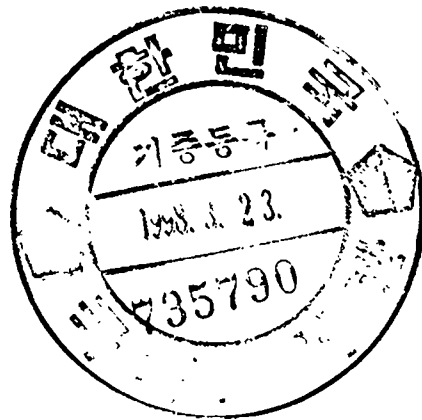


최 종
연구보고서

콘크리트용 혼화재료로서 왕겨활용에 관한 연구

Studies on Utilizing Rice Husk as an Admixture of Concrete



연구기관

농어촌진흥공사 농어촌연구원

농림부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “콘크리트용 혼화재료로서 왕겨 활용에 관한 연구”
과제의 최종보고서로 제출합니다.

1997. 12. 15.

주관연구기관명 : 농어촌진흥공사 농어촌연구원

총괄연구책임자 : 2급 윤 상대

세부연구책임자 : 3급 박 광수

연구 원 : 1급 류 기송

“ : 2급 신 의균

“ : 3급 최 광선

“ : 4급 김 명원

“ : 4급 이 준구

협동연구기관명 : 전북대학교 농업개발연구소

협동연구책임자 : 조교수 김 명호

연구 원 : 조교수 박 승제

여 백

요 약 문

I . 제 목

“콘크리트용 혼화재료로서 왕겨활용에 관한 연구”

II . 연구개발의 목적 및 중요성

현재 우리나라에서 매년 반복 생산되는 왕겨량은 약 80만톤에 이르며, 분기별 생산량은 지역별로 약간의 차이가 있으나 전국적인 평균치로서 1/4 분기에는 21.4%인 171천톤으로 조금 낮고 2,3,4분기에는 거의 비슷한 수준으로 생산되고 있다. 왕겨의 이용처를 살펴보면 지역별로 약간의 편차는 있으나 평균적으로 연간 생산량의 약 96.25%가 가축분뇨의 수분흡수를 위한 축산시설의 깔개나 퇴비로 사용을 위한 축분의 혼합재료 또는 사용 후 자연퇴비화를 위한 과수원의 잡초제거제로 사용되고 있으며, 나머지 3.75%는 마늘이나 딸기 재배시의 상토나 철강재 생산시의 가온용 촉매 재료 사용되고 있다. 이처럼 왕겨의 거의 대부분이 농업분야로 단순 환원되다 보니 왕겨의 부가가치가 낮아 1996년도 왕겨의 평균 판매단가는 전라남도가 톤당 44,700원으로서 최고를 보이고 경상북도가 최저인 10,800원/톤에 거래되고 있으며 전국적으로는 평균 약 21,900원/톤에 판매되고 있다.

이에따라 왕겨는 단순히 농업의 부산물로 여겨질 정도로 농민들의 소득증대에의 기여도가 매우 낮다. 또한 왕겨는 내외피가 규소로 치밀하게 피복되어 있으므로 부식되기 어려움에도 불구하고 왕겨를 축사의 깔개로 이용 후 퇴비화함에 따라 농지내 왕겨 환원속도가 부식속도 보다 빨라서 토양속에 미부식 왕겨가 누적되어 농지내 토양환경을 열악하게 하고 있으며 왕겨를 축사내 깔개로 이

용함에 따라 어린 가축의 생육장애 등이 제기되고 있으며 장래에는 악취로 인한 대기오염 문제와 가축의 질병 문제등이 추가로 제기될 가능성이 많다.

한편 UR 타개책의 하나로서 가운데형 비닐하우스 면적과 생산전용 대형 온실이 2,000년도에는 각각 9,500ha 및 2,900ha에 이를 전망이다. 이들 온실에서 연간 필요로 하는 난방용 수입경유의량은 약 110백만ℓ에 달할 것이며 비용으로는 약 286억원에 이를 전망이다. 또한 하우스내 작물의 생산성과 신선도를 높이기 위해서 이산화탄소를 인위적으로 구입 시용하므로 이들 난방비와 이산화탄소 구입비가 생산원가의 20~37%에 달하므로 시설농업과 국가의 경쟁력을 동시에 떨어뜨리고 있다.

또한 6000톤 규모의 연간 도정능력을 가진 소규모의 미곡종합처리장(RPC)이 전국적으로 253개가 산재해 있으며 이들 RPC는 자체 난방 또는 물벼 건조에 필요한 열원을 수입경유에 의존하여 미곡종합처리장의 경영성을 떨어뜨림은 물론 국가경제의 건전성을 해치고 있다. 한편 경지로부터 산물단위의 벼 수확운반기가 '96부터 국내에 보급되고 있으므로 장래에는 RPC를 이용한 물벼의 건조 및 도정량이 증가할 것이며 나아가 미곡종합처리장의 규모도 가속적으로 대형화 될 것이다. 이에 따라 물벼 건조 또는 자체난방을 위한 수입경유의 사용량도 계속적으로 증대할 것이며 동일 RPC에서 연간 발생하는 왕겨의 량도 증가할 것이다.

한편 지구환경 보호를 위해서 저에너지 산업에 대한 관심이 전세계적으로 고조되고 있다. 콘크리트 분야에서도 이를 반영하여 콘크리트의 고강도화, 고내구성화 및 고품질화를 통하여 공해발생 요인이 매우 큰 시멘트의 사용량을 줄이려는 방향으로 관심이 모아

지고 있다. 이를 위한 구체적 실천방법으로서 첫 번째로는 실리카 함으로 대표되는 혼화재료의 사용량을 증대시키는 방법을 채택하고 있으며 또다른 실천방법으로서 경제적이고 환경 친화적인 혼화재료의 개발 및 보급이 큰 주류를 형성하고 있다. 그러나 실리카 함은 실용적인 혼화재료로서 가장 품질이 뛰어나나 분말가격이 '97년도 6월 현재 kg당 약 900원에 달하는 등 고가이어서 사용에 제한이 있다.

반면 왕겨를 소각하여 콘크리트용 혼화재료로 개발시 콘크리트의 강도와 내구성이 실리카 함을 사용할 때와 동등 이상으로 증대하며 가격은 저렴해 진다. 그러므로 왕겨를 소각하여 혼화재료로 개발할 경우 비교 우위적 품질과 가격 경쟁력으로 인해서 사용량이 크게 증가할 것이며 이로인해 왕겨가 농어민의 새로운 소득원으로 부상할 것이다. 나아가 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 내구성이 높고 경제적이므로 콘크리트를 소재로 한 방대한 국가 기간산업 시설에 미치는 영향은 막대할 것이다.

더구나 왕겨 소각시에는 열량과 CO₂농도 7%인 배연가스가 풍부하게 발생하여 미곡종합처리장의 자체난방이나 물벼건조 및 건조벼 저장에 필요한 양을 충당하고도 남는다. 나머지 열량과 배연가스에 함유된 열량을 온수 또는 증기를 통하여 콘크리트 프리캐스트 제품의 양생에 활용할 경우 프리캐스트 제품 생산원가의 약 6%에 달하는 양생비를 절약할 수 있다. 또한 프리캐스트 제품원가의 10%를 점하는 시멘트의 일부를 왕겨재로 대체함으로써 콘크리트 프리캐스트 제품의 생산원가를 대폭 절약할 수 있으며 나아가 콘크리트 프리캐스트 제품의 강도와 내구성을 획기적으로 증대시킬 수 있다.

그러므로 부가가치가 낮은 현행의 왕겨 소비형태를 지양하고 부가가치가 높은 콘크리트용 혼화재료로 왕겨를 활용하기 위한 기술을 개발함으로써 왕겨를 농어민의 새로운 소득원으로 창출하고 농업의 국제 경쟁력을 높이며 미곡종합처리장이나 시설농업의 경영성을 향상시키고 나아가 국가 기간산업 시설의 대부분을 차지하는 콘크리트 구조물의 품질과 내구성 향상을 통한 국가의 경쟁력을 높이기 위해서라도 왕겨를 콘크리트용 혼화재료로 활용하기 위한 기술을 개발하려는 본 연구는 매우 중요하고도 시급한 과제이다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

본 연구과제의 연구개발 내용과 범위를 연차별로 요약하면 다음과 같다.

1. 제 1차년도

- ° 실험용 왕겨 연소로 구상 및 제작
- ° 산지별, 품종별 왕겨 소각실험 및 자료분석
- ° 산지별, 품종별 왕겨 및 왕겨재 성분실험 및 분석
- ° 소각온도별 왕겨재의 성분특성 실험분석
- ° 제어온도별 품종별 연소로의 연소특성 실험분석
- ° 효율적인 왕겨 소각 및 이산화탄소 활용 시스템 모델 개념정립
- ° 제어온도별 왕겨재의 분쇄특성 실험 분석
- ° 제어온도별, 배합비별, 품종별 왕겨재 혼입 모르타의 강도특성 및 시공성 실험분석
- ° 각종 혼화재 혼입 모르타의 강도특성 및 시공성 실험분석

2. 제 2차년도

- ° 저온제어 소각 粗粒粉碎 왕겨재 혼입 콘크리트의 배합비별 강

도특성 및 시공성 실험 분석

- °저온제어 소각 粗粒粉碎 왕겨재의 최적최대 혼입비율 결정 및 강도증진효과 분석
- °저온제어 소각 粗粒粉碎 왕겨재 혼입 콘크리트의 내투수성 및 내화학적 실험분석
- °저온제어 소각 粗粒粉碎 왕겨재 혼입 콘크리트의 열적특성 및 역학적특성 실험 분석
- °왕겨재의 분쇄성 향상방안 규명
- °왕겨 연소시스템의 효율 향상방안 규명
- °배연가스의 활용성 향상방안 연구
- °국내의 왕겨처리 실태 조사
- °각종 혼화재 혼입 콘크리트의 강도특성 및 시공성 실험 분석

3. 제3차년도

- °저온제어 소각 微細粉碎 왕겨재 혼입 콘크리트의 배합비별 강도특성 및 시공성 실험 분석
- °저온제어 소각 微細粉碎 왕겨재의 최적 및 최대 혼입비율 도출
- °저온제어 소각 微細粉碎 왕겨재의 콘크리트 강도증진효과 실험 분석
- °배연가스 노출양생, 양생 온습도가 콘크리트의 강도증진에 미치는 영향 실험분석
- °왕겨재 혼입 콘크리트 프리캐스트 제품생산 시스템의 실용화 모델 규명
- °연속식 미세분쇄 시스템 규명
- °왕겨재 혼입 콘크리트의 흡열특성 실험분석
- °왕겨재 혼입 콘크리트의 돈사분뇨 처리탱크에의 현장 적용성

실험 분석

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발 결과

본 연구는 부가가치가 낮은 방향으로 소비되고 있어서 단순히 농업부산물로 여겨지고 있는 현행의 관행적 왕겨 소비형태를 지양하고 좀더 부가가치가 높은 방향으로 소비형태를 변환시켜 왕겨를 농어민의 새로운 소득원으로 개발하기 위해서 콘크리트용 혼화재로 왕겨를 활용할 수 있는 기술을 개발하고자 착수하였다.

이에 따라 1995~1997까지 3개년에 걸쳐 연구를 수행하였으며 연구과정에서 얻어진 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ° 지역별, 산지별, 품종별 왕겨의 물리화학적 특성을 분석한 결과 뚜렷한 차이점을 발견할 수 없었으며 대체적으로 소각후 왕겨재로 남는 무기물의 중량은 왕겨중량의 약 15%로 나타났다.

- ° 왕겨의 고위발열량은 평균 3,569kcal/kg 으로서 왕겨 2.7kg은 수입경유 1ℓ 과 열용량이 같은 것으로 나타났다.

- ° 지역별, 산지별, 품종별 왕겨재가 혼화재로 사용될 경우 콘크리트의 강도특성이나 시공성에 미치는 영향을 발견할 수 없었다.

- ° 연구 실험용 연소로에서 저온제어(600~620℃)로 소각할 경우 비결정형 SiO₂가 다량으로 생성되며 분쇄성이 좋고 활성기공이 다량으로 생겨 시멘트 수화물과의 2차적인 포졸란반응을 일으키기 쉬우며 이로인해 혼화재로 사용시 콘크리트의 강도가 더욱 증가한다.

- ° 분쇄기종은 충격식 보다는 Mill형의 Attrition Mill이 유리한 것으로 판단되었으며 연속적인 자동분쇄와 소음 및 분진의 공해 방지 차원에서 습식 Attrition Mill이 유리한 것으로 나타났다.

◦ 충격에너지를 이용하는 L.A.마모시험기로는 1시간 이상 분쇄하여도 평균입경을 $20\mu\text{m}$ 이하로 분쇄하기가 어렵다.

◦ 저온제어($600\sim 620^{\circ}\text{C}$)로 소각한 왕겨재를 혼화재로 사용한 모르타 공시체의 28일 압축강도는 고온제어($600\sim 620^{\circ}\text{C}$)로 소각한 왕겨재에 비해서 약 20-30% 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다.

◦ 평균입경 $10\mu\text{m}$ 또는 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재가 혼화재로서 콘크리트의 28일 압축강도를 보통의 콘크리트 보다 증대시키려면 단위결합재량은 $320\text{kg}/\text{m}^3$ 이상이어야 한다.

◦ 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재의 최적혼입율은 단위결합재량이 $320\sim 500\text{kg}/\text{m}^3$ 에서는 10%로 나타났으며 단위결합재량이 $600\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우 5%로 나타났다. 또한 이때의 재령 28일 압축강도는 보통의 콘크리트에 비해서 20~28%(평균 23%) 증가하는 것으로 나타났다.

◦ 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재의 최적혼입율은 단위결합재량이 $320\sim 500\text{kg}/\text{m}^3$ 에서는 10%로 나타났으며 단위결합재량이 $600\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우 5%로 나타났다. 또한 이때의 재령 28일 압축강도는 보통의 콘크리트에 비해서 11~18%(평균 14%) 증가하는 것으로 나타났다.

◦ 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재의 최대혼입율은 단위결합재량이 $320\sim 600\text{kg}/\text{m}^3$ 에서 25%로 나타났으며, 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재의 최대혼입율은 최적혼입율과 같게 나타났다.

◦ 콘크리트의 시공성과 강도증진을 및 품질의 균질성을 기준으로 살펴보면 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재가 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재나 상업용 혼화재로서 가장 고가인 실리카흄 보다도 우수하다.

◦ 왕겨재로 시멘트를 치환시 재령 초기에는 치환하지 않은 보통의 콘크리트 보다 강도가 작은 경향을 보이나 28일에 이르면 보통의 콘크리트보다도 증가한다.

◦ 고로슬래그를 혼화재로 사용시 단위결합재량이 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 이상인 경우에 28일 압축강도가 보통의 콘크리트 보다 크게 나타난다. 28일 압축강도를 최대화하는 고로슬래그의 최적 혼입율은 10%로 나타났으며 이 때의 재령 28일 압축강도는 보통의 콘크리트 보다 7~28% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 고로슬래그의 최대혼입율은 단위결합재량이 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우에는 시멘트 중량의 50%이나 단위결합재량이 $600\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우에는 30%로 나타났다.

◦ 왕겨재를 혼화재로 개발시 가장 경합이 예상되는 혼화재는 실리카흙이다. 실리카흙을 혼화재로 사용시 단위결합재량이 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 이상인 경우에 28일 압축강도가 보통의 콘크리트 보다 크게 나타난다. 28일 압축강도를 최대화하는 혼입율은 단위결합재량이 $400\sim 500\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우 10%이고 $600\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우 5%로 나타났다. 또한 이 때의 재령 28일 압축강도는 보통의 콘크리트 보다 10~20% 증가하는 것으로 나타났다. 아울러 실리카흙의 최대혼입율은 단위결합재량이 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우에는 시멘트 중량의 20%이고, 단위결합재량이 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우에는 15%, $600\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우에는 10%로 나타났다.

◦ 플라이애쉬를 혼화재로 첨가시 재령 28일 이내에서는 콘크리트의 강도를 높여주지 못한다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트의 수화열은 보통의 콘크리트 보다 약간 작게 나타난다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 보통의 콘크리트에 비해서 내황산염 저항성이 크고 투수에 대한 저항성이 크며 내부식성이 크게 나타나므로 보통의 콘크리트에 비해서 내구성이 있다는 사실을 발견하였다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 증기양생 보다는 온수양생시 압축강도 또는 인장강도의 조기발현 효과가 크게 나타났다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트를 온수로 축진 양생시 최고온도는 70℃ 최적이며 그 지속시간을 길게 할수록 보통의 콘크리트에 비해서 압축강도 또는 인장강도가 조기에 가장 크게 나타났다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트를 농도 7%의 CO₂하에 2주일간 노출시켜도 콘크리트의 중성화가 진행되지 않으므로 풍부한 열량과 농도 7%의 CO₂로 구성된 배연가스를 왕겨재 혼입 콘크리트 프리캐스트 제품의 2차양생에 활용할 수 있는 것으로 나타났다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 색깔이 검어져서 태양복사에너지의 흡수에 유리하며 아울러 강도와 내구성이 우수하므로 특히 동절기 제설작업이 불가한 농어촌의 소규모 도로(마을간 연결도로, 경작로, 농로)의 포장재로 매우 유리할 것으로 판단된다.

◦ 왕겨재를 혼화제로 사용시 콘크리트의 제조단가가 실리카흙의 약 66%로 추정된다.

◦ 이산화탄소의 농도가 7~10%일 경우 미세조류의 성장이 가장 활발하였으며, 광(光) 조사는 주기적으로 하는 것이 연속적으로 하는 것에 비해서 미세조류의 성장에 유리한 것으로 나타났다.

◦ 왕겨재를 혼화제로만 판매할 경우 기존의 관행적 왕겨 소비형태에 비해서 미곡종합처리장 1개소당 연간 약 12백만원의 추가 판매이익이 예상되며 전국적으로는 8,015백만원의 추가 이익이 예상된다.

◦ 왕겨재와 소각열 및 배연가스를 동시에 활용하는 이상적인 실용화 모델 시스템은 미곡종합처리장과 왕겨 소각시스템(연소로, 보일러, 분쇄시스템) 및 콘크리트 프리캐스트 공장을 동시에 설치하

는 시스템으로 판단되며, 이 경우 미곡종합처리장 1개소당 예상되는 최대의 가능한 이익은 연간 약 288백만원으로 추정되었다.

2. 활용에 대한 건의

본 연구는 왕겨재를 콘크리트용 혼화재로 활용하는 기술을 개발하는 과제이므로 본 연구의 수행과정에서 얻어진 결과를 종합할 때 다음의 사항이 계획적으로 시행된다면 본 연구의 성과가 조기에 실용화되어 농어민의 소득증대와 국내 수도작 농업의 경쟁력 확보에 크게 기여할 것이다.

1. 지역의 노동력, 수자원과 같은 천연자원, 지역자본 등과 같은 지역 자원을 최대한 활용하여 지역민의 소득을 극대화할 수 있는 지역종합개발계획을 먼저 수립한 후 이 계획에 의거 미곡종합처리장의 규모나 위치등이 결정되고 설치되어야 할 것이다.

2. 현재 전국적으로 설치되고 있는 미곡종합처리장은 규모를 좀더 대형화하는 것이 유리하며, 향후 미곡종합처리장을 설치하고자 할 경우 지역 농민의 소득 극대화와 미곡의 국제 경쟁력 확보를 위해서 왕겨 소각시스템(소각로, 열교환기, 분쇄기)과 콘크리트 프리캐스트제품 생산공정을 동시에 설치하여 왕겨 소각과정에서 나타나는 발열량과 배연가스를 동시에 재활용할 수 있는 시스템으로의 전환이 필요하다.

3. 관개배수 시설물, 문화마을 시설물, 농어촌 도로, 산촌 마을 시설물, 농공단지 및 축산단지용 시설물 등과 같은 농업생산기반 시설물과 농어민 소득증대 사업용 시설물들의 상당수가 콘크리트 제품으로 이루어져 있다. 물과 접촉할 기회가 거의 없어서 내구연한 동안 구조물이 아주 좋은 환경하에 놓여 있는 일반적인 건물이나 교량과 달리 이러한 농어촌 개발용 시설물들은 영농기 동안 항상

물과 접하고 있으므로 콘크리트 조직이 조기에 노후화된다. 영농기 동안 콘크리트의 조직 내부로 스며든 물은 콘크리트 공극내의 알칼리 농도를 저하시키고 이에따른 철근부식을 촉진 시키며 나아가 산이나 염에의 피해를 쉽게 받게 하며 동절기의 혹한은 영농기 동안 콘크리트속에 침투한 물을 동결시켜 콘크리트에 심각한 동해손상을 일으키는 등 다른 어떤 분야의 콘크리트보다도 매우 유해한 환경 하에 놓여있다. 그러므로 농어촌 개발용 시설물들이 요구하는 역학적인 품질수준이 일반 콘크리트 구조물과 동일할지라도 더 큰 내구성과 내화학적 및 강도를 가질 수 있도록 콘크리트 조직이 치밀하게 설계 및 시공되어야 한다.

그러나 이러한 농어촌 개발용 시설물의 품질 또는 내구성에 대한 어떠한 기준치도 아직까지는 정립되어 있지 않으므로 이 분야에 종사하는 기술자들은 건설교통부에서 제정 공표한 일반적인 조건 하에 놓인 콘크리트 구조물이 요구하는 품질 또는 내구성 기준치를 따르고 있을 뿐이다.

따라서 농어촌개발용 콘크리트 구조물의 설계 및 시공에 적용할 목표품질 및 목표 내구성의 기준을 시급히 정립하여야 한다. 이를 위해서는 많은 실험적 자료를 토대로 압축강도와 내구성 및 콘크리트 품질간의 상관성을 규명하는 추가적인 연구를 지속적으로 수행할 것이 요구된다.

4. 대부분의 농업토목 시설물들은 작물을 수확한 후부터 다음 해의 파종기까지 동절기 동안에 공사가 진행되며 이로인해 콘크리트 구조물의 품질 및 내구성이 현저히 저하된다. 더구나 콘크리트 구조물이 설치될 위치가 산간지나 저습지역과 같이 공사 진행에 아주 불리한 지역이므로 공사용 자재는 물론이고 공사과정 중의 품

질을 건교부 제정 일반콘크리트 시방서가 요구하는 수준까지 유지하기가 어렵다. 그 외에도 소형의 농업토목시설물들이 산악지역등에 설치되어야 하는 등 접근로가 없어 유지관리가 대단히 어렵다.

따라서 이러한 모든 불리한 여건을 고려하여 농업토목시설물의 목표품질과 내구성을 새롭게 선정하여야 하나 건교부에서 제정한 콘크리트 시방서에서는 이에대한 구체적인 규정이 없다.

따라서 콘크리트 구조물의 내구성을 진단 예측하는 이론과 콘크리트 구조물의 목표품질 및 목표내구성을 규명하는 새로운 연구가 후속적으로 수행되어야 한다.

5. 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 강도와 내구성이 높고 화학 저항성이 보통의 콘크리트 보다도 크므로 가혹한 환경하에 놓일 농업토목 구조물에서는 보통의 콘크리트 보다도 왕겨재를 혼입한 콘크리트가 유리한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 조기 실용화와 이에따른 농어민의 신규 소득원 창출을 위해서는 왕겨재를 혼화재로 널리 보급하기 위한 법적·제정적 지원이 뒤 따라야 한다.

6. 아스팔트 포장은 콘크리트 포장에 비해 공사비가 싸고 차량의 주행성이 좋으며 동절기 태양복사 에너지의 흡수능력이 커서 빙판이 적게 발생하므로 도로의 효율성이 높다. 반면에 강도와 내구성이 떨어져 자주 보수 또는 보강공사를 해야하며 시공시 다짐작업을 충분히 해야한다.

반면 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 아스팔트 포장재 이상으로 색깔이 검어져서 동절기 태양복사 에너지를 흡수할 수 있는 능력이 아스팔트 포장재 이상으로 높다. 더구나 아스팔트 포장재와 달리 강도와 내구성이 높고 시공시 별도의 다짐작업 필요없다.

한편 농어촌지역에 설치되는 농로나 기계화 경작로 또는 마을간

연결도로 동은 인력이 부족하고 통과차량이 적으므로 동절기 제설 작업이 불가하여 특히 동절기에는 도로로서 효율이 극히 떨어진다. 특히 최근에는 교통정체 구간이 급속히 늘어나면서 지방도나 마을간 연결도로를 불문하고 중차량이 빈번히 통과하고 또한 농작업용 기계들도 효율을 높이기 위해서 점차 대형화·중량화 하는 추세이므로 농어촌에 산재해 있는 소규모 도로가 손상될 가능성은 점차 증가하고 있는 반면 도로의 기능을 원상 회복하기 위한 보수나 보강공사는 인력부족과 원거리 등으로 인해 국도나 지방도에 비해 매우 어려운 실정이다.

따라서 관리가 어려운 농어촌의 도로는 연성포장인 아스팔트 포장보다는 강도나 내구성 및 내화학성이 높은 왕겨재 혼입 콘크리트를 이용한 포장이 유리하며 특히 검은색을 띄고 있으므로 태양복사 에너지의 흡수능력이 뛰어나 융설효과가 높을 것이 예상되므로 동절기 인위적인 제설을 그다지 요하지 않아 더욱 유리할 것으로 예상된다.

따라서 향후 농어촌에 경작용 도로포장 계획을 수립 또는 시행할 경우에는 콘크리트 포장이나 아스팔트 포장을 여과없이 관행적으로 시공하는 것을 지양하고 시험연구사업의 일환으로서 왕겨재 혼입 콘크리트를 도로 포장재료로 우선 시공하여 품질의 우수성에 대한 객관적인 자료획득과 분석을 거친 후 전국적으로 확대할 경우 본 연구의 실용화 효과는 극대화 될 것이다.

시험연구사업으로서는 시험사업 구간을 설정하고 시험사업 구간 내에 다양한 포장공법에 따라 시험시공하고 이를 면밀히 관찰 분석하여 포장공법별 적절한 도로포장층의 두께나 시공방법의 선정과 통과중량과 통행속도 등의 제한사항을 규명하고 도로포장 공법

별 내구성을 규명하며 포장공법별 효과등을 분석하는 등 일련의 체계적인 연구가 필요하다.

7. 왕겨가 가진 잠재적 가치를 최대한으로 현재화하기 위해서는 왕겨재는 콘크리트용 혼화재로 활용하고 소각열량은 왕겨재를 혼입한 콘크리트 프리캐스트 제품의 1차 양생에 활용하고 배연가스에 내포된 열량과 이산화탄소는 프리캐스트 콘크리트 제품의 2차 양생과정에 활용하는 시스템이 가장 이상적인 모델이라 판단된다.

그러나 이러한 이상적인 모델을 실용적으로 현재화하기 위해서는 사전에 많은 기술적·경제적인 검증을 거쳐야 한다. 즉 소각로의 효율을 높이면서 소각온도를 제어하는 기술의 개발과 최적의 소각로 규모 결정, 최적의 분쇄기 규모 및 형식 결정, 프리캐스트 공장제품의 수익을 극대화하기 위한 생산공정과 적정 생산규모 및 생산 품목의 선정, 다짐작업과 다짐기계의 선정, 품목별 합리적인 양생방법의 결정, 제품의 비수기에 대한 대책, 제품의 소비촉진을 위한 규격화·KS화 등 기술적·경제적 타당성이 검증되어야 한다.

따라서 이를 위한 구체적이고 심층적인 추가 연구가 수행되어야 하며 연구기간도 연구의 성격상 3년 이상이 소요된다.

SUMMARY

I . Subject

Studies on Utilizing Rice Husk as an Admixture of Concrete

II . Objectives and Importances of the Study

Every year, about 0.8 million tones by weight of rice husks(RH) are recurrently produced in our country. But difference of RH production ratio with seasons and locations has been proved to be negligible except the minimum ratio of 21.4% for the first 3 months in every year. Approximately about 96.25% by weight of total RH produced annually has been used as a mixture with livestock excretion first and utilized as a natural compost for plant growth afterwards. This kind of RH consumption practice lowered average selling price of RH down to 21,900 Won/ton by weight nationwide in 1996 even if a little fluctuation of the selling price with seasons and locations was shown.

But as RH is densely covered with silica (Si), time rate of RH corrosion is assumed to be lower than time rate of RH supply into agricultural farmland. Due to this, extra unrotten RH is assumed to be accumulated within soil layer year by year and accompanied with deteriorating conditions for crops cultivation. Besides, repeated utilization of RH as a spreading source on the floor of a cattle shed may arouse

some problems in the long run, such as a tendency to lower down growth rate of young livestock and frequent outbreak of slight indisposition to livestock as well as bad-smelling-induced air pollution around.

On the other hand, as a solution to UR, estimated area of plastic film-covered greenhouse requiring heating source and that of high-tech agricultural greenhouse covered with glass or transparent rigid-panel were reported to be about 9,500ha and 2,900ha respectively in the year 2,000 in Korea. This area requires 110 million liters of gasoline annually to supply the greenhouse with heat during winter season. Also carbon dioxide is to be supplied intentionally to improve productivity and freshness of agricultural yields. Due to these, required cost for supplying heat and carbon dioxide were reported to reach up to 20 to 37 percentage of total production cost in a year. And this situation will evidently cause degradation of international competitive power of greenhouse crops, farmers, and even national power in the year 2,000.

While 253 Rice Processing Center(RPC) with the rice-milling capacity of 6,000 tones by weight have been spreaded over the country up to the year 1997. But since heating source for drying wetted rice crops and that even for warming working space inside RPC itself depend on gasoline, this fact contributes to increasing annual deficit of RPC currently

prevailed. But recently, rice-milling and drying capacity of RPC tends to be larger in order to lessen annual deficit. Thus, required amount of gasoline for drying wetted rice crops as well as rice husk produced, which is by-products of rice-milling, will be increased more and more at a specific RPC hereunder.

Recently, following the worldwidely growing interests in abating global environmental pollution by converting high energy-consuming industry to that of low energy, researchers or engineers in a field of concrete turn their major concern to reducing the amount of Portlant Cement consumption in civil works. For this, they focus on heightening compressive strength, elongating durability of concrete, and making higher quality of concrete structures. There are two major ways to practically realizs these. The one is to replace Portlant Cement to some amount with Silica Fume-represented admixture, which is known to be the most powerful one to heighten compressive strength, elongate durability of concrete, and make quality of concrete structures higher. The other is to develop a new kind of admixture which is more economical and environmentally preservative. But the current unit price of silica fume powder, amounting to 900 Won/kg in 1997 in Korea, is so high as to prevent its wide spread.

But when Rice husk Ash(RHA), which is a burnt and ground ash from RH, is substituted for Portlant Cement to some amount,

compressive strength or durability of RHA-replaced concrete, is proved to be higher or at least equal to that of silica fume. On the contrary, the price of RHA is lower than Silica Fume. Thus, once RHA is developed and sold as an admixture of concrete like Silica Fume, lower price and higher quality may cause mass consumption of RHA and consequential higher income to farmers. In addition, since RHA-replaced concrete will guarantee higher durability and cost-effective construction of structures, RHA, as an admixture of concrete, may influence enormously on the concrete structures-based Social Overhead Capital

Furthermore, plentiful heat and flue-gas with 7% carbon dioxide(CO_2) come out as by-products during burning process. The heat produced is proved to cover far beyond the total energy required for drying and preserving rice in RPC and that for keeping working space inside of RPC warm. The extra heat and heat/ CO_2 -including flue-gas can be converted to the required energy for curing precast concrete structures through high-temperature steam or hot water. Whereas curing cost and cost of Portlant Cement used has been reported to be about 6% and 10% of total production cost of each item respectively. Thus, replacing Portlant Cement with RHA to some portion and utilizing extra heat and flue-gas as a required energy for curing precast concrete structures, the price of precast concrete structures is sure to be lower down

and durability higher.

Considering that economic potential of RH per annum reaches not only to 300 million liters of gasoline in its calorific capacity but also to 120 thousand tones of alternative by weight to Ordinary Portland Cement, the economic potential of RH in our country has been under- estimated or neglected for the last several decades.

Consequently it is a urgent topic to fully utilize economic potential of RH. Hereby it is important to study on developing a new technology of utilizing RHA as an admixture of concrete and find out an efficient solution to utilize by-products of heat or carbon dioxide generated in the process of burning RH.

III . Contents and Scopes of the Study

This study lasts for 3 years from 1995 to develop a new technology of utilizing RHA as an admixture of concrete as well as finding out an efficient solution to utilize by-products of heat or carbon dioxide generated in the process of burning RH.

For this purpose, followings contents and scopes briefly described in each year have been selected and implemented.

1. First Year

- Design and production of a trial center burner type furnace and heat exchanging system.

- Experimental analysis of burning features of RH from

different locations and rice varieties.

- Experimental study on the constituent of RH and RHA from different locations and rice varieties.

- Experimental study on RHA constituent affected by difference in controlled burning temperature.

- Experimental analysis of burning characteristics in the trial center burner type furnace system according to the variation of controlled burning temperature or rice varieties.

- Conceptualization of an efficient model for burning RH and utilizing CO₂.

- Experimental analysis of grinding efficiency of RHA varying controlled burning temperature.

- Experimental analysis of compressive strength and workability of RHA-replaced mortar affected by difference in controlled burning temperature, RHA-replacing ratio, and rice varieties.

- Experimental analysis of compressive strength and workability of mortar made of different commercial admixtures under different mixing ratio.

2. Second Year

- Studies on research trend in the related area.

- Experimental analysis of time-dependent compressive strength and workability of concrete affected by replacing ratio of RHA coarsely ground and burnt under low controlled

temperature

- Determination of optimum/maximum replacing ratio of RHA coarsely ground and burnt under low controlled temperature as well as corresponding increasing rate of compressive strength.

- Experimental analysis of sulfate resistance and anti-permeability of RHA-replaced concrete.

- Experimental analysis of mechanical properties and hydration heat of RHA-replaced concrete.

- Research and survey of realistic status of RH production/consumption practice according to time and location.

- Investigation of an effective method to enhance grinding efficiency of RHA.

- Investigation of an effective method to enhance heat-exchanging efficiency in the trial center burner type furnace and heat exchanging system.

- Study on enhancing efficiency of flue-gas utilizing.

- Experimental analysis of compressive strength and workability of concrete affected by replacing ratio of different commercial admixtures.

3. Third Year

- Experimental analysis of compressive strength and workability of concrete affected by replacing ratio of RHA finely ground and burnt under low controlled temperature.

- Determination of optimum/maximum mixing ratio of finely

ground RHA and burnt under low controlled temperature as well as corresponding increasing rate of compressive strength.

- Determination of time-dependent increasing rate of compressive strength according to replacing ratio of RHA finely ground and burnt under low controlled temperature.

- Study on time-dependent increasing rate of compressive strength of RHA-replaced concrete affected by variation of exposing temperature/humidity or flue-gas coming from furnace at early stage of curing.

- Investigation of a conceptualized practical model for RHA-replaced concrete precast structures utilizing RHA and by-products of heat & flue-gas most efficiently.

- Investigation of a conceptualized practical system to grind RHA most efficiently .

- Experimental analysis of endothermic capacity of RHA-replaced concrete from solar energy.

- Study on field application of RHA-replaced concrete to a concrete-made excremental storage to raise pig.

IV. Results of the Study and Recommendations for Application

1. Study Results

Major results studied for the last 3 years are as follows :

- ° Insignificant differences of physio-chemical characteristics of rice husk(RH) from different locations, places of

production, and rice varieties have been found. And approximately 15% by weight of undried RH has been left as an inorganic ash(RHA) after burning.

° Average calorific power per unit weight of RH has been found to be about 3,569kcal/kg. Thus, 2.7kg by weight of RH is approximately the same as 1 liter of gasoline in calorific power.

° Effect of RHA's difference in place of production or rice varieties on compressive strength and workability of RHA-replaced concrete has been found insignificant.

° Plentiful of amorphous silica(SiO_2) and too many active micro-pores were found to be formed within RHA burnt under low controlling temperature($600\sim 620^\circ\text{C}$) with the trial center burner type furnace designed in this study. And this kind of RHA showed easier crushability and easier reaction with cement hydrates, the so-called secondary pozzolan reaction. Thus, it is believed that these features cause increment of compressive strength of RHA-replaced concrete comparing with that of ordinary concrete.

° Attrition mill-type grinding machine was found more efficient. And not only to grind RHA automatically and continuously but also to prevent noise or scattered dust pollution, water-supplying attrition mill-type grinding machine was believed to be more favorable.

° With the impact-type Los Angeles abrasion machine, grin-

ding RHA to a powder with smaller- than $20\mu\text{m}$ in mean diameter was found very difficult even if RHA was ground for more than 1 hour.

° If RHA which was burnt in low controlling temperature($600\sim 620^{\circ}\text{C}$), ground and replaced to some portions of Ordinary Portland Cement(OPC), then 28-day compressive strength of RHA-replaced mortar specimen showed increment of about $20\sim 30\%$ over comparing with that burnt under high controlling temperature($700\sim 720^{\circ}\text{C}$).

° In case of RHA with $10\mu\text{m}$ or $20\mu\text{m}$ in its mean diameter used as an admixture of concrete, minimum unit binder weight was found to be $320\text{kg}/\text{m}^3$ regardless of mean diameter size in order to make 28-day compressive strength of RHA-replaced concrete(RHABC) higher than that of OPC only-used concrete (OPCC).

° Defining a specific ratio of RHA to unit binder weight as a optimum RHA replacing ratio, which maximizes 28-day compressive strength of RHABC in case of replaced up to this ratio, it was found that optimum replacing ratio of RHA with about $10\mu\text{m}$ in mean diameter amounted to 10% of unit binder weight ranging from 320 to $500\text{kg}/\text{m}^3$, whereas 5% by weight in case of $600\text{kg}/\text{m}^3$ of unit binder weight. And the corresponding 28-day compressive strength of RHABC showed increment of 20 to 28% (average 23%) over that of OPCC if RHA replaced OPC up to optimum ratio.

° In case of RHA with about $20\mu\text{m}$ in mean diameter, it was found that optimum RHA replacing ratio shows the same ratio as those of $10\mu\text{m}$ in mean diameter. But the corresponding 28-day compressive strength of RHABC increased less, i.e., 11 to 18% (average 14%) over that of OPCC.

° Defining a upper limit ratio of RHA unit binder weight as a maximum RHA replacing ratio, which does not make 28-day compressive strength of RHABC lower than that of OPCC in case of replacing up to this ratio, it was found that maximum replacing ratio of RHA with $10\mu\text{m}$ in mean diameter amounted to 25% of unit binder weight ranged from 320 to $600\text{kg}/\text{m}^3$, whereas in case of RHA with about $20\mu\text{m}$ in mean diameter maximum replacing ratio of RHA was equal to the optimum RHA replacing ratio regardless of the amount of unit binder weight.

° Judging from workability, compressive strength increment, and uniformity of concrete quality which were proved through experiment in this study, it was reasonably concluded that ,as an admixture of concrete, RHA with $10\mu\text{m}$ in mean diameter was more beneficial than that with $20\mu\text{m}$ in mean diameter or even Silica Fume(SF) which is the most efficient and expensive admixture among all spread over commercially.

° Compressive strength of RHABC at early age was found lower than that of OPCC, but 28-day compressive strength of RHABC was higher than that of OPCC.

° In case of Blast-Furnace Slag(BFS)-replaced concrete, 28-day compressive strength of concrete was found to be higher than that of OPCC unless unit binder weight was less than 500 kg/m³. Also optimum replacing ratio of BFS to unit binder weight and corresponding increment ratio of 28-day compressive strength to that of OPCC were found to be 15% and 7-28% respectively. If unit binder weight was 500kg/m³ and 600kg/m³, then maximum replacing ratio of BFS was found 50% and 30% of unit binder weight respectively.

° In case of Silica Fume-replaced concrete, 28-day compressive strength of concrete was found to be higher than that of OPCC unless unit binder weight was less than 400kg/m³. Also optimum replacing ratio of SF was found to be 10% of unit binder weight ranged from 400 to 500kg/m³. But in case of 600 kg/m³, 5% of unit binder weight was found optimal ratio. And the corresponding increment ratio of 28-day compressive strength was shown in the range of 10 to 20%. Besides, maximum replacing ratio varied stepwisely by 5% from 20% to 10% according as unit binder weight increased by 100kg/m³ from 400kg/m³ to 600kg/m³.

° Fly-Ash replaced concrete did not show higher 28-day compressive strength than that of OPCC.

° Hydration heat of RHABC was found a little lower than that of OPCC.

° Sulfate attack resistance, water-proof capability and

corrosion resistance of RHABC were higher than those of OPCC. And from this, it was reasonably concluded that RHABC had higher durability than OPCC.

° Early-stage curing of RHABC by hot water showed higher compressive or tensile strength at early age than by hot-steam curing.

° Cost of RHABC per 1 m³ was estimated to be 66% of that of Silica Fume-replaced concrete.

° Under the condition of CO₂ concentration of 7% to 10%, *Chlorella* sp. grew fastest. And periodic irradiation of sun light was better to grow *Chlorella* sp. than continuous irradiation of sun light.

° Assuming that RHA were used only for admixture of concrete, additional annual net profit amounting to 12 million Won is anticipated for each RPC, and 8,015 million Won of additional annual net profit was estimated to all the RPC spread over the country comparing with the profit from the current prevailing practice of RH consumption.

° Conceptualized practical model, which aims at utilizing RHA, flue-gas, and heat generated simultaneously, was inferred to be a system connecting and coordinating RPC, furnace and heat-exchanging system, grinding system and concrete precast plant. And estimated additional annual net profit from this conceptualized practical model was 288 million Won for each RPC with annual rice-milling capacity of 6,000 tones

by weight, comparing with the profit from current prevailing practice of RH consumption.

2. Recommendations for Application

Judging from all the results investigated, systematic implementation of the following recommendations will contribute to result in earlier visible practicality, rapid increment of farmer's income, and to enhance international competition of rice industry in this country.

1. From now on, after making a integrated local area development plan including RPC establishment, which aims at maximizing local resident's profit by maximally utilizing local resources such as local labor power, local natural resources including water resources, local funds, and etc., suitable capacity or location of RPC should be determined or established following this integrated local area development plan if being a plan to establish RPC.

2. The capacity of RPC currently spreaded over the country is recommended to be bigger. And if there is a plan to establish RPC, then it is strongly recommended that simultaneous establishment of RH burning system, heat exchanging boiler and generated heat utilizing agricultural pattern or system such as greenhouse crops area, RHA grinding system, and pre-cast concrete structure-making plant if possible should be considered in order to maximize local area farmer's income and to enhance international competition of rice industry.

3. A majority of structures for rural area development and agricultural infrastructure such as irrigation and drainage canal, rural settlement, rural road, mountain villages, upland improvement, rural industry, livestock farming, and etc. are made of concrete-based material. But these structures above mentioned are continuously exposed to water during farming period, which is generally known to be the worst to durability of concrete unlike usual concrete-composing structures such as buildings, bridges, and etc.. The water leaked easily will cause early deterioration of the concrete structures due to lower concentration of alkali ion-induced easier corrosion of interior reinforcements, easier sulphate & acid attack and easier frost expansion-induced destruction of concrete structure. Thus it is strongly required that concrete structures for rural area development and agricultural infrastructure should be designed and constructed with higher quality concrete in order to elongate durability and heighten chemical resistance even if mechanically required quality of concrete is lower. But unfortunately Concrete Code, formulated by Construction & Transportation Department of Korea, provides no other design or construction criteria to keep or enhance required quality or durability of concrete structures for rural area development and agricultural infrastructure than mechanical requirements only up to this time. Hereupon engineers in agricultural development fields have no alter-

natives but focusing all their attention to mechanical requirements of the structures following current Concrete Code in the stage of design and construction.

Therefore, it is urgent to formulate criteria to stipulate design or construction requirements to concrete-composed structures for rural area development and agricultural infrastructure. And to implement this, an additional study to formulate the relation between durability, quality, and compressive strength of concrete structures for rural area development and agricultural infrastructure based upon experiments and analysis is strongly recommended in succession to this study.

4. Almost all the structures for rural area development and agricultural infrastructure are allowed to have as short fixed construction period as possible from just after harvesting to before sowing. This kind of limit is one major source of degrading quality and durability of the concrete structures.

And the second major source of degrading quality and durability of the concrete structures is site condition where concrete structures are made. Usually site condition of almost all the structures for rural area development and agricultural infrastructure is so difficult that it is nearly impossible to control the quality of every construction material or construction process up to a required level only by

following general provisions prescribed in the Concrete Code.

The third major source of degrading quality and durability is difficult operation and maintenance of the structures resulting from difficulty in transporting every material required due to no approaching road.

For instance, most of main concrete-composing irrigation canal structure are to be established at a high level along the steeply sloped mountainous area covered with heavy forests and at a place without any construction material including water or any approaching road to transport every material required. Also repairment or maintenance of the structures damaged is very difficult due to site condition.

Thus a peculiar target level for the quality of concrete structures to be reached should be prescribed in advance for the purpose of making quality of concrete structures higher, durability longer, and maintenance easier, considering all the negative factors influencing on the quality and inherent to concrete structures for rural area development and agricultural infrastructure. But, unfortunately up to this time, there is no peculiar target level for the quality of concrete structures to be reached.

Besides, there is no formal theory or technology to diagnose durability of concrete structures up to this time.

In order to overcome these, it is recommended to start an additional study in succession to this study in order to

formulate suitable target level, where quality and durability of concrete structures for rural area development and agricultural infrastructure should arrive as well as on formulating theory or technology to diagnose durability of concrete structures at an early age.

5. As RHABC-composing structures proved to have longer durability and higher chemical resistance & strength than OPCC, RHABC is believed to be more favorable material for the structures which are continuously exposed to severe condition like most of the structures for rural area development and agricultural infrastructure.

Thus, in order to get earlier visible practicality and rapider increment of farmer's income from the results of this study, it is strongly recommended that a certain type of legal or financial support system, which guarantees wide application of RHABC-composing structures over the country to the structures required for rural area development and agricultural infrastructure, should be established.

6. Asphalt pavement has better comfortableness for traffic, cheaper initial construction cost, and higher trafficability during winter season due to black color-inducing higher thawing capability through better adsorption of solar radiant energy. But lower durability and strength not only causes frequent repairment but also requires sufficient compaction energy.

While, since RHABC is as black-colored material like asphalt pavement, capability of adsorbing solar radiant energy of RHABC-paved road is expected to be the same as or more than that of asphalt-paved road. Furthermore, RHABC pavement not only shows higher strength and longer durability but also requires less compaction energy than asphalt pavement.

On the other hand, a majority of rural road-for farming or connecting villages- tend to show lower trafficability during winter season because of difficult removal of snow and lower traffic density resulting from sparse population.

Especially not only because recent tendency of severe traffic snarl-up all over the roads causes frequent passage of heavier weight truck to small-sized rural roads but also because recent trend to enhance efficiency of agricultural farming machinery cause more frequent passage of heavier load every year, small-sized roads spread over the rural area are assumed to have higher probability of being damaged. On the contrary, repair or reinforcement works of roads damaged in rural area are more difficult than that in national or provincial roads due to sparse population, narrower width of the rural road or long distance from a main maintenance center. And repair or reinforcement works with asphalt on the asphalt-paved road are believed to be more difficult than with RHABC, because asphalt pavement essentially requires compaction with compactor which is far away from the site.

Considering all the merits of RHABC pavement above mentioned -i.e. higher strength and durability, higher anti-chemical resistance, black color-inducing higher thawing capability through better adsorption of solar radiant energy, and easier repair or reinforcement- naturally leads to the conclusion that pavement with RHABC over small-sized rural roads, such as farming roads, village-connecting roads, and roads for mechanized farming, is believed to be more suitable than OPCC pavement or asphalt pavement.

Thus in the coming stage of planning or implementing rural road pavement, it is desirable to sublate simple or involuntary selection of OPCC or asphalt pavement currently prevailing without considering any other alternatives. Instead, the following study approaching stepwise through implementing a model project is recommendable.

Selecting several roads representing rural roads, paving the selected roads with RHABC, OPCC, and asphalt section by section varying the paving depth, frequent realistic truck load passage test varying traffic velocity, evaluating & analyzing carefully the quality or damage of each pavement for 2 or 3 years, investigation of allowable truck load and traffic velocity, evaluation of durability & trafficability during winter season for each pavement, and efficiency analysis of each pavement. If RHABC pavement is proved to be best, then stepwise spread of RHABC pavement over the country.

7. In order to turn latent value of RH to realized profit maximally, an ideal model is believed to be a system that utilizes RHA as an admixture of concrete, heat generated during burning process as energy source required during the first stage of curing concrete precast structures, and flue-gas including another heat and high concentration of CO₂ as energy source required during the second stage of curing concrete precast structures. Furthermore, since in the process of burning RH much more heat comes out than required for curing concrete precast structures during the first stage, marginal heat can be converted to energy source for drying wetted rice crops and that for warming up interior temperature of RPC itself or that for warming up inside temperature of greenhouse during the night.

But in order to realize the above ideal model, many aspects in the field of economics and technology should be verified and identified in detail in advance. Detailly describing, the followings are detailly studied and investigated.

Development of new technology of controlling burning temperature as well as of heightening efficiency of heat-exchanging rate, criteria to determine optimal capacity or shape of furnace according to the amount of RH produced in a specific local area, criteria to determine optimal capacity or type of RHA-grinding machinery, criteria to determine optimal procedure/capacity or the best manufactured items of precast

concrete structures in the manufacturing plants from the viewpoint of maximizing net profit, a guide to determine optimal compaction method and most efficient compacting machinery according to mix ratio, determination of idealized curing method of each item, a countermeasure for low-demand season, standardization to accelerate demand, and etc.

Therefore a new study which requires longer than 3 years has to be implemented in succession to this study.

CONTENTS

SUMMARY

Chap. 1 Preliminary

Par. 1 Present Status of Domestic Rice Husk Production & Consumption	43
Par. 2 Present Status & Prospects of Domestic Rice Processing Center	46
Par. 3 Present Status & Prospects of Domestic Greenhouse Crops	48
Par. 4 Examination of Domestic & Overseas Research Trend	51

Chap. 2 Physiochemical Features of Rice Husk & Rice Husk Ash

Par. 1 Physiochemical Features of Rice Husk	63
Par. 2 Physiochemical Features of Rice Husk Ash	67

Chap. 3 Rice Husk-Furnacing Pilot System

Par. 1 Formation & Dimension of Rice Husk-Furnacing Pilot System	77
Par. 2 Operating Features of Rice Husk-Furnacing Pilot System	77
Par. 3 Burning Features within Rice Husk-Furnacing Pilot System	82
Par. 4 Features of Crystalization to SiO ₂ in Rice Husk	88

Chap. 4 Ground Features of Rice Husk Ash

Par. 1 Buring Temperature and Ground Features of Rice Husk Ash	90
Par. 2 Features of Coarsely Grinding Premiller	103
Par. 3 Features of Finely Grinding Miller	105

Chap. 5 Characteristics of Commercialized Admixtures in Concrete

Par. 1 Introduction	112
Par. 2 Generalized Characteristics of Commercialized Admixtures	114
Par. 3 Characteristics of Commercialized Admixture-Replaced Concrete	132

Chap. 6 Compressive Strength & Workability of Rice Husk Ash-Replaced Mortar	
Par. 1 Introduction	141
Par. 2 Quality of Experimental Material	143
Par. 3 Experimental Method & Scope	144
Par. 4 Analysis and Evaluation of Experimental Results	145
Chap. 7 Strength & Workability of Rice Husk Ash-Replaced Concrete	
Par. 1 Introduction	160
Par. 2 Compressive Strength and Workability of Rice Husk Ash-Replaced Concrete	163
Par. 3 Tensile Strength of Rice Husk Ash-Replaced Concrete	174
Par. 4 Hydration Heat from Rice Husk Ash-Replaced Concrete	176
Par. 5 Mechanical Features of Rice Husk Ash-Replaced Concrete	181
Par. 6 Durability of Rice Husk Ash-Replaced Concrete	184
Par. 7 Radiation Energy Adsorption of Rice Husk Ash-Replaced Concrete	198
Par. 8 Strength of Rice Husk Ash-Replaced Concrete under Various Curing Condition	202
Chap. 8 Schemes of Utilizing Flue-Gas	
Par. 1 Ash-Type Chlorella Sp. Cultivation System	217
Par. 2 Pipe-Type Chlorella Sp. Cultivation System	222
Chap. 9 Feasibility & Application Effect of Rice Husk Ash as an Admixture	
Par. 1 Quality Feasibility	225
Par. 2 Economical Feasibility	226
Par. 3 Environmental Effect	229
Par. 4 Expected Application Effect	230
Par. 5 Conceptualized Practical Model	234
Chap. 10 General Conclusion	238
Chap. 11 Recommendations for Application	242
References	247

목 차

요 약 문

제 1 장 서론

제 1 절 국내의 왕겨 생산 및 처리 현황	43
제 2 절 국내 미곡종합처리장의 실태와 향후 전망	46
제 3 절 국내 시설농업 현황과 향후 전망	48
제 4 절 국내의 연구개발 동향 및 고찰	51

제 2 장 왕겨 및 왕겨재의 물리화학적 특성

제 1 절 왕겨의 물리화학적 특성	63
제 2 절 왕겨재의 물리화학적 특성	67

제 3 장 파이롯트 규모 왕겨 소각 시스템

제 1 절 시스템의 구성 및 제원	77
제 2 절 시스템의 작동특성	77
제 3 절 시스템의 연소특성	82
제 4 절 왕겨재의 결정화 특성	88

제 4 장 왕겨재의 분쇄특성

제 1 절 왕겨 소각온도와 왕겨재 분쇄성	90
제 2 절 조분쇄기(전처리분쇄기)의 분쇄특성	103
제 3 절 미세분쇄기의 분쇄특성	105

제 5 장 콘크리트용 기성제품 혼화재료의 특성

제 1 절 서 언	112
제 2 절 상업용 기성제품 혼화재료의 일반적 특성	114
제 3 절 상업용 기성제품 혼화재 첨가 콘크리트의 특성	132

제 6 장 왕겨재 혼입 모르터의 강도특성 및 시공성

제 1 절 서 언	141
제 2 절 실험재료의 품질 특성	143
제 3 절 실험방법 및 범위	144
제 4 절 실험결과 분석 및 고찰	145

제 7 장 왕겨재 혼입 콘크리트의 강도특성과 시공성

제 1 절 서 언	160
제 2 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 압축강도 특성 및 시공성	163
제 3 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 인장강도 특성	174
제 4 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 열적 특성	176
제 5 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 역학적 특성	181
제 6 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 내구성	184
제 7 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 흡열 특성	198
제 8 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 양생방법별 강도특성	202

제 8 장 왕겨 소각로의 배연가스 활용방안

제 1 절 회분식 미세조류 배양 시스템	217
제 2 절 관형 미세조류 배양 시스템	222

제 9 장 혼화재료로서 왕겨재의 타당성 및 실용화 효과

제 1 절 품질 타당성	225
제 2 절 경제적 타당성	226
제 3 절 환경 영향성	229
제 4 절 실용화 효과	230
제 5 절 실용화 모델	234

제 10 장 종합결론

제 11 장 활용에 대한 건의

참고문헌

제 1 장 서론

제 1 절 국내의 왕겨 생산 및 처리 현황

<표 1-1>은 1996년도에 전국적인 왕겨의 생산 및 처리실태와 판매단가를 미곡종합처리장을 중심으로 설문지로 조사하고 그 결과를 분석한 것이다.

<표 1-1> 전국 왕겨실태조사 분석(1995년 기준)

도	미 곡 생산량 (천톤)	왕겨 생산량(천톤)					왕겨 비율 (%)	왕겨판 매단가 (원/톤)	왕겨판 매수익 (백만원)	왕겨 이용처(%)	
		1/4 분기	2/4 분기	3/4 분기	4/4 분기	합 계				축산업, 퇴비	상토, 철 강업 등
경기	557	17.5	22.6	29.7	30.7	100.5	18.0	14,200	1427.1	100	0
강원	182	7.6	7.6	7.1	8.1	30.4	16.7	13,700	416.5	100	0
충북	269	10.2	13.5	13.3	12.0	49.0	18.2	12,300	602.7	95	5
충남	720	31.2	33.7	32.0	36.4	133.3	18.5	14,500	1932.9	100	0
전북	767	29.2	34.3	39.2	33.0	135.7	17.7	21,100	2863.3	95	5
전남	868	29.2	44.6	43.7	41.3	158.8	18.3	44700	7098.4	90	10
경북	612	22.5	29.0	30.0	28.2	109.7	17.9	10,800	1184.8	90	10
경남	525	23.6	22.3	22.5	24.0	92.4	17.6	24,300	2245.3	100	0
합계	4,500	171 (21.1)	207.6 (25.6)	217.5 (26.9)	213.5 (26.4)	809.8 (100)			17771.0		

주) () : 전국대비 비율(단위:%)

'95년도 왕겨 총생산량은 약 80 여만톤이며 벼에서 차지하는 왕겨의 평균 중량비율은 18%, 왕겨의 이용처는 95% 이상이 축산시설의 깔개(사용 후 퇴비화) 및 축분의 혼합재(퇴비화), 과수원의 잡초제거재(자연 퇴비화) 등에 이용되고 나머지는 마늘이나 딸기 재배시의 상토, 철강재 생산시의 보온재 등에 이용되는 것으로 조사되었다. 분기별 왕겨 생산량은 1/4 분기에만 21.1% 수준으로 조금 낮고 2, 3, 4 분기는 비슷한 수준으로 나타나므로 왕겨의 생산

량은 연간 거의 일정하게 생산되고 있다는 사실을 알 수 있었다.

