨으로 강도는 증가한 반면 혼입률이 5%의 경우 과도한 섬유혼입으로 감소하였다. 휨인성은 보통의 포러스콘크리트 보다 양호한 휨인성계수를 나타내었으며, Pan계 CF를 사용한 경우 섬유자체의 특성차이에 의해 Pitch계 CF를 사용한 경우에 비하여 강도가 다소 높게 나타났다.

(3) 식생능력을 평가한 결과 발아후 1주일까지는 복토의 유무에 관계없이 거의 동일하게 성장하지만 2주일부터는 복토를 실시한 경우가 잔디의 생육이 더욱 양호하였다. 따라서 포러스콘크리트 적용된 식물의 성장은 같은 골재입경과 공극률의 경우 복토의 유무에 따라 좌우됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. エココンクリート研究委員会報告, 日本コンクリート工學協會, 1995. 11.
2. 玉井元治, “透水性コンクリート, 特集コンクリートの高性能化高機能化”, 콘크리트工學 Vol.32, No.7, pp.134-138, 1994. 7.
3. 松本雅幸, 中岡時春, 平田哲也, 山岸先忠, 白井義人, “ポーラスコンクリートを用いたのり面の植生實驗”, 土木學會第51回年次學術講演會講演概要集, 1996, pp. 252~253
4. 박승범. “신편 토목재료학”, 문운당, 2000.
5. 박승범. “최신 토목재료실험”, 문운당, 1999.
6. 박승범, 폐기물을 이용한 환경친화형 시멘트/콘크리트의 개발, 청정생산기술개발사업 연구보고서, 2001.