왕겨의 평균 판매단가는 전라남도가 최고로서 톤당 44,700 원, 경상북도가 최저로서 톤당 10,800 원의 분포를 보이며 평균은 톤당 21,900 원으로 분석되었고 총 왕겨 판매액수는 약 177억7천만 원 정도로 추정된다.

전국의 왕겨처리 실태를 조사한 결과 왕겨는 현재 대부분 가축 분뇨의 수분 흡수재로서 축사의 깔개로 이용되어 퇴비화되고 있는데 문제점으로서 악취발생, 어린 가축들의 생육장애등이 제기되었으며 장래에는 악취로 인한 대기오염문제나 가축의 질병문제 등 어떤 문제점이 추가로 제기될 가능성이 많다. 또한 자연부식 속도보다 더 빠른 속도로 왕겨를 퇴비화하여 농지내로 환원함에 따라 미부식 왕겨가 토양속에 집적하여 농지내의 토양환경이 점차 열악해지고 있다. 따라서 왕겨의 이용방법에 대한 다각적인 연구가 활발히 이루어져야 하겠다. 일본의 경우 현재까지는 소각하여 처리하는 방법이 가장 보편화되어 있으나 소각 탄화시켜 상토로 이용하는 경우, 팽연화하여 퇴비화하는 경우 등에 대한 시도가 진행되고 있으며 국내에서는 왕겨 배지를 개발하는 연구와 팽연화하여 퇴비화하는 방법이 시도되고 있다.

또한 왕겨가 분기별로 거의 일정하게 생산되고 있으므로 연중 일정하게 소각열량과 배연가스 및 왕겨재가 생산된다는 사실을 알 수 있다. 따라서 미곡종합처리장에 왕겨연소시스템과 프리캐스트 왕겨재 콘크리트 제품의 생산공장을 설치하더라도 왕겨의 수급 불균형으로 인해 프리캐스트 왕겨재 콘크리트 제품의 생산이 중단되지 않으리라는 것을 추측할 수 있다.

1994년도 주요 품종별 미곡 생산량과 지역별 주요 미곡 품종별 식부면적비율을 조사 정리한 결과가 다음 <표 1-2> 및 <표 1-3>이다.

<표 1-2> 주요 품종별 미곡 생산량(1994년도)

구 분	추청벼	봉광벼	동진벼	신선찰벼	섬진벼	오대벼	화성벼	일품벼	계화벼
전국대비 식부면적비	13.8%	2.0%	29.2%	4.1%	2.5%	4.9%	4.7%	7.1%	2.7%
전국 생산량(천톤)	131	19	277	39	24	47	45	67	26
주요 재배지 (전국대비 점유율)	경기 (49%)	경기 (93%)	전남북 (58%)	충남 (25%)	경북 (58%)	강원 (51%)	경남북 (57%)	충남북 (50%)	전남북 (78%)

주) 전국대비 식부면적비 자료 : 농림부 자료통계관실
전국대비 식부면적비 2% 이상의 점유율을 가진 품종만 정리

<표 1-3> 지역별 주요 미곡 품종별 식부면적비(1994년도)

지역	식부면적계 (ha)	지역 내 주요 품종별 식부면적비 (%)								
		추청벼	봉광벼	동진벼	신선찰벼	섬진벼	오대벼	화성벼	일품벼	계화벼
서울	761	70.0	-	2.5	4.1	2.6	4.9	4.7	7.1	2.7
부산	4,543	-	-	34.0	-	-	-	2.0	-	-
대구	1,765	6.0	-	42.0	2.0	14.0	-	2.0	2.0	-
인천	3,864	68.0	2.0	-	-	-	-	-	-	-
광주	9,868	-	-	66.0	-	2.0	-	2.0	4.0	10.0
대전	3,450	10.0	-	12.0	-	12.0	2.0	10.0	28.0	-
경기	154,940	48.3	13.0	0.5	4.8	-	4.0	3.4	1.5	-
강원	50,916	12.0	3.0	-	2.0	-	53.7	3.5	1.5	-
충북	64,318	34.0	-	4.5	6.0	0.5	8.2	4.0	30.0	-
충남	170,745	16.3	-	27.7	6.6	0.3	0.3	3.7	15.5	3.0
전북	163,648	2.3	-	37.7	2.5	0.6	3.5	0.4	2.5	7.7
전남	194,887	0.3	-	65.0	4.9	1.3	-	2.3	3.6	5.4
경북	151,058	9.5	-	16.9	2.6	10.8	4.9	11.5	8.8	-
경남	126,705	6.9	-	38.2	2.9	5.1	0.9	9.6	2.5	0.5
제주	210	30.0	-	-	-	20.0	-	-	-	-

주) 전국대비 식부면적비 자료 : 농림부 자료통계관실
전국대비 식부면적비 2% 이상의 점유율을 가진 품종만 정리

주요 미곡 품종으로는 <표 1-2>에 나타나 있는 바와 같이 같이 동진벼와 추청벼가 전체 생산량의 약 43%인 41만톤에 달하는 것으로 추정되며, 이는 왕겨의 주요 품종 역시 동진벼와 추청벼라는 것을 의미한다.

<표 1-3>에 나타난 지역별 주요 왕겨 품종을 살펴보면 서울, 경기

지역에서는 추청벼 왕겨를, 강원도에서는 오대벼 왕겨를, 충북지역에서는 추청벼와 일품벼 왕겨를 생산하며, 충남지역에서는 동진벼와 추청벼 및 일품벼 왕겨를, 전남북 지역에서는 동진벼 왕겨를, 경남지역에서는 동진벼 왕겨를 주로 생산하며, 경북지역에서는 동진벼, 화성벼, 추청벼 및 일품벼 왕겨가 거의 균일하게 생산되고 있다.

따라서 재배 품종이 지역별로 차이가 있으므로 왕겨를 콘크리트용 혼화재료로 활용하는 기술을 개발하여 전국적으로 확대 보급하기 위해서는 먼저 지역별·품종별 왕겨재가 혼화재료로서 콘크리트의 강도특성이나 시공성에 미치는 영향이 무시될 수 있을 정도로 작다는 사실이 입증되어야 하며 이를 위해서는 먼저 지역별·품종별 왕겨재의 물리·화학적 특성을 정밀하게 분석할 필요가 있다.

제 2 절 국내 미곡종합처리장의 실태와 향후 전망

국내 미곡종합처리장(RPC)은 농업협동조합이나 생산자 단체로서 미곡을 생산·유통하는 법인이나 양곡도정공장과 100명 이상의 평창고를 보유한 일반사업자를 대상으로 정부에서 농어촌 구조개선 특별회계 자금으로 RPC의 설치를 지원하고 있으며 1997년도까지의 지원내역을 살펴보면 다음 <표 1-4>와 같다.

한편 국내의 미곡종합처리장들은 원료곡 확보가 어려워 개별 미곡종합처리장별로는 조곡을 연평균 5,000~7,000톤 가공하고 있다. 따라서 미곡종합처리장 1개소는 연간 약 1,200톤의 왕겨를 생산하는 것으로 추정되며, '97년도 현재 전국 253개의 미곡종합처리장에서 연간 생산하는 왕겨는 전국 생산량의 약 37.5%인 303,600톤

으로 추정된다.

<표 1-4> 지역별 미곡종합처리장의 설치 현황

구 분	생산자 단체(단위 : 개)			일반사업자(단위 : 개)			합 계	
	'91-'93	'94-'97	소 계	'91-'93	'94-'97	소 계		
지역	대 구	-	-	-	-	1	1	1
	인 천	1	1	2	1	-	1	3
	광 주	1	1	2	1	-	1	3
	울 산	1	-	1	1	-	1	2
	경 기	9	17	26	2	7	9	35
	강 원	5	4	9	1	1	2	11
	충 북	4	8	12	1	8	9	21
	충 남	9	16	25	1	12	13	38
	전 북	8	18	26	3	6	9	35
	전 남	12	19	31	4	17	21	52
	경 북	6	9	15	4	13	17	32
	경 남	8	8	16	1	3	4	20
	소 계	64	101	165	20	68	88	253
처리 능력	건 조	1,000톤/년	1,800톤/년		1,000톤/년	1,000톤/년		
	저 장	600톤	1,200톤		600톤	600톤		
	가 공	20톤/일 (정곡)	20톤/일 (정곡)		20톤/일 (정곡)	20톤/일 (정곡)		

주) 자료 : 농림부 식량 수급과

개별 미곡종합처리장에서 의 왕겨소비 실태를 살펴보면 미곡종합처리장이 보유한 왕겨 저장공간이 협소하므로 시의 적절한 왕겨소비를 위하여 많은 미곡종합처리장에서는 무허가 처리업자와 연간 계약에 의하여 왕겨를 판매하고 있는 실정이다. 또한 많은 미곡종합처리장은 규모가 영세성하기 때문에 경영상의 적자에 허덕이고 있음에도 불구하고 미곡종합처리장의 자체난방 또는 물벼 건조에 필요한 열량은 수입경유에 의존하고 있다.

한편 경지로부터 산물단위의 벼 수확운반기가 1996년도 부터 국내에 시판 보급되기 시작하였으므로 향후 미곡종합처리장의 건조

시설을 이용하고자 하는 수요가 늘어날 것으로 추측된다. 미곡종합처리장 역시 경영상의 적자를 탈피하려는 노력의 일환으로 미곡종합처리장에서 도정하는 벼의 양을 점차 늘려 나갈것이 예상된다. 이에따라 미곡종합처리장에서 물벼건조에 필요한 수입경유의 사용량과 연간 발생하는 왕겨의 량도 점차적으로 증가할 것이 예상된다. 왕겨를 농민이나 농민단체 또는 미곡종합처리장의 새로운 고소득 수입원으로 개발하기 위한 기술의 개발육구가 증대할 것이다.

제 3 절 국내 시설농업 현황과 향후 전망

시설농업은 작물의 재배 및 환경관리를 각종 계기와 시설을 이용하여 보다 성력적으로 할 수 있기 때문에 농촌 노동력의 감소에도 불구하고 계속 확대될 전망이다. 농촌진흥청의 분석결과(국내 시설농업 발전을 위한 심포지움, 1993. 8. 26)에 의하면 시설채소의 경우 시설의 고급화와 대형화 및 집단화의 방향으로 발전되어 2000년에는 시설채소의 재배면적은 전체 채소재배 면적의 23%인 69,000 ha에 달할 것이고 화훼류는 2000년도에 전체 화훼재배 면적의 61%인 3,700ha가 시설재배로 돌아설 전망이다. 1996년도 농림수산통계연보에 따르면 1995년도 말 현재 우리나라의 시설농업의 재배면적은 43,093ha이며 이 중 시설채소 재배 면적은 40,077ha이고 화훼류 재배면적은 3,016ha이다.

시설농업의 대부분을 차지하는 비닐하우스는 1993년도 현재 약 86.4%가 인위적으로 열량을 가하지 않는 무가온 형태이며, 나머지 13.6%는 인위적으로 열량을 가하여 작물을 생산하는 가온형태이다. 이 중 경유와 같이 해외 수입에너지에 의존하는 가온형태가 전체 비닐하우스의 12.4%이며, 연탄이나 톱밥과 같은 기타의 열원

에 의존하는 가온형태가 1.2%에 이른다. (자료 : 첨단농업시설발전 방향, 1994.5.19, pp117-118)

따라서 2000년도에 예상되는 시설채소면적 69,000ha와 화훼류 재배면적 3,700ha의 13.6% 모두가 경유나 LPG 또는 LNG를 사용하는 가온형태를 취한다고 가정하면 해외 수입에너지 의존형 비닐하우스의 면적은 2000년도에 약 9,880ha에 이를 전망이며 무가온 형태는 62,820ha에 이를 전망이다. 반면 1990년도의 비닐하우스내 시설 토마토 경영성과 비교분석표(자료:국내 시설원예산업의 발전을 위한 심포지움, 1993.8.26, P56)에 의하면 비닐하우스 10a당 1990년도 단가 기준으로 31,868원의 광열동력비가 필요한 것으로 나타났으므로 1990년도의 경유 1ℓ 단가를 220원으로 추정한다면 약 145ℓ의 경유에 해당하는 광열동력비가 소요된다. 따라서 비닐하우스 1ha당 1,450ℓ의 경유가 필요하므로 2000년도에 가온형 비닐하우스에서 필요한 해외 수입경유의 양은 연간 약 14.3백만ℓ로 추정된다

한편 상업적 농업경영을 위하여 1991년도 부터 첨단기술 농업생산단지 조성 사업으로 생산전용 대형 온실을 보급하기 시작하였으며, '97까지 287ha가 조성되어 전체 시설농업 재배 면적의 0.6%에 달한다. 그러나 가까운 일본이 '92 현재 그 비율이 4.2%이므로 우리나라의 생산전용 대형 온실의 면적 비율도 이와 같다고 가정하면 약 2,900ha 까지 확대될 전망이다. (자료 : 첨단농업시설발전 방향, 1994.5.19, pp117-118)

<표 1-5>는 전남 광양에 있는 농어촌진흥공사 운영 첨단유리온실의 300평당 경영수지 분석표이다. 유리온실로 대표되는 첨단시설농업에서 연간 총 경영비의 약 19%가 수입경유 및 LNG를 사용한

난방비로서 동 표의 난방비 중 약 35%는 수입 LNG를 나머지 65%는 수입경유를 사용한 결과이다.

<표 1-5> 광양 유리온실 300평당 수지 계산서

비 목 별		'94/'95작기 (천원)	'95/'96작기 (천원)	평 균 (천원)	비 고	
조 수 입	주산물가액	72,630	63,170	68,150		
	부산물가액					
	계	72,630	63,670	68,170		
경 영 비	중 간 재 비	- 종 자 대	300	408	354	
		- 암면 구입비	2,900	2,818	2,909	
		- 백색비닐 구입비	145	202	173	
		- 비료 구입비	1,513	1,472	1,493	
		- 농 약 비	282	350	316	
		- 수정용 별	538	552	545	
		- 포장 상자	3,840	3,964	3,902	
		- 기타 자재비	996	986	991	
		- 전기 요금	684	652	668	
		- 용 수 비	148	214	181	
		- 난 방 비	8,813	9,408	9,110	
		- 청 소 비	139	364	252	
		- 시설 유지보수비	5,310	1,813	3,561	
		- 운 입	765	1,498	1,132	
		- 양액 검사비	159	262	210	
		- 보일러 새관비	-	293	147	
		- 기타 경비	308	377	342	
		- 판매 수수료	356	965	661	
		- 세금과공과	121	162	142	
		- 광고선전비	170	54	112	
- 보 험 료	68	-	34			
소 계		27,555	26,914	27,235		
- 노력 비		6,334	7,696	7,015		
- 감 가 상 각 비		13,793	12,413	13,103		
합 계		47,682	47,023	47,353		
순 수 익		24,948	16,647	20,797		

주) 자료 : 농진공 기술설명회 발표집(상), p213, 농어촌진흥공사, 1997. 9. 4

한편 수입경유(9,400kcal/ℓ)는 1ℓ 당 260원에 구입하고 수입 LNG(23,000kcal/m³)는 1m³ 당 737원에 구입하였으므로 필요열량을 경유

로 환산할 경우 첨단시설농업 1ha당 연간 약 33,360 ℓ의 수입경유가 전남 광양 부근에서 동절기에 필요하다고 추정할 수 있다. 따라서 유리온실등과 같은 첨단시설농업의 재배면적을 일본의 경우와 마찬가지로 전체 시설재배 면적의 4.2%까지 확대 된다고 가정하면 국내의 유리온실에서 필요로하는 수입경유의 총 양은 연간 약 96.7백만 ℓ에 달할 전망이다.

따라서 200년대 이후 가온형 비닐하우스와 생산전용 대형 온실에서 연간 필요로 하는 수입경유의 량은 약 111백만 ℓ로 추정되며, 수입경유 단가를 260원/ℓ로 가정할 때 연간 수입경유의 소비액은 약 289억원으로 추정된다.

더구나 향후 농업의 생산성 향상을 위해서 가온형 비닐하우스가 생산전용 대형 온실 등과 같이 단위면적당 더 많은 수입경유를 사용하는 온실로 전환될 경우 연간 필요로하는 수입경유의 양은 더욱더 확대될 것이다. 따라서 농업의 경영성 향상을 위해서 또한 국가경쟁력 제고를 위해서 수입경유를 대체할 수 있는 환경 친화적인 새로운 열원의 개발 및 보급이 시급한 시점에 이르렀다.

제 4 절 국내외 연구개발 동향 및 고찰

왕겨는 약 천년 전부터 중국과 우리나라 등에서는 취사용 燃料로 또는 단열재로 사용되어 왔으며, 그회분은 사람의 대·소변 흡수제 및 퇴비로 사용되어 왔다. 왕겨 연소기는 1880년 C.K.Cowie(burmese)의해 처음으로 만들어져 도정공장의 보일러에 이용되었다. 그 후 1951년 경에 브라질에서 왕겨 이용에 대한 광범위한 연구가 수행되었으나 도정공장이 전기와 내연기관을 이용하는 체제로 전환되면서 왕겨에 대한 연구도 중단되었다.

1950년대에 다시 왕겨에 대한 관심이 높아졌는데 그것은 廢棄物

로서의 왕겨의 처리 문제 때문이었다. 왕겨는 잘 썩지 않아 경작지에서 바로 태워 처리하는 방법을 생각했으나 이것은 환경오염이 원인이 되어 왕겨의 처리는 중요한 문제로 대두되었다. 그래서 세계의 많은 도정공장에서는 왕겨의 처리 문제 때문에 스팀 보일러 연소기의 연료로 왕겨를 사용했던 실정이었다. 최근 1970年代부터 에너지 위기가 도래하자 쏠 세계가 代替에너지원을 찾으면서 왕겨의 에너지원으로서의 이용성에 다시 큰 관심을 쏟게 되었으며, 1978년에는 쏠 세계적으로 왕겨에 대한 총체적인 연구자료가 FAO에 의해 수집되었다(Beagle, 1978).

1. 왕겨의 물리화학적 特性

벼 중에서 왕겨가 차지하는 중량 비율은 벼의 품종, 경작지의 기후조건, 토질, 경작법에 따라 차이가 있으나 보통 20% 정도로 계산하는 것이 일반적이다. 김지동 등(1981)은 약 16.3~26%, (Beagle25)은 14~27% 정도라고 보고한 바 있다. 조명제 등(1981)은 왕겨의 발열량은 산지 및 품종에 따라 약간씩 다르나 국내 왕겨의 고위 발열량은 3750kcal/kg 정도라고 보고하였다. Shimizu 등(1978)은 산지 및 품종별로 발열량을 측정한 결과 산지 및 품종간에 큰 차이가 있으며, 회분의 함량이 증가할 수록 발열량은 감소한다고 보고하였다.

조명제 등은 왕겨는 나무와 연소 특성이 유사하나 다만 회분 성분이 많아 점화에 필요한 열을 전달받기 위한 시간이 약간 지연되고 따라서 왕겨는 점화 온도가 나무보다 약간 높은 300~350℃ 정도로 추정된다고 보고하였다. 김지동 등은 왕겨의 열분해 특성에 대한 연구결과, 110℃에서 흡착수분은 증발이 거의 완료되며, 350℃에서 급속한 열분해가 진행되어 400℃에서 60% 정도의 질량감

소를 일으키는데 이것은 석탄의 경우 400℃에서 겨우 질량감소가 일어나기 시작하는 것과 비교하여 불 때 좀더 용이한 열분해 특성을 가지는 것이라고 보고하였다. Shimizu 등(1978, 1985)은 품종과 산지에 따라 차이가 있으나 일본에서 생산되는 왕겨의 경우 평균적인 조성에서 휘발분은 62%, 탄분은 20.5%, 회분은 17.5%정도이며, 휘발분의 발열량은 3670kcal/kg, 탄분의 발열량은 7640kcal/kg정도라고 보고하였으며 왕겨의 연소 특성에 대한 연구 결과 過剩空氣 90~170%에서 연소 온도가 최대로(870℃) 나타났으며, 연소시간은 過剩空氣가 많을수록 짧아지지만 대체로 10분 이하인 것으로 보고하였다.

Jeon(1982)은 함수율 12%의 왕겨 안식각이 47~52° 이고, 마찰계수는 0.63이라고 보고하였다. 또한 R.G.Smith(1986, 영국)은 말라 위에서의 왕겨재 시멘트(왕겨재 + 석고분말)를 개발하려는 기술용역 시행경험을 바탕으로 소각로의 형태를 철망으로 할 경우와 공기통로 구멍의 크기를 조절할 수 있는 벽돌 소각로 및 고정된 크기의 연직형 공기통로를 가진 벽돌소각로에서 왕겨를 소각시 왕겨재내의 SiO₂의 성분조성은 각각 왕겨재 중량의 90.7%, 88.3% 및 88.5%된다고 발표하였다.

2. 왕겨 연소로

국내의 왕겨 연소로에 대한 연구는 1976년 농촌진흥청 농공이용연구소와 1980년 동력자원연구소에서, 1982년, 1987년 서울대학교에서 수행된 바 있었다. 조명제 등(1981)은 연료공급통에서 자체 중량으로 왕겨가 자유낙하되기 위해서는 연료공급통의 경사각을 45° 이상이 되어야 하며 단면크기는 가로와 세로 공히 80~200mm 이상이 되어야 연속 공급이 가능하다고 보고하였다.

Jean(1982)은 자연통풍식, 무동력의 Center-tube型 연소로를 이용하여 곡물 건조 실험을 수행한 결과 왕겨의 함수율이 16% 이하에서는 왕겨 연소율이 90% 이상이며, 과잉공기는 70%가 적당하고, 1차 공기와 2차 공기의 비율은 1:1이 적당하며, 연소실의 온도는 400℃ 이상을 유지해야 한다고 보고하였다. Antero(-)는 왕겨 연소로를 이용한 곡물 건조실험에서, 왕겨 공급량이 3~4 kg/hr 정도 이하이면 도정공장 부근이 아닌 곳일지라도 왕겨 연소로가 충분한 경제성을 지니며, 건조해야 할 벼로부터 생산되는 왕겨량의 10%를 이용하면 벼를 함수율 22.5%에서 14%까지 충분히 건조할 수 있다고 보고 하였다.

3. 연소로 작동의 自動化 및 溫水보일러 시스템

왕겨연소로의 자동화와 온수보일러 시스템은 주로 외국에서 이용하였는데 대부분 왕겨 공급량 150kg/h 이상의 대형 스팀보일러 시스템에서였다.

자동화 장치로서의 왕겨 공급 장치는 호퍼로부터의 왕겨 자체 중량에 의한 자유낙하와 뉴매틱 컨베이어가 이용되었고, 着火 장치는 석유 혹은 개스 버너가 이용되었다.

왕겨연소로 스팀보일러의 效率는 보통 40~60%정도이며, 왕겨 공급량이 적을수록 그 효율이 높은 것으로 보고되어 있다(Beagle, 1978).

조명제 등은 석탄 연소에 이용되고 있는 연소장치를 제작하여 왕겨 연소실험을 수행한 결과 자연 통풍식 무동력에서는 왕겨 연소율은 높은 장점이 있으나 일산화탄소 발생량이 많아(배연가스 부피 비로 15%) 전체적인 연소효율이 나쁘므로 동력을 사용하여 왕겨가 일정하게 공급되도록 장치를 개발할 필요가 있다고 보고하였

다.

박승제 등(1983)은 Center-burner型 소형 왕겨연소로에서 모터와 스크류컨베이어를 이용하여 왕겨 공급을 일정하게 하고, 공기 공급은 자연통풍식으로하여 연소실험을 수행한 결과, 왕겨 공급량 1.5~2kg/h에서 연소효율이 90~95%, 일산화탄소 발생량은 2%이하였다고 보고하였다. 박승제(1988)는 작동을 자동화한 소형 왕겨연소로 온수보일러 시스템 개발연구에서 공기공급은 과잉공기 70~100% 정도가 최적이며 이 때의 왕겨연소율 97%, 열교환기 효율은 35%정도였고 배연가스 내의 일산화탄소 함량은 1%이내였다고 보고하였다. 또한 시뮬레이션 연구결과 환상 실린더형 열교환기를 이용할 경우 열교환기의 최대 효율은 60% 정도로 추정된다고 보고하였다.

Jaiswal(1980)은 왕겨연소로를 이용한 Parboiling시스템에서 왕겨공급을 15kg/h, 과잉공기 140%일 때 최대 열효율 21.4%를 얻었으며, 그때 왕겨의 연소율은 약 80%, 배연개스로의 열손실율은 41%정도였다고 보고하였다.

4. 미세조류

광합성 미생물을 이용하여 이산화탄소 고정화, 폐수 중의 N, P처리 및 미세조류 배양기의 개발에 관하여 국내의 연구 동향을 보면, 미국이나 이스라엘과 같이 기후 조건이 양호한 곳에서는 연료로 사용할 수 있는 오일 생산기술개발과 이산화탄소 고정화 및 수소 가스 생산 등과 관련된 미세조류를 옥외에서 배양하는 연구가 이루어지고 있다. 또한 일본에서는 광합성 박테리아를 이용한 이산화탄소 고정화 공정 개발에 많은 투자를 하고 있다. 국내에서는 포항제철의 지원하에 포항공대에서 이산화탄소를 효과적으로

제거하기 위해서 광합성 미생물을 고농도 배양 또는 대량 배양할 수 있는 광생물반응기 개발을 위해 연구하고 있다. (이선복 등, 1995).

미세조류 배양을 위한 대표적 배양기로서는 옥외 대량 배양을 위한 raceway 배양기, 옥내배양기인 관형의 광생물배양기 등이 있다. 개방형 탱크인 raceway 배양기는 초기 투자비가 적게 들고, 배양기 유지 및 관리가 용이한 이점이 있으나, 생산성이 낮고 장치설비에 필요한 부지가 많이 요구되는 단점이 있다. 현재 미국 남부 캘리포니아에 100,000㎡ 규모의 raceway 배양기가 설치되어 운전 중이다 (Becker, 1994). 옥외 배양의 단점을 보완하기 위해 고려되고 있는 관형배양기는 개방형 배양기에 비해서 초기투자비와 유지관리비는 높지만 배양기의 생산성이 상대적으로 높으며 배양기 내 이산화탄소의 체류시간이 길어 이산화탄소 고정화율이 높은 장점이 있다.

현재 일본에서는 중간 시험기 규모의 관형배양기를 설치하여 실용화 가능성을 검토 중이다. (Tokyo, 1994). 또한 관형태의 배양조를 여러 번 급혀 배양기의 크기를 조절하여 표면적을 넓힘으로써 이산화탄소 고정화율을 높이려는 시도도 있었다. (Lee, 1992).

1990년 이후로 광합성 미생물을 이용하여 고부가 가치의 물질들 즉 vitamins, carotenoids, fatty acids, antibiotics, plant growth regulators 등과 같은 유용한 화합물의 생산이 가능하게 됨으로써, 효과적인 광 전달을 위한 광생물반응기에 대한 연구가 요구되었다. Matsunaga 등은 Glutamate 생산을 위해 촉광발생형 광섬유를 이용한 새로운 개념의 광섬유배양기를 고안하였다. (Matsunaga etc, 1991). 사용된 광섬유배양기는 기존의 방법보

다 빛의 균일한 조사가 가능하다는 장점이 있으며, 상대적으로 이산화탄소 고정화율이 높은 배양기로 보고하였다. 그 외 Javanmardian 등은 광섬유배양기와 한외여과막을 이용하여 반응중 생산되는 자기억제(autoinhibition)물질이 사용된 막시스템을 이용하여 수시로 제거함으로써 최종 균체농도를 109 cells/ml로 향상시킬 수 있음을 보고했다. (Javanmardian etc, 1991).

광섬유반응기를 이용하여 미세조류를 배양시 이산화탄소 제거율이 3.05kg/m³day, 균체량은 1.5 kg/m³day 인 결과가 발표되었으며, 관형광반응기를 이용한 경우 이산화탄소 제거율과 균체량이 각각 최대 0.39kg/m³day, 0.20kg/m³day 인 결과가 발표되었다. (Cresswell etc, 1989). 그러나 관형 광생물반응기가 광섬유 생물반응기에 비해 상대적으로 S/V(Surface to Volume ratio)값이 작은 것과 설치비와 유지관리비가 적게 드는 것을 고려하여, 생산물이 무엇인가에 따라 배양기를 선택하는 것이 적절하리라 사료된다. 또한 생물체의 증가속도와 이산화탄소 고정화율은 비례하므로 비성장속도가 빠른 미세조류의 선택과 배양시 최적 조건의 유지가 이산화탄소 고정화율을 증가시키는 중요한 인자이다.

폐수 중의 유기물 제거를 위해서 미세조류를 이용한 연구도 많이 발표되고 있다. 특히 돈분이나 우분 등을 이용하여 메탄가스 발효 후, 광합성 종속 영양적으로 증식하는 미세조류를 이용하면 폐수 중의 N, P 등의 영양염류와 유기물의 제거가 가능함이 연구 발표되었다. (권 등, 1993, 성 등, 1994, Kim etc., 1993, Hong etc., 1993).

미세조류의 분리공정 개발 및 미세조류 배양조건의 최적화와 광생물반응기의 확립이 이루어지면 환경개선뿐만 아니라 건강식품,

식품첨가제, 항생제, 액체연료 등을 동시에 부가적으로 제공할 수 있으므로 새로운 생물자원으로서 미세조류의 응용범위가 대폭 확대될 전망이다.

5. 콘크리트용 혼화제로 왕겨재 이용

1923년 미국에서 왕겨재를 시멘트와 혼합하여 건축용 저항도 벽돌을 만들었다는 기록이(Hough 등, 1953년) 왕겨재를 콘크리트용 혼화재료로 개발하려는 최초의 문헌상의 노력이다. 이후 1971년 미국의 P.K. Mehta 등은 왕겨재가 생석회와 반응한다는 사실을 밝혔으며, 1974년 왕겨재를 소각분쇄하여 가황고무의 첨가제로 사용할 수 있는 기술을 개발하고 미국 특허를 획득하였다(P.K. Mehta 등, 1974). 이어서 1975년에는 보통포틀랜드 시멘트(OPC)와 반응하는 왕겨재를 생산하기 위한 소각로를 고안하였으며, 1983년에는 비결정형 실리카가 함유된 왕겨재와 생석회의 반응성은 결정질 실리카가 함유된 왕겨재 보다도 더 좋다는 결과를 발표하였다. 이와 동시에 Ankra(1976, 미국)등은 대기중에서 소각된 왕겨재는 산소를 충분히 공급하는 상태로 소각하는 경우보다도 왕겨재의 표면적이 커진다는 사실을 보고하였다.

태국에서는 19세기 말부터 왕겨재를 도로 포장재로 사용하여 왔으며 지금도 이들 도로의 사용성이 좋은 상태에 있다고 보고되었다(Buton, 1979). 1977년 Cook등은 OPC의 일부를 왕겨재로 대체하려는 연구를 시도하였으며(Cook, 1977), 왕겨재를 도로포장용 롤라다짐 콘크리트로 개발하기 위한 연구(Somjai K., 1992.)도 시작하였다.

대만 국립연구소 공학부에 근무하는 C.L.Hwang 등은 1989년 먼지나 토입자와 같은 불순물을 왕겨로부터 제거한 후 소각온도를 달

리 하였을 때 왕겨재의 화학적 특성을 규명하고 OPC와 혼합시 나타나는 수화반응 특성과 응결시간, 공극분포, 압축강도 특성을 연구 발표하였다.

호주에서는 멜버른 대학 공학부를 중심으로 왕겨재 시멘트(왕겨재+시멘트 : RHAC) 제조기술의 연구시험 단계로서 1980년 Cook등은 소각온도를 450-700℃로 변화시키면서 소각된 왕겨재와 생석회의 반응성을 시험하였으며, 다시 1982년 그 때까지 인정되던 왕겨재:생석회 = 2:1 비율 개념을 타파하고 1:1로 배합시 반응성이 높다는 것과 왕겨재내 탄소의 함유는 강도증진 속도를 더디게는 하나 최종 압축강도의 크기를 훼손하지 않는다는 것을 발표하였다.

한편 파키스탄에서는 1970년 석유를 연소시켜 왕겨를 소각하는 시설을 펀잡주에 설치하여 1년간 100톤의 RHAC를 생산한 후 폐쇄하였으며, 4% 이상의 탄소가 함유된 왕겨재는 강도의 저하를 가져온다고 발표하였다.

다른 어떤 나라보다 RHAC의 개발·보급에 선두인 국가는 인도이다. 인도에서는 개인별 연구보다는 연구소를 중심으로 연구개발하여 실용적인 보급을 주도하였으며 몇 년 동안 RHAC의 상업적인 생산 경험도 있다. 1979년 뉴델리에 있는 CRI에서 벽돌로 이루어진 <그림 1-1>과 같은 소각로를 제작하여 1:2 비율의 저강도용 RHAC를 시험 생산하였으며 이후의 많은 상업용 소각로는 이 모델을 뒤따랐다. 1979년 KAPUR에서는 원형의 철망 소각로를 이용하여 비결정질 실리카를 함유한 왕겨재를 생산하기 위해서 왕겨를 750℃ 이하로 소각시킨 다음 다시 불밀을 이용하여 1.5시간 동안 분쇄하여 저강도용 RHAC를 생산 보급하였으며 상업적인 소각로로서 보급한 실적도 있었다. 1980년도에는 고강도용 왕겨재 시멘트 또는 왕겨

재 혼입 콘크리트를 제조하기 위해서 첨가제로서 알루미나 성분을 첨가하여 실험을 실시한 바 왕겨 소각온도로서는 500℃ 이하가 최적이나 700℃ 까지도 양호하다는 결론을 얻었다.(Aggarwal, 1980). 그러나 OPC가 전국적으로 낮은 가격으로 공급되기 시작하면서 경쟁력을 잃고 점차 사라지는 추세이나 아직도 OPC가 고가인 지역에서는 RHAC가 보급되고 있다.

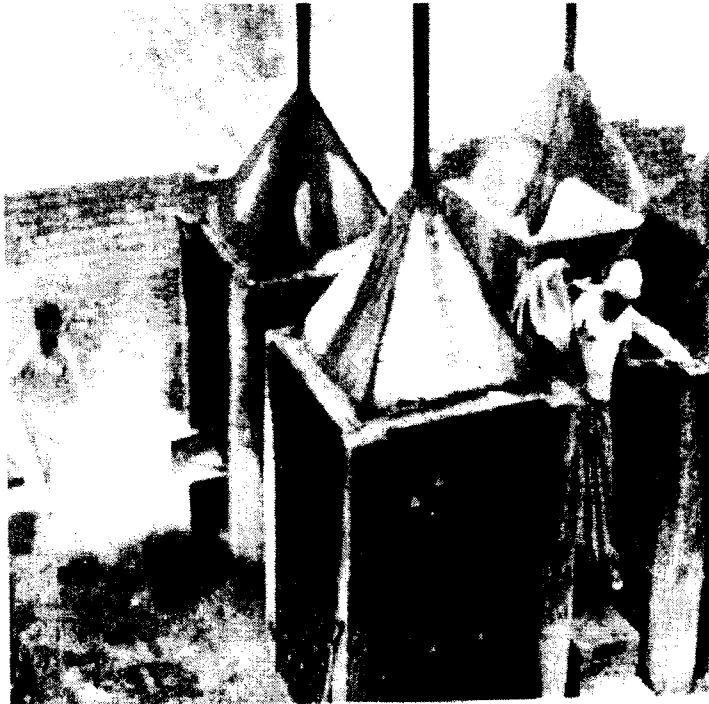
네 팔에서는 대형 야외 벽돌 소각로나 취사용으로 사용 후 생산되는 왕겨재와 생석회 가루를 혼합한 상업적인 RHAC를 제조하여 공사현장에서 사용한 경험이 보고되고 있다.(R.G.Smith, 1987). 또한 스리랑카에서는 650℃ 이하로 소각한 왕겨재와 생석회를 3:4 비율로 혼합하여 RHAC를 제조한 바 있다.(Sooriyakumaran). 그 외에도 가이아나에서는 생석회가 생산되지 않으므로 OPC의 일부를 왕겨재로 대체하기 위해서 왕겨재와 OPC를 혼합한 모르타 강도를 실험한 바 있다고 보고되고 있다.(R.G. Smith, 1986).

말레이시아에서는 노상에서 왕겨더미를 소각하였을 때 발생하는 왕겨재와 생석회를 혼합하여 RHAC를 시험생산 판매(Mohammed, 1979)하였으나 상업화가 지속되지 못하였으며, 말레이대학을 중심으로 RHAC의 압축강도 증대를 위한 소각방법과 생석회 배합비를 연구한 바 있다.(Ong, 1979)

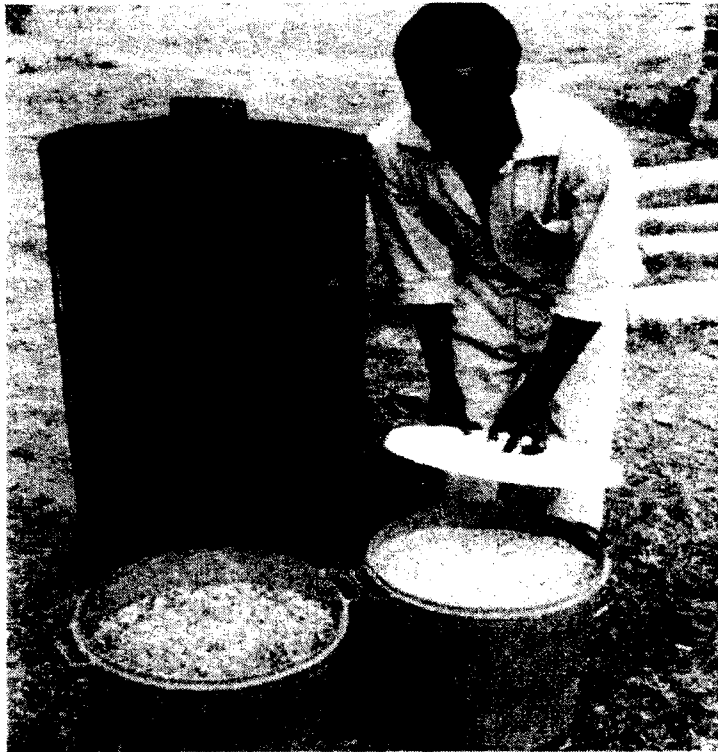
한편 이란에서는 미분쇄 왕겨재와 생석회를 혼합하여 RHAC 개발을 시도하였으나 왕겨재를 분쇄하지 않아 상업화에 실패하였다고 보고되고 있으며, 콜롬비아의 Dalimier는 반응성 비결정형 실리카가 함유된 왕겨재를 생산하기 위해서는 소각온도를 700℃ 이하로 제한하여야 하며, 탄소의 비율이 5% 이하이면 강도에는 별반 차이가 나타나지 않는다고 보고하였다.

말라위의 말라위 대학에서는 영국의 기술지원 아래 <그림 1-2>와 같은 점토벽돌 조각로를 이용해서 왕겨를 조각한 다음 저장도의 벽돌제조용 RHAC 제조기술을 개발한 바 있다고 보고되었다. (R.G. Smith, 1985). 또한 일본에서는 왕겨재를 첨단 전자재나 세라믹 또는 광화이버나 뉴글래스등에 활용하기 위해서 전기로를 이용한 조각방법을 연구하고 있으며 다른 한편에서는 왕겨재를 콘크리트의 알칼리-골재반응 억제제로 활용하는 기술을 개발중이다.

이에반해 국내에서는 아직까지 왕겨를 콘크리트용 혼화재료로 개발하기 위한 어떤 시도도 없었으며 단지 건설기술연구원 김광수 (1995)가 왕겨재의 비표면적이 큰 점을 이용 활성탄 제조방법과 그 경제적 타당성을 발표한 바 있다.



<그림 1-1> 인도에서의 왕겨 조각로



<그림 1-2> 말라위에서의 왕겨 소각로

제 2 장 왕겨 및 왕겨재의 물리화학적 특성

제 1 절 왕겨의 물리화학적 특성

국내에서 생산되는 벼 품종은 <표 1-2>에서 보는 바와 같이 동진벼 및 추청벼 등 총 53종이 재배되고 있으며 동일한 품종이라도 재배지역이 상이하 며 또한 동일 지역일 지라도 산지나 평야부와 같이 기후특성이나 토양특성이 서로 다른 지역에서도 재배되고 있다. 따라서 본 연구의 성과를 곧바로 실용 화하여 전국적으로 적용하기 위해서는 품종별 또는 산지별 왕겨재가 혼화재료 로서 콘크리트의 제반 특성에 미치는 영향에서 차이가 없어야 한다. 즉 지역 별·품종별 왕겨의 물리·화학적 특성 차이가 적어서 왕겨재를 콘크리트용 혼 화재료로 사용시 콘크리트의 제반 특성에 미치는 영향이 거의 없어야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 국내에서 생산되는 대표적 품종으로서 동진벼, 추청 벼, 계화벼, 오대벼 및 화성벼 5품종을 선택하여 품종간 물리·화학적 특성의 차이점을 분석하기로 하였다. 또한 동일 품종일 지라도 재배지역이 다를 경우 재배지역 차이로 인해 화학성분 조성상의 차이점이 나타날 수 있으므로 전북 지역에서 재배되는 동진벼와 경남지역에서 재배되는 동진벼를 선정하여 이를 분석하기로 하였다. 이외에도 동일 품종이 동일 지역에서 재배될 지라도 재배 지역의 고도가 평야부와 산간지 처럼 서로 달라 기상 또는 토성 차이로 인해 화학성분 조성상의 차이점이 나타날 수 있다.

이에 따라 전북지역에서 대표적으로 인정되는 산간부와 평야부로서 김제와 부안을 선정하고 이들 지역에서 재배되는 동진벼를 선택하였다. 경남지역에서 는 대표적인 산간지역으로서 함양군 지역을 선정하고 평야지역으로서는 함안 군 군북면 지역을 선정하여 이들 각각의 지역에서 재배되는 동진벼 왕겨를 선 택하였다. 또한 실험오차를 배제시키기 위해서 모든 왕겨시료는 1994년도에 수확되고 1995년도에 도정된 것을 엄밀하게 채집하여 물리·화학적 특성을 분 석하였다.

1. 왕겨의 화학성분 조성

채집된 품종별·지역별 및 산지별 대표적인 왕겨의 화학성분 조성을 분석한 결과를 종합 정리한 것이 <표 2-1>이다. 품종별·지역별·산지별 성분 조성상 약간씩의 차이를 보이거나 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 이러한 결과는 Shimizu(1978)가 분석한 일본의 지역별·품종별 왕겨성분 분석결과와 유사하다. 따라서 국내산 왕겨 속에는 소각시 재가되는 실리카와 같은 무기물 함량이 13 - 17%이며, 섬유질이 34 - 44%, 리그닌 성분이 23 - 30%이며 수분은 9 - 12%임을 알 수 있었다.

<표 2-1> 왕겨의 물리·화학적 특성

성분			품종별 성분구성비 (%)								평균
			동진 (김제)	동진 (부안)	동진 (군북)	동진 (함양)	계화 (김제)	오대 (운봉)	화성 (군북)	추청 (안산)	
무기물	왕겨재	습량기준	13.48	13.15	17.11	15.44	13.50	13.34	16.44	15.65	14.76
		(건량기준)	(15.06)	(14.96)	(18.94)	(17.06)	(15.03)	(14.83)	(18.22)	(17.36)	(16.43)
수분	소각시 감량	습량기준	10.05	12.08	9.65	9.51	10.16	10.16	9.77	9.84	10.19
		(건량기준)	(11.67)	(13.74)	(10.68)	(10.51)	(11.31)	(11.14)	(10.83)	(10.91)	(11.35)
유기물	소각시 감량	Carbon	32.736	39.092	37.314	37.771	38.240	36.612	36.747	38.268	37.098
		Hydrogen	5.843	5.439	5.577	5.287	5.564	5.427	5.454	5.736	5.541
		Nitrogen	0.315	0.497	0.266	0.314	0.367	0.343	0.372	0.285	0.345
		Sulfer	0.019	0.050	0.022	0.019	0.039	0.029	0.033	0.019	0.025
		Oxygen	37.157	29.692	30.081	31.659	32.130	34.229	31.184	30.202	32.01
		소 계	76.070	74.770	73.260	75.050	76.340	76.640	73.790	74.510	75.050
합 계(습량기준)			100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
고위발열량 (kJ/kg)			3,746.1	3,660.5	3,520.5	3,571.2	3,429.4	3,570.2	3,503.5	3,550.6	3,569.0

이러한 결과는 첫째, 재배지역이나 품종 또는 산지에 관계없이 어떠한 왕겨 일 지라도 소각·분쇄하여 콘크리트용 혼화재료로 활용할 때 콘크리트의 성능에 차이가 거의 없다는 것을 암시하고 있으며, 둘째, 본 연구에서 3개년에 걸쳐 수행한 혼화재로서 왕겨재가 콘크리트의 특성에 미치는 영향에 관한 모든

실험자료와 분석결과가 왕겨의 품종이나 재배지역 또는 산지의 차이점에 영향을 받지 않을 것이라는 사실을 나타내고 있으며, 셋째, 이에따라 본 연구에서 개발할 콘크리크용 혼화재료로서 왕겨를 활용하는 기술은 아무런 제약 없이 전국적으로 확대 적용할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

또한 왕겨내에 함유된 황과 질소의 성분이 매우 적어 연소시 배연가스 내에 대기오염원인 질소산화물이나 황산화물이 적을 것으로 추측되는데 이는 본 연구수행 과정중 실제로 배연가스내 질소산화물이나 황산화물을 실측분석한 결과 대기오염 기준보다 매우 적게 나타난 것으로도 입증되었다.

<그림 2-1> 및 <그림 2-2>는 전자현미경을 이용하여 왕겨의 내외피를 관찰한 결과이고 <그림 2-3> 및 <그림 2-4>는 1994년도에 수확되고 1995년도에 도정되어 생산된 전북 김제산 동진벼의 왕겨를 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)을 이용하여 내외피의 성분을 분석한 결과이다. 그림에서 왕겨의 외피는 격자형태의 규소(Si)가 여러 층으로 겹겹이 쌓여 있으며 내피는 표면의 전면에 얇게 고르게 분포되어 있음을 관찰할 수 있다. 또한 <그림 2-3> 및 <그림 2-4>로부터 왕겨내의 규소는 왕겨의 내피보다는 외피에 집중적으로 분포되어 있음을 발견할 수 있다.

2. 왕겨의 물리적 특성

<표 2-1>은 1994년도에 수확되고 1995년도에 도정된 지역별·품종별·산지별·왕겨 시료를 전기로에서 600℃로 2시간 동안 연소 후 물리적 특성을 실험·분석한 결과이다. 실험방법으로서 고위발열량은 Bomb Calorimeter(Parr Instrument)로 측정하였고 왕겨재 함량은 2시간 동안 소각한 직후 정밀 무게 측정기로 측정하였으며 함수율은 공기오븐법으로 측정하였다.

또한 도정된 왕겨를 다지지 않은 상태에서 걸보기 밀도를 측정한 결과 수분 함량에 따라 차이는 있으나 102 - 107kg/m³ (평균 105 kg/m³)으로 나타났으며 고위발열량은 3,430 - 3,750kcal/kg (평균 3,569kcal/kg) 으로서 왕겨 2.7kg은 고

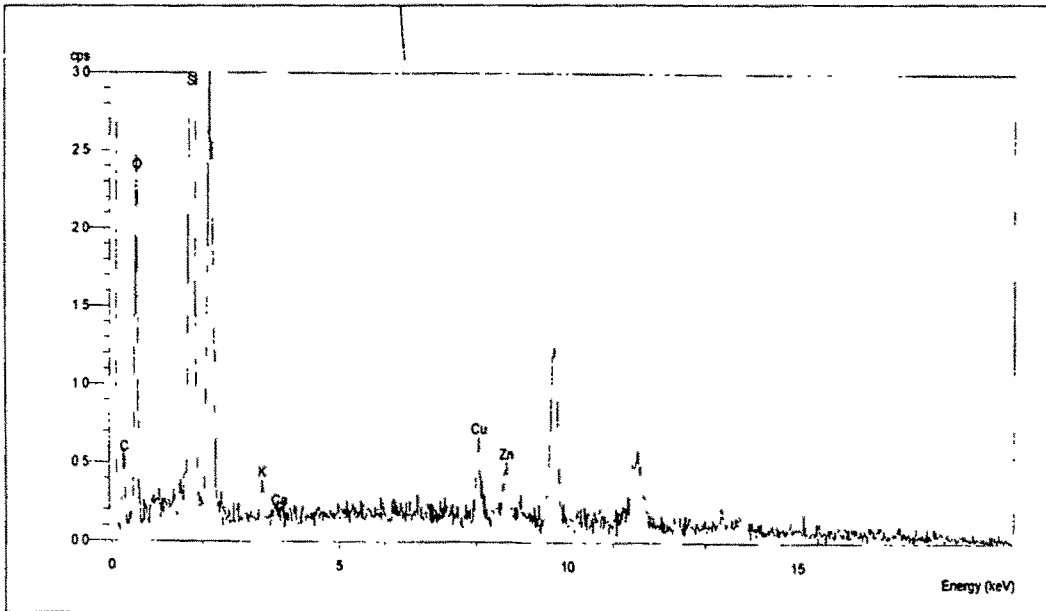
칼로리 수입경유 1ℓ와 열용량이 같은 것으로 나타났다.



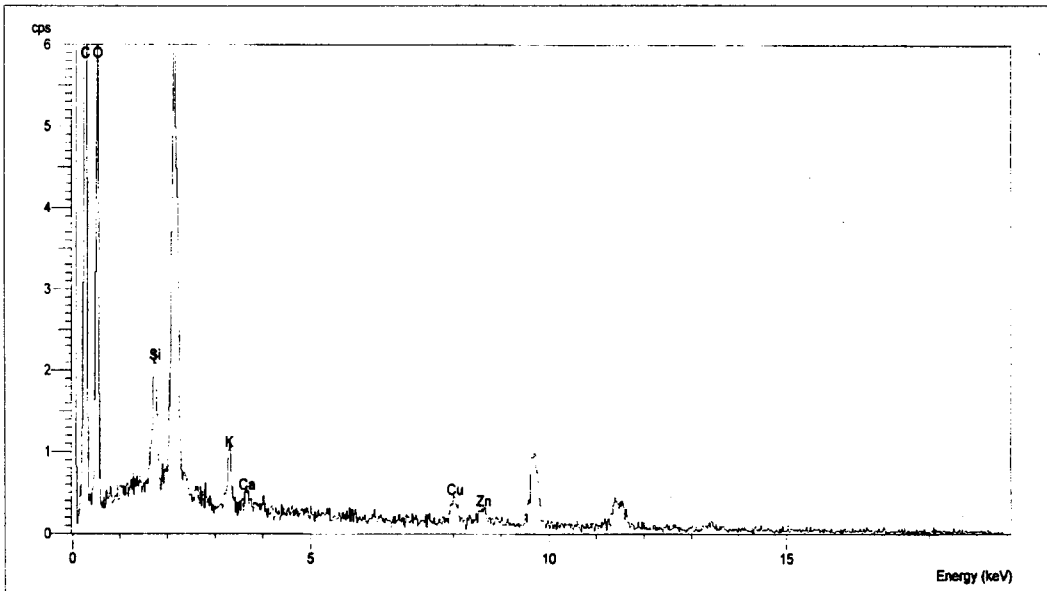
<그림 2-1> 왕겨외피의 전자 현미경 사진



<그림 2-2> 왕겨내피의 전자 현미경 사진



<그림 2-3> 왕겨외피의 EDS 분석 결과



<그림 2-4> 왕겨내피의 EDS 분석 결과

제 2 절 왕겨재의 물리화학적 특성

콘크리트의 제반 특성에 영향을 미치는 인자는 소각된 왕겨재의 물리·화학적 특성이다. 이에 따라 왕겨재가 혼화재료로서 콘크리트내에서 시멘트와 화학반응하는 역할을 과학적으로 분석하고 연구수행 중 개발한 실험용 소각로의 성능을 판단하는 지표로 삼기 위해서 품종별·산지별·지역별 왕겨를 전기로에서 균일한 온도로 소각하여 화학적 성분 조성을 분석하였다. 또한 소각온도에 따라 분쇄특성이나 비결정형 실리카 함량조성의 변화 등과 같은 왕겨재의 제반 물리·화학적 특성이 변화할 수 있으므로 소각온도에 따른 왕겨재의 물리·화학적 특성을 분석하였다.

1. 왕겨재의 화학적 조성

왕겨를 600℃의 전기로에서 2시간 동안 완전연소시킨 후 성분을 분석한 결과가 <표 2-2>이다. 표에서 품종간·지역간에 있어서 약간의 차이를 보이나 일정한 경향이 발견되지 않았으며 SiO₂의 함량이 최대 92.92% 정도로서 약간

작은 값을 나타낸다. 이러한 현상은 최근에 규산질 비료를 거의 시비하지 않는 결과가 반영된 것으로 추정된다.

<표 2-2> 왕겨재의 화학성분 조성

성분	국내외 발표자료 (%)	품종별 왕겨재의 성분조성 백분율(%)								
		동진 (김제)	동진 (부안)	동진 (군북)	동진 (함양)	계화 (김제)	오대 (운봉)	화성 (군북)	추청 (안산)	평균
SiO ₂	86.0~97.3	86.21	92.92	87.88	90.55	89.92	87.39	87.60	90.96	89.180
K ₂ O	0.58~2.5	0.847	0.996	0.631	0.991	0.755	0.770	0.871	0.829	0.836
Na ₂ O	0.6~1.75	0.873	2.142	0.403	1.059	0.714	0.403	0.937	0.543	0.884
CaO	0.2~1.15	0.271	0.224	0.304	0.278	0.278	0.199	0.280	0.388	0.278
MgO	0.12~1.15	0.274	0.240	0.206	0.278	0.290	0.158	0.280	0.298	0.253
Fe ₂ O ₃	~0.54	0.057	0.100	0.071	0.057	0.071	0.071	0.071	0.113	0.076
P ₂ O ₅	0.20~2.85	0.286	0.342	0.191	0.309	0.321	0.183	0.268	0.208	0.263
AL ₂ O ₃	0.15	0.114	0.112	0.091	0.123	0.099	0.136	0.113	0.120	0.113
MnO ₂	0.33	0.095	0.114	0.088	0.153	0.134	0.080	0.153	0.238	0.132
TiO ₂	0.006	미분석	미분석	미분석	미분석	미분석	미분석	미분석	미분석	미분석
SO ₃	0.10~1.13	"	"	"	"	"	"	"	"	"
Cl	~ 0.42	"	"	"	"	"	"	"	"	"
기타 ^{a)}	-	10.973	2.810	10.135	6.202	7.418	10.610	9.427	6.303	7.985

주) a) : 잔류탄소, 감열감량, 기타 미분석 원소(TiO₂, SO₃, Cl 등)

소각온도가 다를 경우 왕겨재의 화학성분이 달라질 수 있다. 따라서 '94년도에 수확한 김제산 동진벼를 대상으로 500℃, 600℃, 700℃, 800℃, 900℃ 및 1,000℃로 소각온도를 달리하면서 전기로를 이용하여 완전연소시킨 후 성분을 분석하고 전자상을 관찰하였다. <그림 2-5>는 소각온도별로 전자현미경상을 <그림 2-6>은 소각온도별 X-선회절분석 결과를 나타낸 것이다.

<그림 2-5. C>를 살펴보면 전기로에서 700℃로 완전 소각시 유기물의 휘발과정에서 미세한 활성기공이 무수히 형성되고 비결정형 실리카가 매우 많이 형성된다. 그러나 800℃ 이상으로 소각하면 활성기공이 사라지고 결정형 실리카의 함량이 급격히 증가하기 시작한다. 따라서 700℃로 완전 소각시에는 비결정형 실리카가 많기 때문에 분쇄 에너지가 적게 들고 또한 활성기공이 많기 때문에 동일한 분쇄에너지로도 잘게 부숩지며 시멘트 수화물과 2차적인 포졸란반응이 일어나기 쉽다. 또한 미립이면서 비표면적이 크므로 시멘트 수화물

의 공극을 충전하여 압축강도를 증가시킨다. 분쇄된 형상이 봉(鋒)과 같으므로 인접한 시멘트 수화물을 강결(罔結)구조로 연결하는 효과를 나타내어 콘크리트 인장강도의 대폭적인 증대 효과를 가져올 수 있으므로 혼화재로서 매우 유리하다. 또한 이러한 효과는 본 연구에서 실험적으로도 입증되었다.

2. 왕겨재의 물리적 특성

다지지 않은 왕겨재의 산물밀도를 측정한 결과 품종에 관계없이 약 67 kg/m³ 정도로서 왕겨 산물밀도의 약 64% 해당하는 작은 값이다. 따라서 운반 효율을 고려하면 분쇄한 다음 왕겨재를 운반하는 것이 유리하다.

소각온도와 왕겨품종 및 분쇄시간의 차이에 따른 왕겨재의 물리적 특성을 분석하고 본 연구에서 개발한 실험용 소각로의 소각특성을 규명하기 위해서 '94년도에 수확하고 '95년도에 도정한 전북 김제산 동진벼와 계화벼, 경기 안산산 추청벼, 전북 운봉산 오대벼, 경남 함안산 화성벼 및 경남 군북산 동진벼를 대상품종으로 선정하였다. 소각방법으로서는 본 연구에서 개발한 실험용 소각로를 이용하고 소각로내의 제어온도를 600-620℃(저온제어)와 700-720℃(고온제어)로 설정한 다음 각각의 왕겨를 소각하였다. 왕겨재 분쇄기로서는 충격에너지를 이용하는 충격식 분쇄기와 Mill형 분쇄기를 선정하였다. 충격식 분쇄기는 강구 18개를 사용하는 Los Angeles 마모시험기를 선정하였고 이를 이용하여 15분, 30분, 45분, 60분 동안 각각 분쇄하였으며, Mill형 분쇄기로서는 Attrition Mill을 선정하고 이를 이용하여 왕겨재를 미세하게 분쇄하였다.

이렇게 분쇄된 왕겨재의 평균입경과 진비중 및 단위 무게당의 표면적 즉 비표면적을 실측한 결과를 정리한 것이 <표 2-3>이다. 여기서 평균입경은 0.04 μm 까지 측정 가능한 레이저 분석기를 이용하여 실측하였으며, 비표면적은 질소흡착법을 이용하는 BET 시험기를 이용하여 측정하였으며 진비중은 물 대신 비중이 작은 광유를 사용하여 실험하였다. 또한 실험과정의 오류를 제거하기 위하여 전자현미경으로 사진촬영 및 분석하였다.

<표 2-3> 분쇄시간별 왕겨재 물리적 특성

분쇄시간	제어온도	평균입경(μm)	비표면적(m ² /g)	진비중	비 고
미분쇄	600-620℃	측정불가	27.3-33.3(30.8)	1.95	() : 평균치
	700-720℃	측정불가	11.7-32.1(19.9)	2.02	
15분	600-620℃	27.0-32.6(30.2)	16.3-48.2(37.0)	1.98	() : 평균치
	700-720℃	30.1-37.1(33.6)	9.1-39.6(21.5)	2.05	L.A.마모기로 분쇄
30분	600-620℃	22.5-27.0(25.4)	32.6-54.8(40.0)	1.99	() : 평균치
	700-720℃	23.7-28.6(25.8)	6.0-23.8(15.6)	2.06	L.A.마모기로 분쇄
45분	600-620℃	19.9-23.3(21.4)	39.4-56.1(50.2)	2.00	() : 평균치
	700-720℃	21.4-24.7(22.9)	7.8-21.9(15.8)	2.06	L.A.마모기로 분쇄
60분	600-620℃	16.2-21.0(18.7)	36.8-94.8(73.1)	2.01	() : 평균치
	700-720℃	19.9-23.9(21.6)	7.8-38.2(18.2)	2.07	L.A.마모기로 분쇄
미세분쇄	600-620℃	6.0-10.6(8.3)	16.67	2.08	미세분쇄기로 분쇄
	700-720℃	미측정	미측정	미측정	

<그림 2-7> 및 <그림 2-8>은 실험용 소각로의 제어온도를 각각 600-620℃와 700-720℃로 설정하고 김계산 동진벼를 소각한 다음 분쇄하지 않은 상태에서 전자현미경으로 3반복 사진 촬영한 것 중의 하나이며 <그림 2-9> 및 <그림 2-10>는 동일한 시료를 대상으로 X-선회절분석 결과 중의 하나이다.

<그림 2-8>과 <그림 2-5.D>를 비교해 보면 결정형 실리카가 매우 많이 생성되어 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 전기로에서 700℃로 완전소각한 왕겨재는 실험용 소각로의 제어온도를 600 ~ 620℃로 설정하고 소각한 경우와 유사하다. 반면 실험용 소각로내 제어온도를 700~720℃로 설정하고 소각할 경우 800℃의 온도하에서 전기소각로로 소각한 경우와 유사하다. 이러한 현상은 전기소각로는 규모가 초소형이어서 소각로내 온도분포가 전체 공간에 걸쳐서 별다른 차이를 보이지 않으므로 왕겨의 소각온도가 균일하다 볼 수 있으나 실험용 연소로의 규모는 전기로 보다 훨씬 크므로 소각온도를 제어하는 제어온도계의 위치에서 측정된 온도가 왕겨가 실제로 소각되는 온도를 나타내지 못하기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

왕겨는 유기분자의 집합체이므로 왕겨를 소각하면 유기성분은 소실되고 무기물만 남게되어 왕겨재 속에는 무수한 대소의 공극을 가지게 된다.

그러나 왕겨재를 분쇄할 경우에는 공극이 파괴되는데 파괴되는 정도는 분쇄

에너지가 증가할수록 증가하게 된다. 따라서 분쇄에너지가 증대할수록 공극이 줄어들어 분쇄된 왕겨재 입자의 진비중이 증가하게 되는데 이러한 결과가 <표 2-3>에 나타나 있다. 동 표로부터 왕겨재의 진비중은 대략 2.0 ~ 2.1 사이에 존재하며 보통포틀랜드시멘트 입자 진비중의 약 2/3에 해당함을 알 수 있다.

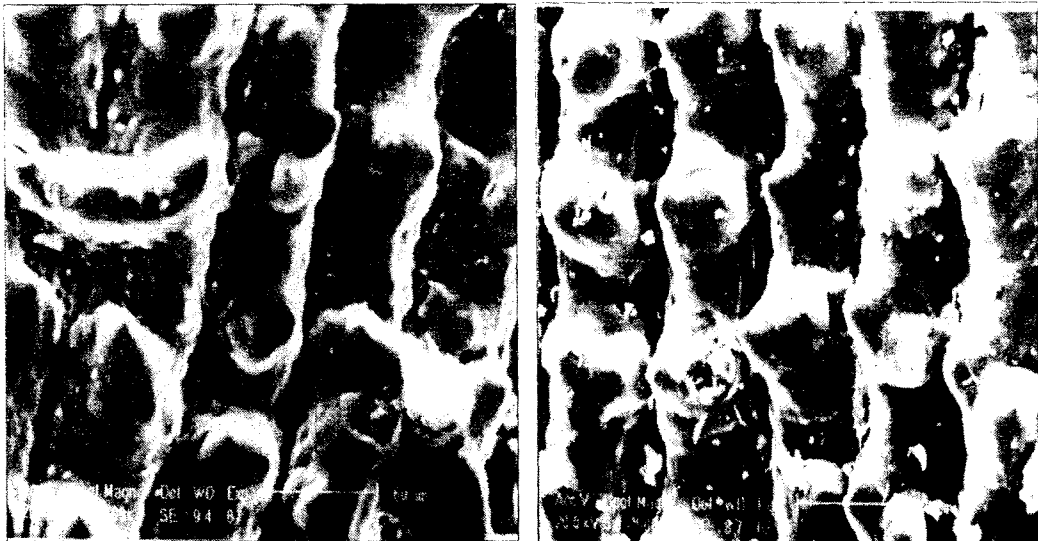
<표 2-3>으로부터 저온으로 제어하여 소각한 왕겨재는 고온으로 제어하여 소각한 왕겨재에 비해서 동일한 분쇄에너지일 지라도 단위 무게당 표면적 즉 비표면적이 크다는 것을 알 수 있다. 이로부터 저온제어하에 소각·분쇄한 왕겨재는 시멘트 수화물과 2차적인 포졸란반응이 더 잘 일어날 수 있을 것이라는 것과 콘크리트의 강도 역시 더욱 증가하리라는 것을 추측 수 있으며 실제로 본 연구에서도 동일한 실험적 연구결과를 발견하였다.

또한 <표 2-3>으로부터 동일한 비표면적을 얻는데 필요한 분쇄시간 즉 분쇄에너지가 저온으로 제어하여 소각한 왕겨재가 고온제어에 비해서 작다는 것을 발견할 수 있다.

따라서 저온제어로 소각한 왕겨재를 혼입한 콘크리트의 강도증진 효과가 고온제어로 소각한 왕겨재의 경우보다도 크고 왕겨재 분쇄에 소요되는 에너지가 고온제어의 경우보다 줄어들며 나아가 연소로의 열효율이 저온제어의 경우가 더 높다는 사실이 입증만 된다면 저온제어 상태로 소각하는 것이 본 연구의 실용화를 위해서 최적의 소각온도 조건이라는 것을 알 수 있다.

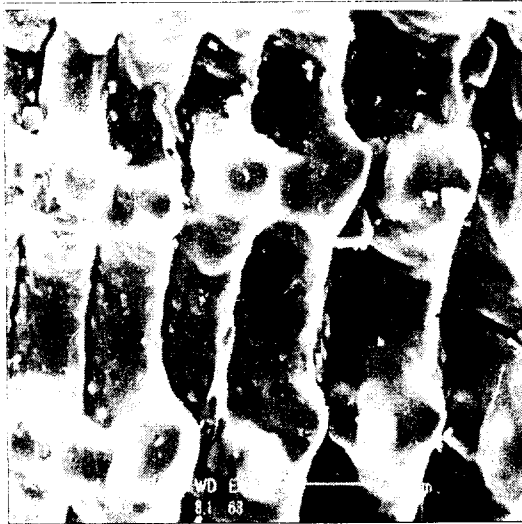
<표 2-3>에서 고온제어로 소각시 중량의 90%이상을 차지하는 실리카가 결정질을 형성하므로 비중이 저온제어로 소각한 경우에 비해 분쇄에너지의 크기에 관계없이 약간 크게 나타난다. 그러나 동일한 소각온도임에도 불구하고 미세하게 분쇄할수록 비중이 증가하는 것은 광유분자 마저 통과할 수 없을 작은 공극이 분쇄가 진행됨에 따라 파괴되어 줄어들며 이로인해 분쇄된 왕겨재 입자의 체적을 실제의 체적과 비슷하게 실측하였기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

왕겨 소각시 나타나는 공극의 크기 분포는 질소분자(직경 $2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4} \mu\text{m}$) 마저 침투할 수 없는 작은 크기로부터 시작해서 광유분자(최소직경 $8 \times 10^{-4} - 12 \times 10^{-4} \mu\text{m}$)를 통과시킬 수 있는 공극의 크기 보다 훨씬 더 큰 공극까지 다양하게 형성된다. 그러나 동일한 분쇄시간에서는 제어온도에 따른 평균 입경의 차이나 비중의 차이가 작음에도 불구하고 저온제어로 소각한 왕겨재의 비표면적이 크게 나타나는 것은 분쇄된 날개의 왕겨재 입자 속에는 질소분자가 통과할 수 있는 크기에서부터 광유분자가 통과할 수 없는 크기까지의 공극이 고온제어로 소각한 경우에 비해서 훨씬 많이 존재한다는 것을 나타낸다. 즉 연구실험용 소각로를 이용하여 저온제어로 소각시 고온제어에 비해서 질소분자가 통과할 수 있는 $2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4} \mu\text{m} \sim 8 \times 10^{-4} - 12 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 범위에 있는 작은 크기의 공극이 훨씬 더 많이 형성된다고 판단할 수 있다.



a) 전기로 500°C 소각

b) 전기로 600°C 소각



c) 전기로 700°C 소각



d) 전기로 800°C 소각

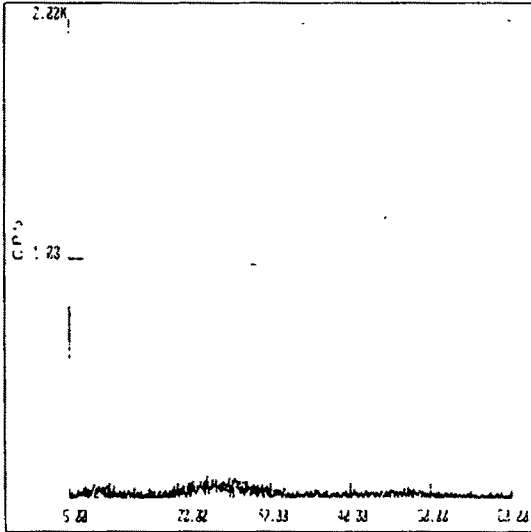


e) 전기로 900°C 소각

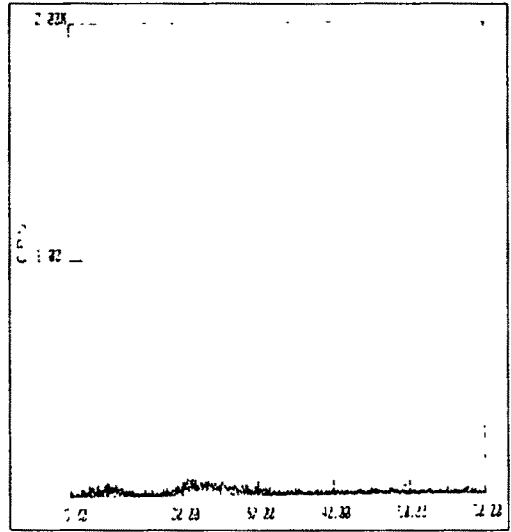


f) 전기로 1,000°C 스각

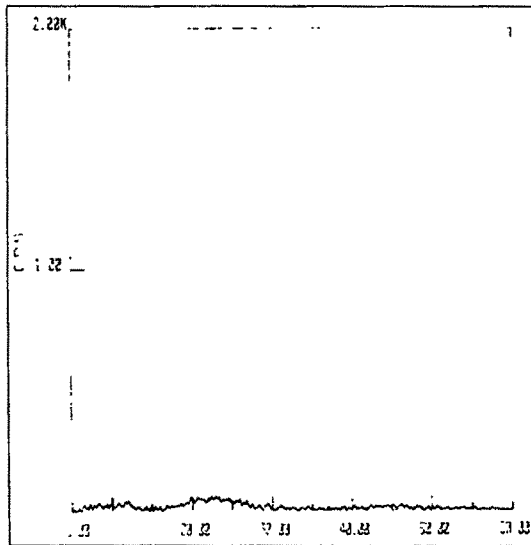
<그림 2-5> 소각온도별 왕겨재의 전자현미경상



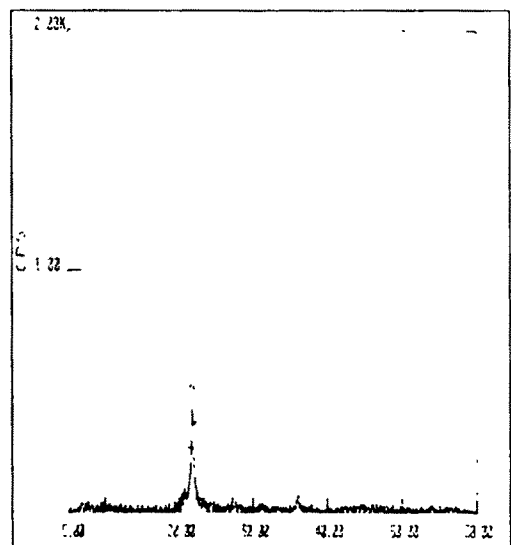
a) 전기로 500℃ 소각



b) 전기로 600℃ 소각

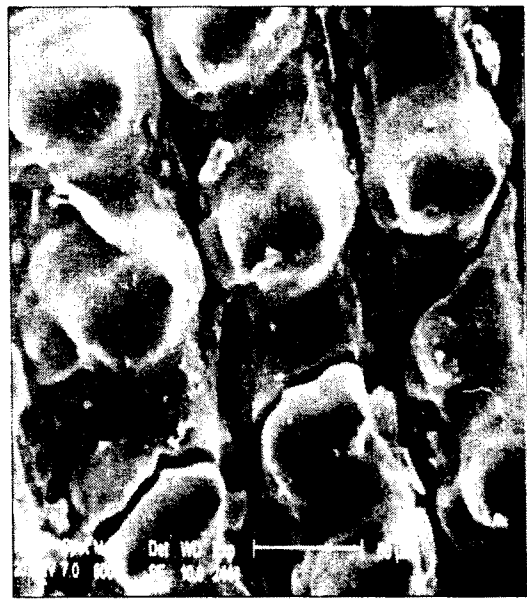
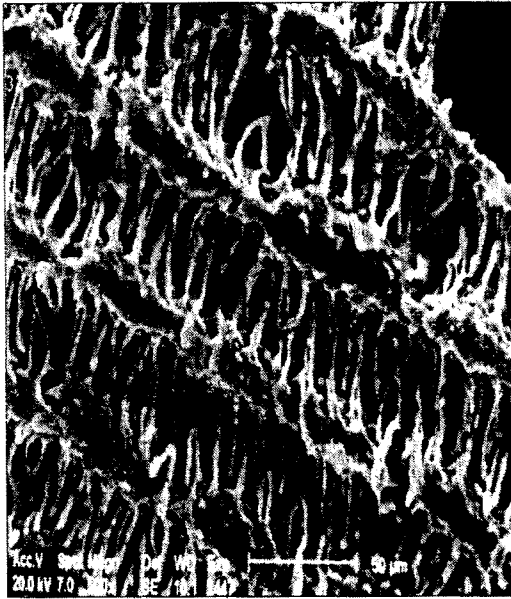


c) 전기로 700℃ 소각

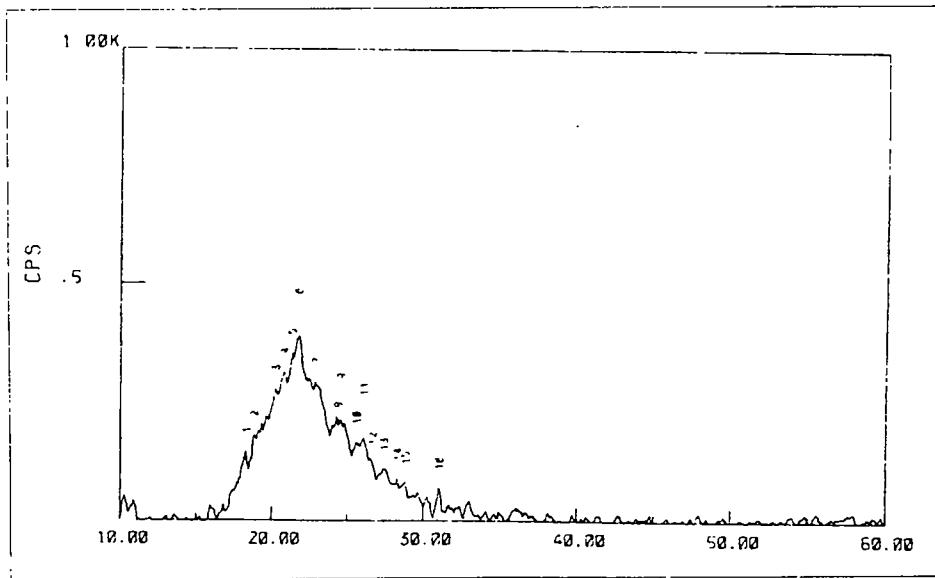


d) 전기로 900℃ 소각

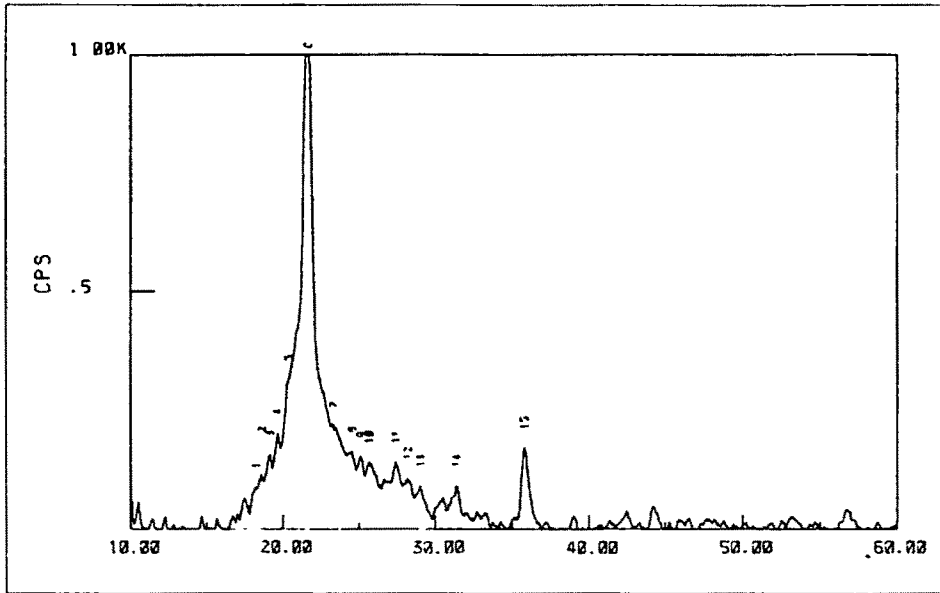
<그림 2-6> 소각온도별 왕겨재의 X-선 회절분석 결과



<그림 2-7> 600°C 소각(연구용 소각로) 왕겨재 <그림 2-8> 700°C 소각(연구용 소각로) 왕겨재



<그림 2-9> 600°C 제어소각(연구용 소각로) 왕겨재 X-선 회절분석



<그림 2-10> 700℃ 제어소각(연구용 소각로) 왕겨재 X-선 회절분석

제 3 장 파이롯트 규모 왕겨 소각시스템

제 1 절 시스템의 구성 및 제원

1. 시스템의 구성

파이롯트 규모의 왕겨 소각 시스템은 왕겨의 물리화학적 특성을 고려하여 이동상 소각로 시스템에 온수보일러를 채택하고 원료의 공급과 재의 처리를 완전 자동화한 것이 특징이다. 보일러 시스템의 열교환기는 제작이 편하고 효율이 좋은 환상실린더형을 선택하였다. 연소실의 하단부는 고온과 저온이 교차하는 영역이며 또한 자동 재처리와 착화시의 이상 고온 등을 고려하여 주물로 제작하였다. 또한 시스템의 실용화를 위하여 설치의 위치에 제약을 받지 않기 위하여 왕겨 및 왕겨재의 공급과 처리를 공기식으로 하였다. <그림 3-1>은 시스템의 구성도와 사진이다.

2. 시스템의 제원

파이롯트 규모 왕겨 소각 시스템의 제원은 연구의 목적을 달성하기 위한 적정 규모로서 왕겨 공급율은 10 - 30kg/hr 수준으로 하였으며 이 규모에 적합하게 부대시설의 제원을 결정하였다. <표 3-1>은 시스템의 제원을 간략히 나타낸 것이다.

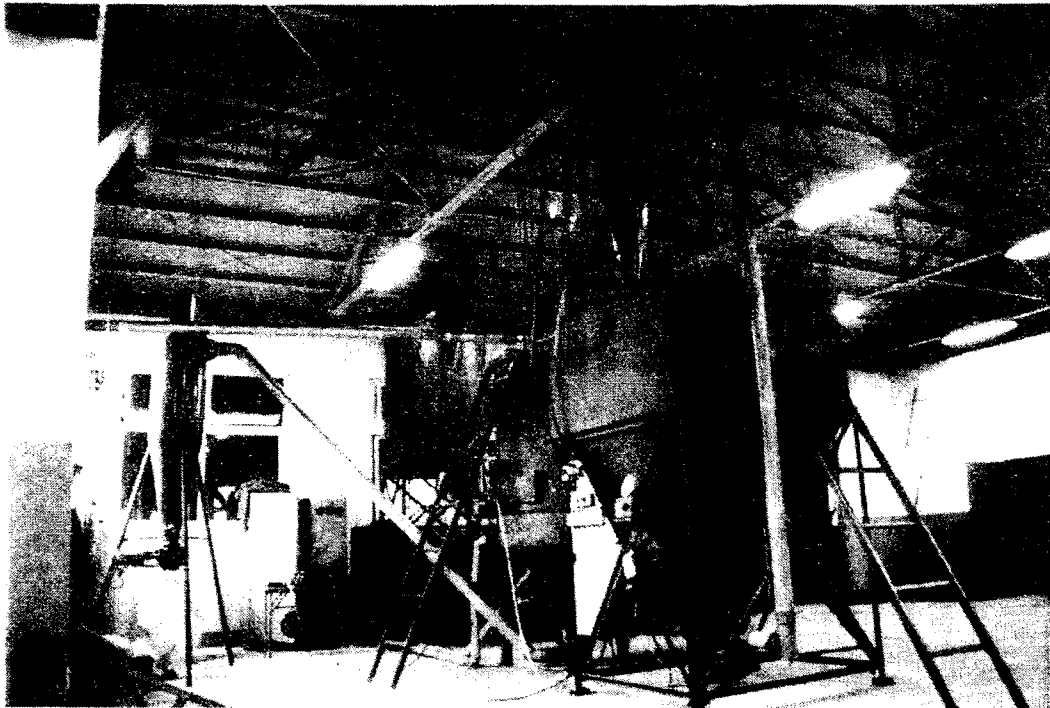
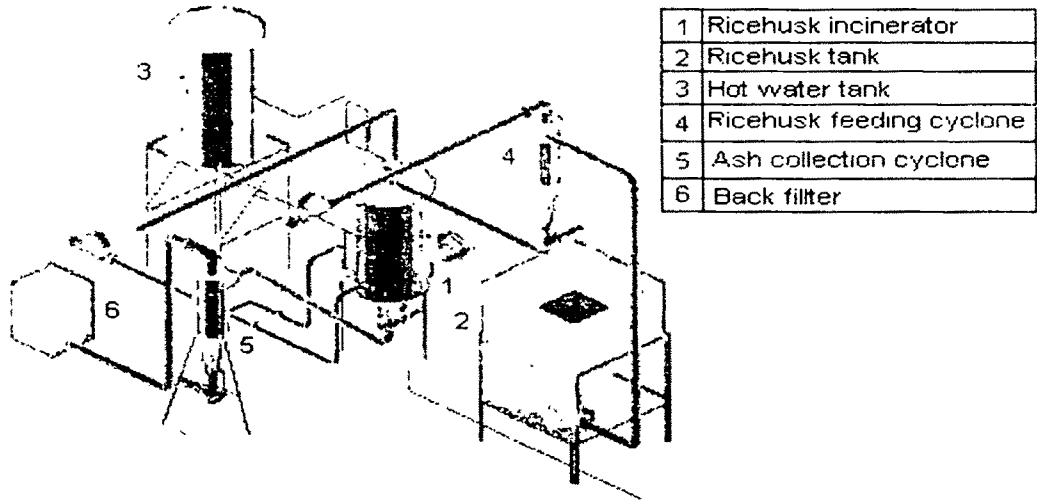
제 2 절 시스템의 작동 특성

1. 소각로 작동의 자동화

소각로 작동의 자동화 장치는 연료공급장치, 착화장치, 회분처리장치로 구성되어 있는데 연료의 공급장치는 스크류 컨베이어와 사이클론 및 원심팬를 이용하여 구성하였고, 스크류컨베이어의 회전속도를 제어하여 시간당 왕겨공급량을 조절하게 되어있다.

소각로의 착화장치는 현재 열풍건조기의 버너로 많이 이용되고 있는 것 중에서 적당한 규격을 선정하여(100,000 kcal/hr) 연소실

하단부 아래의 회분통에 장착하여 구성하였으며 착화시 버너의 불꽃은 연소실 하단(화격자)를 향하게 하였다.

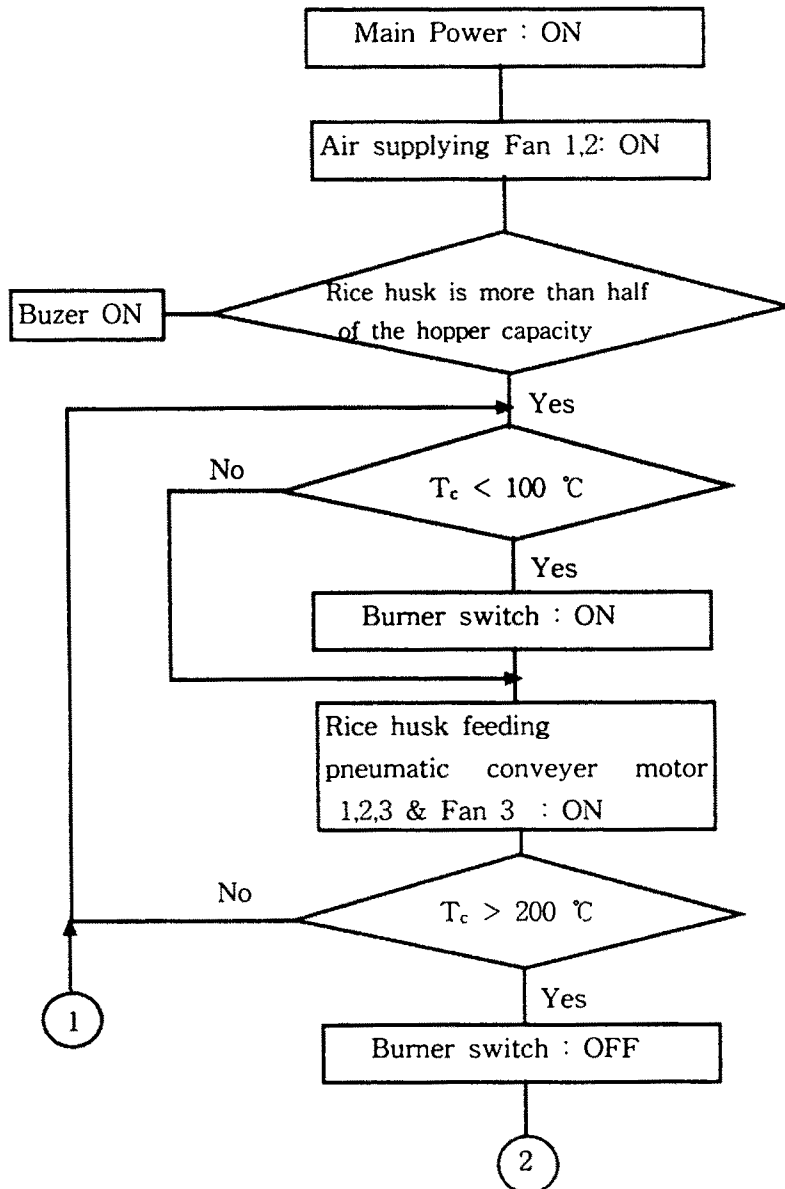


<그림 3-1> 파이롯트 규모 실험용 왕겨 소각 시스템의 구성도(위) 및 사진(아래)

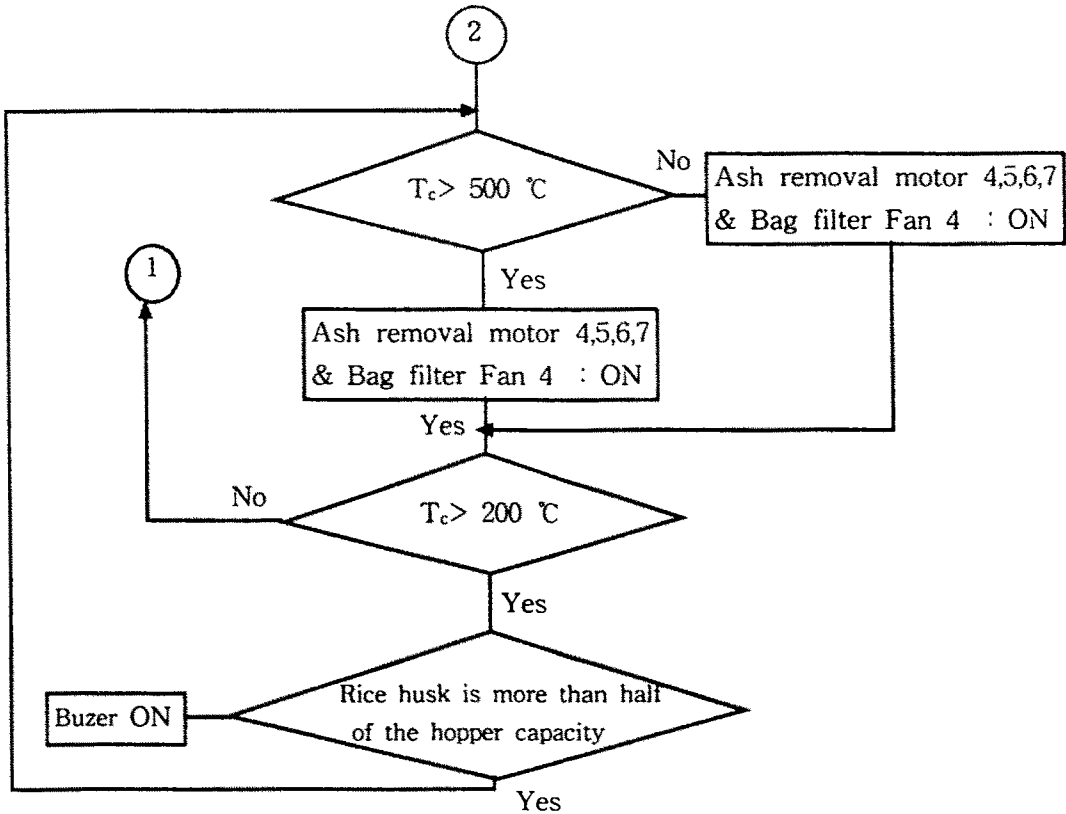
<표 3-1> 파이롯트 규모 왕겨 소각 시스템의 제원

소각로	제원 단위: mm
본체 연소실 왕겨공급장치(feeding screw conveyer) 재처리장치(ash removal screw conveyer) 2 차 공기공급관 착화버너	1100 ϕ \times 2100 600 ϕ \times 1500 100 ϕ , Pitch 70 100 ϕ , Pitch 70 50 ϕ \times 1000 100,000 kcal/h
보일러 온수순환관 온수통 환상실린더형 열교환기	22 ϕ 2000 liter D _i = 640 ϕ , D _o = 840 ϕ H = 1500
기타 왕겨공급 및 소각재 수집 사이클론 분진 포집기	표준 일반 사이클론 몸통직경 : 480 선회류 출구길이 : 300 몸통길이 : 960 포집분진 출구직경: 120 캐비넷 백필터(10 m ³ /min)

소각로의 회분 처리장치는 1 HP 의 교류 제동모터로써 연소실 하단부 회분처리 그레이트(화격자)에 장착한 링크 메카니즘을 구동하여 회분을 연소실로부터 회분통으로 낙하시키는 방법을 사용하였는데, 열전대로써 연소실 상단의 온도를 감지하고 자동온도 제어기로써 회분 처리모터를 구동시켜 주기적으로 회분이 낙하되도록 하였다. 낙하된 회분은 바로 왕겨재 수집 사이클론에 수집된다. <그림 3-2>는 시스템 작동의 자동화 알고리즘을 나타낸 것이다.



<그림 3-2> 소각로 작동의 자동화 알고리즘 흐름도



<그림 3-2> 소각로 작동의 자동화 알고리즘 흐름도

2. 시스템의 작동 특성

본 실험의 연소조건은 회분의 SiO_2 비결정화를 위하여 가능한 저온연소가 되도록 설정하였기 때문에 대체로 모든 조건에서 연소 표면 높이는 45 cm 이하였다.

이 때문에 연소실 하부의 온도변화가 심한 편이었으나 소각로 작동의 자동화는 이상없이 이루어 졌으며 왕겨의 품종간의 작동특성에 차이가 거의 없었다. 그러나 왕겨공급율과 제어온도별로는 작동특성에 차이가 있었는데 이는 바로 연소율과 시스템의 열효율과 직결되는 당연한 귀결이다. 특히 석유버너를 이용하여 착화를 시켰는데 착화시 소모된 석유량은 약 200 cc 정도로서 매우 적은 편

이었다. 이것은 박승제(1988)의 연구에서 왕겨공급을 1.5 kg/h 일 때의 석유 소모량과 동일한 수준으로서 소각로 규모가 10 배인 것을 감안하면 착화시의 열효율이 10배 수준으로 개선되었다고 분석할 수 있다. 또한 정전시에는 작동이 정지하게 되는데 약 30 분 정도의 작동정지 후에도 전기가 다시 공급되어 작동이 시작되면 별 이상없이 연소가 계속될 수 있었다.

제 3 절 시스템의 연소 특성

본 연구에 사용된 공시재료는 1994년에 수확되고 1995년에 도정되어 생산된 여러지역의 일반벼 왕겨였으며 <표 3-2>에 그 물성을 나타내었다. 발열량은 Bomb Calorimeter(Parr Instrument)로 측정하였으며 회분함량은 시료를 전기로에서 600℃, 2 시간 연소 후 측정하였으며 함수율은 공기오븐법으로 측정하였다.

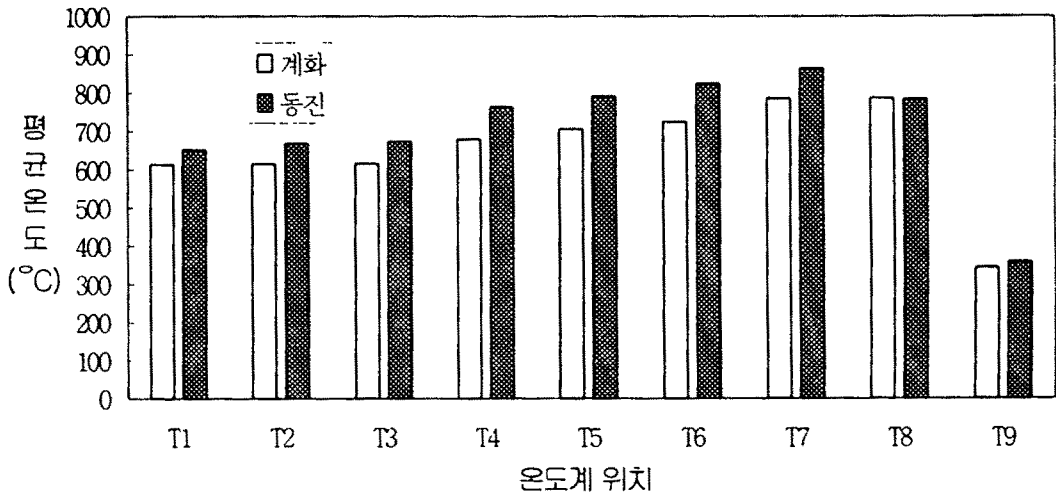
<표 3-2> 공시재료의 물성

구 분 품종(지역)	회분함량(%)		함수율(%)		발열량 (kJ/kg)	비 고
	습량기준	건량기준	습량기준	건량기준		
동진(전북 부안군)	13.15	14.96	12.08	13.74	3660.5	산물밀도 (kg/m ³) 왕겨:102-107 회분: 66-68
동진(전북 김제시)	13.48	15.06	10.45	11.67	3746.1	
동진(경남 함양군)	15.44	17.06	9.51	10.51	3571.2	
동진(경남 함안군 군북면)	17.11	18.94	9.65	10.68	3520.5	
화성(경남 함안군 군북면)	16.44	18.22	9.77	10.83	3503.5	
오대(전북 남원군 운봉면)	13.34	14.83	10.02	11.14	3570.2	
계화(전북 김제시)	13.50	15.03	10.16	11.31	3429.4	
추청(경기 안산시)	15.65	17.36	9.84	10.91	3550.6	

1. 시스템의 온도분포

연소로내의 온도는 완전연소가 가능한 범위에서 저온연소가 유리하다. 왜냐하면 1000 ℃ 이상의 고온연소에서는 일반적으로

질소산화물 생성이 증가하게 되며 특히 왕겨연소에서는 900 ℃ 이상의 고온이 되면 회분의 SiO₂ 성분의 결정화(Crystalization)가 심화되기 때문이다. 질소산화물은 심각한 대기오염원이기 때문에 저감대책이 요구되고 왕겨회분의 SiO₂가 결정이 되면 미세분쇄시 어려움이 있는 등 콘크리트 혼화용 재료로서의 특성이 약화된다.



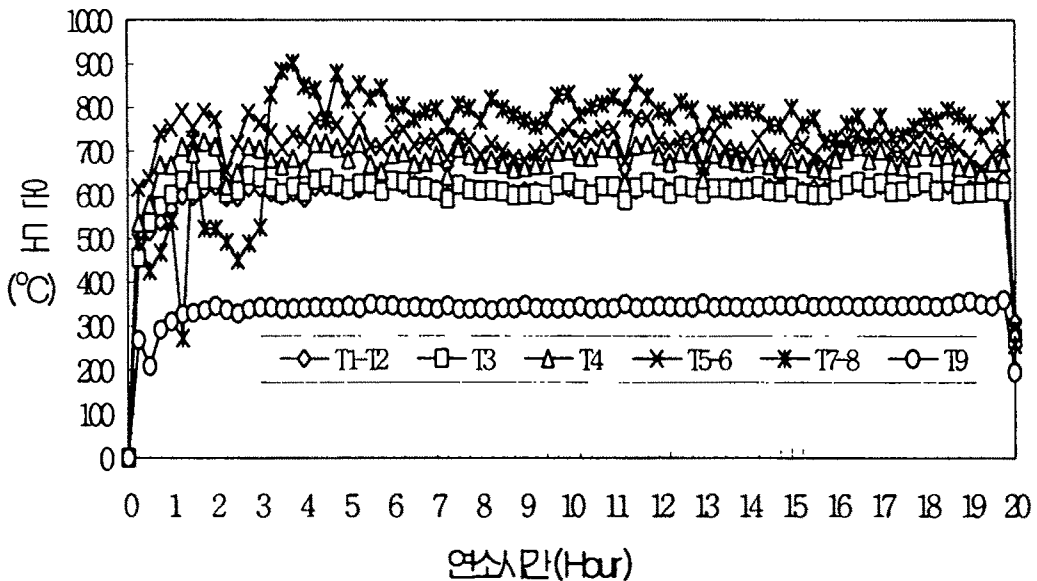
<그림 3-3> 정상상태 연소시 연소로내의 품종별, 위치별 평균온도
왕겨공급율: 13 kg/h, 제어온도: 620℃

<그림 3-3>은 왕겨 두 품종(동진, 계화)에 대하여(공급율 13kg/hr, 제어온도 620 ℃ : 저온연소) 연소로내의 측정위치별 정상상태 연소시의 평균온도를 나타낸 것이다.

<그림 3-3>에서 배연가스의 온도(T₉)를 제외하면 연소로내의 온도는 대체로 균일하며 900 ℃ 이하를 유지하였다. 동진벼인 경우가 약간 더 고온을 유지하였는데 이것은 동진벼가 계화벼에 비해 발열량이 약 7 % 정도 더 많았기 때문으로 판단된다. 가장 높은 온도를 유지하는 위치는 T₇ 위치로서 연소실 하단으로부터 30 cm 높이이다. 바로 이 위치가 연소표면을 형성하는 곳으로서 가장 높

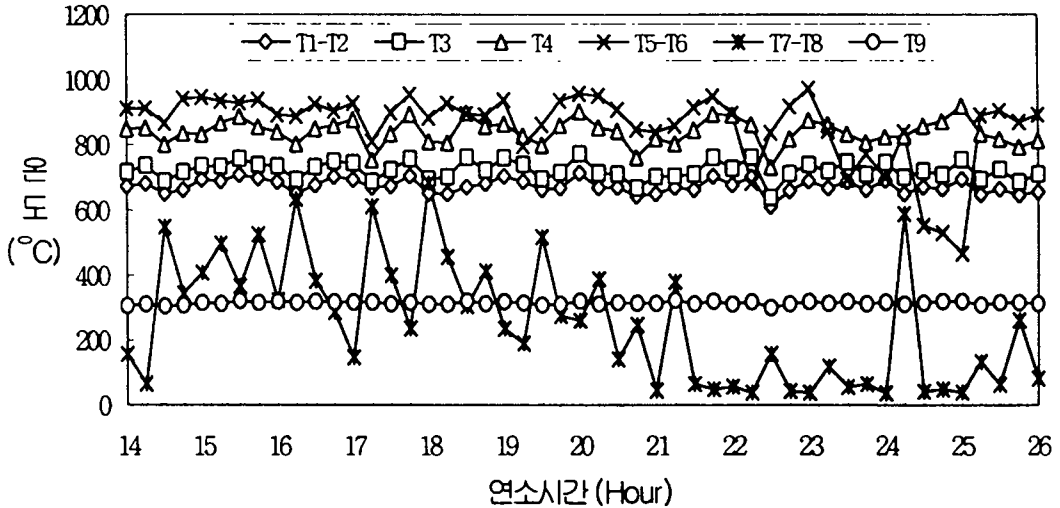
은 온도를 유지하는 것으로 생각되고 이 위치보다 높을수록 약간씩 온도가 하강한다.

<그림 3-4>는 계화벼 품종에 대하여 착화 시부터 연소시간에 따른 측정위치별 온도변화를 나타낸 것이다(공급율 13 kg/hr, 제어 온도 620 ℃). 그림에서 보면 정상상태에 도달하는 시간은 약 5 - 6 시간으로 추정되는데 이것은 연료 물질수지로 계산한 시간의 두 배 정도에 해당하는 시간이다. 이것은 일반적인 정상상태 도달시간 계산방법과 잘 일치하는 것으로 사료된다. $T_7 - T_8$, $T_5 - T_6$ 의 온도 변화가 심한 것은 연소실 하부의 연소표면 근처로서 직접적인 화염에 노출되는 위치이기 때문이다.



<그림 3-4> 연소시간에 따른 연소로내의 위치별 온도변화
 품종: 계화(김제시), 왕겨공급율: 13 kg/h, 제어온도: 620℃

T_1 의 온도를 제어온도로 사용하였는데 그 이유는 이 위치가 연소실 내에서는 온도변화가 가장 적어 제어온도로 이용하기에 가장 적합하였기 때문이다.



<그림 3-5> 정상상태 연소시의 시간에 따른 연소로내의 위치별 온도변화
 품종: 동진(부안군), 왕겨공급율: 20 kg/h, 제어온도: 700°C)

<그림 3-5>는 동진벼 품종에 대하여 착화후 14 시간이 지나 완전히 정상상태에 도달한 후부터 12 시간 동안의 온도변화를 나타낸 것인데 고온연소이기 때문에 온도변화가 더 심한 것으로 나타나고 있다. 특히 $T_7 - T_8$ 의 온도는 연소표면보다 낮은 위치의 온도로서 회분처리시에 연소표면 부근의 연소물질이 하강했을 때는 급격히 증가하였다가 이 물질의 연소가 종료되면 급강하하는 현상을 보이고 있어 변화가 가장 심하게 나타나고 있다.

2. 왕겨의 연소율, 열교환기 효율 및 시스템의 효율

<표 3-3>은 연소특성 실험의 중요결과를 요약하여 나타낸 것이다. 왕겨의 연소율은 공급율 20kg/hr, 제어온도 500°C 인 경우

87%로서 비교적 낮은 결과를 보이는데 이것은 연소온도를 낮게 제어하는 조건에서 공급율이 많았기 때문에 생성열량은 많르니 미처 다 연소되지 않은 연소물질(왕겨)이 회분처리장치에 의해 회분통으로 낙하처리가 되었기 때문이다. 이것은 당연한 귀결이며 따라서 열교환기의 효율도 다른 조건에 비하여 현저히 낮은 결과를 보이고 있다. 열교환기 효율은 최대 59.5% 수준으로서 매우 양호한 결과로 판단되며 실제 시스템으로 제작하게 되면 더욱 향상되리라 판단된다. 이것은 박승제(1988)의 연구에서 토관두께 2.5 cm 일 때의 열교환기효율 47.8%(시뮬레이션 결과)에 비해 약 25% 향상된 결과인데 그 주된 이유는 본 실험에서는 열교환기 내측에 바른 구조토의 두께가 약 2.0 cm로서 약 25% 정도 더 얇았기 때문으로 판단된다. 왕겨공급율 10kg/hr 일 때 제어온도 600, 700℃ 일 때는 연소표면 높이가 너무 높게 형성되어 공기공급이 원활하지 않아 연속연소가 불가능하였다. 그 이외에는 모든 조건에서 양호한 연소가 이루어졌으며 왕겨 연소율 93 - 99%, 열교환기 효율 50.3 - 59.5%, 시스템 열효율 46.9 - 57.7% 범위에 있어 비교적 만족한 결과로 사료된다. 배연가스를 따라 연소실 밖으로 날려나가는 유출회분의 연소율도 매우 높아 평균 95% 정도였으며 총회분에 대한 유출회분의 비는 약 0.5% 정도로서 많지 않았다.

열교환기 효율은 제어온도 600℃에서 가장 높게 나타나고 있는데 이러한 현상은 다음과 같이 분석될 수 있다. 제어온도가 높을수록 연소표면 위치가 높아지고 연소표면 상부의 연소실 온도는 증가하게 된다. 따라서 연소가 급격하게 이루어지며 왕겨의 연소율과 일산화탄소 발생량은 감소하게 된다. 그러나 연소표면 상부의 온도분포는 비교적 균일하나 하부의 온도는 급격히 하강하므로

연소실 평균온도는 오히려 더 낮아질 수 있으며 따라서 열교환기 효율면에서는 불리해 질 수 있다. 또한 연소표면 상부의 온도가 고온이므로 배연가스의 배출온도가 증가하게 되어 배연가스로의 손실도 증가하게 된다.

<표 3-3> 실험처리별 연소특성 분석결과

실험처리		왕겨 연소율 (%)	열교환기 효율 (%)	시스템 열효율 (%)	비 고
왕겨 공급율 (kg/h)	제어온도(°C)				
10	500	96	53	50.9	<ul style="list-style-type: none"> · 품종 : 동진(부안,김제) · 과잉공기 : 100 % 1 차공기 : 2 차공기 (1 : 1) · 유출재의 유출비율 : 0.5 % · 유출재의 연소율 : 95 %
	600	98	-	-	
	700	97	-	-	
15	500	93	50.5	46.9	
	600	97	59.5	57.7	
	700	99	50.3	49.6	
20	500	87	43.8	38.0	
	600	94	54.3	51.2	
	700	94	53.2	49.9	

3. 배연가스의 성분

연소로의 배연가스 성분중에서 대기오염과 관련된 성분은 휴대용 배연가스 분석(ENERAC 2000E, USA)을 이용 측정하였는데 회분의 SiO₂ 결정화가 거의 없는 조건인 왕겨공급을 15kg/hr, 제어온도 600°C 인 저온연소 조건과 결정화가 약간 발생하는 왕겨공급을 20kg/hr, 제어온도 700°C 인 고온연소 조건에서 각각 48 시간 이상 연속연소 후에 5 반복 이상 측정하였다. 그 결과를 <표 3-4>에 나타내었는데 저온 연소조건에서 일산화탄소의 배출량이 허용치를 약간 상회할 때도 있는 것으로 분석된다. 이것은 가연성 가스의 연소가 신속하게 이루어지지 못한 결과인데 왕겨회분의 SiO₂ 결정화를 방지하기 위하여 지나치게 연소실의 온도를 낮게 유지하

였기 때문이다. 그러나 이 문제는 연소실의 일부 보완으로 해결이 기대되며 NO_x 와 SO₂의 농도는 허용치를 훨씬 밑도는 매우 양호한 결과를 보이고 있어 본 소각로의 배연가스를 온실 등의 이산화탄소 시용 목적으로 사용하여도 큰 문제는 없을 것으로 추정된다. 실제로 본 소각로의 배연가스로써 미세조류(녹조)를 배양하였을 때 문제가 발생하지 않았다. 이러한 미세조류는 가축의 사료에 이용될 뿐만 아니라 폐수의 부영양화를 방지할 수 있는 방안이기도 하다.

<표 3-4> 배연가스의 대기오염성분 농도

성분	CO (PPM)	CO ₂ (%)	NO (PPM)	NO ₂ (PPM)	SO ₂ (PPM)
제어온도 : 600℃ 왕겨공급률 : 15 kg/h	500 - 650	5.7 - 8.7	40 - 47	50 - 70	40 - 52
제어온도 : 700℃ 왕겨공급률 : 20 kg/h	429 - 570	5.9 - 8.9	60 - 85	30 - 60	10 - 50
허용기준 (소각로,보일러)	600			200	300

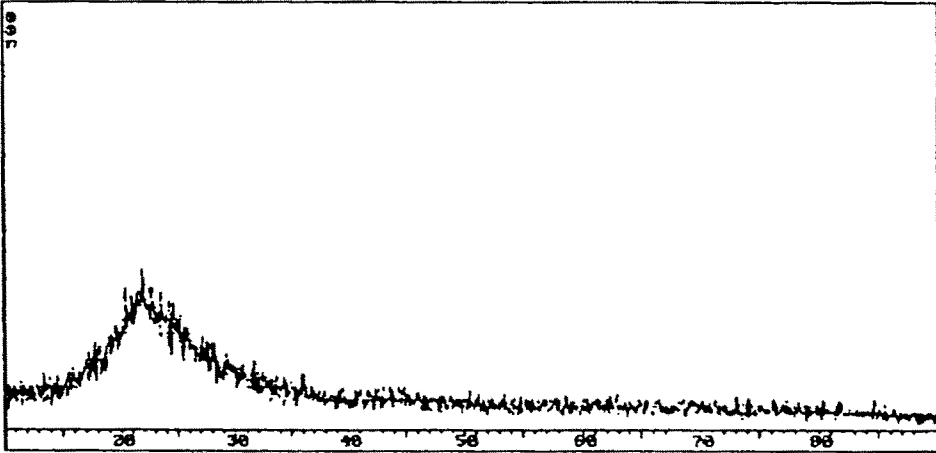
제 4 절 왕겨재의 SiO₂ 결정화 특성

<그림 3-6>은 동진벼 품종을 저온연소(왕겨공급율 15kg/h, 제어온도 600℃)와 고온연소(왕겨공급율 20kg/h, 제어온도 700℃) 시 대표적인 회분의 X-선 회절분석 결과이다. 기초실험결과 연소 온도 900℃ 이상이 되면 결정화가 심화되는 것으로 분석되었는데 이러한 결과는 여러 연구에서 보고된 바와 유사하였다. 본 실험에서는 그림에서와 같이 저온연소와 고온연소에서 결정화가 거의 발생하지 않는 것으로 분석된다(예리한 피크현상이 없음). 따라서 이 회분을 분쇄하여 콘크리트용 혼화재료로 이용하는 데는 별 이상이 없을 것으로 판단되며 실제 콘크리트 실험결과에서도 SiO₂ 결정화로 인한 문제는 전혀 발생하지 않는 것으로 나타났다.

REAL TIME DISPLAY

File : Z00007.RAU
Side : 1
Sample : 3

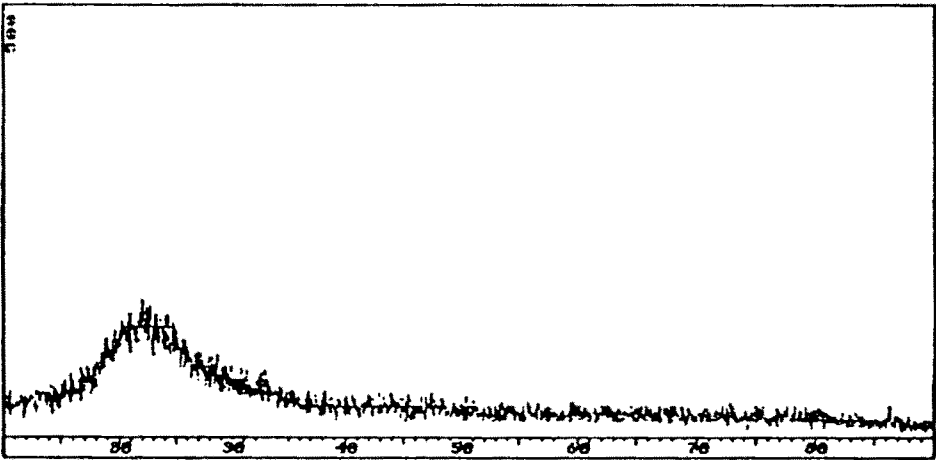
Iteration : 1 of 89.95
-theta/theta :
Intensity : CPS



REAL TIME DISPLAY

File : Z00010.RAU
Side : 6
Sample : 6

Iteration : 1 of 89.95
-theta/theta :
Intensity : CPS



<그림 3-6> 저온, 고온 연소조건에서 왕겨재의 X-선 회절 분석
(위): 저온연소(왕겨 공급율: 15kg/h, 제어온도: 600℃)
(아래): 고온연소(왕겨 공급율: 20kg/h, 제어온도: 700℃)

제 4 장 왕겨재의 분쇄 특성

제 1 절 왕겨 소각온도와 왕겨재 분쇄성

콘크리트용 혼화재료로서 왕겨재가 기존의 상업용 혼화재료에 비해서 가격과 품질의 경쟁력을 지니고 있어야 본 연구성과의 실용화가 촉진된다.

혼화재료로서 품질의 경쟁력을 확보하기 위해서는 왕겨재를 혼입시 콘크리트의 시공성이 떨어져서는 안되며 왕겨재를 혼입시 그렇지 않은 경우보다 콘크리트의 강도가 증가되어야 하며 그 증가 정도는 시장에서 경합이 될 수 있는 기존의 상업용 혼화재료보다 뛰어나야 하며, 나아가 왕겨의 품종이나 재배지역의 차이에 따른 콘크리트의 품질에 변화가 없어야 한다.

가격의 경쟁력을 확보하기 위해서는 왕겨재 생산시 필요한 왕겨의 재료비와 분쇄비를 최소화시키고 동시에 소각시 부수적으로 나타나는 열량과 배연가스를 최대로 활용할 수 있는 기술을 개발하여야 한다. 그러나 현실적으로 왕겨가 다른 용도로 활용되고 있기 때문에 자유경쟁 시장의 속성상 생산자의 입장에서는 가격이 유리한 곳으로 판매하기 때문에 재료비의 절감은 기대하기 어렵다. 결국 가격의 경쟁력을 좌우하는 것은 부수적으로 발생하는 열량과 배연가스의 활용성을 높일 수 있는 기술의 개발과 최소의 분쇄비를 사용하여 콘크리트용 혼화재료로서 왕겨재의 효과를 최대로 거양할 수 있는 기술의 개발로 압축된다. 한편 열량과 배연가스의 활용성을 높이기 위해서는 시간당 왕겨 소각량이나 소각온도 및 과잉공기 투입량 및 소각로 구조개선 등 소각로의 열효율 향상을 위한 제반 기술의 개발과 열량과 배연가스의 활용처를 개발하는 것이 수반되어야 하므로 한계성을 지니고 있어서 비교 우위적 가

격 경쟁력의 핵심요소는 효율적인 분쇄기술 개발로 귀착된다.

그러나 왕겨재를 미세하게 분쇄할수록 콘크리트용 혼화재료로서 효과가 증대하는 반면 분쇄비용은 증대하게 된다. 또한 왕겨재는 속성상 분쇄기종이나 분쇄시간 및 분쇄방법을 어떻게 선정하는가에 따라 분쇄효율이 달라진다. 즉 분쇄시간이 지속됨에 따라 점차 미립질로 변해가나 미립질로의 변화속도가 줄어들어 어느 특정 분쇄시간을 초과하면 아무리 분쇄시간을 증대하더라도 더 이상 미립질로 분쇄되지 아니한다. 이러한 특정 분쇄시간의 크기는 분쇄기의 종류나 분쇄방법 등에 따라 달라진다.

그러므로 본 연구에서는 왕겨재 가격의 구성요소중 대부분을 차지하는 분쇄비용 최소화가 실용화의 첩경이라 판단하였다. 이에 따라 강구의 낙하 에너지에 의한 충격식 분쇄방법과 견식 및 습식 볼밀(Ball Mill)형 분쇄방법을 선정하여 왕겨재의 분쇄성을 분석하여 이상적인 왕겨재 분쇄방법을 선정하고자 하였다.

이를 위해 1994년도에 수확되고 1995년도에 도정된 전북 김제산 동진벼를 본 연구실험에서 개발한 연구실험용 소각로로 600-620℃ (저온제어소각)와 700-720℃ (고온제어소각)로 소각하였다.

강구의 낙하 충격에너지를 이용하는 분쇄방식의 대표적인 시험기구로서는 <그림 4-1>과 같은 콘크리트용 골재의 마모성 시험에 표준적으로 활용되는 Los Angeles 마모시험기(내부직경 : 71cm, 소비전력 1.76kW)를 선택하고 내부에 개당 390g 씩하는 분쇄용 강구(직경 47.5mm)를 18개를 투입하여 매 회전당 강구 18개가 71cm 동시 낙하하는 충격에너지에 의해 왕겨재가 분쇄되도록 하였다. 또한 동 시험기의 회전속도는 매 15분당 525회 회전하도록 고정하였으며 회전지속시간은 15분, 30분, 45분, 60분으로 설정하였다.

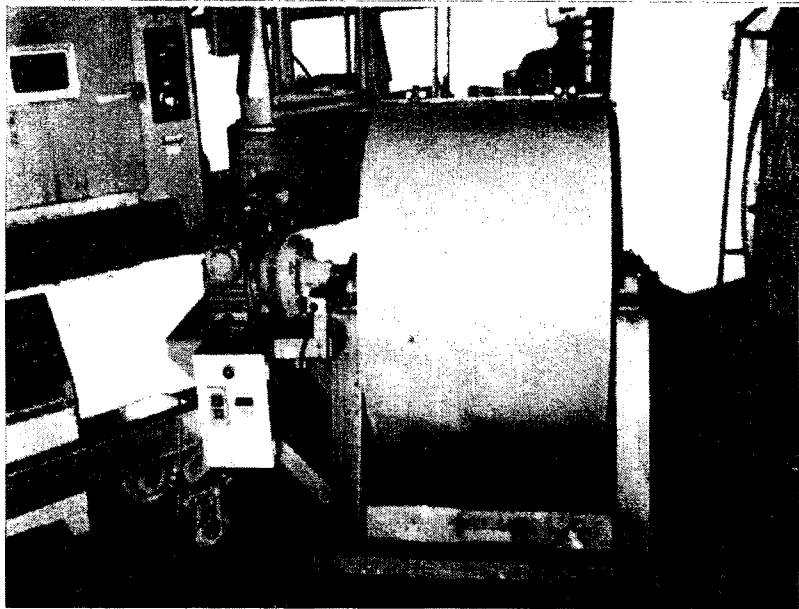
충격식 분쇄방법 대신 Attrition Mill 방식을 사용하는 분쇄기로써 <그림 4-2>와 같은 실험용 건식 미세 분쇄기를 제작하고 건식 미세분쇄 방법의 효율성을 분석하기 위해서 분쇄 지속시간을 15분, 30분, 45분으로 설정하고 1분당 회전수(rpm)을 달리하면서 실측하였다.

본 연구성과의 실용화를 위해서는 왕겨 소각공정과 분쇄공정이 일관공정을 유지해야 하는데 건식 분쇄방법은 분진이 매우 많이 발생하여 일관작업시 작업 종사자의 건강을 해침은 물론 생산공정 주변 지역의 대기중에 많은 분진을 비산시킬 가능성이 있으므로 이를 해소하기 위해서 또한 건식 분쇄방법과 분쇄효율을 비교하기 위해서 <그림 4-3>과 같은 실험용 습식 미세분쇄 장치를 개발하고 이에 대한 분쇄 시간별 · 1분당 회전수별 분쇄효율을 실측하였다.

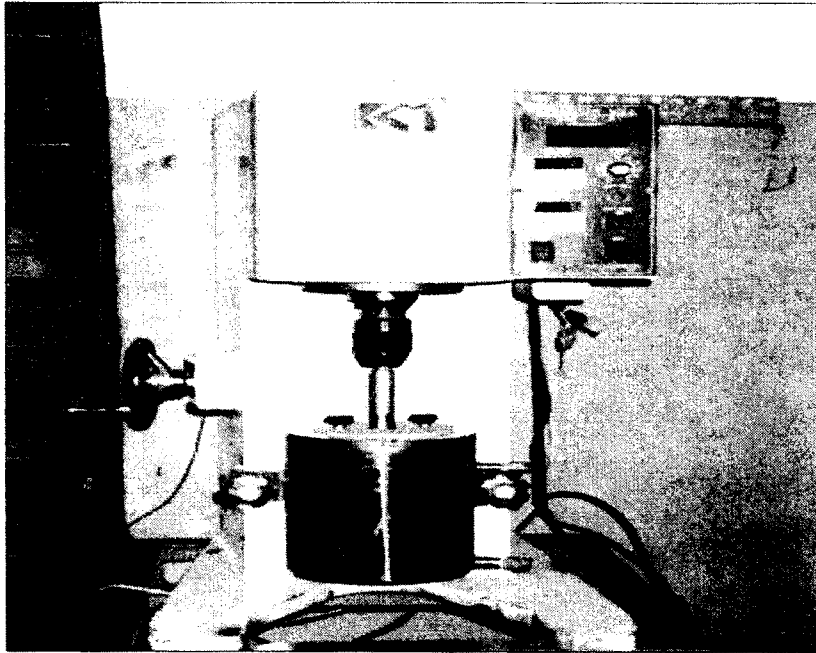
분쇄방법 사이의 효율성을 비교 평가하기 위한 기준으로써 왕겨재의 입도분석과 진비중 및 단위 무게당의 표면적 즉 비표면적 및 소비전력을 선택하고 이를 실측하였다. 입도분석을 위해서는 0.04 μm 까지 측정가능한 레이저 분석기를 이용하였으며, 비표면적은 질소흡착법을 이용하는 BET 시험기를 이용하였으며, 진비중은 물 대신 비중이 작은 광유를 사용하여 실험하였다. 또한 실험과정의 오류를 제거하기 위하여 전자현미경으로 사진촬영 · 분석하였으며 모든 실험과정에서 실험오차를 줄이기 위해서 3반복으로 실험을 실시하였다. <표 4-1>은 이러한 실험결과를 요약 정리한 것이다.

<표 4-1> 왕겨재 분쇄성 실험 결과

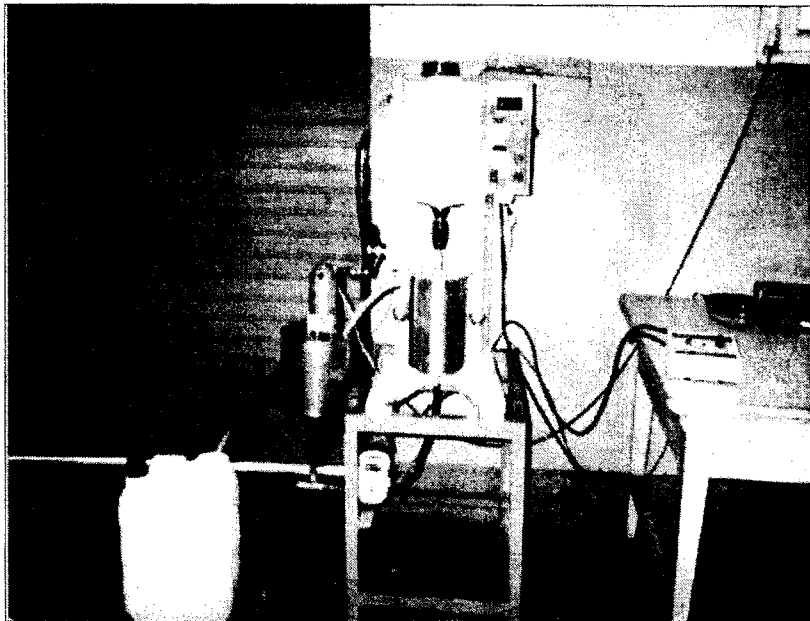
분쇄기	분쇄 시간	소각온도	입경분포 범위(μm)	평균입경(μm)	비표면적 (m^2/g)	평균진비중	소비전력 (kWh)	1회 생산량	1kg당 소비전력(kWh)
L.A. 마모기	15분	저온소각	0.4-192.0	30.2	16.3-48.2	1.98	0.44	1.5kg	0.293
		고온소각	0.4-192.0	33.6	9.1-39.6	2.05	0.44	1.5kg	0.293
	30분	저온소각	0.4-192.0	25.4	32.6-54.8	1.99	0.88	1.5kg	0.586
		고온소각	0.4-192.0	25.8	6.0-23.8	2.06	0.88	1.5kg	0.586
	45분	저온소각	0.4-192.0	21.4	39.4-56.1	2.00	1.32	1.5kg	0.880
		고온소각	0.4-192.0	22.9	7.8-21.9	2.06	1.32	1.5kg	0.880
	60분	저온소각	0.2-128.0	18.7	36.8-94.8	2.01	1.76	1.5kg	1.173
		고온소각	0.4-128.0	21.6	7.8-38.2	2.07	1.76	1.5kg	1.173



<그림 4-1> 낙하 충격식 L.A.마모 시험기



<그림 4-2> 건식 Attrition Mill 분쇄기



<그림 4-3> 습식 Attrition Mill 분쇄기

저온제어로 소각한 김제산 동진벼를 L.A.마모시험기로 각각 15분 및 60분 분쇄한 다음 전자현미경으로 관찰한 것이 <그림 4-4>이며 레이저 분석기에 의한 입경분포 실험결과는 <그림 4-5>이다. 반면 고온제어로 소각한 김제산 동진벼의 경우는 각각 <그림 4-6> 및 <그림 4-7> 이다. 또한 <그림 4-8> 및 <그림 4-9>는 건식 Attrition Mill을 이용하여 저온제어로 소각한 왕겨재를 15분 동안 분쇄한 다음 촬영한 전자현미경상과 레이저 분석기로 실측한 입경분포 곡선이다.

<표 4-1>에서 충격식 L.A.마모시험기로 45분까지 분쇄시에는 소각온도에 관계없이 점차 입경이 작아지나 그 이상 지속하면 분쇄효율이 떨어져서 1시간 가까이 분쇄하여야 소각온도에 관계없이 평균입경이 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 또한 L.A. 마모시험기로 대표되는 충격식 분쇄기로서는 전반적으로 고온제어 보다는 저온제어로 소각할 경우 분쇄효율이 높다는 것을 발견하였다. 아울러 L.A. 마모시험기는 연구실험용으로 특수하게 제작한 소형 분쇄기가 아니라 상업적으로 시판되는 콘크리트용 굵은골재의 마모성을 시험하는 대형의 상업용 분쇄기이므로 1회 분쇄시 왕겨재 1.5kg씩 투입하여 분쇄하였으므로 1kg당 소비전력이 Mill형 분쇄기 보다는 상당히 작게 나타났다.

한편 실리카흙이나 고로슬래그 또는 플라이애쉬로 대표되는 기존의 상업용 혼화재의 평균입경이 10 - 20 μm 의 범위에 있고 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 이하인 점을 감안하면 왕겨재도 최소 $20\mu\text{m}$ 이하까지 분쇄하는 것이 필요하나 콘크리트용 혼화재료로서 효용성을 극대화하기 위해서는 $10\mu\text{m}$ 이하까지 분쇄하는 것이 필요하다. 그러나 대형의 규모라 할 수 있는 L.A. 마모

시험기로서는 1시간 이상 분쇄하여도 평균입경이 $20\mu\text{m}$ 이하가 되도록 분쇄하기가 어렵다. 또한 L.A.마모시험기는 충격식이어서 소음이 크게 발생하므로 향후 실용적으로 보급하기 위해서는 소음공해를 방지하기 위한 추가 시설의 비용이 상당히 필요하다고 판단된다.

반면 건식 또는 습식 Attrition Mill을 이용한 분쇄방법을 택할 경우 비록 분쇄기가 연구실험용으로 특수하게 제작된 소형의 분쇄기일 지라도 10-15분 이내 $10\mu\text{m}$ 이하까지 손쉽게 분쇄할 수 있다. 한편 건식 또는 습식 Attrition Mill 분쇄기는 실용성의 핵심요소인 효율성을 무시하고 연구의 목적만을 달성하기 위하여 비효율적이지만 초소형으로 특수하게 제작된 것이므로 왕겨재 1kg 분쇄에 소요되는 전력량이 L.A.마모시험기를 사용한 경우에 비해서 많이 나타났다. 그러나 L.A. 마모시험기 처럼 Attrition Mill도 분쇄 효율 증대를 위해서 대형으로 제작·설치할 경우 왕겨재 1kg 분쇄에 소요되는 전력량이 L.A. 마모시험기에서 소요되는 전력량보다 대폭 줄어들 것으로 추정된다. 더구나 소음이 적게 발생하므로 소음공해를 해소하기 위한 추가비용이 거의 필요 없으므로 L.A.마모시험기로 대표되는 충격식 분쇄기 보다는 유리하다고 판단된다.

일반적으로 혼화재료는 혼입비율을 증대함에 따라 콘크리트의 강도가 증가하여 최적의 혼입율에 도달하면 최대의 강도를 보이고, 다시 혼입율이 증대함에 따라 강도가 저하하여 어느 일정 혼입율, 즉 최대 혼입율에 이르면 혼화재료를 혼입하지 않은 경우에 비해서 오히려 강도가 떨어진다. 최적 혼입율과 최대 혼입율의 크기 차이는 혼화재료의 입경분포에 영향을 받게 된다. 평균입경이 작고 입경분포의 범위가 좁으면 최대 혼입율과 최적 혼입율의 차이

가 커진다. 그러나 평균입경이 작을지라도 입경분포의 범위가 넓으면 넓을수록 최대 혼입율과 최적 혼입율의 차이가 점차 좁아져서 최종적으로는 최적혼입율과 최대혼입율의 크기가 일치한다. 이러한 사실은 다양한 입경분포를 가진 왕겨재를 혼화재료로 사용하여 콘크리트의 강도특성을 실험한 결과에서도 입증되었다.

최적 혼입율과 최대 혼입율의 크기가 일치하는 입경분포를 가진 왕겨재를 이용하여 콘크리트를 제조하고자 할 경우 일반적으로 최적 혼입율 까지 왕겨재를 혼입하게 된다. 따라서 최적의 왕겨재 혼입율 까지 혼입하고자 할 경우 왕겨재의 양을 정확히 계량·혼입하여야 하나 계량오차가 발생할 경우 최대 혼입율을 초과하여 혼입할 수 있으며, 이 경우 오히려 왕겨재를 혼입하지 않은 경우보다 콘크리트의 강도가 떨어지는 경우가 발생할 수도 있으므로 품질관리가 어렵다.

이러한 측면에서 살펴보면 왕겨재 분쇄방법으로는 평균입경의 크기가 작고 입경분포의 범위가 좁은 Attrition Mill식 분쇄기가 훨씬 유리하다고 판단된다.

한편 소각온도에 따른 왕겨재의 분쇄특성을 살펴보면 L.A. 마모시험기는 동일한 분쇄시간임에도 저온제어로 소각한 왕겨재가 고온제어로 소각한 경우에 비해서 평균입경의 크기가 약간 작아지며, 입경분포의 범위도 좁은 것으로 나타났다.

따라서 600℃이하의 저온제어로 소각한 왕겨재가 동일한 입경까지 분쇄하는 데 필요한 에너지가 적게 소요되어 유리하며 소비전력의 크기나 소음피해 방지 및 분쇄입경의 미립화와 균질화 관점을 종합적으로 고려하면 분쇄방법으로는 충격식 보다는 Mill형이 가장 유리하다고 판단된다.

<그림 4-4>와 <그림 4-6>을 비교하면 고온제어로 소각한 왕겨재는 분쇄시간의 장단에 관계없이 구(球)에 가까운 입형을 가진 입자가 많으나 저온제어로 소각할 경우 봉(棒)형의 입형을 가진 입자가 많이 나타나는데 이는 소각온도에 따른 결정형 실리카의 함량이 많고 적음에 기인한 것이다.

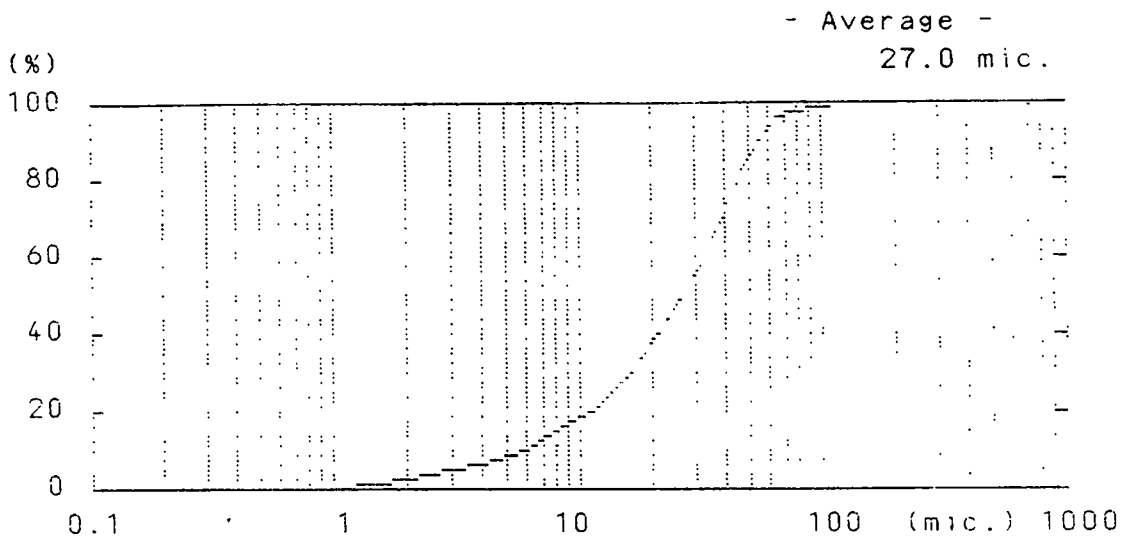


(a) 15분 분쇄 동진벼 왕겨재

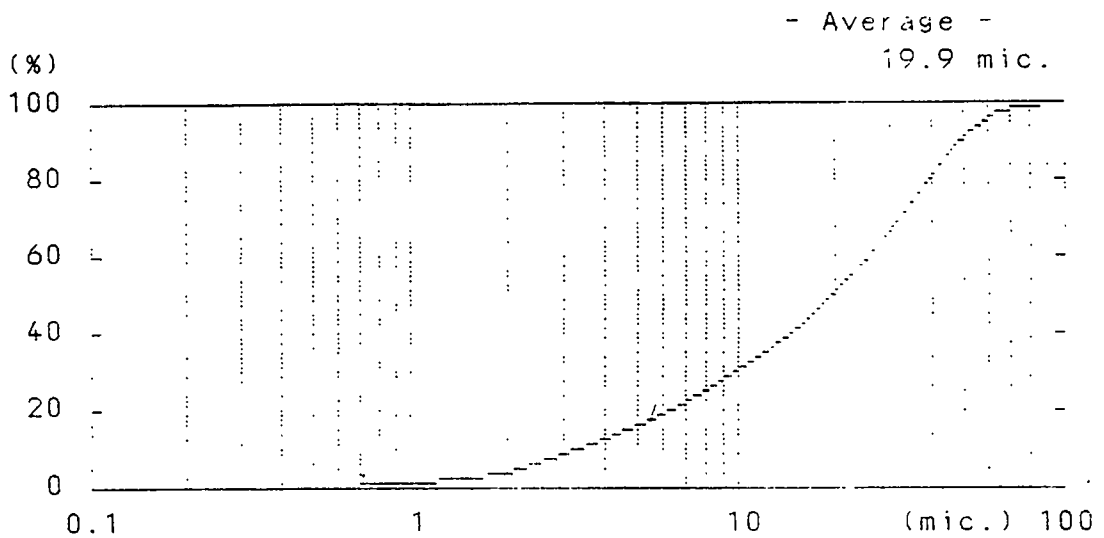


(b) 60분 분쇄 동진벼 왕겨재

<그림 4-4> 저온제어소각 왕겨재의 전자현미경상

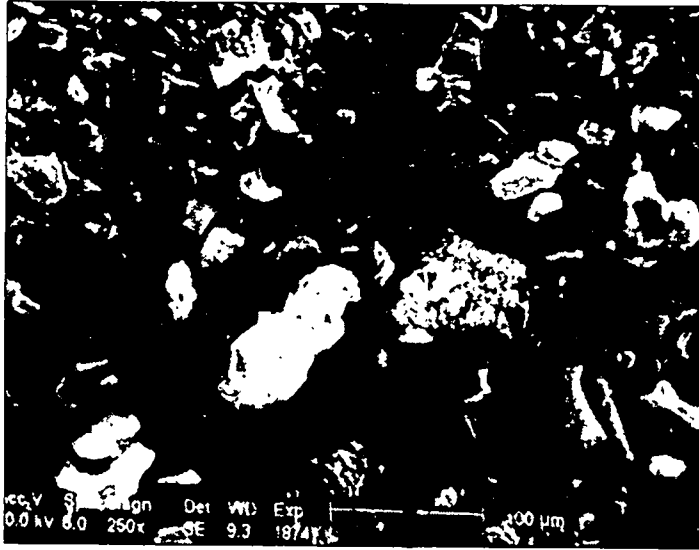


(a) 15분 분쇄 동진벼 왕겨재

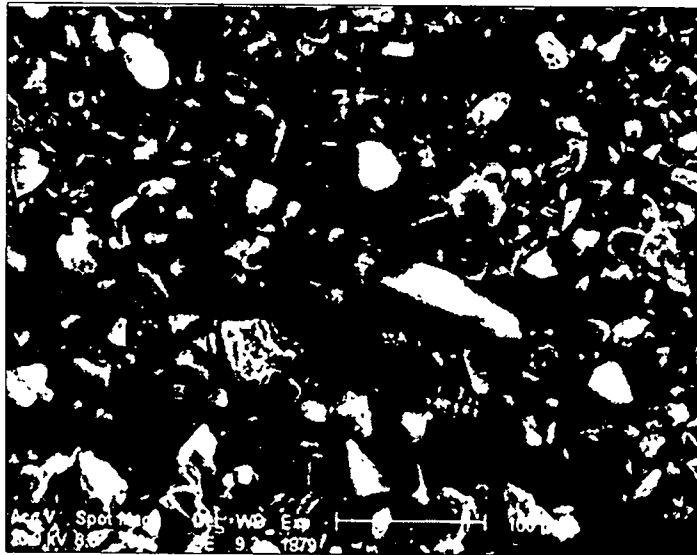


(b) 60분 분쇄 동진벼 왕겨재

<그림 4-5> 저온 제어소각 왕겨재의 입경분포

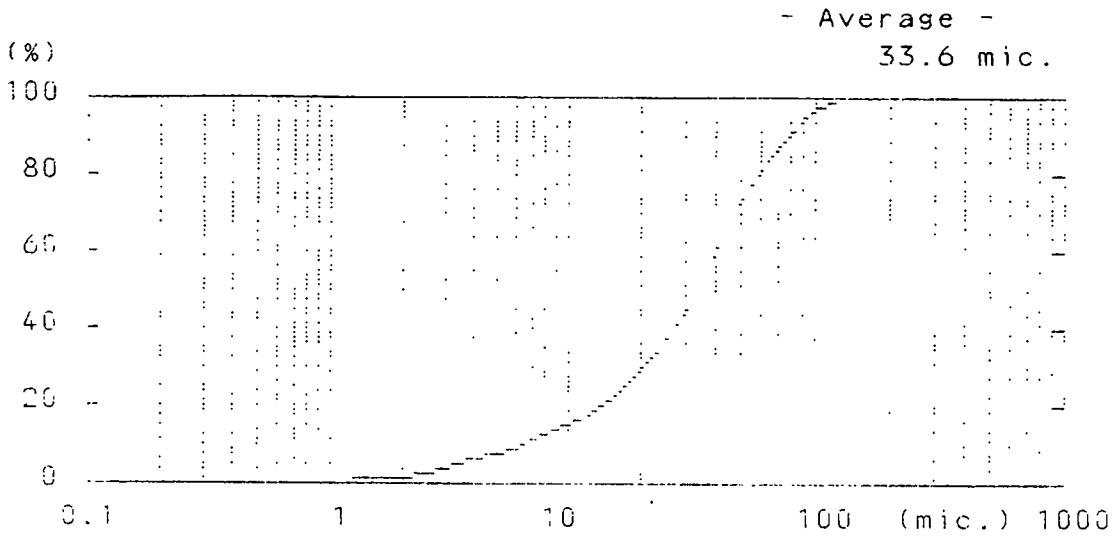


(a) 15분 분쇄 동진벼 왕겨재

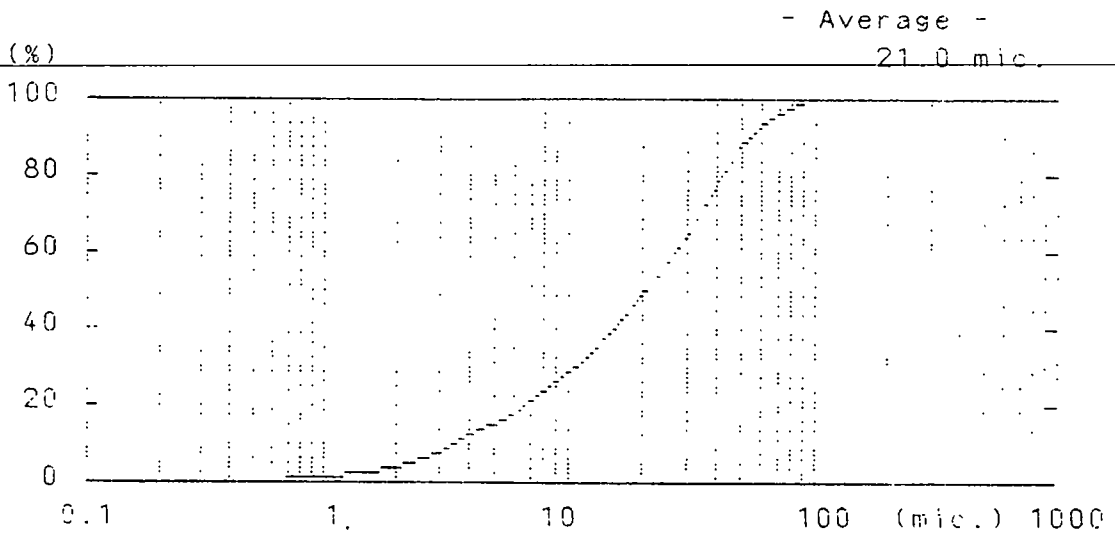


(b) 60분 분쇄 동진벼 왕겨재

<그림 4-6> 고온제어소각 왕겨재의 전자현미경상

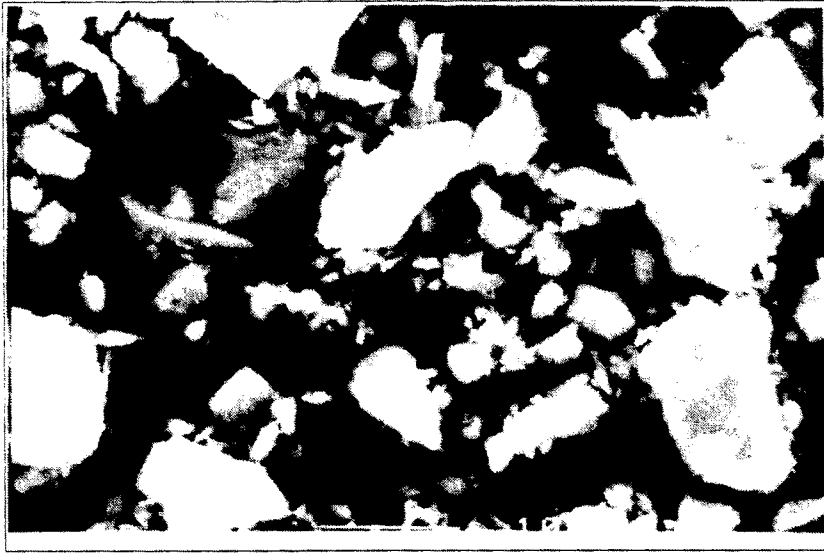


(a) 15분 분쇄 동진버 왕겨재

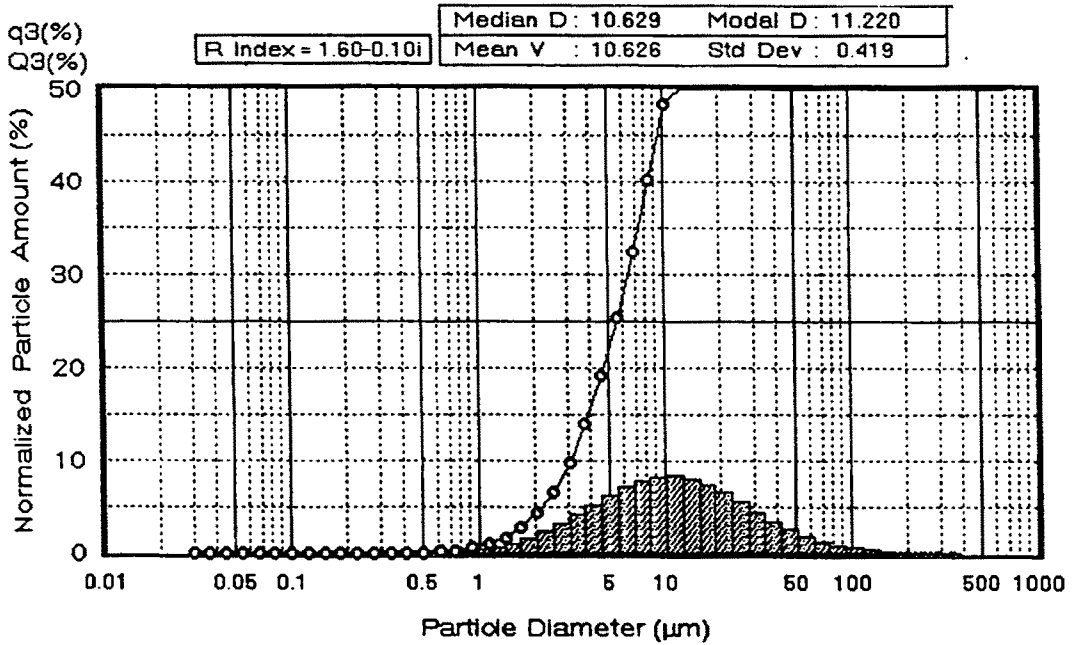


(b) 60분 분쇄 동진버 왕겨재

<그림 4-7> 고온제어소각 왕겨재의 입경분포



<그림 4-8> Attrition Mill 분쇄 왕겨재의 전자현미경상

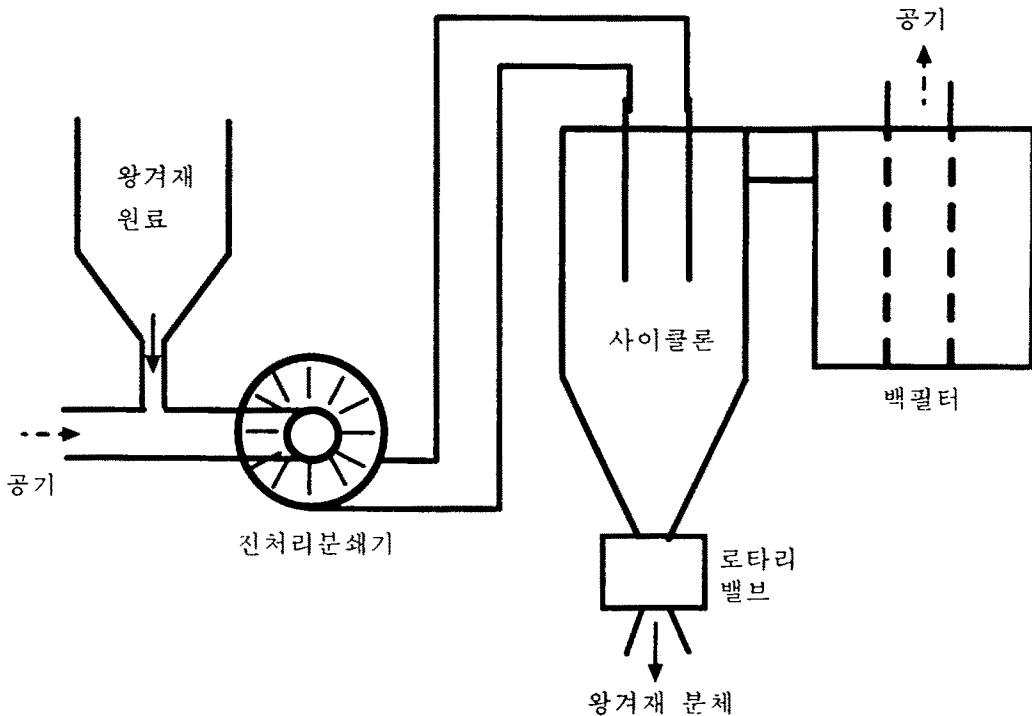


<그림 4-9> Attrition Mill 분쇄 왕겨재의 입경분포도

제 2 절 조분쇄기(전처리 분쇄기) 분쇄특성

1. 조분쇄기의 구성

조분쇄기는 미세분쇄기의 효율을 높이고 또한 미세분쇄기의 작동의 원활성을 위하여 필요성이 인정되는 시스템으로서 본 실험에서는 왕겨재를 이송하는 시스템이 공기이송식이기 때문에 원심팬을 이용하여 왕겨재를 이송하는 단계에서 동시에 조분쇄(전처리 분쇄)를 하는 시스템을 채택하였다. <그림 4-10>은 조분쇄 시스템의 구성을 개념도로 나타낸 것이다.



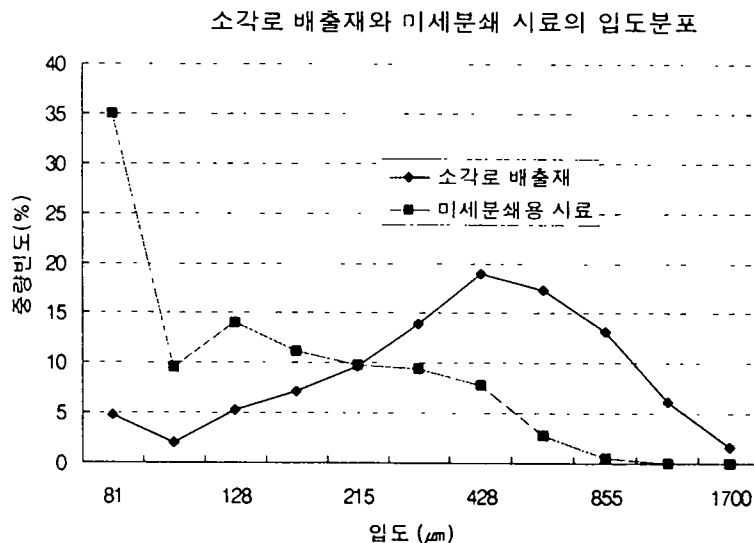
<그림 4-10> 조분쇄(전처리) 분쇄 실험장치의 구성

2. 조분쇄기의 분쇄특성

조분쇄기의 분쇄특성에 영향을 미치는 인자로서 분쇄팬의 회전수와 원료의 투입율을 선택하였다.

예비 실험결과 분쇄팬에 통과시키는 회수가 증가할수록 입도는 작아지나 1회 통과시에 가장 효율이 높았다. <그림 4-11>은 분쇄 실험에 사용된 시료의 입도분포도를 나타낸 것인데 조분쇄기 실험에 사용된 시료는 소각로에서 바로 배출된 왕겨재로서 평균입도는 487.3 μm 이고 미세분쇄시스템의 시료는 조분쇄기에서 분당 회전수 4000, 투입량은 분당 1 kg으로 하여 1회 통과시킨 왕겨재로서 평균입도는 177.9 μm 였다.

<표 4-2>는 조분쇄 실험의 결과를 요약한 것이며 <그림 4-12>과 <그림 4-13>는 실험처리별 평균입도와 분쇄물질의 질량당 분쇄에너지를 나타낸 것이다. 예상했던 바와 같이 조분쇄기에서는 회전수가 증가할수록, 원료 투입율이 작을수록 입도는 작아진다. 그러나 분쇄 에너지를 고려하면 반대의 현상이 나타난다. 당연한 귀결로서 분쇄에너지가 증가하면 입도는 작아지는 것이다.



<그림 4-11> 분쇄실험에 사용된 왕겨재 시료의 입도 분포도

<표 4-2> 조분쇄 실험처리 결과

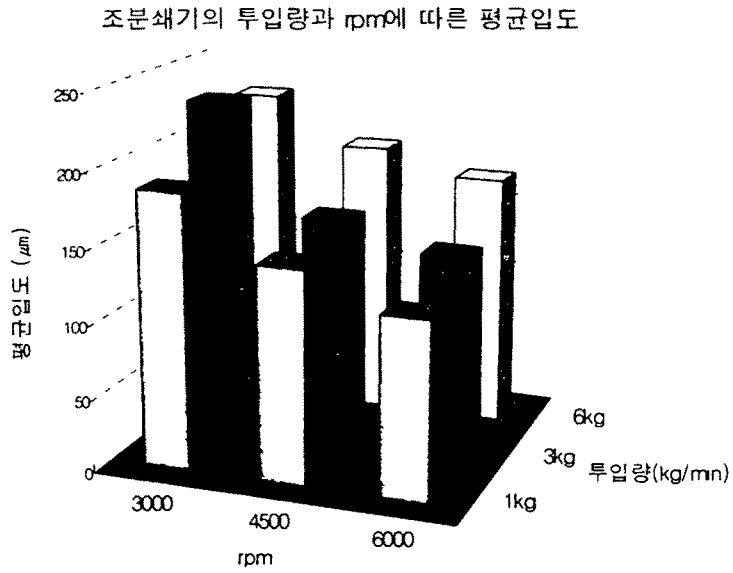
투입량 (kg/min)	구 분	분쇄기 회전수 (rpm)		
		3000	4500	6000
1	평균입도(μm)	186.43	144.59	120.46
	분쇄용량 (kg/h)	60		
	시간당 에너지 (kwh/h)	1.26	2.10	2.88
	질량당 에너지(kwh/kg)	0.021	0.035	0.048
3	평균입도(μm)	229.70	155.98	138.25
	분쇄용량(kg/h)	180		
	시간당 에너지 (kwh/h)	1.50	2.70	3.06
	질량당 에너지(kwh/kg)	0.008	0.015	0.017
6	평균입도(μm)	220.30	188.11	171.73
	분쇄용량(kg/h)	360		
	시간당 에너지 (kwh/h)	2.7	3.42	3.66
	질량당 에너지 (kwh/kg)	0.008	0.095	0.01

제 3 절 미세분쇄기의 분쇄특성

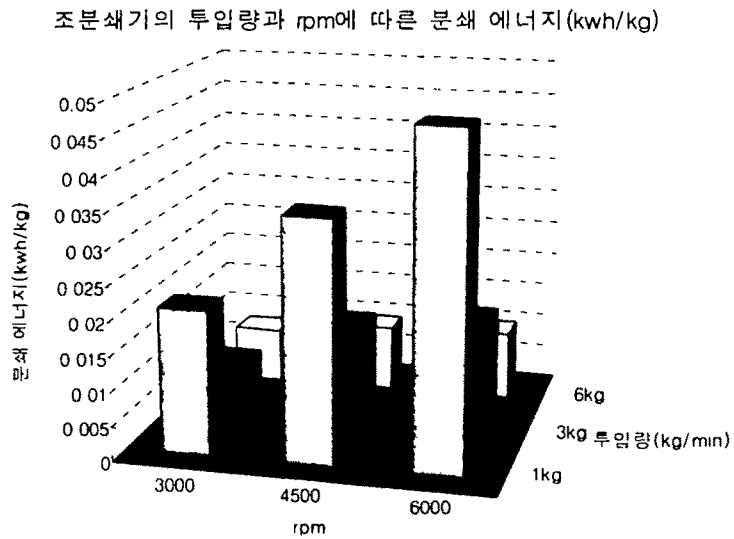
1. 건식 미세분쇄 시스템

가. 건식 미세분쇄시스템의 구성

건식 미세분쇄시스템은 앞절의 <그림 4-2>에 나타낸 실험실용 Attrition Mill(진동볼밀)을 선택하였다. 10 μm 이하의 입도를 가지면서 효율이 좋고 소음이 적은 분쇄기는 찾기가 어렵다. 본 실험에 사용한 진동볼밀은 지르코늄 코팅의 볼(3 ϕ)과 볼을 빠르게 회전시키는 역시 지르코늄 코팅의 임펠러, 그리고 특수 우레탄 코팅의 용기로 구성된다. 용기의 용량은 1000 cc, 임펠러 최대 회전수는 1000 rpm 정도이며 분쇄시간과 임펠러 회전수를 선택할 수 있도록 되어 있다.



<그림 4-12> 조분쇄기의 실험처리별 평균입도



<그림 4-13> 조분쇄기의 실험처리별 분쇄질량당 분쇄에너지

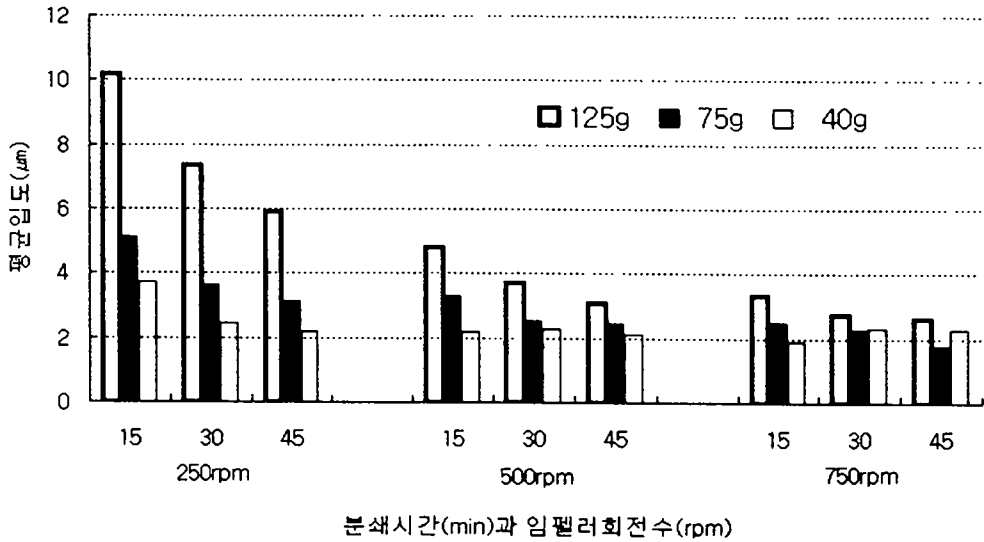
나. 건식 미세분쇄시스템의 분쇄특성

건식 미세분쇄 시스템은 배치식으로서 실험요인은 분쇄기

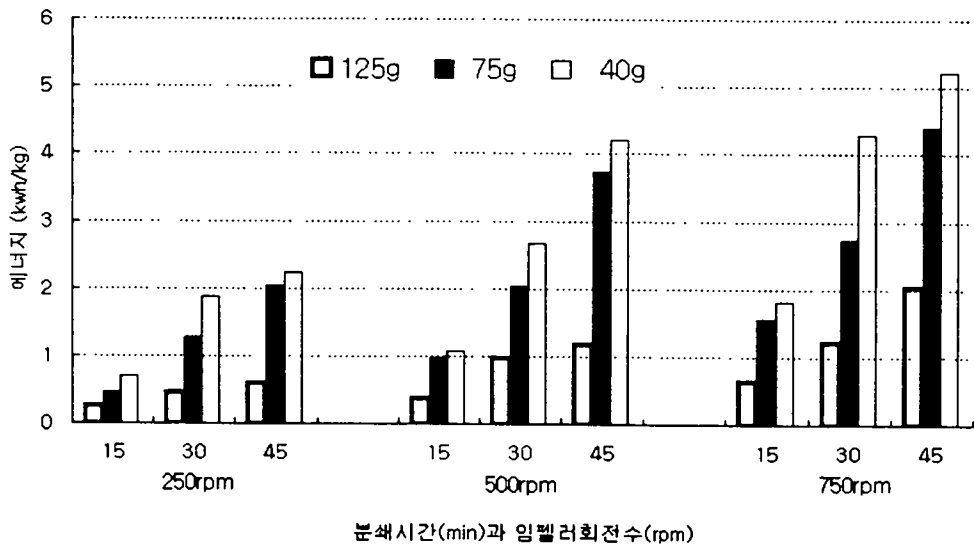
의 임펠러 회전수, 분쇄시간 그리고 투입량으로 하였다. 결과를 요약하여 <표 4-3>에 나타내었으며 <그림 4-14>와 <그림 4-15>는 실험처리별 평균입도와 분쇄질량당 분쇄에너지를 나타낸 것이다. 실험처리내에서 입도분포는 1.78-10.18 μ m 범위에 있으며 분쇄질량당 에너지는 0.256-5.226 kwh/kg 범위에 있다. 입도가 클수록 분쇄에너지는 작아지는 경향은 여전하다. 상업용 불밀과 비교할 때 질량당 분쇄에너지가 비슷한 0.25-0.3 kwh/kg에서 평균입도는 상업용 불밀은 30 μ m 인데 반하여 본 실험용 진동불밀은 10 μ m 수준으로서 매우 우수한 성능을 가지는 것으로 판단된다.

<표 4-3> 건식 미세분쇄 실험결과

투입량 (g)	구 분	분쇄기 회전수 및 분쇄시간(min)								
		250 rpm			500 rpm			750 rpm		
		15	30	45	15	30	45	15	30	45
40	평균입도(μ m)	3.703	2.435	2.178	21.18	2.292	2.098	1.881	2.337	2.280
	분쇄용량(kg/h)	0.160	0.080	0.053	0.160	0.080	0.053	0.160	0.080	0.053
	시간당 에너지(kwh/h)	0.112	0.095	0.118	0.172	0.213	0.223	0.290	0.343	0.277
	질량당에너지(kwh/kg)	0.7	1.19	2.226	1.075	2.663	4.208	1.813	4.288	5.226
75	평균입도(μ m)	5.117	3.614	3.133	3.330	2.515	2.431	2.490	2.292	1.785
	분쇄용량(kg/h)	0.3	0.15	0.1	0.3	0.15	0.1	0.3	0.15	0.1
	시간당 에너지(kwh/h)	0.138	0.190	0.204	0.292	0.306	0.373	0.466	0.410	0.441
	질량당에너지(kwh/kg)	0.46	1.267	2.04	0.973	2.04	3.73	1.553	2.733	4.41
125	평균입도(μ m)	10.182	7.3676	5.901	4.806	3.723	3.082	3.326	2.731	2.617
	분쇄용량(kg/h)	0.5	0.25	0.167	0.5	0.25	0.167	0.5	0.25	0.167
	시간당 에너지(kwh/h)	0.128	0.113	0.100	0.190	0.243	0.197	0.316	0.304	0.339
	질량당에너지(kwh/kg)	0.256	0.452	0.599	0.38	0.972	1.18	0.632	1.216	2.03



<그림 4-14> 건식 미세분쇄 시스템의 실험처리별 평균입도

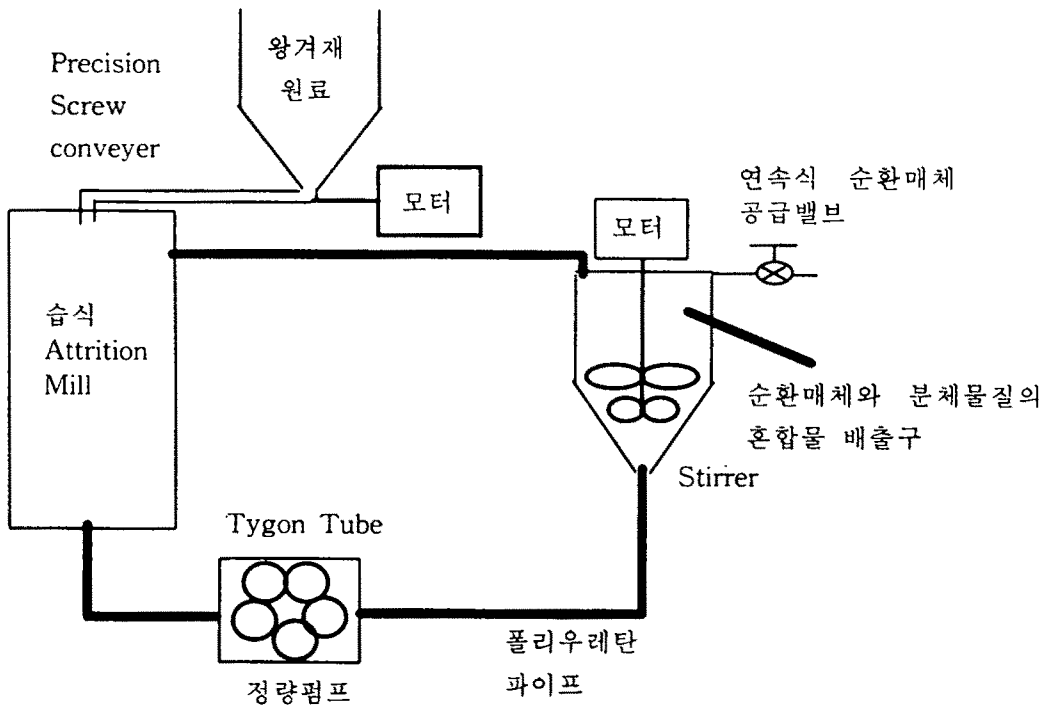


<그림 4-15> 건식 미세분쇄 시스템의 실험처리별 분쇄질량당 분쇄에너지

2. 습식 미세분쇄 시스템의 구성

가. 습식 미세분쇄 시스템의 구성

습식 미세분쇄 시스템으로는 건식 미세분쇄시스템과 동일한 용량과 동일한 형식의 습식 Attrition Mill(진동분쇄)을 선택하였다. 이것은 건식의 실험결과 분쇄효과는 매우 좋았으나 미세 입자들의 공기중의 비산으로 실용화가 어렵다고 판단되어 왕겨재의 미세분쇄의 실용화를 목적으로 선택한 것이다. 앞 절의 <그림 4-3>은 습식 미세분쇄시스템의 사진이며 그림 <4-16>은 시스템의 개념도이다. 건식의 형식에 연속식 순환매체(물)를 공급하여 분쇄 물질을 물과 같이 순환시키면서 계속 분쇄하는 방식이다. 물과 원료를 연속적으로 투입하면서 물과 미세분체의 혼합물을 연속적으로 배출할 수 있어 연속적인 작동이 용이하다.

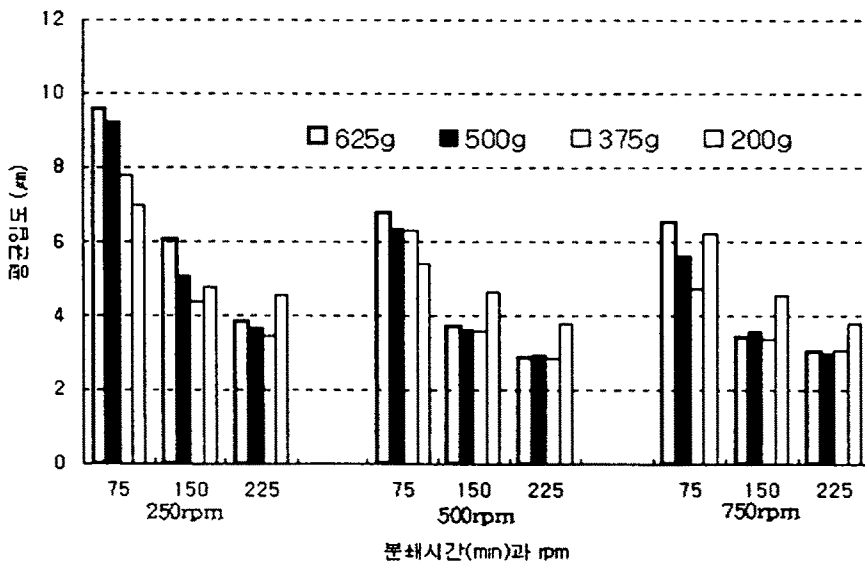


<그림 4-16> 습식 미세분쇄 실험장치의 구성

나. 습식 미세분쇄 시스템의 분쇄 특성

습식 미세분쇄 시스템의 분쇄특성은 건식과 유사한 특성을 지니고 있으나 불을 물과 같이 회전시키고 물과 분체의 혼합물을 계속 순환시키기 때문에 분쇄 에너지가 매우 증가하였으며 반면에 비산 먼지가 없고 연속식이 용이한 특징을 나타내었다. 실험의 결과를 <표 4-4>에 나타내었으며 <그림 4-17>에 실험처리별 평균입도를 나타내었다.

분쇄 인자의 영향은 건식과 대동소이 하며 입도분포도 유사하나 건식에 비하여 평균입도는 약간 큰 것으로 나타났다. 또한 순환유체와 분체물질의 혼합에서 분체물질의 농도가 지나치게 낮으면 높은 경우와 마찬가지로 평균입도가 오히려 커지는 경향이 발견된다. 이는 농도가 낮으면 분체입자가 물(순환유체)의 유선을 따라 운동함으로써 불과의 충돌이 격렬하지 않기 때문으로 판단된다.



<그림 4-17> 습식 미세분쇄 시스템의 실험처리별 평균입도

습식 미세분쇄시스템의 분쇄에너지는 임펠러 회전뿐만 아니라 순환유체와 분체의 혼합물을 순환시키는 에너지가 있기 때문에 견식에 비하여 에너지가 특히 많이 소요될 것이며 임펠러 회전만 하더라도 액체를 회전시켜야 함으로 에너지 소비가 증가할 것으로 쉽게 짐작할 수 있다. <표 4-4>에서 분쇄에너지는 임펠러 회전과 혼합유체의 순환펌프에 투입된 에너지의 합으로서 총분쇄 에너지를 의미한다

<표 4-4> 습식 미세분쇄 실험결과

투입량 (g)	구 분	분쇄기 회전수 및 분쇄시간(min)								
		250 rpm			500 rpm			750 rpm		
		75	150	225	75	150	225	75	150	225
200	평균입도(μm)	6.994	4.769	4.557	5.379	4.637	3.796	6.180	4.553	3.802
	분쇄용량(kg/h)	0.16	0.08	0.053	0.16	0.08	0.053	0.16	0.08	0.053
	시간당 에너지(kwh/h)	0.167	0.235	0.217	0.200	0.314	0.290	0.351	0.409	0.359
	질량당에너지(kwh/kg)	1.044	2.937	4.068	1.250	3.925	5.437	2.193	5.112	6.731
375	평균입도(μm)	7.782	4.339	3.440	6.284	3.557	2.831	4.707	3.368	3.07
	분쇄용량(kg/h)	0.3	0.15	0.1	0.3	0.15	0.1	0.3	0.15	0.1
	시간당 에너지(kwh/h)	0.263	0.177	0.186	0.241	0.237	0.278	0.352	0.290	0.343
	질량당에너지(kwh/kg)	0.887	1.180	1.860	0.803	1.580	2.780	1.173	1.933	3.430
500	평균입도(μm)	9.204	5.061	3.652	6.363	3.622	2.913	5.628	3.563	2.963
	분쇄용량(kg/h)	0.4	0.2	0.133	0.4	0.2	0.133	0.4	0.2	0.133
	시간당 에너지(kwh/h)	0.213	0.238	0.220	0.247	0.287	0.272	0.347	0.390	0.383
	질량당에너지(kwh/kg)	0.532	1.190	1.650	0.617	1.435	2.040	0.867	1.950	2.872
625	평균입도(μm)	9.579	6.029	3.814	6.760	3.700	2.837	6.505	3.395	3.001
	분쇄용량(kg/h)	0.5	0.25	0.167	0.5	0.25	0.167	0.5	0.25	0.167
	시간당 에너지(kwh/h)	0.250	0.275	0.237	0.307	0.299	0.338	0.429	0.438	0.428
	질량당에너지(kwh/kg)	0.500	1.100	1.422	0.614	1.196	2.028	0.858	1.752	2.568

제 5 장 콘크리트용 기성제품 혼화재료의 특성

제 1 절 서 언

혼화재료는 시멘트, 물, 골재(모래, 자갈) 이외의 재료로서 콘크리트나 모르타에 특별한 품질을 부여하거나 성질을 개선하기 위해서 첨가하는 재료를 말하며 혼화재료의 용도는 대단히 넓다. 혼화재료는 한가지의 성능만을 나타내는 것이 아니고 몇 개의 부수적인 성능이나 효과를 동시에 가지고 있다. 또한 콘크리트 구조물의 품질이나 내구성 향상에 대한 최근의 강렬한 사회적 요구와 숙련공 부족에 따른 콘크리트의 높은 시공성에 대한 요구 등에 부응하여 혼화재료의 종류나 용도 등이 매우 다양해 지고 있다.

그러나 혼화재료는 양질의 것을 각각의 품질특성에 맞게 적절히 사용하면 콘크리트의 품질이나 성능을 개선하는 등 긍정적인 측면이 많으나 혼화재료의 품질특성을 무시하고 과용하게 되면 오히려 콘크리트의 품질이나 성능을 떨어뜨리는 등 역효과도 나타난다. 따라서 혼화재료는 콘크리트에서 요구되는 성능을 얻기 위하여 사용량의 한계가 있으며 그 크기는 혼화재료의 종류별로 달라진다.

혼화재료는 요구되는 성능을 얻기 위하여 첨가되는 양의 다소(多小)에 따라 혼화제(混和劑)와 혼화재(混和材)로 분류된다. 일반적인 분류기준에 따르면 첨가량이 시멘트 중량의 1% 이하를 첨가하는 혼화재료를 혼화제라 부르고 5% 이상을 사용하는 경우 혼화재라고 부른다. 현재 각양각색의 혼화재료가 상업적으로 시판되고 있으나 일반적으로 많이 사용되는 대표적인 혼화재료를 용도별로 분류한 것이 다음 <표 5-1>이다

한편 왕겨재는 포졸란 반응이나 잠재 수경성을 갖고 있으며 미세하게 분쇄된 왕겨재는 콘크리트내 공극을 충전하는 효과를 동시에 갖고 있기 때문에 사용량이 시멘트 중량의 5%를 초과할 수 있으며

로 혼화재료 중 혼화재로 분류할 수 있다. 그러므로 혼화재로서 시장에서 주요 경쟁대상 품목은 플라이애쉬(Fly Ash)나 고로슬래그(Blast Furnace) 또는 실리카흄(Silica Fume)을 들 수 있다.

한편 본 연구는 왕겨재를 콘크리트용 혼화재료로 활용하는 기술을 개발하는 것이 주요 목적이므로 이를 위해서는

첫째, 왕겨재가 기존의 상업용 혼화재에 비해서 가격과 품질에서 비교우위적 경쟁력을 지니도록 왕겨 소각방법이나 분쇄방법 또는 적정 혼입율의 크기와 같은 기술을 개발 또는 규명하여야 하며

둘째, 기존에 널리 사용되고 있는 혼화재로서 플라이애쉬나 고로슬래그 또는 실리카흄에 비해서 비교 우위적 품질 경쟁력과 가격 경쟁력이 있음을 규명하여야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 먼저 시중에서 이미 널리 사용되고 있는 상업용 혼화재료의 종류별 일반적 특징과 이들이 콘크리트의 강도 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

<표 5-1> 대표적인 상업용 혼화재료의 용도별 분류

구분	주요 용도	상업적 품목	비고
혼화재	작업성능 또는 동결융해 저항성능 개선	AE제, AE 감수제	
	단위수량, 단위시멘트량 감소	감수제, AE 감수제	
	단위수량 감소 및 강도 대폭증진	고성능 (AE)감수제	
	콘크리트 유동성 개선	유동화제	
	시멘트의 응결·경화시간 조절	촉진제, 지연제, 급결제	
	鋼材의 부식 방지	방청재	
	콘크리트의 경량화	기포제, 발포제	
	콘크리트의 재료분리 방지	중점제	
혼화재	포졸란반응이나 잠재 수경성을 이용한 시멘트 대체재	플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카흄, 화산재	
	경화중 콘크리트의 팽창 유도	무수축 팽창재	
	충진재 역할 수행	광물질 미분말, 석분	

제 2 절 상업용 기성제품 혼화재료의 일반적 특성

1. 고로슬래그

용광로(高爐)방식의 製鐵作業에는 선철과 동시에 주로 알루미늄규산염으로 구성되는 슬래그가 생산된다. 이 용융상태의 고온 슬래그를 물, 공기 등으로 급냉하여 입상화한 것을 고로슬래그 (granulated blast furnace slag)라 부른다. 냉각방법에 따라 제품의 結晶狀態 및 품질이 달라지므로 크게 서냉 슬래그, 반급냉 슬래그, 급냉 슬래그 등으로 분류되며 용도는 <표 5-2>와 같다.

<표 5-2> 고로슬래그의 종류별 용도

종 류	용 도
서냉슬래그 (피상슬래그)	도로용(표층, 노반, 충전), 콘크리트용 골재, 항만재료, 지반 개량용 시멘트, 크링카 원료, 규산석회 비료 등
급냉슬래그 (수쇄슬래그, 입상화슬래그)	고로시멘트용(시멘트 혼합재), 시멘트 크링카 원료, 콘크리트 혼합재, 경량 기포 콘크리트 원료(ALC), 지반 개량재, 콘크리트용 세골재, 아스팔트용 세골재, 노반 안정처리 약제, 규산석회 비료, 항만 재료, 토목공사용
반급냉슬래그 (팽창슬래그)	경량 콘크리트용 골재, 경량 매립재, 기타 보온재

가. 고로슬래그의 성질

1) 화학적 성질

고로슬래그의 화학성분은 필요에 따라 첨가되는 석고류를 함유한 화학성분으로 표시되며 <표 5-3>은 고로슬래그의 화학성분의 범위를 나타내고 있다. 석고류가 첨가된 고로슬래그 분말은 CaO 함유량 및 鹽基度가 높다. 수쇄슬래그 중의 SO₃ 함유량은 0.04% 정도이기 때문에 고로슬래그 분말 중의 석고 첨가량 및 고로슬래그의 염기도는 고로슬래그 분말의 화학분석값(%)으로 부터

추정된다. KSL 5210 규정에 의하면 포틀랜드 고로슬래그 시멘트에 사용하는 고로슬래그의 염기도는 1.4 이상이어야 한다.

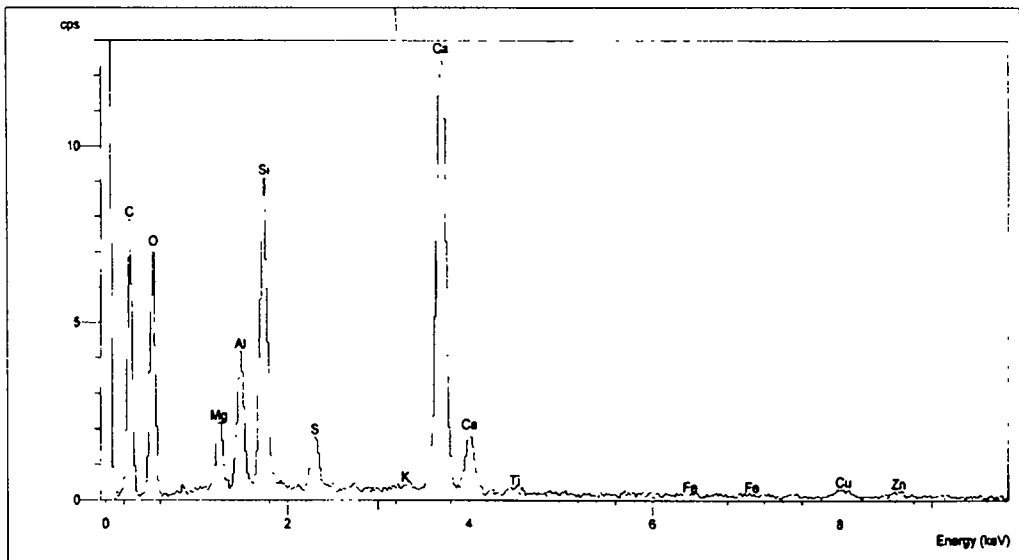
고로슬래그 분말이 물과 혼합하여 수화작용을 나타내기 위해서는 알카리성 혹은 황산염을 생성하는 물질을 첨가하여 OH⁻ 이온이나 SO₄²⁻ 이온이 충분히 존재하도록 해야 하며 이들 이온의 존재하에 고로슬래그 분말은 보통포틀랜드시멘트와 동일하게 수경성을 발휘한다.

일단 수화반응이 시작되면 장기적으로는 석회 결합기능도 나타내기 때문에, 고로슬래그 분말은 포졸란 반응도 함께 갖는 물질로 해석되고 있다.

<그림 5-1>은 1997년도 전남 광양제철소에서 생산되고 있는 고로슬래그 분말을 수집하여 EDS로 분석한 결과이다.

<표 5-3> 고로슬래그의 화학성분 범위(단위:중량%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	MnO	S	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
31.2 - 36.7	12.2 - 16.3	38.0 - 45.0	4.7 - 7.4	0.006 - 1.00	0.21 - 1.42	0.49 - 1.51	0.38 - 1.99	0.16 - 0.42	0.22 - 0.56

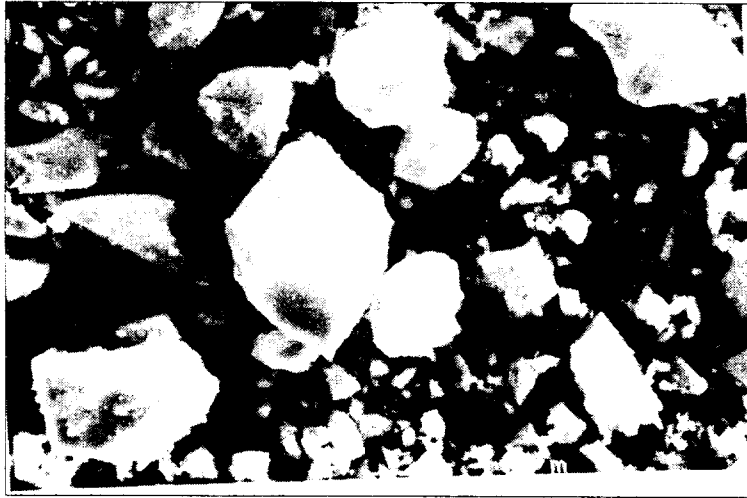


<그림 5-1> 고로슬래그 EDS분석 결과

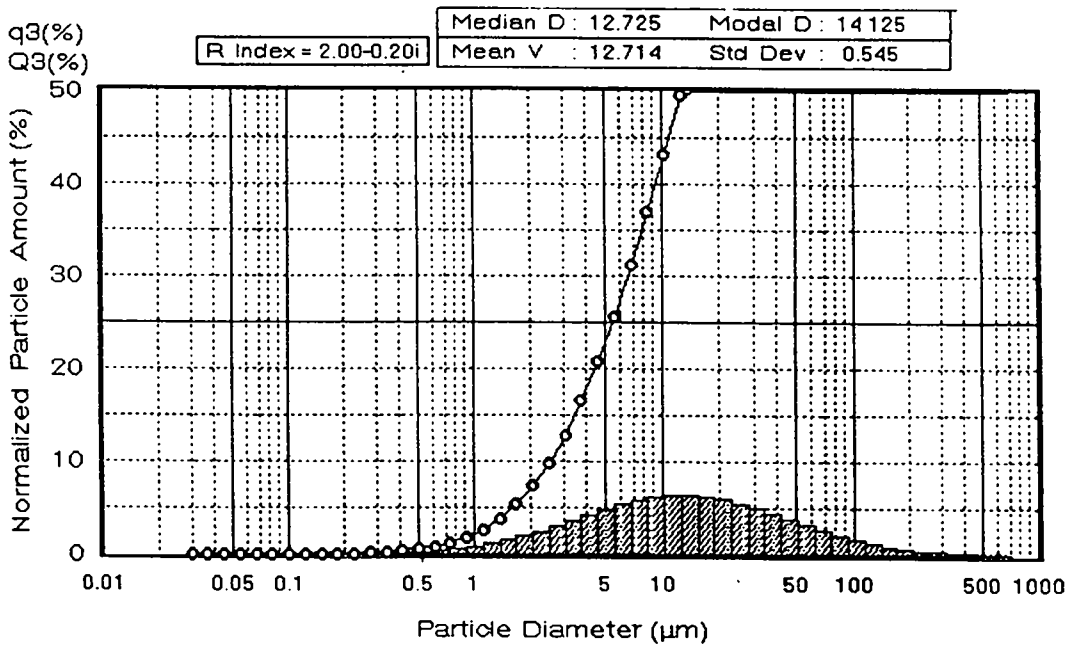
2) 물리적 성질

콘크리트용 혼화재료로 주로 쓰이는 것은 급냉슬래그로서 일반적으로는 비중이 1.89-2.77로 그 범위가 넓지만, $74\mu\text{m}$ 이하로 분쇄한 고로슬래그 분말의 비중은 2.85-2.94(평균 2.90)의 범위를 가지므로 보통포틀랜드 시멘트의 비중(3.15)보다 8% 정도 작으나 플라이애쉬나 실리카흙 및 왕겨재 보다는 약 30% 크다. 고로슬래그는 혼화재료로서 혼합성이나 분산특성이 우수하며 국내에서는 전남 광양제철소를 중심으로 생산되며 주로 국외로 수출되고 있다.

1997년도 현재 전남 광양에서 생산되는 고로슬래그를 전자현미경과 레이저분석기로 여러번 분석관찰한 결과중의 하나가 각각 <그림 5-2>와 <그림 5-3>이다. 분체입자의 형상은 매끈한 파면(破面)을 갖는 입방상으로 물과 접해도 곧바로 표면변화를 보이지 않고 포틀랜드 시멘트의 입자와 마찬가지로 겔화하므로 콘크리트의 주도에 큰 영향을 미치지 않는다. 입경 $10\mu\text{m}$ 이하의 것은 재령 28일까지의 초기강도에 관계하며 $10-40\mu\text{m}$ 의 것은 장기강도에 관계한다고 알려져 있는데 현재 광양에서 생산되고 있는 고로슬래그 분말을 레이저 입도분석기로 실측한 바에 의하면 최대입경은 $700\mu\text{m}$, 평균입경은 $10-16\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ 이하의 량은 14-50%의 범위에 있으며, $44\mu\text{m}$ 잔분은 14-52% 정도이다. 또한 BET 시험기에 의한 비표면적의 크기는 $7.88\text{m}^2/\text{g}$ 으로 나타났으며 진비중은 2.88~2.90(평균 2.89)로 나타났다.



<그림 5-2> 고로슬래그의 전자현미경상



<그림 5-3> 고로슬래그의 입경분포

3) 수화기구

고로슬래그 분말을 pH 12 이상의 수산화칼슘 포화용액 중에 넣으면 알루미늄규산염의 소상(銷狀)결합이 절단되어 수화가

시작되며 서서히 칼슘이온이 소비된다. 그러나 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 공급이 중단되어 알칼리량이 특정 농도 이하가 되면 반응은 진행되지 않는다. 슬래그가 물과 접하면 슬래그 입자 주변에 치밀한 불투수성의 산성(鹼性)피막이 형성되기 때문에 강알칼리를 사용하여 이 피막을 파괴해야만 반응이 계속 진행되며 이를 위해서 NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4$ 등이 사용된다.

나. 고로슬래그 혼입 콘크리트의 일반적 특성

1) 강도

고로슬래그의 입경크기와 모르타르 강도 ($W/C=50\%$, JIS 플로우치 190)는 직선적 관계가 있다. 분말도를 크게 할수록 재령 3일, 7일의 초기강도 및 28일 강도의 개선이 현저해진다. 그러나 블레인 시험기에 의한 분말도 $3,000-4,500\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그 분말을 사용한 콘크리트의 초기강도는 보통포틀랜드 시멘트만 사용한 콘크리트 보다 작고 이 경향은 슬래그 치환율이 클수록, 또는 물-시멘트비가 작을수록 현저하다.

미국에서는 ASTM C 989의 규정에 맞도록 슬래그 활성화 지수가 등급 120인 고품위 고로슬래그 분말($5200\text{cm}^2/\text{g}$)이 생산되고 있다. 이 제품은 재령 7일의 슬래그 활성화 지수가 90% 이상이므로 슬래그 치환율 30-65%, 물-시멘트 비 44-76%의 범위에서 재령 7일의 콘크리트 강도가 보통의 콘크리트 강도를 상회하고 있다. 또한 일본에서도 분말도 $8,000\text{cm}^2/\text{g}$ 이상의 고로슬래그 분말이 생산되고 있는데 슬래그 치환율 50%의 경우에는 7일강도 부터 치환하지 않은 보통 콘크리트의 강도를 상회하고 있다.

2) 彈 性

고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 靜 彈 性 係 數는 일반적으

로 보통포틀랜드 시멘트만 사용한 콘크리트 보다도 약 10% 정도 작으며, 고강도 콘크리트에서는 반대로 최고 13% 정도 크게 나타난 결과도 있다.

건조수축 및 크리프에 대해서는 실험 데이터가 적고 동일 연구자임에도 실험시기에 따라 다른 결과를 발표하는 경우도 있다. 대체적으로 초기의 건조수축은 크지만 장기적으로 최종 수축변형은 보통포틀랜드 시멘트의 경우와 큰 차이가 없으며 미세하게 분쇄한 것은 오히려 작아진다.

3) 중성화

고로슬래그 치환율이 높고 분말도가 작은 저강도 콘크리트에서는 표면열화가 현저하고 콘크리트의 중성화 깊이가 철근의 표면까지 도달하게 되어 알칼리성 상실에 따른 콘크리트의 방청기능이 크게 떨어지게 된다.

혼합 직후 콘크리트내에서 고로슬래그 분말은 불활성인 석분과 같은 작용을 하므로 분말도를 크게 하여도 재령 1일까지는 그다지 효력이 없으나 3일부터는 약간의 강도증진을 보인다. 결합재로서의 기능이 약하기 때문에 양생의 정도가 중성화 속도에 대단히 큰 영향을 미친다.

4) 양생과 콘크리트 품질

일반적인 고로슬래그 분말은 경화 지연성을 가지고 있기 때문에 초기양생을 소홀히 하거나 중단하게 되면 강도발현이 현저히 저하한다. 따라서 최소한의 수화율을 수화초기에 확보하도록 습윤양생 기간을 설정하고 그 후에도 경화작용이 충분히 진행되어 소요의 강도를 갖는 콘크리트가 얻어지도록 양생기간을 정하도록 해야한다. 고로슬래그 분말을 혼입한 콘크리트의 경화는 온도에

민감하므로 특히 저온시의 보호가 대단히 중요하다.

5) 열적특성

고로슬래그 분말을 사용한 콘크리트의 수화발열 특성은 배합, 시공방법 외에 고로슬래그 분말의 염기도, 유리화율과 유리구조, 분말도, 석고 혼입량, 포틀랜드 시멘트와의 치환율, 사용한 포틀랜드 시멘트내의 크링카 광물 등의 지배를 받는다. 염기도나 유리화율 혹은 분말도가 작은 슬래그에서는 치환율에 따라 수화열이 낮아지나 이들의 값이 큰 경우에는 슬래그 치환율이 작은 범위에서는 오히려 보통포틀랜드 시멘트의 경우보다도 크게 되는 것으로 알려져 있다. 종래에는 30-50% 정도의 치환율 범위에서도 수화열의 저하가 나타난다고 알려져 있었으나 최근의 연구결과에 의하면 60% 정도의 치환율(분말도 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 것)까지는 수화열의 저하가 나타나지 않는다고 발표되고 있다.

6) 내화학적성

보통포틀랜드 시멘트는 수화시에 다량의 수산화칼슘을 방출하는 광물 (C_3S , C_3A 등)이나 유산염 또는 염화물의 존재하에 복염을 생성하는 광물(C_3A)을 함유하고 있으므로 화학저항성이 떨어진다.

그러나 고로슬래그 분말을 혼화재로 사용하면 치환율에 따라 이들 광물이 희석되므로 방출되는 수산화칼슘이 슬래그로부터 용출되는 실리케이트나 알루미늄네이트와 모세관공극 중에서 포졸란 반응을 일으켜 일부가 소비되므로 치밀한 조직구조를 형성하고 투수성을 감소시켜서 염류의 침투작용을 억제하는 등 내화학적성이 증가시킨다.

2. 플라이애쉬

화력발전소 등의 연소 보일러에서 대기중으로 방출하는 연소 폐가스 중에는 석탄재 부산물이 포함되어 있는데 이를 전기 집진기로 회수한 것 중 특정입도 범위의 粒狀殘砂를 플라이애쉬(fly ash)라 정의하며 포졸란계를 대표하는 혼화재 중의 하나이다.

플라이애쉬의 성질은 사용되는 탄의 종류(CaO 함량의 변화)와 연소로의 구조, 운전상태, 집진기의 형태 등에 따라 달라진다.

화력발전소에서 발생하는 전체 석탄재 중 80% 이상이 플라이애쉬로 배출된다. 따라서 석탄소비량에 따라 막대한 양의 플라이애쉬가 발생되므로 자원의 효율적 활용 차원에서 플라이애쉬의 이용기술 개발이 <표 5-4>와 같은 각 방면에 걸쳐 진행되고 있다.

그러나 국내에서 생산되는 플라이애쉬의 원료탄은 전량 수입에 의존하며 수입선도 원료탄의 국제가격에 따라 해마다 달라진다. 이 때문에 동일 화력발전소일 지라도 플라이애쉬의 화학조성이 해마다 다른 결과를 보이므로 콘크리트용 혼화재로서 실용성이 상당히 떨어져서 콘크리트 분야에 종사하는 기술자들 조차 사용을 기피하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 플라이애쉬가 혼화재로서 콘크리트에 미치는 영향을 규명하고 왕겨재와의 품질경쟁력을 비교하기 위해서 충남 서천 화력발전소에서 1996년도에 생산된 플라이애쉬를 수집하여 그 특성을 먼저 실험하였으며 이를 토대로 콘크리트에 미치는 영향을 실험분석하였다.

<표 5-4> 石炭災의 유효이용기술

분야	이용재료	이용기술의 현황
토목건축분야	시멘트 혼합재	플라이애쉬를 혼화재로써 사용하는 경우로, 보통의 시멘트보다 경제성면에서 우월하고 혼합을 30%까지로 제조 가능
	시멘트 점토제품	석탄회로 시멘트 원료 중의 하나인 점토를 대체하는 것으로 자원 절약적 측면이 강조
	콘크리트용 혼합재	각종 콘크리트에 공기연행제를 조절하여 20-30% 혼합 가능 RCC 사용의 경우 30-50% 혼합가능
	콘크리트용 골재	크링커를 콘크리트용 세골재로써 사용 가능
	아스팔트 충전재	플라이애쉬를 아스팔트 포장에 사용하는 충전제(석회석분)의 대체로써 사용 가능
	인공 경량골재	석탄회에 발포제 및 점토 등의 바인더를 첨가하여 소성한 것
	단열 흡음재	석탄회를 부원료(돌로마이트 등)와 혼합 가열용해하여 제조
	신경화재	석탄회를 석고·철강슬래그와 혼합, 첨가재를 가하여 고열처리
	로반재	크링커를 도로의 로반재로써 이용
	기와 및 세라믹 제품	기와의 경우 점토 대체한도 15%, 품질변동 고려시 10% 옥내저장 시설 필요
비료분야	성토·매립조성	해면매립(간척사업), 농지조성, 택지조성, 매립이용
	토양개량재 (green ash)	플라이애쉬를 특수비료로써 이용, 강산성·유효공극이 작은 토양의 개량에 적절
	규산비료	석탄회를 가열처리하여 제조 작물의 耐病蟲性에 이용
	유기질 비료	석탄회를 유기질 폐기물과 혼합 발효시켜 이용

가. 플라이애쉬의 성질

1) 화학적 성질

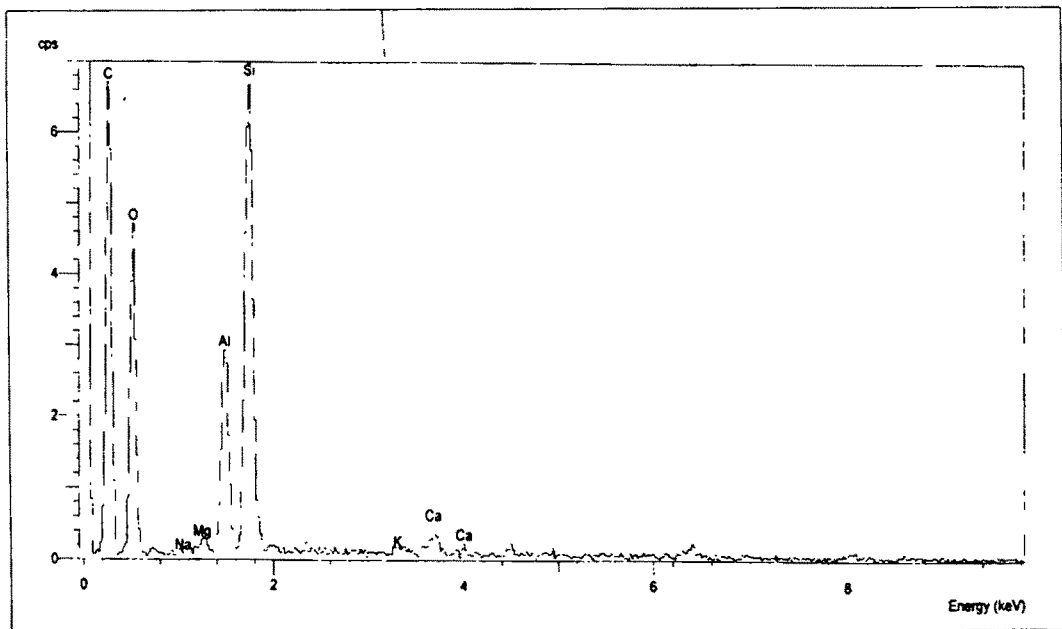
<그림 5-4>는 서천화력발전소에서 1996년도에 생산된 플라이애쉬의 EDS분석 결과이다. 플라이애쉬의 화학조성은 그 원료탄의 조성에 따라 달라지나 일반적으로 SiO₂가 60% 정도를 점하여 가장 많고, Al₂O₃ 25% 정도, Fe₂O₃, 탄소(C) 등이 함유되어 있어 슬래그에 비하여 CaO 가 적고 SiO₂, Al₂O₃가 풍부한 특징이 있다.

플라이애쉬 그 자체는 수경성이 없지만 그것에 함유되어 있는 가용성의 규산 등이 시멘트 수화물인 수산화칼슘과 상온에서 서서히 2차 반응하여 불용성의 안정한 규산칼슘 수화물등을 생성한다. 이와같은 성질을 포졸란 반응이라 하며 플라이애쉬는 인공포졸란의 대표적인 것이다.

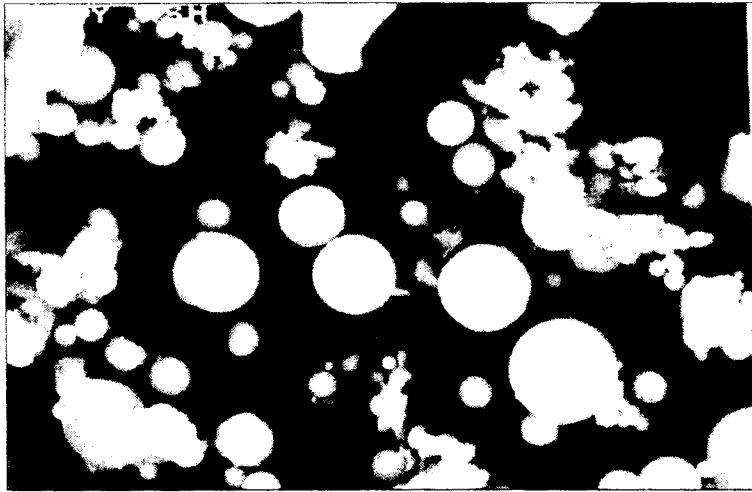
2) 물리적 성질

서천화력발전소에서 1996년도에 생산된 플라이애쉬의 물리적 특성을 실험한 결과 진비중은 2.17로서 왕겨재와 비슷하게 나타났으며, BET시험기에 의한 비표면적은 $11.26 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 나타났다. 레이저 분석에 의한 입경분포 실험 결과 평균입경은 $16 \sim 17 \mu\text{m}$ 의 범위에 있었으며 $10 \mu\text{m}$ 이하가 35 - 38%이며 최대입경의 크기는 $700 \mu\text{m}$, 입경의 범위는 $0.045 \sim 700 \mu\text{m}$ 범위로 나타났다. 또한 진비중은 2.23 ~ 2.24(평균 2.23)으로 나타났는데 이는 왕겨재 보다는 약 5% 크며 실리카함과 거의 비슷한 수준이다.

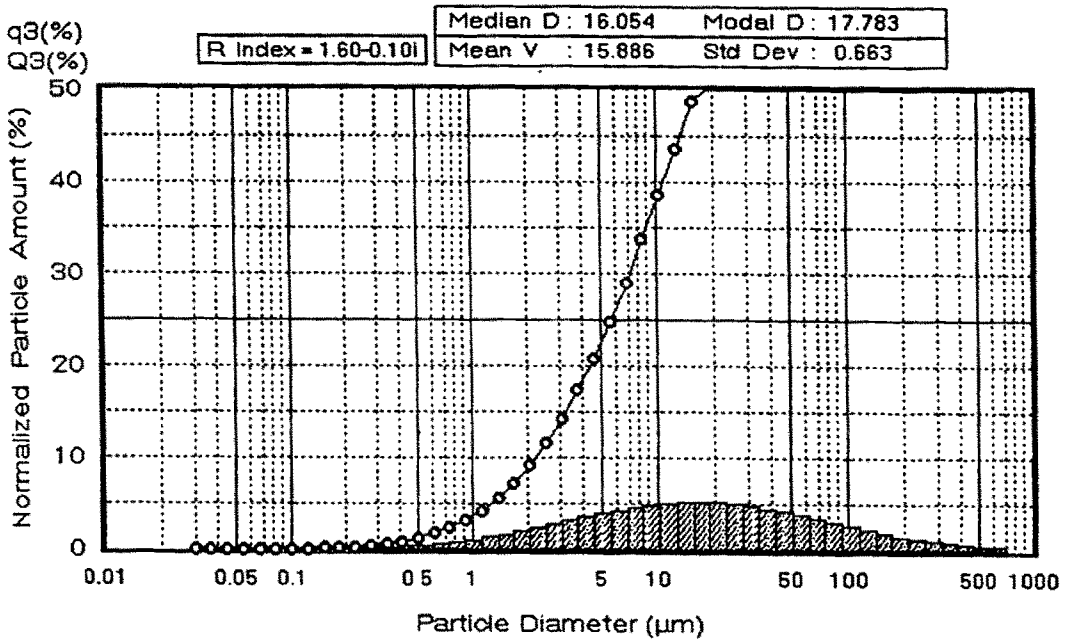
<그림 5-5>는 1996년도에 서천화력발전소에서 생산된 플라이애쉬를 전자현미경에 의한 입경형상을 분석한 결과이며 <그림 5-6>은 레이저분석에 의한 입경분포곡선이다. <그림 5-5>로부터 플라이애쉬는 분쇄의 절차를 밟지 않으므로 입형이 원형이 많다는 것을 발견할 수 있으며 이는 플라이애쉬를 콘크리트용 혼화재료로 사용할 때 시공성을 높이는 역할을 한다.



<그림 5-4> 플라이애쉬의 EDS 분석 결과



<그림 5-5> 플라이애쉬의 전자현미경상



<그림 5-6> 플라이애쉬의 입경분포 곡선

나. 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 일반적 특성

1) 유동성의 개선

플라이애쉬는 구(球)형의 미립자가 콘크리트 중에서 볼베어링과 같은 작용을 하므로 워커빌리티를 개선하여 소요 반죽질기

를 얻기 위한 단위수량을 감소시키고 블리딩(bleeding) 현상도 감소된다. 이러한 경향은 플라이애쉬의 품질, 치환율, 콘크리트 배합, 세골재의 입도 등에 따라 달라지지만 치환율 25%의 경우에 7% 정도 단위수량을 감소시킨다는 보고도 있다.

2) 장기강도의 개선

플라이애쉬 혼입 콘크리트의 강도는 초기재령에서는 보통의 콘크리트 보다 낮지만 재령이 길어짐에 따라 포졸란 반응의 증가로 장기강도가 증가한다. 또한 플라이애쉬의 포졸란 반응은 온도가 높아짐에 따라 활성화되어 강도증진 효과는 온도가 높을수록 현저해 진다.

3) 열적특성

플라이애쉬는 시멘트의 수화생성물인 수산화칼슘과 2차반응하여 경화성을 발휘하지만 그 반응속도는 시멘트와 비교하여 상당히 낮고 수화발열량도 적다. 따라서 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트는 수화열에 의한 균열 방지 목적으로 댐이나 원자력발전소 등과 같은 매스콘크리트 공사에 치환율 10-20%로 많이 이용되고 있다.

4) 알칼리골재반응의 억제

플라이애쉬가 포졸란 반응을 하므로 콘크리트 중의 수산화칼슘을 감소시켜 세공용액 중에서 알칼리-골재 반응에 관계하는 수산화 이온을 감소시키고 비표면적이 큰 저칼슘형 규산칼슘수화물(CSH)을 생성시킨다. 이에따라 알칼리 이온의 흡착 및 경화된 시멘트 페이스트 조직이 치밀해져 물의 이동속도가 저하되고 그 결과 알칼리-골재 반응에 의한 콘크리트 구조물의 조기 붕괴현상을 방지한다.

이러한 효과는 왕겨재를 혼입한 경우와 동일한 효과를 나타내나 5% 정도의 소량 첨가에서는 팽창량이 오히려 증가하여 알칼리-골재 반응을 촉진한다는 보고서도 있다.

5) 내화학적성

플라이애쉬를 첨가함에 따라 시멘트량이 상대적으로 감소하고 포졸란 반응으로 시멘트 중의 C_3A 및 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)이 감소하며 이에 따라 이들과 황산염이 반응하여 생성시키는 에트링가이트(ettringite)의 양이 감소됨으로써 에트링가이트의 생성에 따른 팽창압이 완화되기 때문에 황산염에 대한 저항성이 증가한다.

다. 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 문제점

1) 초기강도 발현 지체 및 응결시간의 지연

플라이애쉬를 첨가한 콘크리트는 일반콘크리트에 비해 응결시간이 늦어지며 지연정도는 플라이애쉬의 미연탄소와 산화바나듐(V_2O_5) 성분 함량이 많을수록 현저해진다. 바나듐 성분은 화력발전소에서 석탄과 중유를 혼용할 때 플라이애쉬에 포함되어 생성된다.

그러므로 재령초기의 강도가 작게 나타나므로 공사기간이 장기화되며, 장기강도가 증가하기 위해서는 포졸란 반응이 충분히 이루어지도록 초기 습윤양생과 양생온도 관리가 중요하다.

2) 연행공기량(運行室氣量)의 감소

플라이애쉬 중의 未燃炭素紛에 의해 AE제 등이 흡착되어 연행공기량이 현저히 감소하므로 목표공기량을 얻기 위해서는 일반적으로 AE제의 사용량이 증가한다.

3) 플라이애쉬의 固結

플라이애쉬는 그 자체의 수경성은 거의 없으나 공기 중의 수분과 반응하여 응집되고 가압상태에서 고결되는 현상이 있으므로 사용상 취급이 곤란하다.

3. 실리카흄 (Silica Fume)

실리카흄은 실리콘이나 페로실리콘 등의 규소합금을 전기 아크식 爐에서 제조할 때 排出가스에 부유하여 발생하는 부산물의 총칭이다. 규소합금의 원료로서 규석, 목편, 철가루 등과 환원제로서 코우크스를 전기로에 투입하여 약 2,000℃의 고온으로 페로실리콘을 제조하게 된다. 이때 중간생성물인 SiO가 가스화하고 이것이 공기에 의해 산화하여 SiO₂로 되며 다시 응축하여 초미립자로 생성된다. 생성된 초미립자를 전기집진장치를 이용하여 회수함으로써 실리카흄이 얻어지는 것이다.

실리카흄은 주로 소련, 미국, 노르웨이 등 수력자원이 풍부한 나라에서 생산되며 1986년도의 전 세계적 생산량은 약 160만톤 정도이었다. 우리나라에서는 실리카흄이 생산되지 않으므로 전량 수입에 의존하고 있으며 1997년도 현재 국내의 시판가격은 1kg당 900원에 형성되어 있다.

가. 실리카흄의 성질

1) 화학적 성질

<표 5-5>는 실리카흄의 일반적인 화학조성을 나타내고 있다. 포졸란 재료로서 적합하지 않은 CaSi와 SiMn으로부터 생성되는 실리카흄을 제외하면 주성분의 80% 이상이 SiO₂로 구성되어 있다. 그러나 동일한 규소합금 제조 원료를 사용할 지라도 爐의 조건 등에 따라 화학성분이 서로 다른 실리카흄이 생산된다.

<표 5-5> 각종 규소 합금 제조 원료별 부산되는 실리카흙의 화학조성

성분	Si	FeSi -90%	FeSi -75%	White Silica Fume FeSi-75%	FeSi -50%	FeCrSi	CaSi	SiMn
SiO ₂	94-98	90-96	86-90	90	84.1	83	53.7	19
Fe ₂ O ₃	0.02-0.15	0.2-0.8	0.3-5.0	2.9	8.0	1.0	0.7	3.9
Al ₂ O ₃	0.1-0.4	0.5-3.0	0.2-1.7	1.0	0.8	2.5	0.9	5.5
CaO	0.1-0.3	0.1-0.5	0.2-0.5	0.1	1.0	0.8	23.2	12.4
MgO	0.2-0.9	0.5-1.5	1.0-3.5	0.2	0.8	7.0	3.3	2.4
Na ₂ O	0.1-0.4	0.2-0.7	0.3-1.8	0.9	-	1.0	0.6	1.1
K ₂ O	0.2-0.7	0.4-1.0	0.5-3.5	1.3	-	1.8	2.4	8.7
C	0.2-1.3	0.5-1.4	0.8-2.3	0.6	1.8	1.6	3.4	3.7
S	0.1-0.3	0.1-0.4	0.2-0.4	0.1	-	-	-	-
MnO	0.1	0.1-0.2	0.02	-	-	0.2	-	28.5
L.O.I	0.8-1.5	0.7-2.5	2.0-4.0	-	3.9	2.2	7.9	7.5

본 연구에서는 1996년도 미국산 수입품으로서 국내에서 널리 사용되고 있는 실리카흙을 수집하여 EDS분석을 반복하였으며 그 결과 중의 하나를 <그림 5-7>에 나타냈다. SiO₂는 주로 비결정질이나 X-Ray 회절분석 결과 불순물로서 α-SiO₂, MgFe와 MgFe₂O₄를 함유하고 있고 그 함유량도 상당한 차이를 보인다.

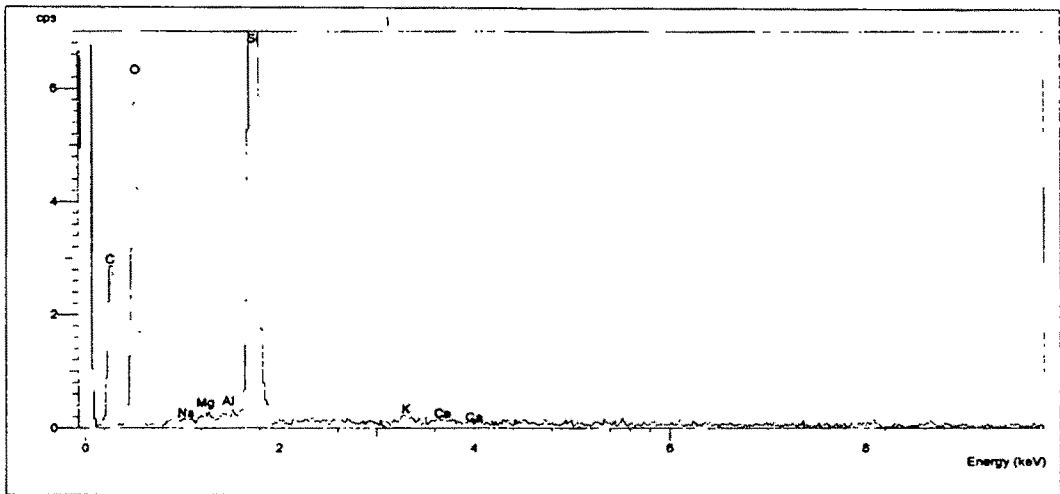
2) 물리적 성질

1996년도 미국산으로서 국내에서 널리 시판되는 실리카흙을 구입하고 입형을 분석하기 위해서 전자현미경상을 반복 관찰하였으며 0.04μm까지 측정할 수 있는 레이저 분석기를 이용하여 반복적으로 입경분포를 분석하였다. 또한 BET시험기를 이용하여 비표면적을 실측하였으며 이러한 결과들 중의 하나씩을 <그림 5-8> 및 <그림 5-9>에 대표적으로 나타내었다.

레이저 분석기로 분석한 결과에 의하면 최대입경은 700μm, 평균입경은 15-35μm, 10μm 이하의량은 15-36%의 범위에 있으며, 44μm 잔분은 27-39% 정도이다. 또한 BET 시험기에 의한 비표면적의 크

기는 $31.37 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 나타났으며 진비중을 실측한 결과 2.20 - 2.21로 나타났는데 이는 왕겨재의 진비중에 비해서 약 3% 큰 값이다.

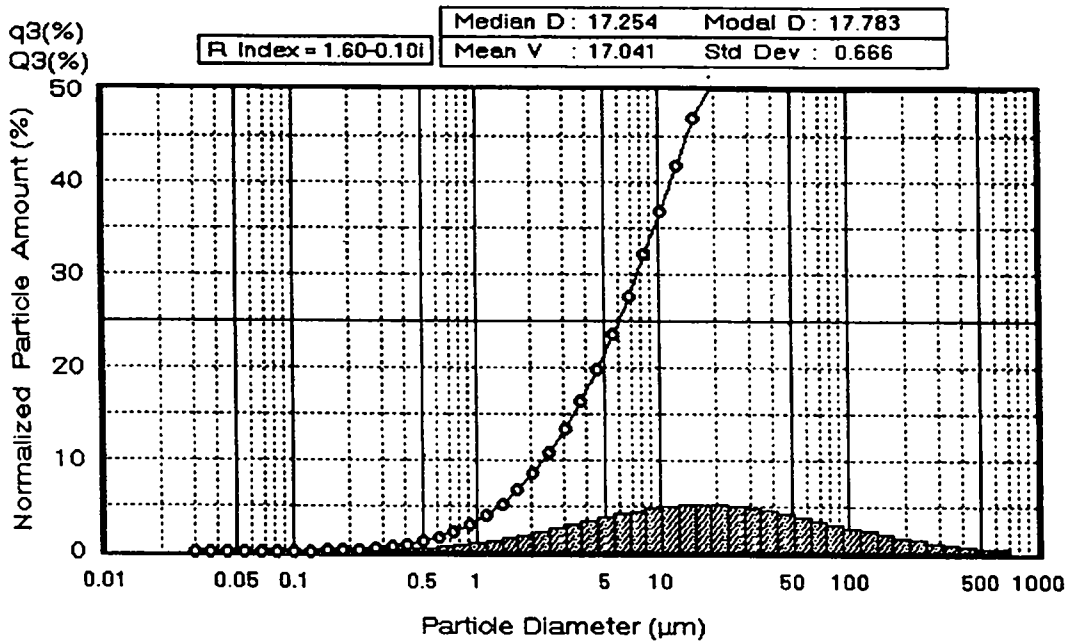
또한 실리카흙의 입형은 분쇄공정을 거치지 않은 관계로 <그림 5-8>에 나타난 바와 같이 약 90% 이상이 구형으로 구성되어 있어 왕겨재가 파면(破面)을 가진 것과 대비된다.



<그림 5-7> 실리카흙의 EDS분석 결과



<그림 5-8> 실리카흙의 전자현미경상



<그림 5-9> 실리카흙의 입경분포 곡선

나. 실리카흙을 혼합한 콘크리트의 성질

1) 굳지 않은 콘크리트의 성질

실리카흙의 혼합량이 시멘트중량의 10-20% 정도에서 고강도 및 고내구성을 갖는 콘크리트를 제조하기 위해서는 물-결합재비를 0.30 이하로 유지시켜야 하며 이를 위해서는 고성능 감수제를 필수적으로 사용하여야 한다고 보고되고 있다. 실리카흙은 비표면적이 매우 크고, 미연소 탄소를 함유하고 있기 때문에 혼합률이 증가함에 따라 AE제의 사용량도 증가한다.

실리카흙을 혼합하면 실리카흙이 시멘트 입자 사이의 빈 공간을 채워 불리딩수 관의 크기를 감소시키고 결합재와 골재사이의 접촉면을 증가시켜 콘크리트의 점착력을 증가시키고 재료분리를 감소시키므로, 콘크리트의 유동성이 변화하여 불리딩과 재료분리를 감소시킨다.

2) 경화한 콘크리트의 성질

실리카흙은 주성분이 비결정질의 SiO_2 로서 Ca(OH)_2 와 반응하여 C-S-H를 생성하고, 플라이애쉬 등의 다른 포졸란 재료와 달리 조기재령에서도 포졸란 반응이 발생하여 보통의 콘크리트 보다 강도가 증가하며 실리카흙의 혼입률이 증가할 수록 압축강도도 증가한다.

물-결합재비가 동일하면 실리카흙 혼입량의 크기에 관계없이 포졸란 반응에 의해 $0.1\mu\text{m}$ 이상의 큰 공극은 작아지고 미세한 공극이 많아져서 총공극량은 거의 비슷해 진다.

실리카흙을 혼입한 콘크리트의 동결융해 저항성은 실리카흙의 종류, 시험방법, 혼입률, AE제의 사용유무 및 배합 등에 따라 많은 차이를 보인다.

물-결합재비 0.33-0.35, 실리카흙의 혼입률이 15%인 콘크리트는 염산, 황산 및 유기산 등에 저항성이 높다. 또한 CO_2 에 의해 유발되는 콘크리트의 중성화 정도는 실리카흙 5% 혼입시 35%정도 감소되고, 20% 혼입시에는 중성화가 거의 발생하지 않는다는 보고도 있으나 혼입률이 높아지면 액상의 pH가 저하되기 때문에 혼입량에 대해서는 충분한 검토가 필요하다.

실리카흙을 콘크리트에 혼합하면 수화열이 저감되고, 강도발현이 현저하며, 수밀성, 화학저항성 및 내구성을 향상시킬 수 있어 고강도 및 고내구성의 콘크리트 제조에 효과적이다. 아울러 재료분리와 블리딩이 감소되어 수중 콘크리트로서의 활용가치도 크다.

그러나 단위수량의 증가, 플라스틱 수축균열의 발생 등의 문제점과 전량을 수입에 의존해야하는 우리나라로서는 품질변동, 고가의 수송비용 등 여러 가지 문제점이 있다.

제 3 절 상업용 기성제품 혼화재 첨가 콘크리트의 특성

본 연구성과의 조기 실용화를 위해서는 기존에 널리 사용되고 있는 혼화재로서 플라이애쉬나 고로슬래그 또는 실리카흄에 비해서 비교 우위적 품질 경쟁력이 있음을 우선적으로 규명하여야 한다. 한편 콘크리트의 강도특성 등은 실험에 사용하는 시멘트의 양부, 골재량과 골재의 조립을, 단위 시멘트량, 배합수량 등에 많은 영향을 받는다. 동일한 시멘트 회사에서 동일한 시기에 생산한 시멘트일 지라도 실험에 투입되는 시점이 다르면 시멘트가 대기중의 수분과 반응하는 정도가 다르므로 강도특성에서 차이가 나타난다.

그러므로 기성제품 혼화재와 왕겨재가 혼화재로서 콘크리트에 미치는 우월적 품질특성을 비교분석하기 위해서는 동일 회사에서 동일한 시점에 생산한 시멘트를 구입하여 동일한 시기에 동일한 배합으로 비교실험을 수행해야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 왕겨재의 품질특성 실험에 사용할 시멘트와 동일한 시멘트를 구입하여 기성제품 혼화재의 품질특성을 실험하고자 실험계획을 수립하였다.

이를 위해서 먼저 기성제품 혼화재의 품질특성 실험에 사용할 각각의 재료에 대하여 물리적 특성을 먼저 실측하고 기성제품 혼화재의 치환율에 따른 재령별 강도특성과 시공성을 단위결합재량별로 실험분석하기로 하였다.

1. 실험 재료의 품질 특성

가. 시멘트

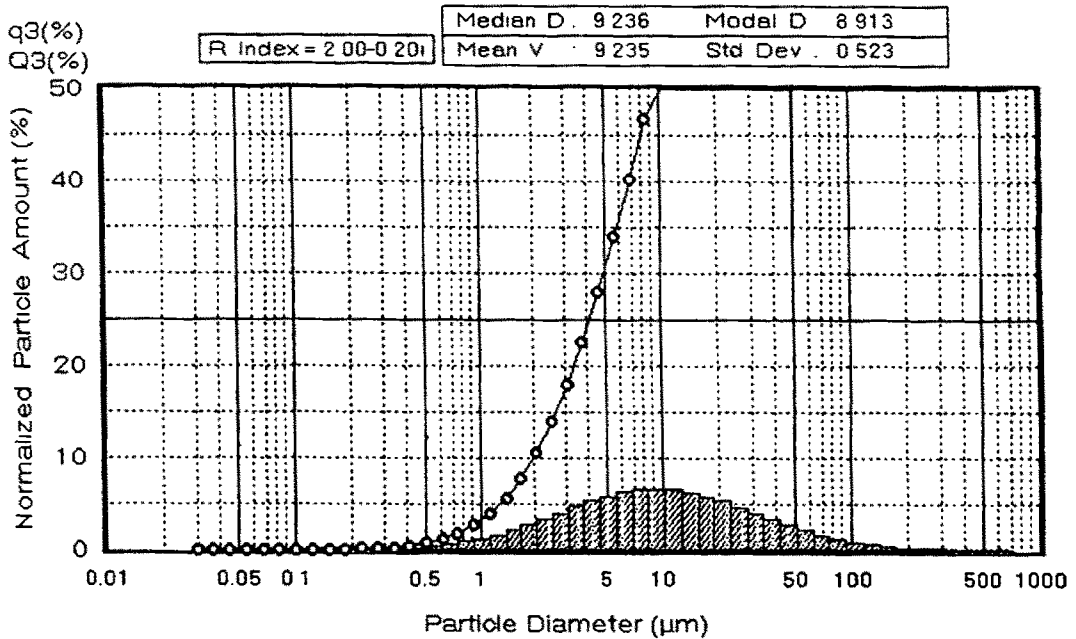
혼화재료의 강도특성 실험에 사용한 시멘트는 시중에서 구입한 보통포틀랜드 시멘트(A사 제품)을 사용하였으며 물리적 품질특성에 대한 실험결과는 <표 5-6>이다.

연구실험에 사용한 보통 포틀랜드시멘트를 0.04 μ m까지 측정할 수 있는 레이저분석기를 이용하여 입경분포를 분석한 결과는 <그림

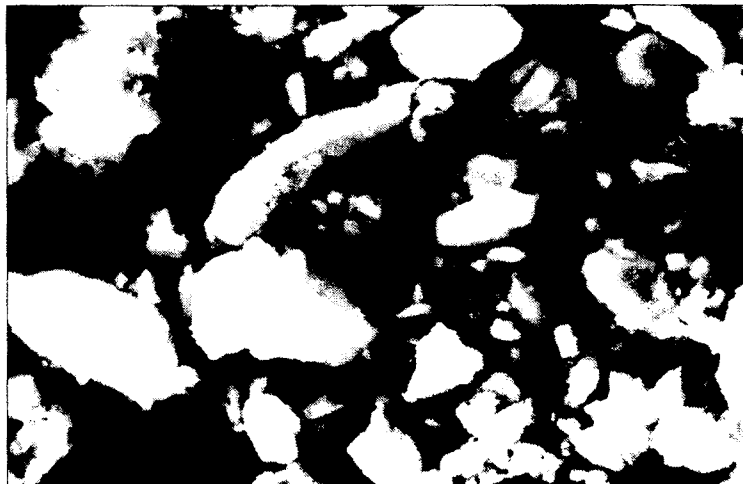
5-10>이며 전자현미경으로 상을 관찰한 결과는 <그림 5-11>이고 EDS 분석 결과는 <그림 5-12> 이다.

<표 5-6> 시멘트의 물리적 특성

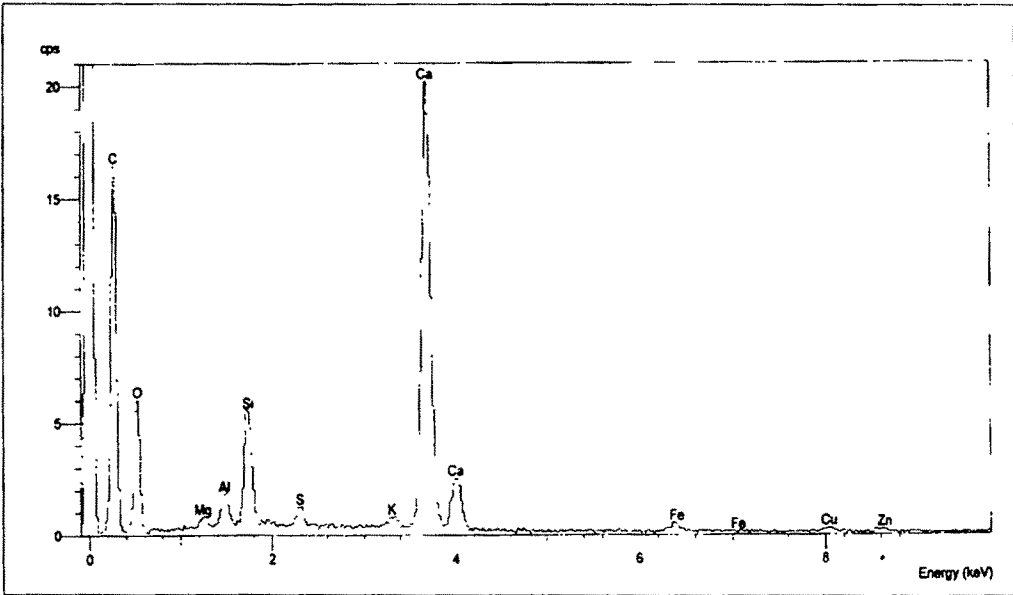
종 류	평균 비중	응결시간		분말도 (cm ³ /g)	평균입경 (μm)	압축강도(kg/cm ²)		
		초결(min)	중별(hr)			3 일	7 일	28 일
보통포틀랜드	3.15	228	6.15	3.338	8 ~ 10	194	219	208



<그림 5-10> 보통포틀랜드 시멘트의 입경분포



<그림 5-11> 보통포틀랜드 시멘트의 전자현미경상



<그림 5-12> 보통포틀랜드 시멘트의 EDS분석 결과

나. 잔골재 및 굵은골재

본 연구에 사용된 잔골재는 경기도 여주군 남한강산 하천사를 구입하여 사용하였으며, 굵은골재는 경기도 안성군에서 생산하는 부순돌을 이용하였다. 이들 각각의 물리적 특성을 실험한 결과를 정리한 것이 <표 5-7> 및 <표 5-8> 이다.

<표 5-7> 잔골재의 물리적 특성

평균 비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (ton/m ³)	200번채 통과량 (%)	조립율
2.55	1.08	1.558	1.8	2.69

<표 5-8> 굵은골재의 물리적 특성

최대치수 (mm)	평균 비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (ton/m ³)	마모율 (%)	조립율
19	2.55	1.08	1.558	28.5	2.69

다. 혼화제

본 연구에서 사용한 화학 혼화제는 고강도 및 고유동 콘크리트용으로 사용되고 있는 나프탈린계의 고성능 AE감수제(표준형, K사)로서 이의 품질특성을 실험한 결과가 다음 <표 5-9> 이다.

<표 5-9> 화학혼화제의 품질 특성

평균 비중	PH	고형분 (%)	표준사용량(%) (시멘트중량비)	주 성분	비고
1.21	8	41	0.2 ~ 2.0	Sodium Salt of a Sulfonate Napthalene	액상

라. 혼화제

본 연구에서 사용한 혼화제는 시중에서 시판되는 고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카흙으로서 이들의 품질특성을 실험한 결과를 정리한 것이 <표 5-10>이다.

<표 5-10> 혼화제의 품질 특성

품목	원산지	비중	BET비표면적(m ² /g)	평균입경(μm)
고로슬래그	전남 광양제철소	2.88 ~ 2.90	7.88	10 ~ 16
플라이애쉬	서천 화력발전소	2.23 ~ 2.24	11.26	16 ~ 17
실리카흙	미국	2.20 ~ 2.21	31.37	15 ~ 35

고로슬래그에 대한 EDS분석 결과는 <그림 5-1>이며 전자현미경상은 <그림 5-2>이며 레이저분석 결과는 <그림 5-3> 이다. 또한 플라이애쉬에 대한 EDS분석 결과는 <그림 5-4>이고 전자현미경상은 <그림 5-5>이며 레이저분석 결과는 <그림 5-6> 이다. 아울러 실리카흙에 대한 EDS분석 결과는 <그림 5-7>에 전자현미경상은 <그림 5-8>에 레이저분석 결과는 <그림 5-9>에 나타냈다

2. 실험방법

콘크리트 구조물의 품질을 좌우하는 요소는 여러 가지가 있다. 그 중에서 최근에 나타나고 있는 건설시장에서의 심각한 인력난 등에 따른 기계화 시공의 급속한 확산을 고려하면 콘크리트에

서 재료의 분리가 나타나지 않으면서 동시에 시공성을 확보하는 것은 매우 중요한 요소중의 하나이다.

이에 따라 본 연구에서는 기계화 시공을 겨냥하여 목표슬럼프를 21 ± 3 cm로 설정하고 재료의 분리가 나타나지 않는 범위에서 단위결합재량별·재령별 표준공시체 ($\phi 100 \times 200$ 또는 $\phi 150 \times 300$)를 제작하고 표준양생(양생온도 $22 \pm 2^\circ\text{C}$)을 시킨 후 재령별로 압축강도를 시험하고 그 결과를 왕겨재 혼입 콘크리트의 그것과 비교분석할 수 있도록 <표 5-11>과 같은 실험범위를 설정하였다.

<표 5-11> 기존 혼화재 특성 실험범위

품 목	단위결합재량(kg/m ³)	재령일수(일)	혼입율(%)	양생방법	혼화재 혼입율(%)	목표슬럼프(cm)	반복수(회)	실험항목
고로슬래그	300, 400, 500, 600	3,7,28	0,10,20,30	표준양생	0.5 ~ 2.0	21±3	6	압축강도
40,50,60								
0, 5,10,15			표준양생	0.5 ~ 2.0				
20,25,30								
실리카흙			0, 5,10,15		표준양생	0.5 ~ 2.0	21±3	6
		20,25,30						

3. 실험결과 분석

주어진 실험범위 내에서 재령별·단위결합재량별 고로슬래그를 혼입하지 않은 보통 콘크리트의 압축강도에 대한 고로슬래그로 치환한 콘크리트의 압축강도 비율을 재령별·혼입율별로 요약 정리한 것이 다음 <표 5-12>이다.

또한 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트에 대해서 재령별·단위결합재량별·혼입율별로 동일하게 정리한 것이 다음 <표 5-13>이며, 실리카흙을 대상으로 동일하게 정리한 것이 다음 <표 5-14>이다.

<표 5-12> 고로슬래그 혼입 콘크리트의 압축강도비

재령 일수	혼입율 (%)	단위 결합재량별 압축강도비(%)				비고
		300 kg/m ³	400 kg/m ³	500 kg/m ³	600 kg/m ³	
3일	10	90	91	109	107	보통 콘크리트의 재령별 압축강도에 대한 고로슬래그 혼입 콘크리트의 재령별 압축강도비 (%)
	20	92	106	136	110	
	30	113	117	130	116	
	40	80	72	137	89	
	50	65	65	109	85	
	60	42	53	72	89	
7일	10	64	105	107	102	
	20	57	103	117	89	
	30	80	96	124	105	
	40	57	68	118	85	
	50	58	87	121	78	
	60	45	82	121	82	
28일	10	56	75	128 [★]	107 [☆]	
	20	57	93	126	102	
	30	62	84	121	104 [☆]	
	40	53	67	106	93	
	50	49	85	109 [☆]	91	
	60	37	82	97	85	

주) ★ : 고로슬래그 최적혼입비율, ☆ : 고로슬래그 최대혼입율

<표 5-13> 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 압축강도비

재령 일수	혼입율 (%)	단위 결합재량별 압축강도비(%)				비고
		300 kg/m ³	400 kg/m ³	500 kg/m ³	600 kg/m ³	
3일	5 %	99	92	94	84	보통 콘크리트의 재령별 압축강도에 대한 고로슬래그 혼입 콘크리트의 재령별 압축강도비 (%)
	10 %	103	79	109	85	
	15 %	99	111	101	73	
	20 %	60	79	79	75	
	25 %	34	79	72	70	
	30 %	31	70	65	60	
7일	5 %	61	50	80	95	
	10 %	67	59	95	88	
	15 %	59	68	93	77	
	20 %	53	50	91	83	
	25 %	37	49	87	75	
	30 %	38	39	72	76	
28일	5 %	60	59	93	77	
	10 %	75	56	90	81	
	15 %	61	77	84	76	
	20 %	56	58	86	68	
	25 %	38	56	94	67	
	30 %	45	48	90	79	

<표 5-14> 실리카흙 혼입 콘크리트의 압축강도비

재령 일수	혼입율 (%)	단위 결합재량별 압축강도비(%)				비 고
		300 kg/m ³	400 kg/m ³	500 kg/m ³	600 kg/m ³	
3일	5 %	61	83	120	107	보통 콘크리트의 재령별 압축강도에 대한 실리카흙 혼입 콘크리트의 재령별 압축강도비 (%)
	10 %	61	116	122	102	
	15 %	91	118	112	93	
	20 %	66	121	109	81	
	25 %	57	113	98	69	
	30 %	58	87	83	54	
7일	5 %	53	98	112	115	
	10 %	62	132	120	105	
	15 %	81	106	115	92	
	20 %	62	98	108	81	
	25 %	56	96	100	72	
	30 %	58	73	88	61	
28일	5 %	55	99	104	115 [★]	
	10 %	63	120 [★]	110 [★]	104 [☆]	
	15 %	72	112	101 [☆]	90	
	20 %	61	103 [☆]	99	92	
	25 %	62	93	78	79	
	30 %	60	86	96	74	

주) ★ : 실리카흙 최적혼입비율, ☆ : 실리카흙 최대혼입율

플라이애쉬는 단위결합재량의 크기에 관계없이 재령 28일 이내에는 보통 콘크리트의 압축보다 작게 나타난다. 이는 플라이애쉬를 혼입시에는 단기강도 증진효과가 나타나지 않는다는 것을 의미하며 일반적으로 알려져 있는 결과와 일치한다. 따라서 플라이애쉬를 혼화재료로 사용하고자 할 경우 강도발현이 늦기 때문에 거푸집의 제거 시기를 늦추어야 하며 이는 곧 공사기간이 장기간 소요된다는 것을 의미한다. 또한 재령 28일을 기준으로 할 때 플라이애쉬의 최적 혼입비율과 최대 혼입비율은 나타나지 않았다.

한편 고로슬래그는 단위결합재량이 500kg/m³ 이상인 경우부터 재령 28일의 압축강도가 고로슬래그를 혼입하지 않은 보통의 콘크리트 보다 증가하기 시작한다. 단위결합재량이 500kg/m³ 및 600kg/m³ 일 때 재령 28일의 압축강도를 최대화하는 고로슬래그의 혼입

비(최적 혼입비)는 시멘트 중량의 10%로 동일하게 나타났으며 그때의 압축강도는 보통 콘크리트의 그것에 비해서 7 - 28% 증가하는 것으로 나타났다. 재령 28일 압축강도를 기준으로 삼을 때 보통 콘크리트의 재령 28일 압축강도보다 조금이라도 크게 나타나는 최대의 한계상태 혼입비 즉, 고로슬래그의 최대혼입비의 크기는 단위결합재량이 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우에는 시멘트 중량의 50%로 나타났으나 단위결합재량이 $600\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우 시멘트 중량의 30%로 나타났다.

실리카흙을 혼화재로 혼입할 시는 단위결합재량이 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 이상일 때부터 비로소 재령 28일의 압축강도가 실리카흙을 혼입하지 않은 보통의 콘크리트 보다 증가한다. 단위결합재량이 $400 - 500\text{kg}/\text{m}^3$ 일 때 재령 28일의 압축강도를 최대화하는 실리카흙의 최적 혼입비는 시멘트 중량의 10%로 나타났으며, 단위결합재량이 $600\text{kg}/\text{m}^3$ 일 때는 시멘트 중량의 5%로 나타났다. 또한 최적 혼입비율의 실리카흙을 혼입할 시는 재령 28일의 압축강도가 보통 콘크리트의 그것에 비해서 10 - 25% 증가하는 것으로 나타났다. 재령 28일 기준 실리카흙의 최대 혼입비율은 단위결합재량이 $400\text{kg}/\text{m}^3$, $500\text{kg}/\text{m}^3$ 및 $600\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우에 각각 시멘트 중량의 20%, 15% 및 10%로 나타났다.

이러한 결과는 저온제어(600°C)로 소각한 다음 평균입경이 20μ 되도록 Los Angeles 마모시험기로 1시간 동안 분쇄한 비정질의 왕겨재를 혼입하여 실험한 결과와 매우 비슷하다.

상업화에 성공한 기존의 혼화재료가 정제된 생산공정에서 엄밀한 품질관리를 거쳐 생산된 것임에도 불구하고 비정질의 왕겨재를 혼화재료로 사용하여 실험한 경우와 매우 비슷하게 나타났다는 것은

왕겨재가 실리카흙에 비해서 혼화재로서 품질의 경쟁력이 있다는 것을 나타내고 있다.

제 6 장 왕겨재 혼입 모르터의 강도특성 및 시공성

제 1 절 서 언

콘크리트는 물과 시멘트가 수화반응하여 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)을 생성시키고, 이 수산화칼슘이 자갈과 모래 사이의 공극을 채우며 자갈과 모래의 표면을 강하게 결속하여 높은 강도를 발휘한다. 일반적으로 콘크리트 공학에서는 물과 시멘트만의 혼합체를 시멘트풀(Cement Paste)이라 칭하고 시멘트풀과 모래가 섞인 것을 모르터라 정의하며 모르터와 자갈이 혼합된 것을 콘크리트라 정의한다.

한편 본 연구는 왕겨재를 콘크리트용 혼화재료로 활용하는 기술을 개발하는 것이 주요 목적이므로 본 연구 성과의 조기 실용화를 위해서는

첫째, 품종별 산지별 지역별 왕겨재 차이가 콘크리트의 제반 특성에 미치는 영향이 없다는 것을 규명해야 한다.

둘째, 왕겨재가 기존의 상업용 혼화재에 비해서 가격과 품질에서 비교우위적 경쟁력을 지니도록 왕겨 소각방법이나 분쇄방법 또는 혼입율의 크기와 같은 기술을 개발 또는 규명하여야 하며

셋째, 기존에 널리 사용되고 있는 혼화재로서 플라이애쉬나 고로슬래그 또는 실리카흙에 비해서 비교 우위적 품질 경쟁력과 가격 경쟁력이 있음을 규명하여야 한다.

콘크리트는 자갈, 모래, 물, 시멘트 및 혼화재료 등 여러 가지 재료로 이루어진 혼합체이므로 사용 재료의 다양성 때문에 각각의 재료들이 갖는 품질(입도, 비중 등) 특성이 조금만 달라져도 콘크리트의 시공성이나 강도특성에서 큰 편차를 보이게 된다.

이 중에서 모래와 자갈은 콘크리트 전체 체적의 약 70%를 점유하

는 최대의 재료이며 자연에서 생산되므로 동일한 산지나 공장에서 동일한 시점에 생산하였다 할지라도 입경분포 등에서 차이가 나타나므로 콘크리트의 강도특성이나 시공성 등의 품질특성에 큰 편차를 보이게 된다.

따라서 소각온도의 차이나 산지별·품종별 왕겨재 차이가 콘크리트의 강도특성·시공성에 미치는 영향과 같은 미세한 차이점을 규명하기 위해서는 실험에 사용되는 구성재료들은 가능한 한 품질변동폭이 작아야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 품질변동 폭이 상대적으로 큰 자연산 모래와 자갈은 사용하지 않고 대신 항상 특정한 비중과 입도만 갖도록 특수하게 제조된 표준모래와 물 및 시멘트만 사용한 모르터의 강도특성 실험(KSL5104)을 실시하기로 하였다. 소각온도별·품종별·지역별 왕겨재가 혼화재로서 품질특성에 차이가 있는지 여부를 규명하는 것이 주목적이므로 먼저 소각온도별·품종별·지역별 왕겨재 각각을 L.A. 마모시험기를 이용하여 15, 30, 45, 60분 동안 분쇄하였다.

KSL5104의 규정에 따라 표준모래와 보통포틀랜드 시멘트 및 소각온도별·품종별·지역별·분쇄시간별 왕겨재를 이용하여 왕겨재의 혼입율을 달리하면서 재령일수별 모르터 공시체를 제작하고 소요재령일수 만큼 양생하였다.

소요재령에 도달한 모르터 공시체를 수거하여 1단계 압축강도 실험을 실시하였으며, 이로부터

- 품종별·지역별·산지별 왕겨재가 혼화재료로서 콘크리트의 강도특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며

- 소각온도가 모르터의 강도특성에 미치는 영향을 분석하고 소

각온도에 따른 연소로의 열효율을 종합적으로 고려하여 이상적인 최적의 소각온도를 설정하고자 하였으며

- 5가지 등급의 평균입경별로 분쇄된 왕겨재 나타내는 강도특성과 내구성 및 시공성을 종합적으로 고려하여 콘크리트용 혼화재로서 가져야 할 분쇄입경의 범위를 규명하고자 하였으며

- 모르터의 압축강도를 최대화 하는 최적의 왕겨재 혼입율과 그때의 압축강도 증가율을 규명하고자 하였으며

KSL5104의 규정에 따라 표준모래와 보통포틀랜드 시멘트 및 분쇄시간별 왕겨재와 기성제품 혼화재를 이용하여 혼입율을 달리하면서 재령일수별 모르터 공시체를 제작하고 재령일수 만큼 양생하였다.

소요재령에 도달한 모르터 공시체를 수거하여 2단계 압축강도 실험을 실시하였으며, 이로부터

- 콘크리트의 시공성과 분쇄에 소요되는 에너지 및 기성제품 혼화재와의 시장경합성 등을 종합적으로 판단하여 최적의 분쇄입경을 선정하고자 하였다

제 2 절 실험재료의 품질특성

1. 시멘트

본 연구에 사용한 시멘트는 시중에서 구입한 보통포틀랜드 시멘트(A사 제품)으로서 물리적 특성에 대한 실험결과가 <표 5-6>이며 레이저분석기를 이용한 입경분포는 <그림 5-10>과 같으며 전자현미경으로 상을 관찰한 결과는 <그림 5-11>이며, EDS 분석결과는 <그림 5-12>이다.

2. 표준모래

본 연구에 사용된 표준모래는 시중에서 유통되는 강원도 주

문진 산이며 이를 체가름 시험시 KSL5100의 규정에 알맞게 600 μ m 체에 남는 모래의 중량은 전체 중량의 1.0%이하 였으며 300 μ m 체에 남는 모래의 중량은 전체 중량의 95.0% 이상 이었다.

3. 왕겨재

지역별, 품종별, 산지별 및 소각온도별 왕겨재가 콘크리트의 품질특성에 미치는 영향을 실험분석하기 위해서 다음 <표 6-1>과 같은 조건별 왕겨재를 생산하였으며, 각각의 조건별 왕겨재의 물리적 특성은 <표 2-4> 및 <표 4-1>과 같다.

<표 6-1> 왕겨재 혼입 모르터 공시체의 실험조건

구분	동진벼	계화벼	오대벼	화성벼	추청벼	동진벼	
소각 조건	연구실험용 소각로	연구실험용 소각로	연구실험용 소각로	연구실험용 소각로	연구실험용 소각로	연구실험용 소각로	
제어온도 (°C)	700-720°C 600-620°C	700-720°C 600-620°C	600-620°C	600-620°C	600-620°C	600-620°C	
분쇄 조건	분쇄기종 분쇄시간 (분)	L.A.마모기 0,15,30,45,60	L.A.마모기 0,15,30,45,60	L.A.마모기 30	L.A.마모기 30	L.A.마모기 30	L.A.마모기 30
혼입율 (%)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30	0,5,10,15 20,25,30	0,5,10,15 20,25,30	0,5,10,15, 20,25,30	0,5,10,15 20,25,30	
구입 지역	전북 부안	전북 김제	전북 운봉	경남 함안	경기 안산	경남 함안	
실험 목적	품종간 비교 지역간 비교	품종간 비교	품종간 비교	품종간 비교	품종간 비교	지역간 비교	

제 3 절 실험방법 및 범위

KSL 5104의 규정에 따라 보통포틀랜드 시멘트 490g을 사용하고 표준모래는 시멘트 중량의 2.54배가 되도록 사용하였다. 제어온도별·산지별·품종별 왕겨재를 분쇄시간별로 분쇄한 다음 소요 혼입율별로 시멘트를 치환하고 흐름값이 110 \pm 5가 되도록 배합수량을 조정하였다. 결정된 배합비에 따라 재령별 모르터 공시체(규격: 5cm X 5cm X 5cm)를 제작하고 처음 1일 동안은 항온항습기(23°C)로 양생하고 다시 수중에서 재령일수(3일, 7일, 28일)별로 양생한

다음 압축강도 실험을 실시하고 이로부터 제어온도별·품종별·산지별 왕겨재가 콘크리트의 강도특성에 미치는 영향을 분석하였다(1단계).

다시 저온제어로 소각한 전복 부안산 동진벼 왕겨재를 보통포틀랜드 시멘트의 일부로서 혼입을 조건만큼 치환한 다음 물-결합재량 비율을 59.7%로 고정시킨 상태에서 흐름값이 110 ± 5 가 되도록 고성능감수제의 사용량을 조정하였다. 결정된 배합비에 따라 모르타 공시체(규격: 5cm X 5cm X 5cm)를 제작하고 1단계와 동일한 방법으로 양생 및 재령별 압축강도 실험을 실시하였다.

실험오차를 줄이기 위해서 소요재료의 무게는 1/10,000g 까지 잴 수 있는 정밀무게 측정기를 사용하였으며, 재료에 포함된 수분함량을 일정한 수준으로 유지하기 위해서 사용전에 모든 재료는 로건조기에서 $110 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 24시간 건조하였다.

제 4 절 실험결과 분석 및 고찰

1. 왕겨재 품종이 모르타의 강도특성에 미치는 영향

본 연구에서 개발한 연구실험용 소각로를 이용하여 <표 6-1>의 실험조건하에서 수많은 실험을 실시하였다. 이 중에서 $600 \sim 620^\circ\text{C}$ 로 소각한 왕겨재를 L.A. 마모시험기로 30분동안 분쇄한 다음 혼입율별 및 품종별 모르타 공시체의 재령 28일 압축강도 실험 결과를 <표 6-2> 및 <그림 6-1>에 대표적으로 요약 정리하였다.

<표 6-2>로부터 왕겨재 혼입율이 증가하면 할수록 모르타 공시체의 28일 압축강도는 점차 작아짐을 알 수 있다. 이는 시멘트의 수화반응에 필요한 물의 양은 일반적으로 시멘트 중량의 15 ~ 20%에 불과한 데 반해 시멘트 중량의 57.6 ~ 88.1%에 달하는 물을 배합수로 투입하였으므로 수화반응에 사용되고 남은 물이 모르타 공시

체 속에 공극을 형성하고 있으므로 공시체 내부의 조직이 치밀하지 못하여 모르터 공시체의 28일 압축강도가 360kg/cm² 이하인 중저강도를 나타내고 있기 때문에 나타난 것으로 판단된다.

<표 6-2> 왕겨재 품종별 혼입율별 모르터 공시체의 재령 28일 압축강도비

왕겨재 혼입율	시멘트 모르터 공시체의 압축강도에 대한 품종별 혼입율별 28일 압축강도비(%)						평 균	압축강도	압축강도	물-결
							압축강도	표준편차	분산계수	합재비
	㉠	㉡	㉢	㉣	㉤	평 균	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(%)	(%)
0 %	100	100	100	100	100	100	360	24	6	57.6
5 %	90	96	91	97	88	93	333	13	4	65.8
10 %	93	76	85	91	82	85	307	24	8	67.8
15 %	76	83	81	88	84	82	296	15	5	75.0
20 %	70	80	79	71	75	75	270	16	6	80.3
25 %	67	62	53	70	65	63	228	23	10	84.2
30 %	54	63	54	67	60	60	215	21	10	88.1

주) a) : 전북 부안산 동진벼, b) : 전북 김제산 계화벼, c) : 경기 안산산 추청벼
 d) : 전북 운봉산 오대벼, e) : 경남 함안산 화성벼
 시멘트 모르터 공시체 : 왕겨재 혼입율 0%

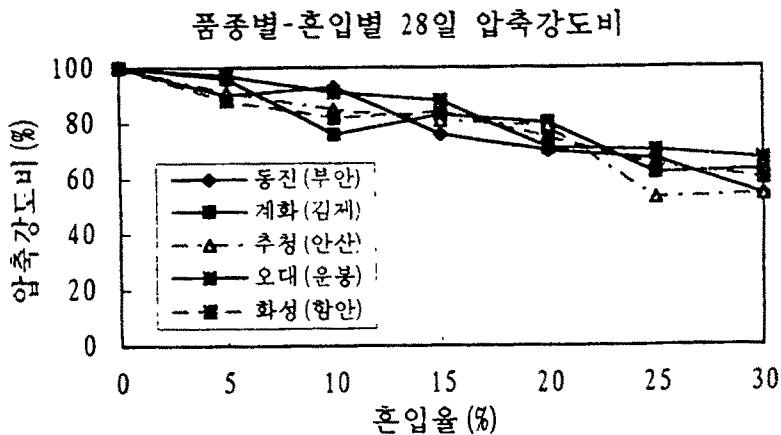
이러한 사실은 동일한 조건의 왕겨재를 혼입하고 배합수량을 줄인 상태에서 콘크리트의 압축강도 특성을 실험해 보면 왕겨재를 혼입하는 경우가 그렇지 않은 경우보다 28일 압축강도를 증가시킨다는 실험적 사실로부터 입증될 수 있었다.

또한 왕겨재 혼입율이 증가할수록 모르터 압축강도의 분산치가 증대하는 것으로 나타나는데 이는 표준모래나 보통포틀랜드 시멘트의 품질변동폭 보다는 왕겨재 제조(소각 및 분쇄) 단계에서의 품질변동폭이 상대적으로 매우 크게 나타나므로 왕겨재 사용량이 증대함에 따라 보통포틀랜드 시멘트의 사용량이 줄어들므로 총체적인 압축강도 변동폭이 크게 나타난 것으로 판단된다.

<표 6-2>로 부터 동일한 왕겨재 혼입율하에서도 품종별 모르터 공시체 간에 약간의 차이가 나타나나 품종 차이에 따른 모르터 공시체의 28일 압축강도에서 뚜렷한 차이점이 없다는 사실이 5%의 유의수준에서 인정된다. 또한 <표 6-2>에 나타나 있는 전북 부안

산 동진벼와 경남 함안산 동진벼 왕겨재를 혼입율별로 치환시 모르터 공시체의 재령 28일 압축강도는 5%의 유의수준에서 뚜렷한 차이가 없다는 것을 알 수 있다.

이로부터 지역별 품종별 산지별 왕겨재가 그 화학적 조성이 <표 2-1>처럼 약간씩의 차이를 나타내나 콘크리트용 혼화재료로서는 차이가 나타나지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 어떠한 품종의 왕겨재를 혼화재료로 사용하더라도 콘크리트의 품질에 차이가 없다는 것을 나타내므로 본 연구의 성과가 범용성이 있어서 실용화 가능성이 매우 높다는 것을 나타낸다.



<그림 6-1> 왕겨재 품종별 혼입율별 모르터 공시체 28일 압축강도비

2. 소각온도별 왕겨재가 모르터 압축강도특성에 미치는 영향

본 연구에서 개발한 연구실험용 소각로를 이용하여 1994년도에 수확되고 1995년에 도정된 전북 부안산 동진벼를 저온제어(600~620℃) 및 고온제어(700~720℃)로 소각한 다음 L.A. 마모시험기로 15분 및 30분동안 분쇄하고 혼입율별, 분쇄시간별 및 재령별 모르터 공시체의 압축강도 실험을 실시하였다. 동 실험결과로부터 고온제어로 소각한 왕겨재를 혼입한 모르터 공시체의 재령별

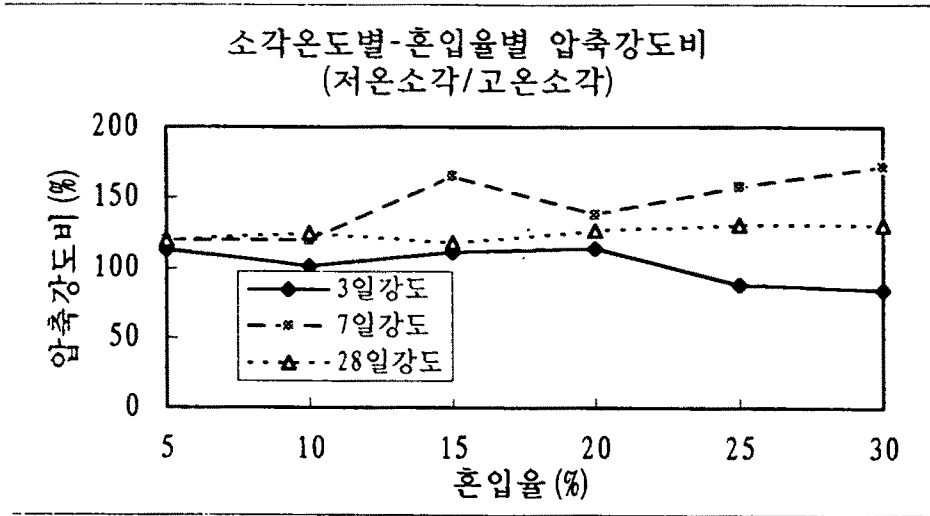
압축강도에 대한 저온제어로 소각한 왕겨재 혼입 모르터 공시체의 재령별 압축강도 비율을 정리한 것이 <표 6-3> 이고 이를 그림으로 표현한 것이 <그림 6-2> 및 <그림 6-3>이다.

이로부터 저온제어(600~620℃)로 소각한 왕겨재를 혼입하면 고온제어(700~720℃)로 소각한 왕겨재를 혼입하는 경우보다 왕겨재 혼입율의 크기에 관계없이 약 20 ~ 30% 증가하는 것을 발견할 수 있다. 또한 혼화재로서 콘크리트의 품질을 높이기 위해서는 600~620℃로 소각하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

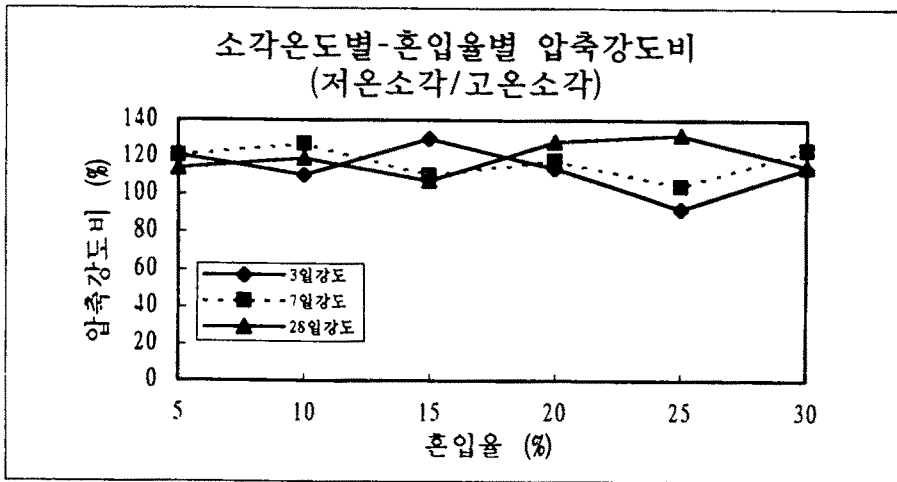
<표 6-3> 소각온도와 분쇄시간에 따른 재령별 모르터 압축강도비

왕겨재 혼입율	L.A.마모기 분쇄시간(분)	재령별 압축강도비(%)			재령별 평균(%)	비 고
		3일	7일	28일		
5 %	15	113	120	120	118	고온제어 소각 왕겨재 혼입 모르터 공시체의 압축강도에 대한 저온제어 소각 왕겨재 혼입 모르터 공시체의 압축강도비(%)
	30	121	121	114	119	
	평균	117	120	117		
10 %	15	101	120	125	115	
	30	110	127	119	119	
	평균	106	124	122		
15 %	15	111	165	118	131	
	30	130	110	107	116	
	평균	120	137	113		
20 %	15	114	138	127	126	
	30	114	118	128	120	
	평균	114	128	128		
25 %	15	88	158	131	125	
	30	92	104	132	109	
	평균	90	131	132		
30 %	15	84	172	131	129	
	30	114	124	115	118	
	평균	99	148	123		
분쇄시간별 평균 강도비	15	102	145	125		
	30	114	117	119		

또한 30분 분쇄한 경우 모르터 압축강도비가 15분 분쇄한 경우에 비해서 재령별로 거의 일정한 크기를 나타내는데 이는 15분동안 분쇄한 경우에 비해서 왕겨재의 입경분포가 상대적으로 균등하기 때문에 즉 품질이 균질하기 때문에 나타난 결과로 판단된다.



<그림 6-2> 소각온도에 따른 재령별 왕겨재 혼입율별 모르터 공시체 28일 압축강도비 (15분 분쇄 왕겨재)



<그림 6-3> 소각온도에 따른 재령별 왕겨재 혼입율별 모르터 공시체 28일 압축강도비 (30분 분쇄 왕겨재)

3. 왕겨재 혼입 모르터의 재령별 압축강도 특성

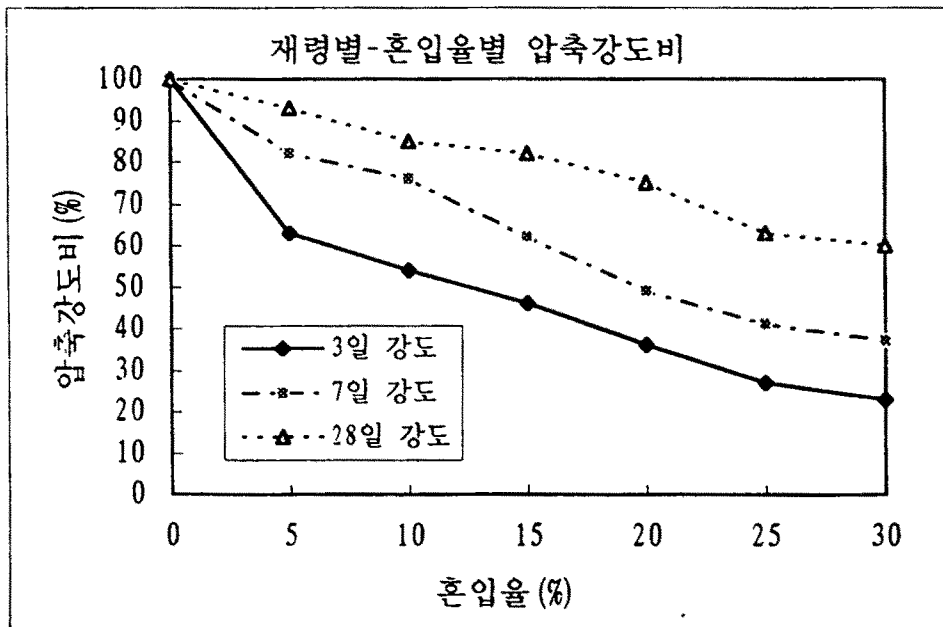
본 연구에서 개발한 연구실험용 소각로를 이용하여 1994년도에 수확되고 1995년에 도정된 <표 6-1>에 나타난 전체 품종을 각각 저온제어(600~620℃)로 소각한 다음 L.A. 마모시험기로 30분 동안 분쇄하고 혼입율별 및 재령별 모르터 공시체의 압축강도 실험

을 실시하였다. 동 실험결과로부터 각각의 품종별 왕겨재를 혼입한 모르터 공시체가 나타내는 압축강도를 발취하고 재령별 전체 품종의 평균 압축강도를 혼입율별로 구하였다. 다시 이를 왕겨재를 혼입하지 않은 보통포틀랜드 시멘트 모르터 공시체의 재령별 압축강도(3일 강도 : 216 kg/cm², 7일 강도 : 266 kg/cm², 28일 강도 : 360 kg/cm²)로 각각 나누고 백분율로 표시한 것이 <표 6-4>이며 그림으로 표현한 것이 <그림 6-4>이다.

<표 6-4> 왕겨재 혼입율별 재령별 모르터 압축강도비

왕겨재 혼입율 (%)	재령별 모르터 공시체 압축강도비 (%) ^{a)}						비고
	3일		7일		28일		
	압축강도비	일별증가율	압축강도비	일별증가율	압축강도비	일별증가율	
5	63	21.0	82	4.8	93	0.5	
10	54	18.0	76	5.5	85	0.4	
15	46	15.3	62	4.0	82	1.0	
20	36	12.0	49	4.3	75	1.2	
25	27	9.0	41	3.5	63	1.0	
30	23	7.7	37	2.5	60	1.1	

주) a) : 전체품종의 평균압축강도/시멘트모르터 공시체 압축강도 × 100



<그림 6-4> 전체 품종 왕겨재의 혼입율별 재령별 평균 압축강도비

왕겨재 혼입율의 크기에 관계없이 재령일수가 증가할수록 왕겨재 혼입 모르터 공시체의 재령별 압축강도가 왕겨재를 혼입하지 않고 보통포틀랜드 시멘트만으로 성형한 모르터 공시체의 재령별 압축강도에 빠른 속도로 접근해 간다. 이는 왕겨재를 혼입시 시멘트의 일부를 왕겨재로 치환하였기 때문에 초기 수화반응에 관여하는 시멘트의 양이 줄어들었으며 이로 인해 보통시멘트로만 성형된 모르터의 압축강도에 비해서 재령초기에는 왕겨재를 혼입한 모르터의 압축강도가 작게 나타난다. 그러나 재령일수가 증가할수록 왕겨재를 혼입한 모르터의 압축강도가 왕겨재를 혼입하지 않은 모르터의 압축강도 보다는 더 빠른 속도로 증가하는 현상이 발생하는데 그 이유는 왕겨재를 혼입시 왕겨재와 시멘트 수화물 즉 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 2차 반응하여 모르터의 압축강도를 증가시키는 포졸란 효과를 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

한편 콘크리트를 고온에서 양생시 시멘트의 수화반응이 촉진되어 조기에 높은 압축강도가 나타난다. 왕겨재는 생산과정에서 대단히 많은 열량이 발생하므로 발생열량을 왕겨재 혼입 콘크리트의 양생 과정에 활용할 경우 양생비의 대폭적인 절약은 물론이고 포졸란효과에 의한 왕겨재 혼입 콘크리트의 압축강도를 조기에 대폭적으로 증진시킬 것이 예상되므로 이러한 방향으로 본 연구의 실용화를 추진할 경우 실용화 성공 가능성이 매우 높을 것이다.

4. 왕겨재 분쇄 입경별 모르터의 재령별 압축강도 특성

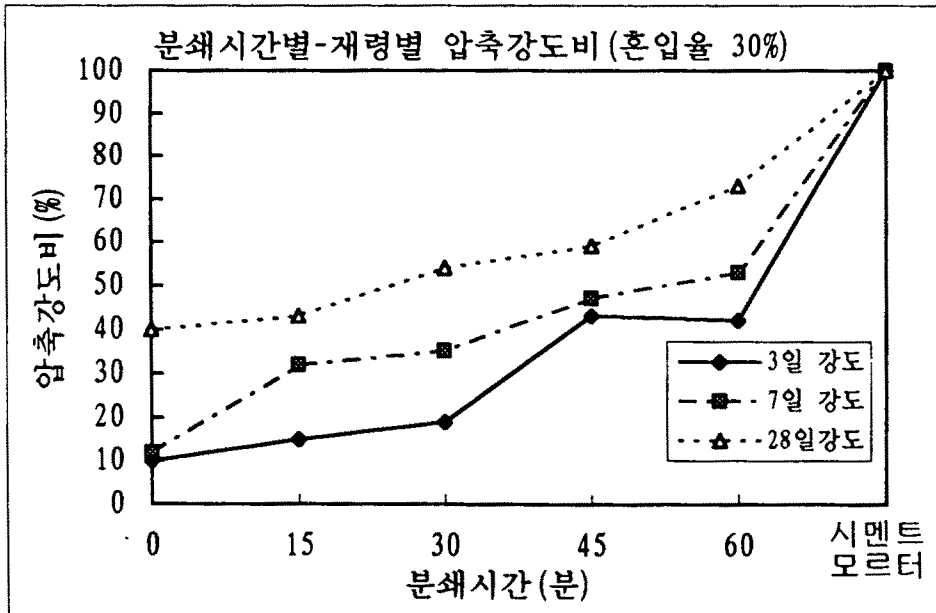
1994년도에 수확되고 1995년에 도정된 <표 6-1>의 전북 부안 산 동진벼를 본 연구에서 개발한 연구실험용 소각로를 이용하여 저온제어(600~620℃)로 소각한 다음 L.A. 마모시험기로 15, 30, 45, 60분 동안 각각 분쇄하고 각각의 혼입율별 및 재령별 모르터 공시

체의 압축강도 실험을 실시하여 분쇄입경이 모르터 압축강도에 미치는 영향을 실험분석하였다.

<표 6-5>는 그 중에서 왕겨재 혼입율이 15% 조건일 때 분쇄 입경별 왕겨재 혼입 모르터 공시체의 재령별 압축강도를 왕겨재를 혼입하지 않은 모르터 공시체의 재령별 압축강도로 나누고 백분율로 표시한 것이며 <그림 6-5>는 이를 다시 그림으로 표시한 것이다.

<표 6-5> 왕겨재 분쇄 입경별 재령별 압축강도비

분쇄입경		재령별 압축강도비(%)			물-결합재 비율(%)
분쇄시간	평균입경	3 일	7 일	28 일	
0 분	미측정	10	12	18	124
15 분	30.2 μ m	15	32	43	93
30 분	25.4 μ m	19	35	54	89
45 분	21.4 μ m	43	47	59	75
60 분	18.7 μ m	42	53	73	72



<그림 6-5> 왕겨재 분쇄입경별 모르터 압축강도비

동 표와 그림으로부터 왕겨재를 미세하게 분쇄할수록 모르터 공시체의 압축강도가 재령일수에 관계없이 증가하고 있다. 그러나 미세하게 분쇄할수록 압축강도가 증가하나 분쇄비용 역시 증가하므로 혼화재로서 왕겨재의 실용성을 추구하기 위해서는 분쇄비용은 물론이고 기존의 상업용 혼화재와의 시장 경쟁력 까지 고려하여 분쇄입경을 결정할 필요가 있다.

<그림 6-5>를 살펴보면 45분 ~ 60 분의 분쇄시간에서 28일 압축강도 증가율의 기울기가 급하다.

이는 곧 왕겨재의 평균입경이 $20\mu\text{m}$ 가까이 가면 평균입경을 조금이라도 더 작게 분쇄할수록 재령 28일의 압축강도가 급격히 증가한다는 사실을 나타내고 있으므로 콘크리트의 압축강도 증가 측면에서는 평균입경 $20\mu\text{m}$ 가 혼화재로서 최소로 요구되는 왕겨재의 한계 평균입경이라고 판단된다.

한편 전 세계적으로 가장 많이 사용되는 보통 포틀랜드시멘트의 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 이하이고 일반적으로 보편화되어 있는 상업용 혼화재의 평균입경이 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 사이에 있는 바 이러한 평균입경을 가지고 있는 혼화재료 또는 시멘트를 콘크리트용 재료로 사용시 압축강도나 시공성 측면에서 커다란 문제점을 발견하지 못하고 현재까지 널리 애용되고 있다. 이러한 점은 혼화재로서 왕겨재에 요구되는 한계 평균입경이 $20\mu\text{m}$ 라는 결론과 그 맥을 같이 한다.

또한 왕겨재를 혼입할 경우 혼입하지 않는 경우보다 모르터 공시체의 압축강도가 재령일수에 관계없이 항상 작게 나타나고 있다. 그 이유는 왕겨재를 혼입한 모르터 공시체의 물-결합재비가 왕겨재를 혼입하지 않는 모르터 공시체 물-결합재비 55% 보다 훨씬 높아 수화반응에 사용되고 남는 잉여수가 왕겨재를 혼입하지 않는

경우보다 훨씬 많아졌으며 이에따라 모르터 내부에 공극이 더 많이 형성되었기 때문이다.

반면 일반 콘크리트에서 물-결합재비가 보통 50%이하이므로 KSL5104에 따른 모르터 공시체의 압축강만으로는 콘크리트의 압축강도를 최대화하는 왕겨재의 최적분쇄입경을 추정하기가 어렵다.

그러므로 평균입경이 대략 20 μ m인 왕겨재와 10 μ m인 왕겨재를 대상으로 저온으로 소각한 다음 콘크리트에 혼입하여 압축강도와 시공성을 분석함으로써 최적의 분쇄입경을 선정할 필요가 있다.

5. 산지별 왕겨재 혼입 모르터의 재령별 압축강도 특성

1994년도에 수확되고 1995년에 도정된 <표 6-1>의 전북 부안산 동진벼와 경남 함안산 동진벼를 본 연구에서 개발한 연구실험용 소각로를 이용하여 저온제어(600~620℃)로 소각한 다음 L.A. 마모시험기로 30분 동안 분쇄하고 각각의 혼입율별 및 재령별 모르터 공시체의 압축강도 실험을 실시하여 그 비율을 나타낸 것이 <표 6-6>이다.

이 결과로부터 유의수준 5%의 범위내에서 산지별 왕겨재 차이가 모르터 강도에 영향을 미치지 않는다는 결론을 얻을 수 있다.

<표 6-6> 산지별 왕겨재 혼입 모르터 공시체의 압축강도 비율

재령일수	왕겨재 혼입율별 압축강도비(%)						재령별 평균(%)	재령별 표준편차
	5	10	15	20	25	30		
3 일	105	105	92	90	86	95	96	7.9
7 일	97	113	95	85	88	92	95	6.7
28 일	103	100	95	92	95	102	98	4.4

주) 경남 함안산 동진벼에 대한 전북 부안산 동진벼 왕겨재 혼입 모르터 압축강도비(%)

6. 왕겨재 혼입 모르터의 시공성

콘크리트의 품질을 좌우하는 요소중의 하나가 시공성이다.

왕겨재를 분쇄할 경우 <그림 4-4>, <그림 4-6> 및 <그림 4-8> 처럼 입형이 모난형을 가지며 개개의 입자속에도 미세한 공극이 있는 것으로 판단되므로 시장에서 상품으로서 가장 경합이 예상되는 실리카흙의 경우와 입형이나 공극분포가 사뭇 다르다.

이러한 성격으로 인해 왕겨재를 콘크리트내 혼화재료로 혼입시 콘크리트의 시공성이 실리카흙 등 기존의 상업용 혼화재를 사용한 콘크리트에 비해 저하될 수 있으며 이러한 현상이 발생할 경우 혼화재로서 시장에서의 경쟁력을 상실할 수 있다.

한편 콘크리트의 시공성의 양부 판단은 동일한 슬럼프(모르터의 경우 동일한 동일한 Flow)를 나타내는데 필요한 배합수량이나 고성능 감수제의 양으로 판단할 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 1994년도에 수확되고 1995년에 도정된 <표 6-1>의 전북 부안산 동진벼를 본 연구에서 개발한 연구실험용 소각로를 이용하여 저온제어(600~620℃)로 소각한 다음 L.A. 마모 시험기로 15, 30, 45, 60분 동안 분쇄하였다. 각각의 분쇄입경별 왕겨재와 고로슬래그, 플라이애쉬 및 실리카흙을 혼화재로 사용하고 KSL5104의 규정에 따라 보통포틀랜드 시멘트 490g과 시멘트 증량의 2.54배가 되는 표준모래를 사용하여 흐름값이 110 ± 5 가 되도록 필요한 고성능감수제양과 배합수량을 혼입을별로 조정하였으며 그 결과를 정리한 것이 <표 6-7>이다.

왕겨재를 혼화재로 개발시 품질특성의 유사성 때문에 시장에서 가장 경합이 예상되는 혼화재 품목은 실리카흙이라 할 수 있다. 한편 <표 6-7>에 나타나 있는 바와 같이 KSL5104의 규정에 따라 실리카흙을 혼입한 모르터 공시체를 제작하는데 소요되는 고성능 감수제의 양은 60분동안 분쇄한 왕겨재를 혼화재로 사용할 경우에

필요한 고성능감수제의 양과 매우 유사하다. 이는 곧 60분동안 분쇄한 왕겨재를 혼화재로서 콘크리트에 투입하여야 실리카흙의 시공성과 동등한 시공성을 얻을 수 있으며 또한 60분 동안 분쇄한 왕겨재를 혼입하여야 비로소 실리카흙을 혼입한 콘크리트와 동등한 품질을 확보할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

한편 저온소각한 왕겨재를 L.A.마모시험기로 60분 동안 분쇄할 경우 평균입경이 약 19 μ m에 달하므로 향후 혼화재 시장에서 실리카흙에 비해 비교 우위적 품질과 가격 경쟁력을 지니기 위해서는 왕겨재를 최소의 비용으로 평균입경이 19 μ m 이하가 되도록 왕겨재를 분쇄하는 기술의 개발이 필요하다.

<표 6-7> 혼화재 혼입율별 배합수량과 고성능 감수제양

혼화재 혼입율 ^{a)}	고로 슬래그	플라이 애쉬	실리카 흙	왕 겨 재			
				15분 분쇄	30분 분쇄	45분 분쇄	60분 분쇄
I	454 0.50	454 0.50	454 0.50	454 0.50	454 0.50	454 0.50	454 0.50
II	454 0.30	454 1.30	454 1.30	454 1.60	454 1.60	454 1.60	454 1.40
III	454 0.35	454 1.60	454 2.90	454 4.60	454 5.20	454 4.40	454 2.40
IV	454 0.30	454 1.30	454 4.00	454 10.30	454 9.80	454 8.70	454 3.30
V	454 0.10	454 0.30	454 7.00	454 17.10	454 17.40	454 10.10	454 7.90
VI	454 0.10	454 0.30	454 11.10	454 24.20	454 20.70	454 13.70	454 11.50
VII	454 -	454 0.20	454 15.00	454 34.70	454 26.80	454 14.20	454 14.70

주) 상단 : 배합수량(단위 : g), 하단 : 결합재량에 대한 고성능감수제 중량비(%)

a) : 혼화제 혼입율(결합재량에 대한 중량 백분율 :%)

혼화제 구분	I	II	III	IV	V	VI	VII
고로슬래그	0	10	20	30	40	50	60
고로슬래그 외	0	5	10	15	20	25	30

그러나 미세하게 분쇄할수록 분쇄비용이 대폭 증대하므로 혼화재

로서 품질과 가격 경쟁력등을 종합적으로 판단하여 최적의 평균입경을 결정하는 것이 필요하다.

반면 보통포틀랜드 시멘트의 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 이하이고 상업용 혼화재의 평균입경이 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 사이에 있으며 본 연구에서 개발한 미세분쇄기는 수분 이내에 왕겨재를 $10\mu\text{m}$ 까지 분쇄하므로 저온제어로 소각한 왕겨재를 평균입경이 대략 $20\mu\text{m}$ 와 $10\mu\text{m}$ 되도록 분쇄한 다음 콘크리트에 혼입하여 압축강도와 시공성을 분석함으로써 최적의 분쇄입경을 선정할 필요가 있다

7. 혼화재로서 왕겨재가 모르터의 강도특성과 시공성에 미치는 영향 고찰

산지별, 품종별, 지역별 왕겨재 5가지를 선정하고 분쇄입경 즉 분쇄시간별 왕겨재 혼입율별 모르터 공시체를 제작하고 재령별 소각온도별 압축강도를 측정분석한 결과 약간의 실험오차가 내포되어 있으나 다음과 같은 결론을 도출하였다

첫째, 왕겨재 혼입율이 증가할 수록 분쇄입경과 관계 없이 모르터 공시체의 재령별 압축강도는 왕겨재를 혼입하지 않은 경우에 비해서 점차 작아진다. 이는 KSL 5104의 규정에 따라 보통포틀랜드 시멘트와 표준모래의 양을 1:2.54로 고정시킨 상태에서 흐름값이 110 ± 5 가 되도록 배합수량을 필요이상으로 많이 첨가하였기 때문에 모르터내 공극이 너무 많아졌으며 이에 따라 저강도의 모르터를 제조하였기 때문에 나타난 현상이다.

둘째, 지역별, 품종별, 산지별 왕겨재가 화학적 조성에서 약간씩의 차이를 보이거나 콘크리트용 혼화재료로서는 5% 유의수준에서 품질특성상의 차이점을 발견할 수 없었다. 이러한 결과는 어떠한 품종의 왕겨재를 혼화재료로 사용하더라도 콘크리트의 품질에 차이가 없다는 것을 나타내므로 본 연구의 성과가 범용성이 있어서 실

용화 가능성이 매우 높다는 것을 나타낸다.

셋째, 저온제어(600~620℃)로 소각한 왕겨재를 혼입하면 비결정질 SiO₂가 대폭 증가하여 동일한 에너지로 분쇄하더라도 더욱 미립질로 분쇄할 수 있으며 또한 입형이 원형 보다는 침(針)상의 형상을 이루고 활성기공이 많이 형성되므로 시멘트 수화물과 2차적인 포졸란반응을 일으킬 가능성이 훨씬 증가한다. 그러므로 고온제어(700~720℃)로 소각한 왕겨재를 혼입하는 경우보다 모르터 압축강도가 약 20 ~ 30% 증가하며 그 양상은 왕겨재 혼입율의 크기에 관계없다. 따라서 왕겨재를 혼화재로 사용하여 콘크리트의 품질을 높이기 위해서는 저온제어하에 소각하는 것이 유리하다고 판단된다.

넷째, 왕겨재를 혼입시 초기(3일, 7일) 재령은 왕겨재를 혼입하지 않는 경우보다 작으나 재령일수가 증가할수록 왕겨재와 시멘트 수화물이 포졸란반응을 일으키므로 재령일수가 증가할수록 왕겨재를 혼입한 모르터의 압축강도가 왕겨재를 혼입하지 않은 경우보다 더 빠른 속도로 증가한다.

다섯째, 왕겨재를 미세하게 분쇄할수록 모르터 공시체의 압축강도가 재령일수의 장단에 관계없이 증가한다. 그러나 미세하게 분쇄할수록 분쇄비용 역시 증가하므로 혼화재로서 왕겨재의 실용성을 추구하기 위해서는 분쇄비용은 물론이고 기존의 상업용 혼화재와의 시장경쟁력 까지 고려한 분쇄입경의 결정이 필요하다.

여섯째, 왕겨재의 평균입경이 20 μ m 근처에 있는 경우 평균입경을 조금이라도 더 작게 분쇄할수록 재령 28일의 압축강도가 급격히 증가하므로 콘크리트의 압축강도 증가 측면에서는 평균입경 20 μ m가 최소한도로 도달해야 할 평균입경의 한계치라고 판단된다.

한편 보통포틀랜드 시멘트의 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 이하이고 일반적인 상업용 혼화재의 평균입경이 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 사이에 있으므로 왕겨재가 시장에서 기존의 혼화재에 대한 비교우위적 경쟁력을 지니기 위해서는 왕겨재에 요구되는 평균입경이 대략 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 라는 결론을 얻을 수 있었다.

일곱째, 일반적인 콘크리트에서의 물-결합재비가 보통 50% 이하인데 반해 KSL5104에 따른 모르터 공시체의 물-결합재비가 이보다 훨씬 높으므로 모르터 공시체의 압축강도만 가지고 콘크리트의 압축강도를 최대화하는 왕겨재의 최적분쇄입경을 추정하는 것이 불가능하다. 그러므로 저온제어하에 소각된 왕겨재를 평균입경이 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 되도록 분쇄하고 콘크리트에 혼입하여 압축강도와 시공성을 분석한 다음 콘크리트용 혼화재로서 최적의 분쇄입경을 선정할 필요가 있다.

여덟째, L.A. 마모시험기로 60분동안 분쇄한 왕겨재가 혼화재로서 실리카흙과 동등한 시공성과 품질을 나타낸다. 따라서 향후 혼화재 시장에서 왕겨재가 실리카흙에 비해 비교 우위적 품질과 가격 경쟁력을 지니기 위해서는 최소의 비용으로 $19\mu\text{m}$ 이하의 평균입경이 되도록 왕겨재를 분쇄하는 기술을 개발하는 것이 우선적으로 필요하다. 그러나 미세하게 분쇄할수록 분쇄비용이 대폭 증대하므로 혼화재로서 품질과 가격 경쟁력등을 종합적으로 판단하여 최적의 평균입경을 결정하는 것이 필요하다.

제 7 장 왕겨재 혼입 콘크리트의 강도특성과 시공성

제 1 절 서 언

콘크리트에 비해서 품질 변동폭이 적은 모르터 공시체를 이용하여 품종별, 산지별, 제어온도별, 분쇄입경별 왕겨재가 혼화재로서 콘크리트에 미치는 영향을 KSL 5104 규정에 따라 모르터 공시체를 이용하여 정밀하게 실험한 결과 첫째, 지역간, 품종간 또는 산지간의 왕겨재 차이가 모르터의 강도특성에 영향을 미치지 않는다는 사실을 발견하였으며, 둘째, 고온(700 ~ 720℃)보다는 저온(600 ~ 620℃)으로 제어소각하는 경우가 분쇄에너지가 적게 들어가며 비결정질 SiO₂가 많아져서 모르터의 압축강도가 높아지는 것을 발견하였으며, 셋째, 평균입경 20 μ m 근처 까지 분쇄하여야 실리콘과 시공성이 동등해 진다는 사실을 발견하였으며, 넷째, 평균입경 20 μ m 근처에서는 좀더 미립으로 분쇄할수록 모르터의 강도가 급격히 증가하며 또한 본 연구에서 개발한 연구실험용 미세분쇄기는 적은 에너지로 수분만에 10 μ m 까지 왕겨재를 분쇄할 수 있다. 이에 따라 콘크리트용 혼화재로서 왕겨재가 가져야 할 최적의 분쇄입경을 규명하기 위해서 평균입경이 10 μ m와 20 μ m인 왕겨재가 콘크리트의 강도특성과 시공성에 미치는 영향을 집중적으로 규명해야 할 필요성을 발견하였다.

이에 따라 본 연구에서는 1995년도에 수확되고 1996년도에 도정된 전북 김제산 동진벼 왕겨를 구입하여 저온제어(600 ~ 620℃)로 소각한 다음 평균입경이 각각 20 μ m와 10 μ m 되도록 분쇄하였다.

이를 이용하여 KSF2405의 규정에 따라 왕겨재 혼입율별·재령별·단위결합재량별 콘크리트 표준 공시체(ϕ 100X200)를 제작하고

표준양생시킨 후 재령별 압축강도 실험을 실시하였다. 이로부터 왕겨재를 사용하지 않는 보통 콘크리트의 재령 28일 압축강도에 비해서 왕겨재를 혼입한 콘크리트의 압축강도가 가장 높게 발현되는 최적의 왕겨재 혼입율과 그 때의 압축강도 증진율을 평균입경과 단위결합재량별로 규명하고자 하였다.

다시 왕겨재의 최대 사용 가능량을 결정하기 위해서 치환 가능한 최대의 왕겨재 혼입량 즉 왕겨재의 최대 혼입율을 평균입경의 크기별로 규명하고자 하였다. 이를 위해서 최적의 왕겨재 혼입율이 상으로 점차 왕겨재 치환량을 증가시킬 때 재령 28일의 콘크리트 압축강도가 왕겨재를 혼입하지 않는 보통 콘크리트의 재령 28일 압축강도보다도 높게 형성되는 최대의 왕겨재 혼입율을 실험적으로 찾고자 하였다.

한편 왕겨재가 콘크리트용 혼화재로 시중판매에 들어갈 때 혼화재로서의 인지도가 낮기 때문에 소비자들이 사용을 기피할 것이 예상되며 또한 실리카흙과는 여러 면에서 치열한 경쟁이 예상된다. 이를 타개하기 위해서 또한 왕겨재를 혼화재로 개발시 놓어민 소득의 극대화를 위해서 기존의 상업용 혼화재 중 가장 고가이고 동시에 품질이 가장 우수한 실리카흙에 비해서 비교우위적 품질경쟁력이 있음을 실험적으로 입증하는 것이 필요하다. 한편 콘크리트의 강도특성은 실험에 투입된 재료 즉 시멘트, 모래, 자갈 및 혼화재료의 품질에 매우 민감하다. 이에 따라 제 5장에서 논술한 상업용 혼화재 혼입 콘크리트의 품질특성 실험에 사용한 재료와 동일한 품질을 지닌 시멘트, 모래, 자갈 및 혼화제를 사용하여 동일한 시공성(목표슬럼프: 21 ± 3 cm)을 목표로 평균입경별·결합재량별·혼입율별·재령별로 표준공시체를 제작 및 표준양생하고 이로

부터 재령별 강도특성과 최적 및 최대혼입율을 단위결합재량별로 규명하고자 하였다.

아울러 최적 혼입율의 왕겨재와 실리카흙을 혼입한 표준양생 콘크리트가 지는 장기압축강도와 인장(휨, 할렬)강도 특성 및 내구성(내황산염) 특성을 규명하고 탄성계수를 실측 비교하여 왕겨재가 콘크리트 구조물에 사용되었을 때 기존의 상업용 혼화재중 효과가 가장 뛰어나고 고가인 실리카흙에 비해서 비교우위적 품질이 있음을 직접적으로 실증하고자 하였다

이외에도 왕겨 소각시 나타나는 소각열과 배연가스 및 왕겨재를 동시에 이용하여 프리캐스트 콘크리트 제품의 생산 가능성을 타진하기 위해서 최적비율의 왕겨재와 실리카흙을 혼입한 콘크리트에 대하여 양생방법(표준, 기건, 온수, 증기)에 따른 강도특성을 단계별로 실험분석하고자 하였다.

또한 최적 혼입율의 왕겨재를 혼입한 콘크리트에 대한 장기적인 내황산염 저항성 실험과 내투수성시험 및 내부식성 실험 등 내구성 실험을 실시하여 왕겨재 혼입 콘크리트의 내화학적 내지 내구성을 규명하고자 하였다. 아울러 농업시설 중에서 콘크리트에 가장 유해한 환경이라 여겨지는 돈사에서 왕겨재 혼입 콘크리트의 현장적응성을 실험을 실시하여 왕겨재 혼입콘크리트의 우수한 내화학을 입증하고자 하였다.

그 외에도 왕겨재를 혼입시 콘크리트의 색깔이 검어져서 동절기의 태양 복사열 흡수능력이 우수하리라 예상된다. 한편 농어촌도로는 차량통행이 적고 인력이 모자라 동절기에 인위적인 제설이 불가하므로 농어촌의 도로포장재로 왕겨재 혼입 콘크리트를 개발할 경우 도로의 효율성이 대폭 높아지리라 예측할 수 있다. 따라

서 왕겨재를 혼입한 콘크리트를 도로 포장재로의 활용하기 위한 기술적 가능성을 타진하기 위해서 왕겨재 혼입 콘크리트가 보통의 콘크리트에 비해서 가지는 흡열특성의 우수성 실험분석하고자 하였다.

제 2 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 압축강도 특성 및 시공성

1. 실험재료의 품질 특성

가. 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 시중에서 구입한 보통포틀랜드 시멘트로서 그 물리적 특성을 실험한 결과가 <표 5-6> 및 <그림 5-10>이다.

나. 잔골재 및 굵은골재

본 실험에 사용된 잔골재와 굵은골재는 각각 경기도 여주군 남한강산 하천사 및 경기도 안성군 생산 부순돌로서 그 물리적 특성은 <표 5-7> 및 <표 5-8>에 나타난 바와 같다.

다. 혼화제

본 연구실험에서 사용한 화학혼화제는 고강도 및 고유동 콘크리트용으로 사용되고 있는 나프탈린계 고성능 AE감수제로서 품질 특성은 <표 5-9>에 나타난 바와 같다.

라. 왕겨재

본 연구실험에서 사용한 왕겨재는 1994년도에 생산되고 1995년도에 도정된 전북 김제산 동진벼를 본 연구에서 개발한 실험용 소각로로 저온(600~620℃)제어로 소각한 다음 분쇄한 것을 사용하였다. 분쇄방법으로서는 평균입경인 20 μ m인 왕겨재를 생산하기 위해서 L.A. 마모시험기로 60분 동안 분쇄하였으며, 평균입경인 10 μ m 이하인 미세 왕겨재를 생산하기 위해서는 본 연구에서

개발한 실험용 소형 미세분쇄기(건식)를 사용하였다. 각각의 평균 입경별 왕겨재가 가지는 물리적 특성을 실험한 결과는 <표 2-4> 및 <표 4-1>에 나타나 있다.

2. 실험방법

최근에 사회적으로 요구되는 콘크리트의 기계화 시공을 겨냥하여 <표 7-1>과 같은 3단계에 걸친 실험범위에 따라 21±3cm의 목표슬럼프를 설정하고 재료의 분리가 나타나지 않도록 배합설계를 실시한 다음 단위결합재량별·재령별 표준공시체(∅100X200 또는 ∅150X300)를 왕겨재 평균입경별로 제작하고 표준양생(양생온도 22±2℃)을 시킨 후 재령별로 압축강도를 KSF2405의 규정에 따라 실험하였다. 이 실험결과로부터 왕겨재 혼입에 의한 압축강도 증가 효과가 나타나기 시작하는 최소의 결합재량과 콘크리트의 압축강도를 최대화하는 최적의 왕겨재 혼입율 및 왕겨재를 혼입하더라도 보통 콘크리트의 압축강도보다 작아지지 않는 최대의 왕겨재 혼입율을 구하고 아울러 왕겨재를 혼입하지 않은 보통의 콘크리트에 대한 재령별 압축강도 증가율을 평균입경의 크기별로 도출하고자 하였다.

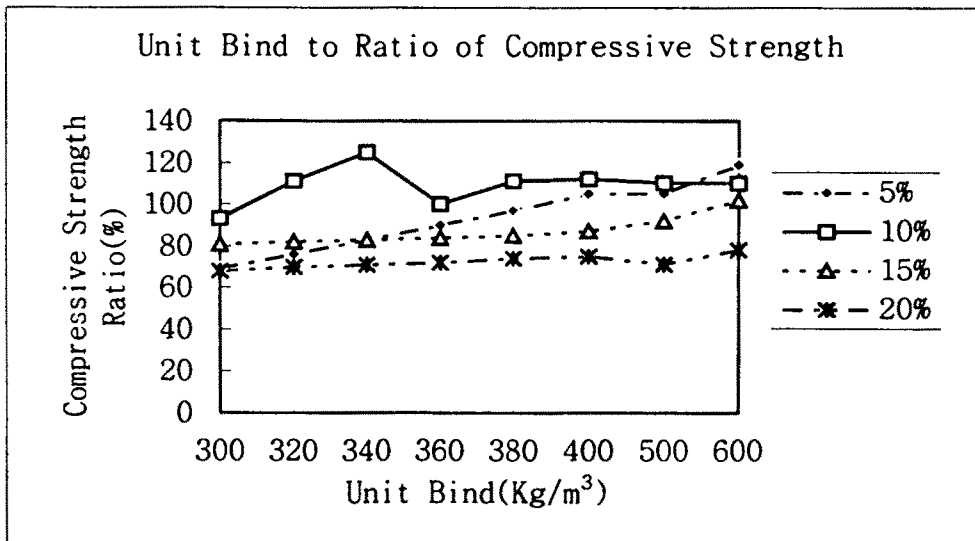
<표 7-1> 왕겨재 혼입 콘크리트의 특성 실험범위

단 계	평균 입경	단위결합 재량(kg/m ³)	재령일 수(일)	혼화재		양생 방법	혼화제혼 입율(%)	목표슬 럼프(cm)	반복수 (회)	실험 항목
				종 류	혼입율(%)					
1	20 μ m	300,320,340 360,380,400 500,600	3, 7, 28	왕겨재	0.5,10,15, 20, 25, 30	표준 양생	0.5 ~ 2.0	21±3	6	압축 강도
2	20 μ m	400,500,600	3,7,28,91 365,730	왕겨재 실리카흙	0 최적혼입율	표준 양생	0.5 ~ 2.0	21±3	6	압축 인장
3	10 μ m	300, 400, 500, 600	3,7,28,91 365,730	왕겨재	0.5,10,15, 20, 25, 30	표준 양생	0.5 ~ 2.0	21±3	6	압축 강도

3. 실험결과 분석 및 고찰

가. 왕겨재를 혼화제로 사용시 요구되는 최소의 결합재량

<표 7-1>의 1단계 실험범위 내에서 표준양생한 왕겨재 혼입 콘크리트 공시체를 재령별 압축강도 실험을 실시하여 재령별·결합재량별·왕겨재 혼입율별 압축강도를 얻은 다음 이를 왕겨재를 혼입하지 않은 보통 콘크리트의 재령별·결합재량별 압축강도로 각각 나누어 재령별·결합재량별 백분율을 구하였다. <그림 7-1>은 이 중 재령 28일에서의 결합재량별·왕겨재 혼입율별 압축강도 비율을 나타낸 것이다. 또한 <표 7-1>의 3단계 실험범위내에서 표준양생한 공시체를 1단계 실험과 동일한 방법으로 실험분석한 결과를 정리한 것이 <표 7-2>이며 <표 7-1>의 제 2단계 실험범위내에서 표준양생한 공시체를 제 1단계와 동일한 방법으로 실험분석한 결과를 정리한 것이 <표 7-3>이다.



<그림 7-1> 단위결합재량별 왕겨재 혼입율별 압축강도비(평균입경 20 μ m)

<표 7-2> 단위결합재량별 왕겨재 혼입율별 압축강도비(평균입경 10 μ m)

재령 일수	왕겨재 혼입율	단위결합재량(kg/ m ³)				비 고
		300	400	500	600	
3일	0 % ^{a)}	127	148	362	462	※ a) : 재령별, 단위결합재량별 압축강도(kg/cm ²) b) : 보통콘크리트의 압축강도(a) 에 대한 압축강도비(%) ※ ★ : 왕겨재 최적 혼입율 : 왕겨재 허용 혼입율 범위 ☆ : 왕겨재 최대 혼입율
	5 % ^{b)}	90	85	104	91	
	10 % ^{b)}	83	106	101	91	
	15 % ^{b)}	71	95	78	82	
	20 % ^{b)}	61	82	81	75	
	25 % ^{b)}	57	78	73	76	
	30 % ^{b)}	54	75	52	62	
7일	0 % ^{a)}	166	232	459	538	
	5 % ^{b)}	108	103	106	99	
	10 % ^{b)}	98	106	109	86	
	15 % ^{b)}	83	98	89	72	
	20 % ^{b)}	62	96	85	76	
	25 % ^{b)}	59	85	86	73	
	30 % ^{b)}	50	86	72	68	
28일	0 % ^{a)}	287	308	480	614	
	5 % ^{b)}	95	114	118	113 [★]	
	10 % ^{b)}	88	115 [★]	121 [★]	107	
	15 % ^{b)}	70	109	105	112	
	20 % ^{b)}	79	105	130	100	
	25 % ^{b)}	72	100 [☆]	109 [☆]	100 [☆]	
	30 % ^{b)}	68	95	93	87	

<표 7-3> 단위결합재량별 왕겨재 혼입율 콘크리트의 장기강도 특성과 탄성계수

단위결 합재량	혼화재 종 류	장 기 강 도 (단위 : kg/cm ²)								탄성계수 (28일) (kg/cm ²)
		압 축 강 도						인장	휨인장	
		3 일	7 일	28일	91일	365일	730일			
400 Kg/m ³	보통 ^{a)}	259	272	367	387	404	실험중	30	62	298,000
	왕겨재 ^{b)}	286	326	433	500	549	실험중	34	70	314,000
	실리카 ^{c)}	300	360	442	510	545	실험중	35	72	315,000
500 Kg/m ³	보통 ^{a)}	297	325	444	470	529	실험중	38	78	314,000
	왕겨재 ^{b)}	333	396	494	536	577	실험중	40	81	328,000
	실리카 ^{c)}	362	390	490	563	600	실험중	40	82	328,000
600 Kg/m ³	보통 ^{a)}	355	377	485	510	540	실험중	43	81	327,000
	왕겨재 ^{b)}	382	407	545	664	712	실험중	45	82	339,000
	실리카 ^{d)}	378	434	556	625	665	실험중	46	91	340,000

※ a) : 보통의 콘크리트, b) : 왕겨재(평균입경 20 μ m) 10% 혼입 콘크리트,
 c) : 실리카흙 10% 혼입 콘크리트, d) : 실리카흙 5% 혼입 콘크리트,
 e) : 왕겨재(평균입경 20 μ m) 5% 혼입 콘크리트

<그림 7-1>에서 평균입경 20 μ m인 왕겨재를 혼화재로 사용할 경우

에는 단위결합재량이 적어도 320kg/m³ 이상이 되어야 비로소 재령 28일의 콘크리트 압축강도를 증가시킨다는 것을 알 수 있었다. 달리 표현하면 단위결합재량이 300kg/m³ 이하일 경우에는 왕겨재를 혼화재로서 콘크리트에 혼입할 경우 오히려 재령 28일의 콘크리트 압축강도를 저하시키는 결과를 보이고 있다.

한편 <표 7-2>을 살펴보면 평균입경이 10 μ m 근처에 있는 왕겨재를 혼화재로 사용할 경우에도 단위결합재량이 300kg/m³ 이하일 때는 왕겨재를 혼입하지 않는 것이 오히려 재령 28일의 콘크리트 압축강도를 증가시킨다는 동일한 결과를 나타내고 있다.

따라서 평균입경이 10 ~ 20 μ m 인 왕겨재를 콘크리트용 혼화재로 사용하여 보통 콘크리트의 재령 28일 압축강도 보다 더 높은 압축강도를 나타나게 하기 위해서는 최소의 단위결합재량이 320kg/m³ 이상이 되어야 한다.

나. 왕겨재 최적 혼입비와 압축강도 증가 특성

왕겨재를 혼화재로 혼입시 보통의 콘크리트에 비해서 재령 28일 압축강도를 최대화하는 최적의 왕겨재 혼입율과 또한 보통 콘크리트의 재령 28일 압축강도에 비해서 최적 혼입율의 왕겨재를 혼입한 콘크리트가 나타내는 재령 28일에서의 압축강도 증가율을 <그림 7-1>과 <표 7-2>로부터 분석 정리하면 분쇄입경별로 다음 <표 7-4>와 같이 나타났다.

<표 7-4> 분쇄입경별 왕겨재 최적 혼입율과 압축강도 증가율

구분	평균분쇄입경	단위결합재량 (kg/m ³)					
		320	400	500	600	평균	분산계수
왕겨재 최적혼입율	20 μ m	10 %	10 %	10 %	5 %	9 %	
	10 μ m	10 %	10 %	10 %	5 %	9 %	
28일 압축강도 증가율	20 μ m	15 %	18 %	11 %	12 %	14 %	0.23
	10 μ m	20 %	22 %	21 %	28 %	23 %	0.15

동 표에서 왕겨재 최적 혼입율은 분쇄입경의 크기와는 무관하나

단위결합재량 별로는 차이가 있다. 즉, 단위결합재량이 320 ~ 500 kg/m³ 범위일 때는 최적혼입율이 10%이나 단위결합재량이 600kg/m³ 일 때는 시멘트 중량의 5%이다.

반면 최적혼입율의 왕겨재를 혼입시 재령 28일의 압축강도는 평균입경이 20 μ m인 저온제어 왕겨재를 사용할 때는 재령 28일 압축강도가 단위결합재량의 크기에 따라서 11% ~ 18%(평균 14%) 범위에서 증가하는데 그치며 단위결합재량별 증가율의 편차가 커서 분산계수(표준편차/평균)가 0.23에 이른다. 그러나 평균입경이 10 μ m인 저온제어 왕겨재를 사용할 때는 재령 28일 압축강도가 20% ~ 28%(평균 23%) 범위까지 증가하며 분산계수가 0.15에 불과하여 단위결합재량의 크기에 따른 재령 28일의 압축강도 증가율이 안정적으로 나타나므로 혼화재로서 콘크리트의 품질에 미치는 영향이 안정적이라고 판단할 수 있다. 따라서 콘크리트의 품질향상 측면에서는 왕겨재 평균입경을 10 μ m로 유지하는 것이 훨씬 유리하다.

한편 <표 5-14>에 나타나 있는 실리카흙의 경우와 비교할 때, 실리카흙의 최적 혼입율의 크기는 평균입경이 10 μ m 또는 20 μ m인 왕겨재의 최적혼입율과 같다. 그러나 실리카흙을 최적혼입율 까지 혼입할 때 재령 28일에서의 압축강도 증가율은 평균입경이 20 μ m인 왕겨재 보다 약간 크게 나타난다. 즉, 실리카흙의 혼화재로서 강도특성은 평균입경이 20 μ m인 왕겨재 보다 약간 우수하다.

단위결합재량이 증가함에도 또한 평균입경의 크기가 달라짐에도 왕겨재 최적혼입율의 크기가 변하지 않는 것은 시멘트 수화물과 2차적인 포졸란반응을 일으켜 재령 28일의 압축강도를 증가시킬 수 있는 왕겨재의 량에 한계가 있다는 것을 나타내며 그 한계치가 최적의 왕겨재 혼입율로 추정된다.

또한 평균입경이 작을수록 재령 28일 압축강도 증가율이 크게 나타나는데 이는 평균입경이 작을 경우 비표면적이 커서 시멘트 수화물과 포졸란반응이 쉽게 더 잘 일어나며 시멘트 수화물간의 공극을 더욱더 잘 충전하기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

다. 왕겨재 최대 혼입비

최적혼입율의 범위를 넘어서 왕겨재를 점차 추가로 혼입할 경우 최적혼입율 만큼의 왕겨재는 포졸란반응과 수화물 사이의 공극을 충전하여 최대의 압축강도를 발현하나 나머지 왕겨재는 포졸란반응을 일으키지 못하고 오로지 공극 충전효과만 있기 때문에 압축강도가 오히려 점차 저하하여 마침내는 보통의 콘크리트와 동일한 압축강도를 나타내게 된다.

이 때의 왕겨재 혼입율을 최대 혼입율로 정의하면 <그림 7-1>과 <표 7-2>로부터 분쇄입경별 단위결합재량별 왕겨재 최대혼입율을 다음 <표 7-5>와 같이 정리할 수 있다.

<표 7-5> 분쇄입경별 단위결합재량별 왕겨재 최대 혼입율

평 균 분쇄입경	단 위 결 합 재 량 별 혼 입 율 (%)			
	320 kg/m ³	400 kg/m ³	500 kg/m ³	600 kg/m ³
10 μm	25	25	25	25
20 μm	10	10	10	5

<표 7-4>와 <표 7-5>로부터 평균입경이 20 μm 인 왕겨재는 최적 혼입율과 최대의 혼입율이 단위결합재량의 크기에 관계없이 같은 값을 가지나 평균입경이 10 μm 인 왕겨재는 단위결합재량의 크기에 관계없이 최대 혼입율은 최적 혼입율보다 훨씬 크게 나타난다.

이는 평균입경이 클 경우 시멘트 수화물 사이의 공극을 충전하는 효과가 적으며, 비표면적이 적어서 포졸란 반응이 쉽게 빨리 일어나지 않음으로 나타난 현상으로 판단된다.

이 때문에 평균입경 20μm 인 왕겨재를 콘크리트에 최적혼입율 만

큼 실제로 투입하고자 할 경우 계량오차가 발생하면 오히려 왕겨재를 혼입하지 않는 보통의 콘크리트 보다도 재령 28일의 압축강도가 떨어질 수 있으므로 정밀하게 무게를 실측할 수 있는 계량기를 사용하거나 최적혼입율 보다도 약간 작은 양의 왕겨재를 투입하여야 계량오차에 의한 압축강도 감소현상을 피할 수 있다. 그 외에도 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재는 최적 혼입율만큼 혼입하더라도 <표 7-4>에 나타나 있는 바와 같이 재령 28일에서 압축강도 증가율의 크기가 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재 보다도 작음은 물론 증가율 자체가 단위결합재량별로 큰 편차를 나타낸다. 따라서 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 실용적인 혼화재로 사용하기에는 제약이 따른다.

또한 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재의 최대혼입율은 <표 5-14>에 나타나 있는 실리카흙의 최대혼입율과 비교할 때 그 크기가 작으므로 실리카흙에 비해서 사용 범위가 더욱 좁다. 더구나 실리카흙에 비해서 콘크리트용 혼화재로서 왕겨재의 인지도가 소비자들에게 매우 낮으므로 왕겨재가 실리카흙과 동일한 품질을 나타내는 정도로서는 건설현장에 종사하는 소비자들이 왕겨재 품질의 불확실성 등을 이유로 외면할 것이 예상된다.

따라서 이러한 이유들로 인해 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재로서는 왕겨를 콘크리트용 혼화재로 개발하여 농어민의 소득증대에 기여하려는 본 연구의 목표를 달성하기 어렵다고 판단된다.

반면 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재는 단위결합재량의 크기에 관계없이 최대 혼입율의 크기가 최적 혼입율보다 훨씬 크게 나타나며, <표 7-4>에 나타나 있는 바와 같이 최적 혼입율에 해당하는 왕겨재를 혼입할 때 재령 28일의 압축강도 증가율 편차가 단위결합재량별로 적게 나타난다. 더구나 <표 5-14>에 수록되어 있는 실리카흙의 최

대 혼입을 크기와 비교할 때 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재의 최대 혼입을 크기가 더욱 크며 나아가 최적의 혼입을 만큼 치환하였을 때 재령 28일에서의 압축강도 증가율도 실리카흙에 비해서 훨씬 더 크다.

한편 콘크리트용 혼화재로서 왕겨재의 인지도가 낮은 점 까지 감안하면 혼화재로서 왕겨재의 품질은 적어도 실리카흙의 품질보다는 우수해야 한다. 따라서 이러한 점들을 종합적으로 고려하면 본 연구의 실용화를 위해서는 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재가 혼화재로서 유리하다고 판단된다.

라. 왕겨재 분쇄입경별 시공성

<표 7-1>에 나타난 실험범위 중 평균입경이 각각 $20\mu\text{m}$ 와 $10\mu\text{m}$ 인 저온제어로 소각한 왕겨재를 최적 혼입을 만큼 치환하고 목표슬럼프($21 \pm 2\text{cm}$)를 충족시키는 상태에서 콘크리트 1m^3 제조하는데 소요되는 재료의 양을 발체 정리한 것이 <표 7-6>이다.

동일한 목표슬럼프를 나타낼 경우 콘크리트의 시공성은 물 또는 감수제의 사용량에 의해 판단할 수 있다. <표 7-6>에서 감수제의 사용량 크기를 살펴보면 단위결합재량의 크기에 관계없이 평균입경이 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재, 실리카흙, 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재 순서로 나타나므로 콘크리트의 시공성 또한 같은 순서로 좋아진다.

이러한 현상은 실리카흙의 평균입경이 평균입경이 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재와 유사하기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

콘크리트 구조물의 품질은 콘크리트의 시공성 양부에 의해서도 크게 좌우된다. 시공성이 좋을 경우 굳지 않은 콘크리트가 거푸집의 곳곳을 완전히 충전하고 다짐효과가 매우 뛰어나기 때문에 굳은 후에는 콘크리트의 품질이 매우 높아 내구성도 뛰어나게 된다.

<표 7-6> 평균입경별 단위결합재량별 콘크리트 재료량

단위결합 재량(kg/m ³)	평균입경 (μ m)	최적혼입율 (%)	단위 재료량(kg/m ³)				
			시멘트	물	감수제	왕겨재	실리카흙
400	20(왕겨재)	10	360.0	166.0	11.25	40.0	-
	10(왕겨재)	10	360.0	166.0	8.20	40.0	-
	실리카흙	10	360.0	166.0	12.91	-	40.0
500	20(왕겨재)	10	450.0	157.0	13.70	50.0	-
	10(왕겨재)	10	450.0	157.0	10.24	50.0	-
	실리카흙	10	450.0	157.0	13.53	-	50.0
600	20(왕겨재)	5	570.0	166.0	16.53	30.0	-
	10(왕겨재)	5	570.0	166.0	12.10	30.0	-
	실리카흙	5	570.0	166.0	13.74	-	30.0

따라서 왕겨재가 혼화재로서 소비자들의 낮은 인지도를 극복하고 실리카흙에 비해서 비교 우위적 품질경쟁력을 갖기 위해서는 시공성의 차원에서라도 평균입경이 10 μ m인 왕겨재가 평균입경이 20 μ m인 왕겨재 보다도 절대적으로 유리하다고 판단된다.

4. 실험결과 고찰

이상의 실험적 분석결과를 종합하면 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

첫째, 왕겨재가 혼화재로서 콘크리트의 압축강도를 증진하기 위해서는 단위결합재량이 적어도 320 kg/m³ 이상이 되어야 한다.

둘째, 평균입경이 20 μ m인 왕겨재를 혼화재로 활용시 최적의 왕겨재 혼입율은 단위결합재량이 320 ~ 500 kg/m³ 인 범위에서는 시멘트 중량의 10%이고 단위결합재량이 600kg/m³일 경우 5%로 나타났다. 또한 이때의 압축강도는 보통의 콘크리트에 비해서 재령28일에는 11% ~ 18%(평균 14%) 증가하며 증가율이 단위결합재량별로 큰 편차를 보이는데 이러한 현상은 실리카흙과 매우 비슷하다.

그러나 실리카흙과 달리 최대혼입율의 크기가 최적혼입율의 크기와 일치하기 때문에 실제 구조물에 적용시 계량오차가 발생하면 오히려 왕겨재를 혼입하지 않는 보통의 콘크리트 보다도 압축강도

가 떨어지는 현상이 발생하는 등 사용에 주의를 요하며, 재령 28일에서 압축강도 증가율의 크기가 실리카흙보다도 약간 작음은 물론 증가율 자체가 단위결합재량별로 큰 편차를 나타낸다. 이외에도 시공성 측면에서도 실리카흙에 뒤짐은 물론 건설업계의 소비자들에게 인지도도 낮다.

따라서 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재가 실리카흙에 비해서 비교우위적 품질 경쟁력을 가질 수 없다고 판단된다.

세째, 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 사용시 최적의 왕겨재 혼입율은 단위결합재량이 $320 \sim 500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 인 범위에서는 시멘트 중량의 10%이고 단위결합재량이 $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ 일 경우 5%로 나타났다. 또한 이때의 압축강도는 보통의 콘크리트에 비해서 재령 28일에는 20% ~ 28%(평균 23%) 증가하며 증가율이 단위결합재량별로 큰 편차를 보이지 않는 등 실리카흙 보다도 품질이 매우 비슷하다.

또한 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재의 최대혼입율은 실리카흙이나 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재에 비해서 그 크기가 훨씬 넓은 25%에 달하기 때문에 실제 구조물에 적용시 왕겨재를 다양하게 사용할 수 있으므로 사용상의 주의가 그다지 필요없다. 또한 재령 28일에서 압축강도 증가율의 크기가 실리카흙이나 평균입경 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재에 비해서 훨씬 크며 증가율 자체에서도 큰 편차를 나타내지 않는 등 콘크리트용 혼화재로서 실리카흙 보다도 품질이 뛰어나다. 이외에도 시공성 측면에서도 실리카흙 보다도 뛰어 나므로 건설업계의 소비자들에게 인지도가 낮음에도 불구하고 비교우위적 품질 경쟁력으로 인해 향후 혼화재로 시판시 급속히 혼화재 시장을 잠식할 것으로 예상된다.

넷째, 콘크리트용 혼화재료의 품질 및 향후 시장경쟁력 측면을

판단의 기준으로 삼을 때 최적의 왕겨재 평균입경은 $10\mu\text{m}$ 라는 결론을 도출할 수 있었다.

제 3 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 인장강도 특성

콘크리트는 본래 압축강도는 매우 높으나 대신 인장에 매우 취약하므로 취약한 인장력은 철근 등의 보강재에 의존하는 것이 지금까지의 콘크리트 구조물의 설계 및 시공의 기준이며 이를 반영하여 국내외에서 발간되는 모든 콘크리트 시방서에서는 콘크리트가 가지는 인장력을 무시하라고 규정하고 있다. 이에 따라 지금까지 규명한 최적의 왕겨재 혼입율이나 최적의 왕겨재 분쇄입경 및 실리카흙과의 품질 경쟁력 등은 표준양생시 나타나는 압축강도를 기준으로 분석한 것이다.

그러나 콘크리트도 압축강도의 약 1/10에 해당하는 인장강도를 발휘하며 소규모 콘크리트 구조물 특히 소규모 용수로용 프리캐스트 콘크리트 제품은 콘크리트 자체가 가지는 인장강도를 이용하는 제품이 대단히 많다.

따라서 최적 혼입율의 왕겨재(평균입경 $20\mu\text{m}$)와 실리카흙을 혼입한 표준양생 콘크리트가 가지는 재령 28일의 휨인장강도와 할렬인장강도 특성을 규명함으로써 기존의 상업용 혼화재중 효과가 가장 뛰어나고 고가인 실리카흙과 품질특성을 비교분석하고자 하였다

1. 실험재료의 품질 특성

본 실험을 위해서 사용한 시멘트, 모래, 자갈, 굵은골재, 혼화제 및 왕겨재는 압축강도 특성실험에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용하였다.

2. 실험범위 및 방법

<표 7-1>의 2단계 실험조건 범위내에서 에 따라 할렬인장강

도는 KSF2423의 규정에 따라 휨인장강도는 KSF2407의 규정에 따라 최적혼입율의 왕겨재와 실리카흙을 혼입한 표준공시체를 만들어 표준양생 후 재령별·단위결합재량별로 인장강도 실험을 실시하고 그 결과를 분석하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

재령별 단위결합재량별 인장강도 실험결과를 정리한 것이 <표 7-3>이다.

가. 활렬인장강도 특성

평균입경이 20 μ m인 왕겨재로 최적혼입비 만큼 보통 포틀랜드 시멘트를 대체하면 설계기준인 28일에서의 활렬인장강도가 보통의 콘크리트에 비해서 약 8% 증가하며, 인장강도는 압축강도의 약 1/12로 나타났다.

또한 활렬인장강도 증가율의 크기는 상업용 혼화재로서 가장 널리 사용되고 있는 실리카흙과 유사하므로 인장강도 측면에서는 평균입경이 20 μ m인 왕겨재도 상업용 혼화재료로서 품질의 경쟁력이 있음을 알 수 있다.

나. 휨인장강도 특성

평균입경이 20 μ m인 왕겨재로 최적혼입비 만큼의 보통포틀랜드시멘트를 대체시 설계기준인 28일 휨인장강도가 보통의 콘크리트에 비해서 약 10% 내외가 증가하며, 휨인장강도의 크기는 압축강도의 약 1/6으로 나타났다.

또한 휨인장강도 증가율의 크기는 상업용 혼화재로서 가장 널리 사용되고 있는 실리카흙과 유사하므로 평균입경이 20 μ m인 왕겨재로도 상업용 혼화재료로서 품질의 타당성이 있음은 물론 높은 휨인장강도가 생명인 프리캐스트 콘크리트 제품에서 평균입경이 20

㎍인 왕겨재를 혼화재료로 투입시 상업적 타당성이 있을 것이라는 것을 유추할 수 있었다.

제 4 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 열적 특성

시멘트가 물과 수화반응할 때 약 120cal/g 까지 열을 발생한다. 한편 콘크리트는 열전도율이 낮기 때문에 매우 큰 콘크리트 구조물인 경우 수환응에서 발생하는 수화열로 인해서 콘크리트 내부에 높은 온도상승이 발생한다. 그러나 콘크리트 외부는 대체로 온도가 낮기 때문에 내부의 높은 열은 서서히 외부로 방출하면서 내외부의 급격한 온도경사로 인해 심각한 균열이 발생한다.

시멘트의 수화반응에서 발생하는 수화열은 시멘트의 성분에 의해 좌우되며 시멘트의 주성분은 C_3S (Tricalcium Silicate, $3CaO \cdot SiO_2$), C_2S (Dicalcium Silicate, $2CaO \cdot SiO_2$), C_3A (Tricalcium Aluminate, $3CaO \cdot Al_2O_3$) 및 C_4AF (Tetracalcium Aluminoferrite, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) 4이며 이들 각 성분이 나타내는 수화열의 크기는 다음 <표 7-7>로 알려져 있다.

<표 7-7> 시멘트의 성분별 수화열

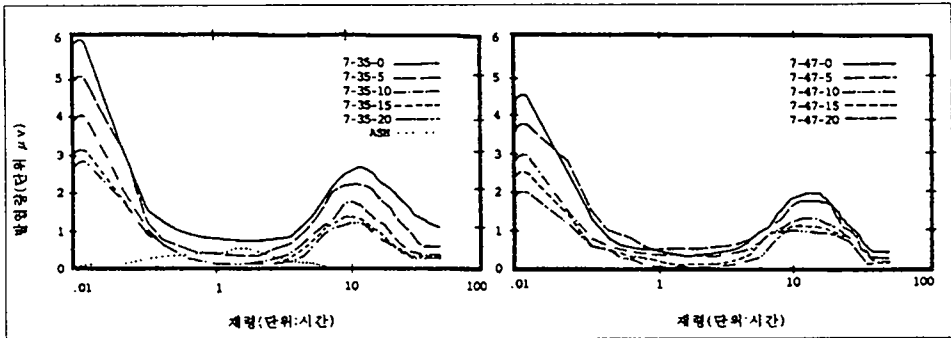
성분	1 g당 수화열	
	I/g	cal/g
C_3S	502	120
C_2S	260	62
C_3A	867	207
C_4AF	419	100

한편 콘크리트에서 수화열에 의해 나타나는 주된 피해는 총 수화 반응열의 크기에 의해서 나타나기 보다는 열발산속도가 늦기 때문에 신구(新舊)의 콘크리트간 또는 동일 시기에 친 콘크리트일지라도 내외부의 급격한 온도 차이로 인해 나타나는 균열의 피해라 할 수 있으며 주로 매스 콘크리트에서 이러한 피해가 나타난다.

한편 저온으로 제어소각한 왕겨재 속에는 비결정질 SiO_2 가 다량

으로 함유되어 있으며 이것이 시멘트의 4가지 성분 중 특히 C₃S 및 C₃A와 수화반응을 가속화 시킨다. 왕겨재 속의 실리카흙은 초기에 칼슘이온과 반응하여 칼슘이온을 감소시키고 이에따라 시멘트의 수화반응으로 생성되는 수화물의 특성이 변하게 되며 이로인해 시멘트 풀의 수화반응 시간이 시멘트 모르타르 보다도 길게 나타난다. 이로인해 실리카흙을 혼입한 시멘트 풀의 열발산 속도는 모르타르의 경우 보다 더욱 크다.

<그림 7-2>는 외국에서 왕겨재 혼입율별 · 물-시멘트비별 · 재령별 왕겨재 혼입 시멘트풀의 수화열 발산 과정을 실험한 결과이다.



<그림 7-2> 왕겨재 혼입 시멘트풀의 시간별 수화열 발생량
(재령-물시멘트비-왕겨재혼입율)

이로부터 왕겨재를 혼입하더라도 보통 시멘트의 수화반응과정과 마찬가지로 2회에 걸쳐 최대 발열량을 보이며 최대 발열량이 나타나는 시간 역시 0.1시간과 10시간으로서 차이가 없다. 또한 왕겨재의 혼입율이나 혼합수의 양이 증가할수록 최대발열량의 크기는 작아지나 수화열의 발산지속시간이나 최대발열량이 나타나는 시각에서는 변화가 없다. 이러한 수화열 발산 형태는 시멘트의 성분중 C₃S가 나타내는 수화열 발산 양상과 일치하는 데 그 이유는 C₃S의 중량이 대략 전체 시멘트 중량의 50% 이상을 점유하기 때문

에 왕겨재를 혼입하더라도 변화가 나타나지 않았기 때문이다.

한편 매스 콘크리트의 내부는 경화시 수화반응 과정에 따라 수화열이 발생하여 높은 온도상태를 유지한다. 그러나 열확산 속도가 낮기 때문에 이를 온도가 낮은 인근의 콘크리트로 내부의 높은 열을 신속히 확산시키지 못하여 콘크리트 내부에서 외부로 급격한 비선형 온도경사가 나타난다. 비선형 온도경사에 따라 입자들이 열팽창 변형을 일으켜야 하나 고체입자간의 연속성으로 인해 평면 변형을 유지하려는 속성 때문에 상대적인 변형을 차이를 유발하고 이것이 인장응력을 일으켜 콘크리트 내부에 균열을 발생시키고 구조물의 내구성을 심각하게 훼손하게 된다.

따라서 매스 콘크리트 내부에서 나타나는 온도는 단열과정에서 나타나는 최고의 수화반응 온도라 할수 있다. 보통의 콘크리트에 대해서는 수많은 실험 결과 있으므로 이를 토대로 각국에의 콘크리트 시방서에서 단열온도상승 정수(단열온도 상승량, 온도상승계수)를 규정하고 있다.

그러나 왕겨재를 혼입한 콘크리트에 대해서는 단열온도상승 정수를 규명한 바가 없으므로 이를 구명하여 왕겨재를 매스 콘크리트용 혼화재로 사용할 때 지장이 없는지 여부를 규명하고자 하였다.

1. 실험재료의 품질 특성

본 실험을 위해서 사용한 시멘트, 모래, 자갈, 굵은골재, 혼화제 및 왕겨재는 압축강도 특성실험에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용하였다.

2. 실험범위 및 방법

단열온도의 크기는 왕겨재의 혼입율과 단위시멘트량에 좌우되고 왕겨재의 입경에 의해서는 그다지 영향을 받지 않을 것이다.

이에 따라 본 연구에서는 저온으로 제어한 김제산 동진벼를 평균 입경이 $20\mu\text{m}$ 될 때까지 분쇄한 다음 단위결합재량은 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 선정하고 최적혼입율의 왕겨재를 혼입한 콘크리트와 왕겨재를 혼입하지 않는 보통의 콘크리트를 목표슬럼프가 $21\pm 3\text{cm}$ 가 되도록 배합하였다. 200°C 까지 측정할 수 있는 온도센서(정밀도: $\pm 0.5^\circ\text{C}$) 2개가 설치된 단열 거푸집을 특수하게 제작하고 2개의 온도센서에 서 감지한 온도는 컴퓨터에 자동 저장하게 하였다. 온도센서 중 1개는 실험용 콘크리트의 시편의 중앙에 설치하여 수화반응 진행에 따른 콘크리트의 중앙부 온도를 측정하고 나머지는 콘크리트 시편의 표면온도를 측정하도록 배치하였다. 이로부터 콘크리트 시편의 중앙부 온도가 시편의 표면온도 보다 1°C 이상 높으면 배치된 전열선을 가열하여 시편의 표면온도를 인위적으로 높여 중앙부 온도와 0.5°C 이내에 도달하도록 전열선을 가동하여 내부의 높은 열원이 표면으로 이동하지 못하도록 하는 <그림 7-4>와 같은 단열온도 측정 실험기구를 제작하였다.

이 실험기구를 이용하여 최적혼입율의 왕겨재를 혼입한 콘크리트와 보통의 콘크리트를 배합에 따라 시간별로 측정하고 그 결과로부터 회귀분석을 실시하여 단열온도상승정수를 도출하였다.

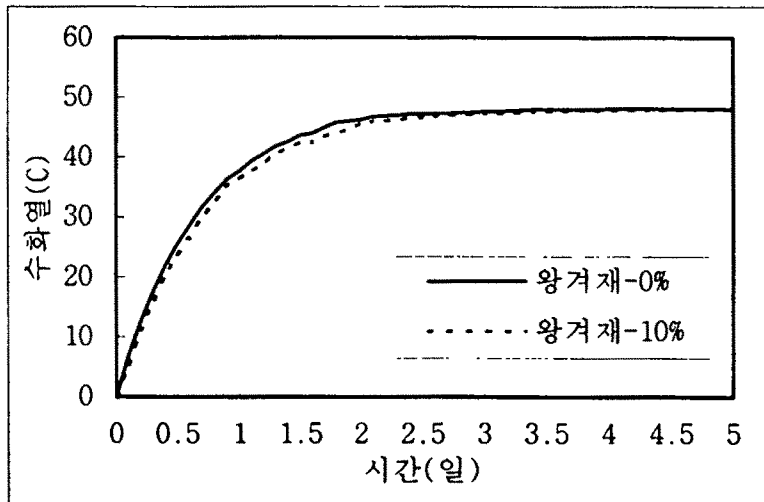
3. 실험결과 분석 및 고찰

단열온도상승 실험기 내부 콘크리트에서 나타나는 시간별 단열온도상승 실험결과치를 그림으로 표시한 것이 <그림 7-3>이며 동일한 측정자료로 부터 기존의 콘크리트 시방서에서 제시하고 있는 단열온도상승식 $Q_t = Q_\infty(1 - e^{-\nu t})$ 을 이용한 회귀분석을 실시하여 최종단열온도상승량(단열상승정수) Q_∞ 와 온도상승계수 ν 를 구하였으며 기존의 시방서에서 제시한 식과 비교한 결과가 <표7-8>이다.

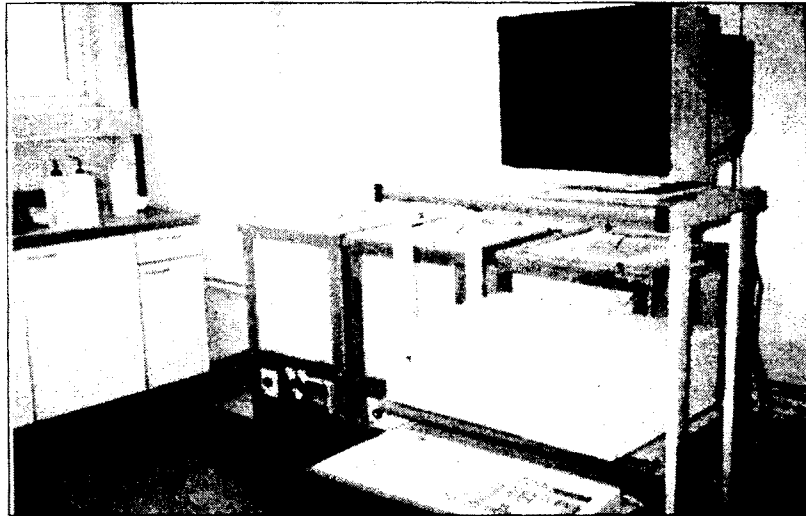
단열온도상승정수는 왕겨재 혼입유무와 무관하게 종전시방서에서 제시하는 값과 비슷하게 나타나는바 이는 왕겨재 혼입율이 10%에 불과하고, 콘크리트속에는 골재의 체적이 전체의 약 75%에 달하기 때문에 시멘트의 수화반응열이 단열온도상승량에 큰 영향을 미치지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 온도상승계수는 왕겨재 혼입시 약간 작게 나타나는데 이는 왕겨재를 혼입함에 따라 왕겨재의 주성분인 SiO_2 가 시멘트의 조기 수화발열에 큰 영향을 미치는 C_3S 와 C_3A 와 합해져 화학적 조성이 달라졌기 때문인 것으로 판단된다.

<표 7-6> 단열상승정수 비교표

구 분	종 전 시방서	개 정 시방서	본 연구		비 고 (실험조건)
			왕겨재 0%	왕겨재 10%	
단열온도 상승량	50 °C	56 °C	48 °C	48 °C	단위결합재량 : 400 kg/m ³ 초기타설온도 : 20 °C
온도상승 계수	1.049	1.484	1.520	1.478	



<그림 7-3> 시간별 왕겨재 혼입율별 단열온도상승 곡선



<그림 7-4> 단열온도상승 측정 실험기

제 5 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 역학적 특성

콘크리트를 구조물에 사용할 때는 콘크리트의 탄성계수를 근거로 구조역학적인 계산을 실시하여 구조물의 치수등을 결정한다. 보통의 콘크리트에 대한 재령 28일에서의 탄성계수는 이미 많은 실험결과를 토대로 각국의 시방서에 통일적으로 규정되어 있다.

그러나 왕겨재를 혼입한 콘크리트 처럼 보통의 콘크리트에 비해서 압축강도가 높아지는 경우에 대한 실험적 사실이 없다. 그러므로 혼화재로서 인지도가 매우 낮은 왕겨재를 콘크리트용 혼화재로 널리 보급시키기 위해서는 왕겨재 혼입 콘크리트의 탄성계수에 대한 규명 없이는 건설기술자들이 왕겨재를 혼화재로 사용하는 것을 기피할 것이며 이는 왕겨재를 혼화재로 개발하여 농어민의 소득증대에 기여하고자 하는 계획에 많은 차질이 나타날 것이다.

이에 따라 본 연구의 최종 목적을 달성하기 위해서 왕겨재 혼입 콘크리트의 역학적 특성 특히 탄성계수를 규명하고자 하였다.

1. 실험재료의 품질 특성

본 실험을 위해서 사용한 시멘트, 모래, 자갈, 굵은골재, 혼화제 및 왕겨재는 압축강도 특성실험에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용하였다.

2. 실험범위 및 방법

왕겨재가 혼화제로 사용될 경우에는 최적 혼입율까지 사용될 것이 예측되므로 <표 7-1>의 2단계에 나타나 있는 실험범위를 선정하고 KSF2438의 규정에 따라 28일간 표준양생한 원형공시체를 대상으로 탄성계수를 단위결합재량별로 실측하였다.

KSF2438의 규정에 따르면 공시체 압축강도의 40%되는 점까지 하중을 가한 다음 이때의 변형율을 측하여 탄성계수를 구하도록 되어 있으나 첫째 공시체의 압축강도를 구하기 위해서는 동일배합의 특정시험체를 파괴하기 때문에 시험체가 없어지며 이에 따라 동일한 공시체로 압축강도의 40%되는 점까지 하중을 가할 수가 없다. 한편 동일배합의 콘크리트로 만든 시험체라 할지라도 여러 가지 원인에 의해 압축강도에서 편차를 보인다. 따라서 동일한 공시체가 아니면 아무리 동일한 조건으로 제조·양생한 시험체라 할지라도 다른 압축강도를 나타내므로 40%되는 압축강도를 찾기가 불가하여 KSF2438의 규정을 준수하여 구한 탄성계수에는 많은 오차가 포함된다.

이에 따라 본 연구에서는 오차를 줄이기 위해 하중-변형량을 동시에 실측할 수 있는 정밀시험기를 구입하고 이를 이용하여 모든 시험체를 파괴점 까지 시험하여 각각의 시험체별 하중-변형량을 구하고 이로부터 압축강도의 40%에 해당하는 점까지의 변형량과 하중을 이용하여 탄성계수를 정밀하게 실측하였다.

이렇게 실측된 탄성계수를 단위결합재량별로 통계분석하여 단위결합재량별 평균치를 구하고 다시 압축강도와의 상관성을 회귀분석하였다. 나아가 혼화재로서 가장 경합이 예상되는 실리카흙과 비교하기 위해서 실리카흙을 혼입한 콘크리트의 탄성계수도 실측하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

단위결합재량별 혼화재별 탄성계수 분석결과를 <표 7-3>에 수록하였다.

실험범위는 실용적으로 널리 쓰이는 일반저인 콘크리트의 압축강도보다 높은 범위이며 또한 왕겨재 혼입 콘크리트의 28일 압축강도가 왕겨재를 혼입하지 않은 보통의 콘크리트 보다도 높기 때문에 탄성계수의 크기도 보통의 콘크리트 보다도 크게 나타났다. 또한 28일 압축강도가 증가하면 탄성계수도 증가한다는 보편적인 사실도 발견할 수 있었다.

탄성계수와 28일 압축강도의 관계식을 회귀분석한 결과 탄성계수는 콘크리트 압축강도가 고강도($350-800\text{kg/cm}^2$) 이므로 압축강도와 탄성계수의 관계는 탄성계수 = $41,500 \sigma_{ck}^{1/3}$ 으로 분석되었다.

이 크기는 건교부 제정 콘크리트 시방서에서 제안하는 일반적인 탄성계수의 크기보다는 크게 나타난다.

탄성계수가 크다는 것은 왕겨재 혼입 콘크리트를 구조물에 사용할 때 구조물의 치수를 줄일 수 있어 매우 경제적으로 구조물을 설치할 수 있다는 것을 나타내므로 구조물의 시행주 입장에서는 왕겨재 혼입콘크리트를 선호할 것이므로 왕겨재가 혼화재로서 소비가 촉진될 것으로 판단된다.

제 6 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 내구성

최근의 콘크리트 산업 분야에서는 GR대비 CO₂발생량이 매우 큰 시멘트의 사용량을 줄이기 위해서 콘크리트의 고강도화, 고내구화 및 고품질화로 목표를 잡고 이의 접근방법으로서 고성능화학혼화제의 개발보급과 왕겨재와 같은 환경친화적인 혼화재나 산업부산물의 혼화재화 등의 수단을 이용하고 있다. 특히 최근에 급격히 악화되고 있는 지구환경에 저항하면서 소정의 내구연한까지 콘크리트 구조물의 사용성을 유지해야 한다는 명제를 세계적인 공통의 관심사로 크게 부상시켰으며 이 명제에 대한 해결책은 콘크리트의 내구성의 증대를 통해서만 해결될 수 있다.

따라서 콘크리트용 혼화재로서 왕겨재의 실용성을 높이기 위해서는 왕겨재를 혼입한 콘크리트가 동일한 배합을 가진 보통의 콘크리트에 비해서 내구성이 더 있음을 규명해야 한다.

한편 콘크리트의 내구성을 저하시키는 요인을 분류하면 크게 물리적 요인과 화학적 요인으로 구분할 수 있다. 물리적 요인으로서 사용연한이 지남에 따라 발생하는 표면마모와 온습도의 극단적인 변화로 인해 나타나는 균열등을 들 수 있다. 화학적 요인으로서 시멘트풀에 위해적인 영향을 미치는 황산염이나 이산화탄소 등과 같은 유해한 인자들을 들 수 있다. 그러나 대부분의 성능저하는 콘크리트내 공극이 많아서 위해적인 요인들이 자유롭게 출입이 가능하여 발생된 것이다.

따라서 내구성을 판단하는 시험방법은 이러한 원인을 고려하여 결정해야 한다. 황산염에 의한 내구성 저하를 실험하는 방법으로서는 내황산염 시험방법이 일반적으로 통용되고 있으며 콘크리트내 공극의 다소에 의해 나타나는 내구성의 크기는 내부수성 시험법과

내부식성 시험법이 일반적으로 널리 인정되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 최적 혼입율의 왕겨재를 혼입한 콘크리트와 그렇지 않은 보통의 콘크리트를 28일간 표준양생하고 표준양생된 콘크리트 시험시편을 대상으로 내황산염시험과 내부식성 및 내투수성 시험을 실시하여 왕겨재가 혼화재로서 콘크리트의 내구성 증대에 미치는 영향을 규명하고자하였다.

1. 내 황산염 저항성

가. 실험재료의 품질 특성

본 실험을 위해서 사용한 시멘트, 모래, 자갈, 굵은골재, 혼화제 및 왕겨재는 압축강도 특성시험에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용하였다.

나. 실험범위 및 방법

왕겨재가 혼화재로 사용될 경우에는 최적 혼입율까지 사용될 것이 예측되므로 최저혼입율의 왕겨재를 혼입한 콘크리트와 보통의 콘크리트를 대상으로 표준공시체를 제작한 다음 10%의 황산나트륨 용액속에 침지기간을 달리하면서 다음 <표 7-5>와 같은 실험범위내에서 시험시편의 중량(표면건조 내부포화상태) 변화를 실측하였다. 중량 측정시점은 표준양생 기간 조건별 양생 직후에 1차로 실측하고 동일 시편을 10% 황산나트륨 용액속계 소요 침지기간 만큼 침지 직후에 다시 중량을 실측하였다.

이로부터 황산나트륨 침지 직후의 중량에서 표준양생 직후의 중량을 제외하여 침지에 따른 중량변화량을 계산하고 다시 중량변화량을 표준양생 직후의 중량으로 나눈 다음 백분율로 표시하는 중량변화율을 구하였다.

<표 7-5> 내 황산염 시험조건

황산나트륨용액 침지기간	수용액 농도(%)	표 준 양생기간	왕겨재 혼입율(%)	단위결합 재량(kg/m ³)	평균입경 (μm)	측정항
1주, 2주, 3주, 2월, 4월, 12월	0 10	1주, 2주, 4주	0 10	400	10 20	중량변화

다. 실험결과 분석 및 고찰

수용액 농도별 · 표준양생기간별 · 수용액내 침지기간별 왕겨재 혼입콘크리트의 중량변화율을 분석한 결과를 요약한 것이 <표 7-6>이다.

10%의 황산나트륨 용액속에 침지할 경우 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 표준양생기간의 장단에 관계없이 보통의 콘크리트 보다는 중량증가율이 크게 나타나며 특히 황산나트륨 용액속에 침지 기간이 길수록 중량증가율이 두드러지게 크다. 그러나 표준양생 기간이 길수록 동일한 기간 동안 황산나트륨 용액속에 침지한 공시체는 중량 증가율이 점차 작게 나타난다. 그 이유는 표준양생기간이 길수록 표준 양생기간 동안 빠른속도로 수화반응을 일으켜서 표준양생이 끝난 직후의 중량이 점차 커지는데 반해 그 후 황산나트륨 용액속에 침지하는 경우 중량 증가속도가 둔화되기 때문에 표준양생 직후의 중량에 대한 수용액 침지 후의 중량 증가율이 감소하였기 때문으로 판단된다.

또한 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 혼입하는 경우 표준양생기간이나 수용액 속에서의 침지기간에 관계없이 평균입경이 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 혼입하는 경우보다 중량 증가율이 작게나타나고 있다. 이러한 현상은 평균입경이 작은 왕겨재를 혼입하는 경우 비표면적이 커서 포졸란반응을 쉽게 일으키고 공극의 충전효과가 크므로 표준양생 직후의 중량이 $20\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 혼입하는 경우보다 크므로 수용액

속에 침지후의 중량 증가율이 상대적으로 작게 계산되었기 때문으로 판단된다.

전반적으로 볼 때 왕겨재를 혼입한 경우는 그렇지 않은 보통의 콘크리트보다도 황산염에 대한 저항성이 크다는 것을 나타내며 그 차이는 황산나트륨 용액속에서의 침지기간이 길수록 더욱 커진다.

<표 7-6> 내황산염 시험결과

구분	수용액 침지상황		표준양생일수별 왕겨재 혼입을별 변화율 (%)								
			1 주 표준양생			2 주 표준양생			4 주 표준양생		
	침지시간	수용액농도	PC ^{c)}	RHMC ^{d)}		PC ^{c)}	RHMC ^{d)}		PC ^{c)}	RHMC ^{d)}	
			20 μ m ^{e)}	10 μ m ^{f)}		20 μ m ^{e)}	10 μ m ^{f)}		20 μ m ^{e)}	10 μ m ^{f)}	
중량변화	1주	0 % ^{a)}	0.62	0.62	0.53	0.15	0.37	0.35	0.22	0.20	0.08
		10 % ^{b)}	0.53	0.59	0.52	0.12	0.34	0.13	0.05	0.05	0.03
	2주	0 % ^{a)}	0.55	0.57	0.48	0.23	0.49	0.42	0.07	0.07	0.08
		10 % ^{b)}	0.54	0.55	0.41	0.15	0.47	0.15	0.20	0.12	0.12
	3주	0 % ^{a)}	0.85	0.84	0.85	0.25	0.35	0.43	0.14	0.14	0.13
		10 % ^{b)}	0.83	0.83	0.82	0.12	0.07	0.13	0.13	0.24	0.03
	2월	0 % ^{a)}	0.82	0.85	0.69	0.23	0.42	0.39	0.28	0.09	0.37
		10 % ^{b)}	0.80	0.76	0.76	0.20	0.39	0.03	0.08	0.17	0.36
	4월	0 % ^{a)}	1.80	2.35	2.32	0.56	0.70	0.71	0.36	0.11	0.43
		10 % ^{b)}	1.20	2.37	2.21	0.42	0.44	0.38	0.06	0.18	0.22
	12월	0 % ^{a)}	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중
		10 % ^{b)}	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중	진행중

※ a) : 담수중 양생, b) : 10% 황산나트륨용액 중 양생, c) : 보통의 콘크리트
 d) : 왕겨재 혼입 콘크리트, e) : 평균입경이 20 μ m인 왕겨재 10% 혼입
 f) : 평균입경이 10 μ m인 왕겨재 10% 혼입

2. 내투수성

콘크리트의 내구성에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 콘크리트 조직내의 공극의 양이다. 공극의 양이 적을 경우 조직이 치밀하여 압축강도와 인장강도가 높아짐은 물론이고 조직이 치밀하기 때문에 콘크리트에 열화를 일으키는 위해적인 요소의 출입이 제한되어 내구성이 매우 높아진다.

콘크리트의 내투수성 실험은 물을 콘크리트에 고압으로 통과시키고 시간별 투수량을 실측해야 하나 장기간이 소요되며 나아가 왕

겨재 혼입 콘크리트와 같이 고강도의 콘크리트는 내부조직이 매우 치밀하여 물을 통과하기 어려우므로 투수량 시험으로는 소정의 실험결과를 얻기가 어렵다.

반면 ASTM의 규정에 따른 염소이온투과 시험법을 채택할 경우 조직이 치밀한 콘크리트 속에도 염소이온을 투과 시킬 수 있으므로 통과되는 전하량으로 투수성을 측정할 수 있다.

가. 실험재료의 품질 특성

본 실험을 위해서 사용한 시멘트, 모래, 자갈, 굵은골재, 혼화제 및 왕겨재는 압축강도 특성실험에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용하였다.

나. 실험범위 및 방법

왕겨재가 혼화제로 사용될 경우에는 최적 혼입율까지 사용될 것이 예측되므로 최적혼입율의 왕겨재를 혼입한 콘크리트와 보통의 콘크리트를 대상으로 원형공시체 ($\Phi 100 \times 200$)를 제작하고 28일 동안 표준양생한 다음 길이가 5cm 되도록 절단하여 시험체를 제작하였다.

ASTM의 규정에 따른 염소이온투과 시험법으로 내투수성 시험을 실시하기 위해서 <그림 7-5>와 같은 표준 시험기를 제작하고 (-)전극에는 3%의 NaCl용액을 (+)전극에는 0.3N의 NaOH용액을 채웠다. 실험용액의 초기농도는 20-25℃를 유지하였고 시험중의 대기온도를 20-25℃를 유지하였다. 시험중 0.2Ω 저항치에 걸리는 전압을 30분마다 6시간 동안 Data logger로 측정하여 전류로 환산하였다. 다시 30분마다 측정한 전류(Amperes)를 다음식을 이용하여 6시간동안 통과한 전하량(Coulomb)을 계산하였다.

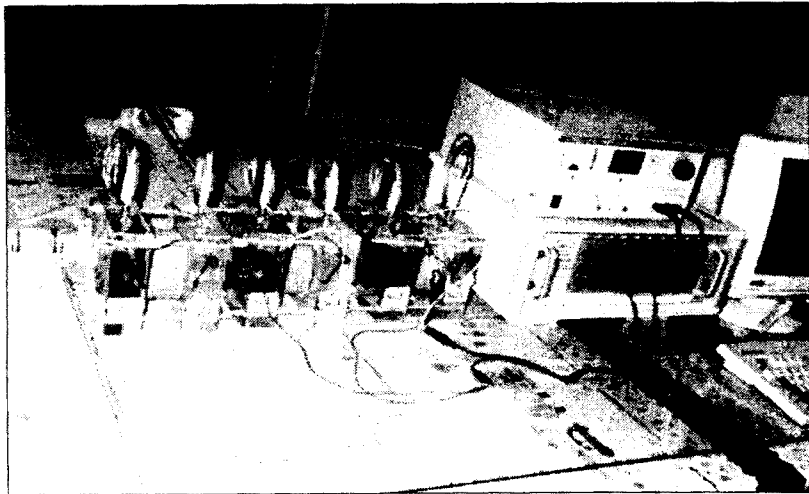
$$Q = 900 \times (I_0 + 2 I_{30} + 2 I_{60} + \dots + 2 I_{330} + I_{360})$$

여기서 Q는 Coulomb의 단위를 가지는 6시간동안 통과한 전하량이며, I_n 은 실험시작 후 n분이 경과 하였을 때의 전류(Amperes)를 나타낸다.

전압공급장치는 DC $60 \pm 0.1V$ 를 안정적으로 공급할 수 있는 장치를 사용하였고 지속시간별 통과한 전하량(Coulomb)을 <표 7-6>의 실험조건하에서 3반복 실측하여 콘크리트의 투수성을 분석하였다.

<표 7-6> 내투수성 실험조건

염소이온 통과시간	수용액 농도(%)	표 준 양생기간	왕겨재 혼입율(%)	단위결합 재량(kg/m ³)	평균입경 (μ m)	측정항
6 시간	3	4주	0 10	400	10	전류량



<그림 7-5> 내투수성 시험장면

다. 실험결과 분석 및 고찰

평균입경 10μ m인 왕겨재를 최적혼입율 까지 혼입한 콘크리트를 통과한 누적 전하량을 시간의 함수로 표현한 것이 <그림 7-6>이다.

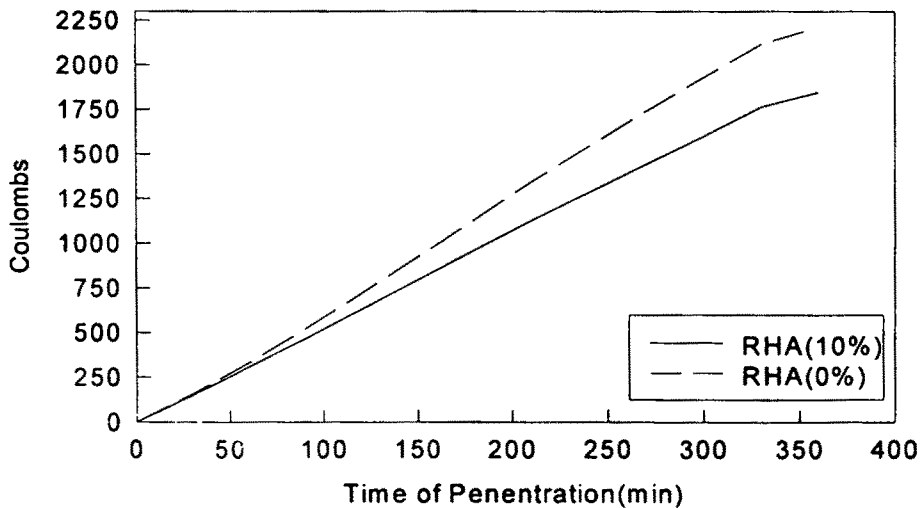
동 그림에서 평균입경 10μ m인 왕겨재를 최적혼입율 까지 혼입한 콘크리트를 6시간 동안 통과한 전하량은 보통 콘크리트를 통과한

전하량의 약 83%에 해당한다.

이는 단위결합재량이 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 인 콘크리트에 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 10% 혼입할 경우 재령 28일에 나타나는 압축강도 증가율의 크기가 보통의 콘크리트에 비해서 약 20% 증가하는 것과 그 맥을 같이한다. 즉 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재는 시멘트 수화물과 2차적인 포졸란 반응을 일으키는 물론 시멘트 수화물간의 공극을 충전하는 효과가 더욱 크기 때문에 조직이 치밀해져 압축강도의 증가율이 더욱 커지고 통과한 전하량이 더욱 줄어들기 때문에 나타난 현상이다.

따라서 평균입경 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 최적혼입율 까지 혼입한 콘크리트가 보통의 콘크리트 보다는 조직이 약 13% 정도 더 치밀해서 내구성이 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

그러므로 상업용 콘크리트 혼화재로서 왕겨재를 널리 유포시키기 위해서는 왕겨재의 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 까지 되도록 최소의 분쇄비로 분쇄할 필요가 있다.



<그림 7-6> 왕겨재 콘크리트의 시간별 누적 통과 전하량(평균입경 $10\mu\text{m}$)

3. 내부식성

최근에 나타나기 시작한 건설업계의 문제로서 질 좋은 하천사가 고갈되고 자연환경 보호 인식이 확대되면서 자연하천으로 부터의 모래채취가 거의 불가능하다. 이에 따라 거의 모든 콘크리트 구조물은 바다에서 준설한 해사(海砂)를 콘크리트용 모래로 사용하고 있다.

한편 해사에는 염분이 함유되어 있으므로 이를 제대로 세척하지 않고 콘크리트에 사용할 경우 염분내의 염소이온과 물 및 공기가 철근을 부식시켜 콘크리트 구조물의 성능저하를 촉진시켜 조기에 붕괴시키는 등 콘크리트 구조물의 내구성을 현저히 떨어뜨린다.

이에 따라 본 연구에서는 콘크리트에 매입된 철근이 높은 염분하에서 부식되는 속도가 콘크리트에 왕겨재를 혼입할 때 얼마나 지체되는지를 규명함으로써 혼화재로서 왕겨재의 효용성을 입증하고 나아가 왕겨재 소비처를 확대하여 왕겨를 농어민의 소득원으로 자리매김 하고자 하였다.

한편 콘크리트에 매입된 철근의 부식정도 실험방법은 자연부식방법과 촉진시험방법이 있다. 자연부식방법은 수개년에 해당하는 장시간이 소요되므로 본 연구기간으로는 불가하다. 이에 따라 촉진시험을 사용하기로 하였다. 촉진시험방법으로는 오토클레이브에 의한 방법과 전위차에 의한 강제부식방법이 있다. 이 중 본 연구에서는 전위차에 의한 강제 부식방법을 사용하기로 하였으며 이를 위해 으며 <그림 7-7>과 같은 전위차 부식촉진 시험기구를 제작하고 실험을 수행하기로 하였다.

이러한 실험방법이 실제로 콘크리트 구조물이 놓이는 환경과 다르므로 부식속도도 다를 것이 예상되나 동일한 배합으로 이루어진

콘크리트로서 왕겨재 혼입 여부에 따른 상대적인 비교 지표로는 충분한 타당성이 있을 것으로 판단된다.

가. 실험재료의 품질 특성

본 실험을 위해서 사용한 시멘트, 모래, 자갈, 굵은골재, 혼화제 및 왕겨재는 압축강도 특성실험에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용하였다.

나. 실험범위 및 방법

왕겨재가 혼화재로 사용될 경우에는 최적 혼입율까지 사용될 것이 예측되므로 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 최적혼입율까지 혼입한 콘크리트와 보통의 콘크리트를 대상으로 원형공시체 ($\Phi 100 \times 200$)에 길이 19cm 직경 13mm의 철근을 피복두께 5cm 위치에 매입한 다음 28일 동안 표준양생하여 실험시편을 제작하였다.

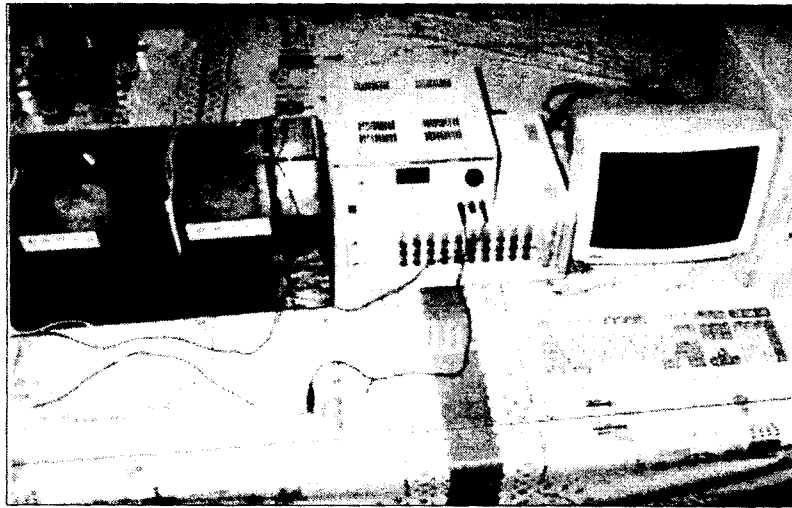
5%의 NaCl 용액속에 시편을 침지하고 20V 직류전원 공급장치의 (+)극은 시편의 철근에 (-)극은 NaCl 용액에 연결하여 직류회로를 구성하였다. 시편의 높이는 20cm이고 NaCl 용액에 침지한 높이는 18cm 이었다. 전압을 가하면 NaCl은 전기분해를 일으켜 Cl^- 이온이 전압차에 따라 콘크리트내를 투과하여 철근에 도달하면 철근의 부식이 점차 진행된다. 회로마다 저항 10Ω 을 연결하여 저항에 걸리는 전압을 측정하고 Data Logger로 전압차이를 시간별로 기록한다. 기록된 전압을 전류로 환산하여 시간별 통과 전류량을 계산한다. 철근의 부식이 진행되면 철근이 팽창을 일으키고 이로인해 철근을 피복하고 있던 콘크리트에 균열이 발생하고 이에따라 전류의 통과량이 급격히 증가하며 급격한 전류 통과량이 발생하면 시편의 피복 콘크리트가 파괴되어 있으므로 실험을 종료한다.

동일한 피복두께를 가진 시편이라면 전류가 급격히 증가할 때 까

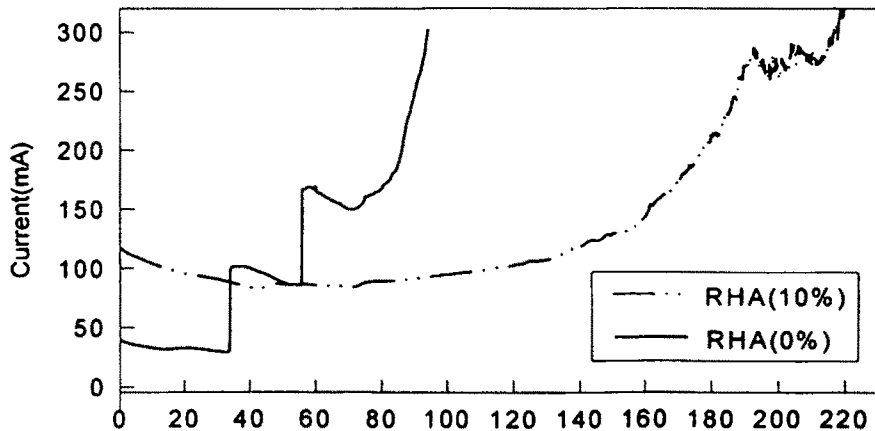
지의 경과시간이 길수록 내구성이 크다는 것을 입증하므로 <표 7-7>과 같은 실험조건하에 실험을 실시하였다.

<표 7-7> 내부식성 실험조건

실험지속시간 (hr)	수용액 농도(%)	표 준 양생기간	왕겨재 혼입율(%)	단위결합 재량(kg/m ³)	평균입경 (μ m)	측정항
60 시간	5	4주	0 10	400	10	전류량



<그림 7-7> 내부식성 실험장면



<그림 7-8> 지속시간별 통과 전류량(평균입경 10 μ m)

다. 실험결과 분석 및 고찰

평균입경이 10μ 인 왕겨재를 10%만큼 혼입한 시편의 시간대별 통과 전류량은 실선으로, 왕겨재를 혼입하지 않은 보통의 콘크리트는 점선으로 <그림 7-8>에 나타내었다.

그림에서 왕겨재를 혼입하지 않은 보통의 콘크리트는 34시간 및 56시간에서 미세한 균열이 발생하고 85시간(3.5일)에서 균열이 발생하였으나 왕겨재를 혼입한 경우 약 186시간(약 8일)에서 균열이 발생하였다. 이로부터 왕겨재를 혼입한 경우 공극이 치밀하여 압축강도가 보통의 콘크리트 보다도 약 20% 증가함은 물론 이에따라 외부에서 염소이온이 침투할지라도 철근이 부식하여 피복콘크리트가 탈락하기 까지의 시간이 왕겨재를 혼입하지 않는 경우에 비해서 약 2.2배의 시간이 요하므로 내부식성도 대폭 증가함을 알 수 있었다.

4. 돈사분뇨처리탱크에의 현장적용성

농업용 콘크리트 구조물 중에서 콘크리트에 가장 유해한 환경하에 지속적으로 노출되는 것은 돈사이다. 돈산내의 돈분과 돈뇨 및 슬러리는 유해한 암모니아 가스 등이 지속적으로 방출되는 등 돈사에서 콘크리트는 쉽게 부식될 환경하에 노출되어 있다.

또한 내황산염 시험이나 내부수성 시험 및 내부식성 시험이 실내에서 촉진시험에 의해 나타난 결과 인데 반해 실제의 현장에 설치되어 있는 콘크리트 구조물은 다양한 환경하에 놓이게 되고 또한 콘크리트의 내구성에 미치는 유해한 인자가 여러 측면에서 복합적으로 일어난다.

이에 따라 돈사에 설치될 콘크리트 구조물에 왕겨재를 혼입할 경우 나타나는 내화화성을 실증적으로 확인할 필요가 있다. 그러나

실제의 돈사 구조물은 매우 크므로 연구실험용 소형 콘크리트 믹서를 이용하여 돈사구조물에 소요되는 모든 콘크리트를 배합 비별로 재령별로 생산하여 타설하는 것이 불가능하고 또한 돈사 구조물을 왕겨재 혼입 콘크리트로 타설하기 위해서는 양돈을 시작할 신규의 양돈농민을 찾아야 하나 제한된 연구기간과 연구비로서 이를 실현하는 것은 불가능하였다. 더구나 돈사를 신축할 양돈 농가를 찾았다 할 지라도 돈사용 콘크리트를 연구목적으로 장기간에 걸쳐 다양한 배합으로 부위별로 타설하고 일정한 시기별로 이를 채취하여 실험을 수행하는 것은 양돈의 경영일정이나 양돈의 환경에도 좋지 못하다는 이유로 이를 수용할 양돈농가를 찾기가 불가능하였다.

그러므로 본 연구에서는 경기도 안성군 대덕면 삼한리 소재 기존의 양돈농가를 선별하고 돈사 경영주의 양해하에 왕겨재 혼입 콘크리트와 보통의 콘크리트를 이용한 원형공시체를 제작하고 실내에서 28일간 표준양생 후 실험장 소재지로 이동시켜 돈분내 침지기간별로 침지실험을 실시하고 침지기간에 따른 시편의 중량과 압축강도 변화를 실험하기로 하였다.

가. 실험재료의 품질 특성

본 실험을 위해서 사용한 시멘트, 모래, 자갈, 굵은골재, 혼화제 및 왕겨재는 압축강도 특성실험에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용하였다.

나. 실험범위 및 방법

왕겨재가 혼화제로 사용될 경우에는 최적 혼입율까지 사용될 것이 예측되므로 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 최적혼입율까지 혼입한 콘크리트와 보통의 콘크리트를 대상으로 <표 7-8>의 실험

조건을 충족시킬 수 있도록 연구소 시험실에서 원형공시체(∅ 100X200)를 제작하고 28일 동안 표준양생하였다.

표준양생이 끝난 공시체 각각을 시험실에서 표면건조 내부 포화 상태를 만든 다음 중량을 측정하고 공시체 각각을 구분할 수 있는 표식을 한 다음 차량을 이용하여 현장시험장이 설치되어 있는 안성군 대덕면 삼한리 소재 양돈장으로 운반하였다. 양돈장에 도착한 시험용 공시체를 돈분, 돈노, 돈분슬러리용(돈분 50%, 돈노 50%)으로 <그림 7-9>와 같이 단위결합재량별·왕겨재 혼입율별로 구분 설치하고 돈분과 돈노 및 돈분슬러리를 투입하였다.

시험기간이 장기간 소요되므로 매 3개월 마다 돈분, 돈노 및 돈분슬러리를 교체함으로써 시험장의 조건이 실제의 현장조건과 비슷하게 유지되도록 하였다.

조건별 침지기간이 도래하면 현지 시험장에서 해당 공시체를 수거 후 세척하고 표면건조 내부포화상태의 중량을 현지에서 실측하고 압축강도 시험용은 연구소로 운반하여 압축강도를 실측하였다.

또한 3년간 침지기간이 필요한 공시체는 매 침지기간 마다 현지 시험장에서 표면 세척 후 표면건조 내부포화상태의 중량을 실측하고 다시 저장용 통에 침지시켰다.

압축강도 증가의 기준으로 삼을 원형공시체는 연구소 시험실에서 28일간 표준양생이 끝난 직후 만능시험기로 압축강도 시험을 실시하였다.

<표 7-8> 돈사 현장적응성 시험조건

침지조건	침지기간 (월)	표준 양생기간	왕겨재 혼입율(%)	단위결합 재량(kg/m ³)	평균입경 (μ m)	시험항목
돈분, 돈노	3, 6, 12,	4주	0, 10	400	10	압축강도 중량
돈분+돈노	24, 36		0, 5	600		



<그림 7-9> 돈사현장 적응성 실험장 전경

다. 실험결과 분석 및 고찰

침지조건별 중량 및 압축강도 변화 현상을 요약하면 다음

<표 7-9>와 같다.

<표 7-9> 침지조건별 시험체 중량 및 압축강도 증가율

단위결 합재량	왕겨재 혼입율	침지조건	3월 침지		6월 침지		12월 침지		24월 침지		36월 침지	
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
400 kg/m ³	0 %	돈분침지	99.85	127	100.05	137	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
		돈노침지	99.90	112	100.04	130	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
		돈분슬러리	99.87	141	100.01	140	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
	10 %	돈분침지	100.08	135	99.99	150	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
		돈노침지	99.95	144	99.98	163	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
		돈분슬러리	99.90	134	100.03	143	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
600 kg/m ³	0 %	돈분침지	99.95	131	99.94	159	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
		돈노침지	100.01	123	99.76	119	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
		돈분슬러리	99.99	150	99.82	148	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
	5 %	돈분침지	100.06	133	99.94	149	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
		돈노침지	100.16	140	99.87	133	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중
		돈분슬러리	99.99	132	99.96	129	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중	시험중

주) a : 중량 비율(침지후 공시체 중량/28일 표준양생 후 중량X100)

b : 압축강도 비율(침지후 압축강도/28일 표준양생 직후 압축강도X100)

위 표에 나타나 있는 바와 같이 침지기간이 짧기 때문에 뚜렷한

양상을 발견하기가 어렵다. 특히 중량 증가율에서는 시험오차로 인해 왕겨재 혼입유무에 따른 뚜렷한 경향을 발견하기 어렵다.

그러나 대체적으로 왕겨재를 혼입한 경우 혼입하지 않은 경우에 비해서 단위결합재량의 크기가 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우 침지 6개월 까지 압축강도 증가율이 약간 크게 나타난다. 그러나 단위결합재량이 $600\text{kg}/\text{m}^3$ 인 경우 시험치의 분산치가 커서 왕겨재 혼입 유무에 따른 뚜렷한 경향을 발견할 수 없다.

그러나 6개월이라는 짧은 침지기간으로 어떤 결론을 도출하기에는 너무 이르다 판단되며 좀 더 장기간의 실측결과를 얻은 후이나 경향을 파악할 수 있을 것이다

제 7 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 흡열 특성

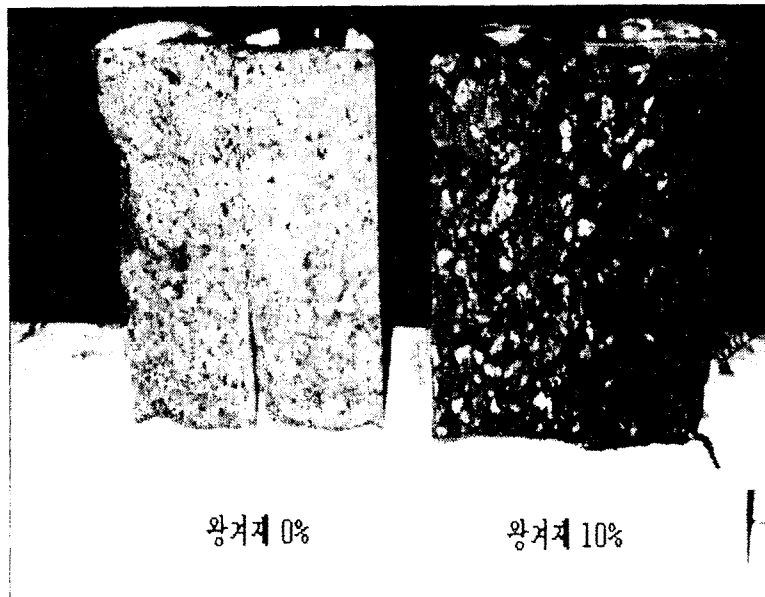
도로포장재는 사용재료에 따라 크게 콘크리트 포장과 아스팔트 포장의 2가지로 분류된다. 콘크리트 포장은 강성재료이어서 수명이 긴 반면 색깔이 희기 때문에 동절기 쌓인 적설이 자연적으로 녹기 어려워 빙판을 형성하는 구간이 많아 교통사고가 빈번하다. 그러나 아스팔트 포장은 연성재료이고 색깔이 검기 때문에 차량의 주행성이 좋고 동절기 빙판 구간이 적어 교통사고 빈도수가 상대적으로 작은 반면 수명이 짧다.

한편 콘크리트에 왕겨재를 혼입하게 되면 콘크리트의 내외부 색깔이 <그림 7-10>처럼 검게 변한다. 색깔이 검어진다는 것은 태양열 복사에너지의 흡수능력이 왕겨재를 혼입하지 않은 보통의 콘크리트보다도 뛰어날 것이 예상된다.

한편 우리나라의 농어촌에 산재해 있는 많은 도로들은 보통의 콘크리트로 포장되어 있으며 또한 동절기의 농어촌도로는 차량통행이 적고 인력이 모자라 인위적인 제설이 불가하므로 농어촌의 도

로에는 많은 빙판이 형성되어 있어 도로의 효율성이 떨어진다. 반면 국도나 지방도로 등은 색깔이 검은 아스팔트로 포장되어 있어서 태양열 복사에너지의 흡수능력이 뛰어난 물론 계획적인 제설 작업으로 도로의 효율이 높다.

따라서 왕겨재 혼입 콘크리트를 개발하여 놓여진 도로에 시공할 경우 동절기에 태양에너지에 의해 자연제설 효과가 아스팔트 포장 못지 않게 기대되며 또한 도로로서의 내구성은 아스팔트에 비교할 수 없이 크므로 매우 효과적이다.



<그림 7-10> 왕겨재 10% 혼입 콘크리트와 보통 콘크리트의 파괴후 색상에 따라 본 연구에서는 왕겨재를 혼입한 콘크리트를 도로 포장재로의 활용하기 위한 기술적 가능성을 타진하기 위해서 왕겨재 혼입 콘크리트가 보통의 콘크리트에 비해서 가지는 흡열특성을 실험분석하고자 하였다.

복사에너지의 흡열특성 실험방법은 실내실험과 야외실험으로 구분된다. 야외실험을 실시하기 위해서는 실제로 적설이 많은 지역

에 시험시공하고 적설량의 시간적 변화상을 관찰하여야 하나 1년이라는 한정된 연구기간내에서 그 효과를 검정하기가 어렵다. 한편 실내실험에 의해 복사에너지의 절대량을 실측하기 위해서는 강재(鋼材)처럼 조직이 치밀한 재료여야 가능하다. 그러나 콘크리트는 혼합재료로 이루어진 많은 공극을 지닌 재료이기 때문에 복사에너지의 측정이 불가능하다.

이에따라 본 연구에서는 동일배합의 왕겨재 혼입 콘크리트와 보통의 콘크리트를 타설·양생하기 위한 실험용 거푸집을 제작하고 콘크리트 표면으로부터 피복두께(0, 2.5, 6.5, 10.5cm)별로 온도센서를 설치한 상태로 콘크리트를 타설·양생한 다음, 시편의 표면에서 50cm 일정한 거리에 열원인 할로겐램프를 조사하였을 때 시편의 표면과 피복두께별 온도센서에서 나타나는 시간대별 온도를 실측하여 흡열특성을 간접적으로 비교·분석하고자 하였다.

1. 실험재료의 품질 특성

본 실험을 위해서 사용한 시멘트, 모래, 자갈, 굵은골재, 혼화제 및 왕겨재는 압축강도 특성실험에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용하였다.

2. 실험범위 및 방법

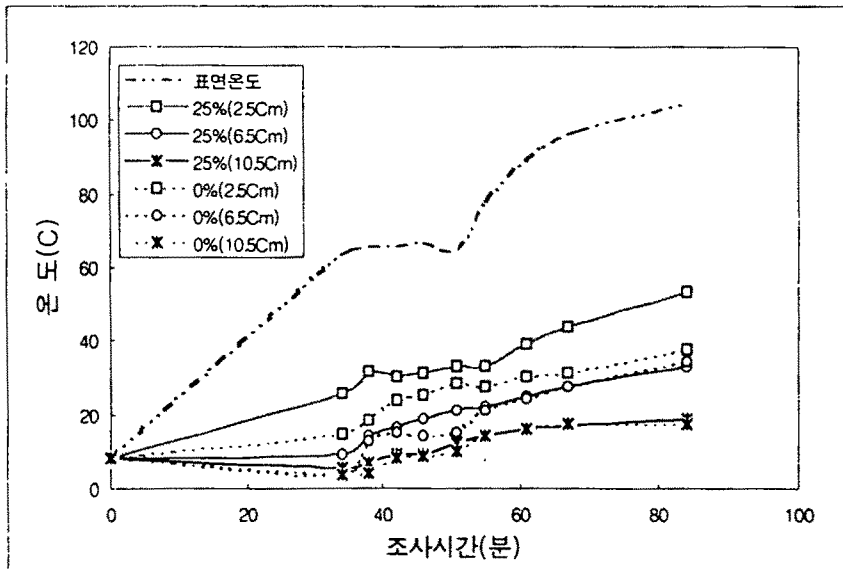
왕겨재 혼입 콘크리트가 도로 포장재로 사용될 경우 색깔이 검어지는 현상을 이용할 것이므로 최대혼입율까지 사용될 것이 예측된다. 따라서 단위결합재량 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 인 콘크리트에 평균입경이 $10\mu\text{m}$ 인 왕겨재를 25%까지 치환한 콘크리트와 보통의 콘크리트를 대상으로 할로겐램프 조사시간별 콘크리트 내부온도 변화를 실측 분석하였으며, 온도측정을 위해서 Data Logger가 부착된 컴퓨터를 이용하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

시편표면 및 피복두께별 내부 온도센서가 감지한 온도를 렘프 조사시간별로 나타낸 것이 <그림 7-11>이다.

동 그림에서 왕겨재를 최대혼입율까지 혼입한 콘크리트가 왕겨재를 혼입하지 않은 콘크리트 보다도 온도센서의 매입깊이가 얇을 수록 빠른 시간에 온도가 급속하게 상승하고 있는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 왕겨재를 혼입시 색깔이 검어져서 복사에너지를 손쉽게 흡수할 수 있으므로 나타나는 당연한 귀결이다.

따라서 왕겨재를 혼입한 콘크리트를 도로포장재로 사용할 경우 특히 동절기에는 태양복사에너지의 흡수가 용이하여 자연 제설효과가 크게 기대되며, 더구나 도로로서의 내구성은 아스팔트에 비교할 수 없이 크므로 인위적인 제설이 불가능한 농어촌에 산재해 있는 많은 도로들에 매우 효과적인 포장공법이 될 것이다.



<그림 7-11> 온도센서별 시간별 온도

제 8 절 왕겨재 혼입 콘크리트의 양생방법별 강도 특성

콘크리트는 원래 압축강도에는 무척 강하나 인장에는 매우 취약하다. 이에 따라 모든 콘크리트 구조물은 인장강도를 무시하고 설계하도록 되었다. 그러나 대부분의 콘크리트 프리캐스트 제품의 경우 운반이나 시공성을 고려하여 중량이 가볍도록 소규모의 구조물이 대중을 이루고 있다. 소형의 구조물이기 때문에 인장에 취약한 콘크리트를 보강하기 위해서 철근등으로 내부를 보강할 수가 없다. 이에 따라 취약한 인장응력에 저항할 수 있도록 또한 공사 현장에서 인력 시공이 가능할 정도로 규모를 소형으로 만든다.

또한 프리캐스트 콘크리트 제품은 공장제품이기 때문에 콘크리트의 품질은 양호하나 대신 제작과정에서 많은 비용이 들어가기 때문에 고가이다. 특히 프리캐스트 제품은 중기로 양생하기 때문에 중기발생을 위한 열원을 수입경유에 의존함으로써 양생비가 제품 원가의 6%이상을 점한다. 또한 프리캐스트 제품은 조기강도 발현이 필요하므로 단위시멘트량이 약 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 에 달하는 등 시멘트의 비용이 제품생산 원가의 약 10%를 점한다.

한편 왕겨를 저온으로 연소시 비결정형 실리카가 생성되고 형상도 침(鍼)상이 많으므로 이를 콘크리트에 혼입하고 양생시 시멘트 수화물간을 강결구조를 연결하므로 보통의 콘크리트 보다는 인장강도가 높아질 것이 예상된다. 압축 및 인장강도가 높을 경우 프리캐스트 제품규격은 크게 단면치수는 작게 하여 프리캐스트 제품의 시공비 마저 낮출 수 있으며 시멘트 재료비도 절약할 수 있다.

또한 왕겨 1톤 소각시에는 20°C 의 물 25톤을 100°C 로 가열할 수 있는 열량이 발생하는데 이는 왕겨재 혼입 프리캐스트 콘크리트 제품의 양생에 필요한 열원으로 이용하고도 남을 양이다.

따라서 왕겨재를 혼화재로서 프리캐스트 제품에 이용하고 왕겨소각시 나타나는 열량을 양생열로 활용할 경우 프리캐스트 콘크리트 제품의 품질이 향상되고 제품의 생산단가가 낮아지므로 왕겨재를 혼입한 프리캐스트 제품의 소비가 촉진되어 왕겨재를 이용한 농어민의 소득은 더욱 향상되리라 추정된다.

더구나 프리캐스트 제품 생산공정과 왕겨 소각로 및 왕겨재 분쇄공정을 RPC를 중심으로 설치할 경우 혼화재 판매에 따른 고수익과 프리캐스트 제품의 판매수익이 추가로 발생하며 나아가 계절별·시기별 열량의 수급불균형으로 인한 에너지 손실이 적어 부대비용이 줄어들므로 RPC의 경영성이나 농민단체의 수익이 대폭 향상되리라 예상된다.

콘크리트 프리캐스트 제품은 1차양생 후 4℃ 이상의 온도를 유지하면서 2차양생을 하도록 규정되어 있다. 한편 왕겨 소각시 나타나는 배연가스는 온도가 80℃ 이상이고 7% 농도의 이산화탄소가 포함되어 있으므로 콘크리트 프리캐스트제품의 2차 양생과정에 이를 활용시 배연가스에 내포된 잠열이 1차양생 기간의 잔여경화 및 왕겨재와 시멘트수화물간 포졸란반응을 촉진시키므로 추가적인 강도증진이 예상된다. 그러나 이산화탄소와 시멘트 수화물간의 중성화반응으로 콘크리트의 내구성이 오히려 저해될 수 있으므로 7% 농도의 CO₂에 노출시 강도·중성화 특성의 규명이 필요하다.

이에따라 본 연구에서는 왕겨 연소시 나타나는 발열량·왕겨재·배연가스를 콘크리트 프리캐스트 제품에 동시 활용하기 위한 기술적인 타당성을 규명하고자 콘크리트의 양생방법에 따른 왕겨재 혼입 콘크리트의 강도발현 특성을 인장강도 중심으로 규명하기로 하였다.

1. 실험재료의 품질 특성

본 실험을 위해서 사용한 시멘트, 모래, 자갈, 굵은골재, 혼화제 및 왕겨재는 압축강도 특성실험에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용하였다.

2. 실험범위 및 방법

왕겨재를 이용한 콘크리트 프리캐스트 공장제품 제작시 왕겨재 혼입율은 최적의 혼입율 까지 치환할 것이 예상되므로 최적혼입율의 왕겨재를 혼입한 콘크리트와 보통의 콘크리트를 대상으로 목표슬럼프를 $21 \pm 3\text{cm}$ 로 설정하고 또한 대부분의 프리캐스트 공장제품의 단위결합재량이 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 이므로 이를 선택하였다.

한편 K.S.에 규정에는 콘크리트 프리캐스트 공장제품의 제품별로 양생방법에 대한 명확한 규정이 없으며 단지 참고사항으로 500°hr 이상으로 증기양생할 것을 권장하고 있다. 동 규정에 따르면 양생과정이 크게 2차로 구분된다. 1차는 사전양생과 본 양생으로 이루어지며 2차양생은 1차양생이 끝난 후 제품이 출하될 때까지의 시행하는 후(後)양생이다.

1차 양생방법 중 사전양생은 20°C 이상으로 3시간 이상을 지속하고, 본 양생은 시간당 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 씩 양생실의 온도를 최고온도인 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 까지 상승시키고 최고온도에 도달하면 최고온도를 6시간 이상 지속하고 다시 3시간 이상 상온까지 서서히 온도를 하강시킬 것을 권장하고 있다. 또한 1차양생이 끝난 제품은 4°C 이상을 유지하는 상태로 2차양생을 할 것을 규정하고 있다.

이에따라 본 연구에서도 동 규정을 준수하여 <표 7-10> 및 <그림 7-12>와 같은 실험범위를 설정하고 표준적인 원형공시체($\phi 100 \times 200$)을 제작하고 양생방법(온수양생, 증기양생, 기건양생, 표준양생)

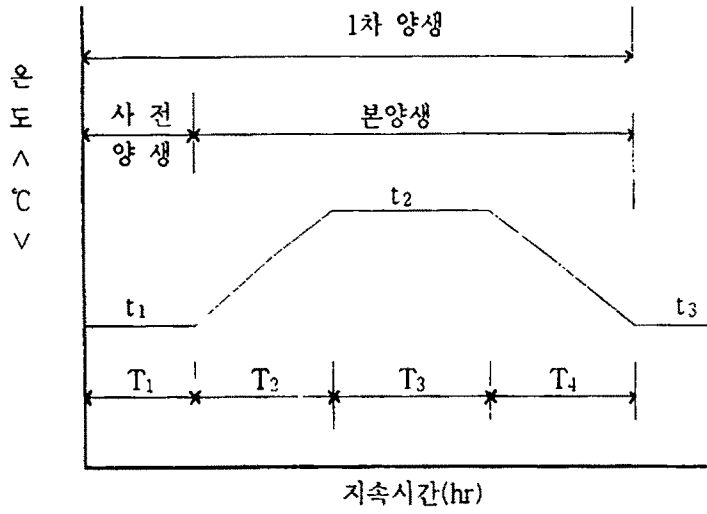
과 최대온도 지속시간별로 인장강도와 압축강도의 증가특성이 1차 양생기간 동안 어떻게 변하는지 1단계로 규명하고자 하였다.

콘크리트 프리캐스트 제품의 2차 양생기간 동안 필요한 열량으로서 왕겨 소각시 방출되는 배연가스(온도 80℃ 이상, 이산화탄소 농도 7%)의 잠열을 이용할 경우 열이용 측면에서 매우 유리하므로 이를 모사실험하기 위해서 2단계 실험에서는 1단계 시험결과로부터 가장 유리한 양생방법 중 하나로 판단되는 “온수양생-최고온도 70℃-9hr지속” 조건으로 시험체를 제작하여 1차 양생한 다음, 다시 시험체를 30℃의 실내온도와 30%의 실내습도 및 7%의 이산화탄소 농도와 상압(常壓)하에 2차양생(1주, 2주)을 실시하여 왕겨재 혼입 콘크리트와 보통의 콘크리트의 강도증진효과 및 중성화 깊이를 규명하고자 하였다.

또한 본 실험에서는 왕겨재는 평균입경이 10 μ m인 저온제어로 소각한 왕겨재를 사용하였으며 본 실험을 위해서 농어촌연구원에서 자체자금 35,000천원을 별도로 투입하여 <그림 7-13>과 같은 증기노출·온수양생·이산화탄소 노출양생조를 국내외에 최초로 별도 제작하였다.

<표 7-10> 양생방법별 강도증진 효과

단계	단위결합재량	왕겨재 혼입율	측정항목	양생방법	양생방법						
					사전양생		본 양생				
					t ₁ (℃)	T ₁ (hr)	t ₂ (℃)	t ₃ (℃)	T ₂ (hr)	T ₃ (hr)	T ₄ (hr)
1	400 kg/m ³	0 % 10 %	압축강도 인장강도	표준양생 기건양생 온수양생 증기양생	20~24	3	60,70, 80	20~24	3	3,9,18, 30,42	3
2	400 kg/m ³	0 % 10 %	압축강도 인장강도 중성화	기건양생	온도 : 30℃, 상대습도 : 30%, CO ₂ 농도 : 7% 압력 : 상압 양생방법:온수양생, 최고온도 70℃-9 hr 지속						



<그림 7-12> 양생 방법 별 유형



<그림 7-13> 이산화탄소 및 증기 노출 양생조

3. 실험결과 분석 및 고찰

가. 1단계 실험결과 분석 및 고찰

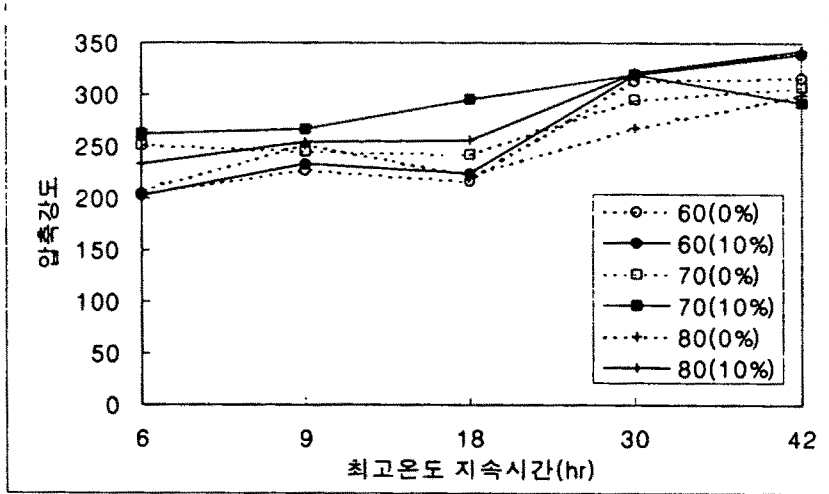
각각의 양생방법별 보통의 콘크리트와 왕겨재 혼입콘크리트의 압축강도 및 할렬인장강도의 크기를 정리한 것이 <표 7-11>이다.

<표 7-11> 양생방법별 강도 증진율

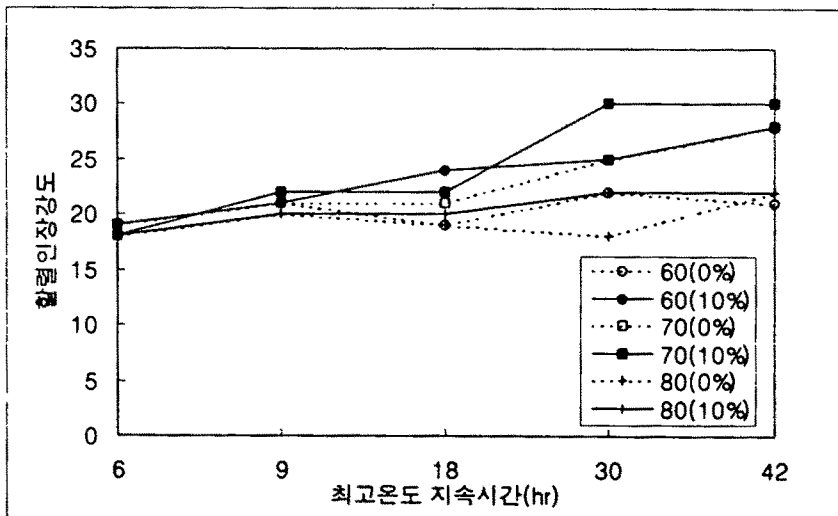
t ₂	양생 방법	강도 (kg/cm ²)	최대온도 지속시간(T ₃)									
			6 hr		9 hr		18 hr		30 hr		42 hr	
			왕겨재 혼입율 (%)									
		0	10	0	10	0	10	0	10	0	10	
60	온수	압축강도	204	203	227	234	216	224	313	319	317	340
	양생	할렬인장	19	19	21	21	19	24	22	25	21	28
	증기	압축강도	154	125	164	135	231	186	279	289	292	301
	양생	할렬인장	12	13	16	15	21	13	19	24	25	21
	표준	압축강도	-	-	53	36	74	55	116	110	168	146
	양생	할렬인장	-	-	5	3	6	5	11	13	12	17
	기건	압축강도	-	-	32	19	63	49	103	91	154	127
	양생	할렬인장	-	-	5	1.3	5	4	11	10	12	12
70	온수	압축강도	251	262	246	266	242	296	295	319	308	292
	양생	할렬인장	19	18	21	22	21	22	25	30	28	30
	증기	압축강도	209	170	207	211	243	273	333	369	285	336
	양생	할렬인장	16	15	21	14	17	20	22	24	26	27
	표준	압축강도	66	44	82	65	99	73	166	131	206	171
	양생	할렬인장	7	5	8	6	10	9	16	12	13	16
	기건	압축강도	52	25	69	46	89	57	138	104	166	126
	양생	할렬인장	5	2.7	6	5	8	6	13	10	13	13
80	온수	압축강도	208	233	251	255	223	256	268	321	300	342
	양생	할렬인장	18	18	20	20	19	20	18	22	22	22
	증기	압축강도	232	237	263	252	240	259	310	323	276	277
	양생	할렬인장	17	20	20	18	18	20	24	22	21	23
	표준	압축강도	66	44	82	65	99	73	166	131	206	171
	양생	할렬인장	7	5	8	6	10	9	16	12	13	16
	기건	압축강도	52	25	69	46	89	57	138	104	166	126
	양생	할렬인장	5	2.7	6	5	8	6	13	10	13	13

주) 28일 표준양생 압축강도 : 왕겨재 0% : 470kg/m², 왕겨재 10% : 499kg/m²
 28일 표준양생 인장강도 : 왕겨재 0% : 29kg/m², 왕겨재 10% : 32kg/m²

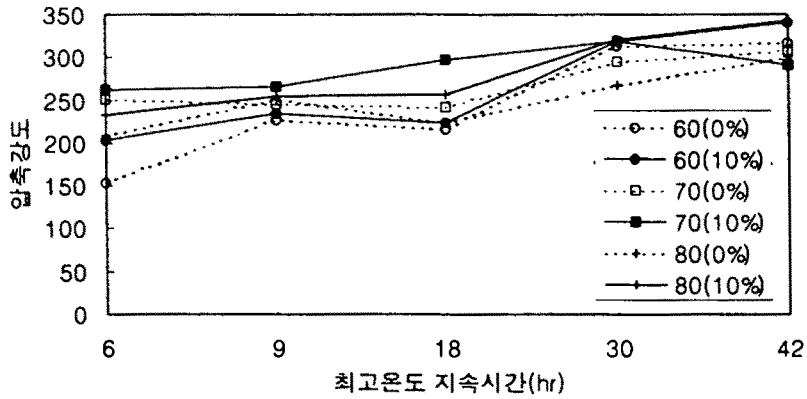
온수양생 및 증기양생방법에 따른 최고온도 지속시간별 압축강도와
 할렬인장강도 크기를 <표 7-11>을 기준으로 재 정리한 것이 다음 <
 그림 7-14, -15, -16, -17>이다.



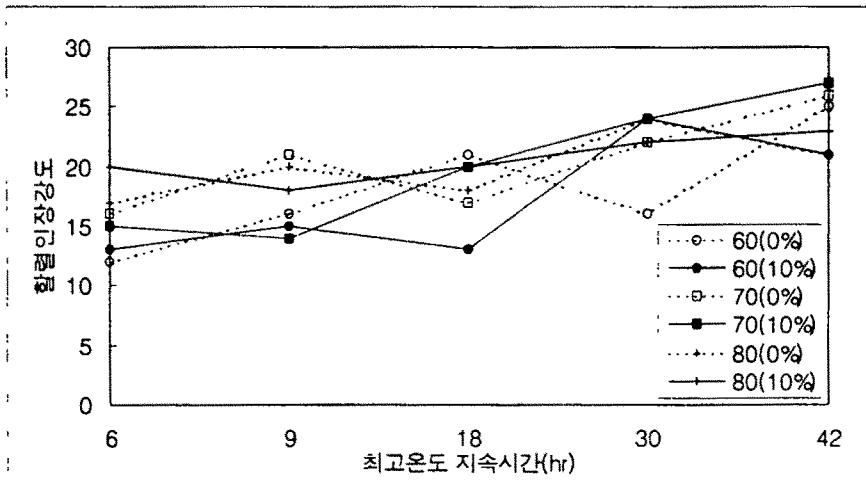
< 그림 7-14 > 온수 양생시 최고온도 지속시간별 압축강도



< 그림 7-15 > 온수양생시 최고온도 지속시간별 할렬인장강도



< 그림 7-16 > 증기양생시 최고온도 지속시간별 압축강도



< 그림 7-17 > 증기양생시 최고온도 지속시간별 하절인장강도

<표 7-11>에 나타나 있는 6시간 동안 최고온도 60℃로 온수양생시 압축강도를 기준으로 할 때 각각의 양생방법별 압축강도의 비율을 정리한 것이 다음 <표 7-12>이며, 같은 방법으로 하절인장강도에 대해서 정리한 것이 <표 7-13>이다.

<표 7-12> 양생방법별 압축강도 비율

t ₂	양생 방법	최고온도 지속시간(T3) 별 압축강도 비율(%)									
		6 hr		9 hr		18 hr		30 hr		42 hr	
		왕겨재 혼입율(%)									
		0	10	0	10	0	10	0	10	0	10
60	온수	100	100	111	115	106	110	153	156	155	167
	증기	75	61	80	66	113	91	136	142	143	148
70	온수	123	128	121	130	119	145	145	156	151	143
	증기	102	83	101	103	119	134	163	181	140	165
80	온수	102	114	123	125	109	125	131	157	147	168
	증기	114	116	129	124	118	127	152	158	135	136

<표 7-13> 양생방법별 할렬인장강도 비율(%)

t ₂	양생 방법	최고온도 지속시간(T3) 별 압축강도 비율(%)									
		6 hr		9 hr		18 hr		30 hr		42 hr	
		왕겨재 혼입율(%)									
		0	10	0	10	0	10	0	10	0	10
60	온수	100	100	111	111	100	126	116	132	111	147
	증기	63	68	84	79	111	68	100	126	131	111
70	온수	100	95	111	116	111	116	132	158	147	158
	증기	84	79	111	74	105	116	116	126	137	142
80	온수	95	95	105	105	100	105	95	116	116	116
	증기	89	105	105	95	95	105	126	116	111	121

<표 7-12> 및 <표 7-13>을 살펴보면 최고온도가 60℃와 70℃로 유지하는 지속시간이 30시간 이내에서는 온수양생이 증기양생에 비해서 압축강도를 크게 하고, 최고온도를 80℃로 유지할 때는 초기부터 증기양생이 유리한 것으로 나타났다. 또한 인장강도는 최고온도를 60℃, 70℃ 및 80℃ 각각에 대해서 지속시간의 장단에 관계없이 온수양생이 증기양생에 비해서 우수한 것으로 나타났다.

총체적으로 살펴보면 온수양생이 증기양생보다 압축강도 또는 인장강도를 크게 하며 왕겨재를 혼입할 경우 또다시 증가시킨다.

한편 최고온도를 80℃로 유지할 경우 70℃로 유지하는 경우보다

압축강도나 인장강도가 지속시간의 장단에 관계없이 오히려 줄어들어 가는 것으로 나타났는데 이는 3시간 동안 60℃ (20℃ → 80℃)를 상승시키는 과정에서 시험체 내부의 급격한 온도경사로 인해 시험체 내부에 고유응력(Eigen Stress)이 추가로 발생하면서 경화되었기 때문에 압축 또는 인장강도가 작게 나타난 것으로 추측된다.

그러므로 왕겨재를 혼입하여 압축강도와 인장강도를 조기에 증대시키기 위한 최적의 촉진양생(1차양생) 조건은 최고온도는 70℃로 유지하고 양생방법은 온수양생을 택하는 것이 압축강도나 인장강도를 조기에 발현시키므로 가장 유리한 것으로 판단된다.

왕겨재 혼입 유무에 따른 압축강도특성을 살펴보면, 최고온도를 70℃로 유지하되 온수양생의 경우에는 최고온도 지속시간을 6시간 이상, 증기양생의 경우에는 9시간 이상 지속시켜야 압축강도의 크기가 왕겨재를 혼입하지 않은 경우보다 크게 나타났다. 그 이유는 시멘트와 물이 먼저 수화반응하여 수화물을 생성한 다음 다시 수화물과 왕겨재가 2차적인 포졸란반응을 일으켜서 압축강도를 증가시키며 또한 왕겨재가 수화물들 사이의 공극을 충전하는 역할을 수행하기때문에 압축강도증진 현상이 나타나는 점을 고려하면 당연한 귀결이다.

한편 왕겨재 혼입 유무에 따른 할렬인장강도 특성을 살펴보면, 압축강도의 경우와 마찬가지로, 70℃를 최고온도로 선택할 경우 온수양생이나 증기양생은 최고온도 지속시간을 각각 6시간, 9시간 이상 지속시켜야 왕겨재를 혼입하지 않은 경우보다 할렬인장강도가 크게 나타나는데 이는 압축강도 증가에 따라 나타나는 당연한 귀결이다.

표준양생은 20±3℃로 온도를 일정하게 유지시킨 경우이므로 초

기에는 왕겨재를 넣지 않은 경우가 왕겨재를 혼입한 경우보다 인장강도나 압축강도에서 크게 나타나는 데 이는 왕겨재를 혼입할 경우 시멘트량이 줄어들므로 초기수화반응에 관여하는 시멘트의량이 적어서 나타난 현상이다.

기존의 콘크리트 프리캐스트 공장은 온도조절이 쉬운 증기양생을 택하고 있다. 그러나 증기양생의 경우 양생이 끝남과 동시에 대기중에 소실되므로 증기손실이 커서 열효율이 좋지 못하다.

한편 왕겨는 주간에 소각하는 것이 인건비 절약 차원에서 유리하다. 그러나 왕겨 소각시 나타나는 열량의 이용시기를 살펴보면 미곡종합처리장의 자체난방이나 시설농업의 난방은 주로 야간에 필요하고 물벼건조작업 역시 현실적으로 야간에 주로 수행하므로 건조열량 역시 야간에 필요하다.

그러므로 주간에 발생하는 열량을 야간에 이용하기 위해서는 열용량이 큰 물을 이용하여 소각열량을 온수조에 저장하였다가 야간에 이용하는 시스템이 필요하다.

한편 왕겨를 저온으로 제어하여 소각하는 것이 소각로의 열효율이나 콘크리트용 혼화재료 측면에서 유리하므로 소각로에 열교환기를 설치하여 보일러에 항상 낮은 온도의 물을 순환시켜 소각로내의 온도를 조절해야 하며 가열된 온수는 온수조로 옮기고, 온수조내에서 온도가 떨어진 물은 다시 보일러로 이송시켜 소각로의 온도제어를 위한 물로 순환시켜야 한다.

온수조에 저장된 높은 온도의 물은 프리캐스트 콘크리트 제품의 양생과정에 이용하고 다시 냉각 물은 소각로의 온도제어용으로 순환하는 시스템을 설치할 경우 물의 비열이 높기 때문에 시스템의 열효율이 극히 높아 매우 유리하다. 또한 이러한 열이용 시스템을

설치할 경우 높은 열효율로 인해 왕겨 소각시 발생하는 열량은 프리캐스트 제품의 1차양생 과정에 이용하고도 남을 것이므로 남는 열은 미곡종합처리장의 자체난방이나 시설농업 또는 물벼건조에 활용이 가능하다.

따라서 왕겨재를 혼입한 콘크리트 프리캐스트 공장의 양생방법은 온수양생을 선정하는 것이 열이용 측면이나 콘크리트 제품의 품질 측면에서 모두 우수하다는 결론을 도출할 수 있다.

그러나 본 실험은 표준 원형공시체 ($\varnothing 100 \times 200$)을 이용하여 양생방법별 효과를 실험분석한 것에 지나지 않는 것으로서 농업시설물용 콘크리트 프리캐스트 제품의 대다수를 차지하는 벤치플룸이나 수로형관의 형상과 다르므로 주변에서 내부로 열의 전달속도 등이 달라서 양생시간별 압축강도나 인장강도 특성이 벤치플룸 등과 다르게 나타날 수 있다. 따라서 본 연구실험 결과를 프리캐스트 제품 생산공정에 곧장 활용하기 위해서는 온도상승·하강 속도나 최고온도 지속시간의 세분화 및 시험체 거꾸집 형상의 다변화 등과 같은 실험변수를 선정하고 변량을 달리하면서 반복적인 추가실험과 분석이 수반되어야 한다.

나. 2단계 실험결과 분석 및 고찰

왕겨재 혼입 콘크리트 프리캐스트 제품의 2차 양생과정에 필요한 열량으로서 왕겨 소각시 방출되는 배연가스 잠열의 이용가능성을 타진하기 위한 실험과정이 2단계 실험이다.

한편 1% 에탄올 용액으로 만든 페놀프탈레인 시약을 분무기로 시편에 분무시켰을 때 PH 8.2 - 10.0 이상의 알칼리측에서는 붉은색을 나타내나 중성화가 진행된 곳에서는 무색을 띄게된다. 콘크리트는 강한 알칼리성이나 CO₂와 반응시 중성화가 진행되므로 콘크

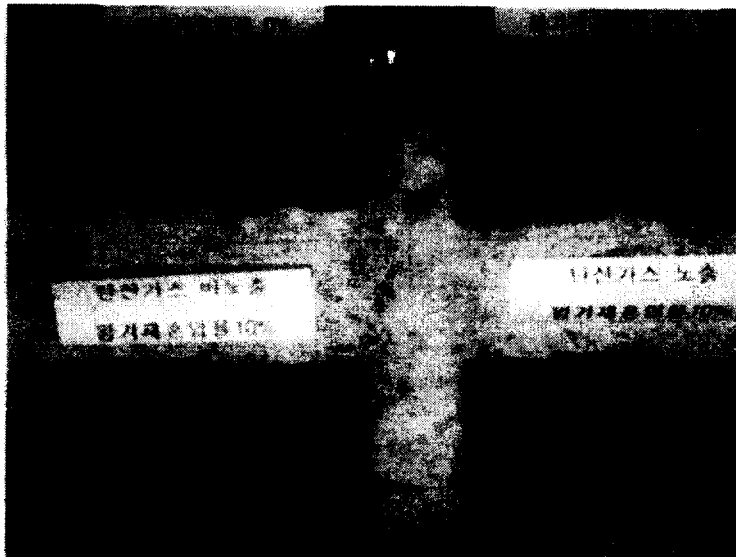
는 점을 이용하여 시편 표면으로부터 無色 깊이를 측정하여 콘크리트의 중성화 깊이를 측정하게 된다.

이러한 과정으로 부터 얻어진 압축강도와 할렬인장강도 및 중성화 깊이를 CO₂ 노출지속시간별로 압축강도와 인장강도 및 중성화 깊이를 정리한 것이 <표 7-14>이며 <그림 7-18>은 중성화 깊이를 측정하는 실험사진이다.

<표 7-14> 이산화탄소(7%) 노출조건별 중성화 및 강도특성

구 분	왕겨재 혼입율	노출시간 (일)	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	중성화 깊이 (mm)
7% CO ₂ 노출	0 %	7 일	360(100)	27.0	0
		14 일	365(101)	30.5	0
	10 %	7 일	365(100)	23.7	0
		14 일	384(105)	32.1	0
CO ₂ 미노출	0 %	7 일	321(100)	19.4	0
		14 일	380(118)	27.3	0
	10 %	7 일	338(100)	24.4	0
		14 일	361(107)	29.4	0

주) ()는 CO₂노출시간 7일을 기준으로 한 상대적인 비율(%)



<그림 7-16> 중성화 깊이 측정 실험 전경
(7% CO₂ 2주 노출, 30℃ 기건양생)

<표 7-14>로부터 7% 농도의 CO₂ 하에 2주일간 노출시켜도 증성화가 진행되지 않음을 알 수 있다. 이는 곧 프리캐스트 제품의 2차 양생과정에 왕겨 조각이 나타나는 배연가스내 잠열을 적어도 2주일 동안 이용하여도 증성화가 진행되지 않는다는 것을 입증한다.

또한 농도 7%인 CO₂ 하에 노출시간이 증가하여도 계속적으로 압축강도와 인장강도가 증가하는 것은 배연가스의 잠열을 이용한다는 측면에서 실험실의 온도를 30℃로 일정하게 계속적으로 유지하였기 때문에 1차양생기간 동안 남은 잔여경화는 물론이고 시멘트 수화물과 왕겨재간의 포졸란 반응이 가속적으로 진행된 결과로 판단된다.

또한 동 표에서 왕겨재 혼입유무와 CO₂노출 유무에 따른 강도특성에서 뚜렷한 차이를 발견할 수 없다. 대체적으로 왕겨재를 혼입한 콘크리트를 7%의 CO₂에 노출시 압축·인장강도가 CO₂ 미노출의 경우에 비해서 약 7% 증가하는 경향을 보이는데 반해 왕겨재를 혼입하지 않을 경우 이 보다도 작은 증가율을 보인다. 그러나 이 증가율에 대해서는 추후 무수한 반복실험을 통한 검증이 필요하다.

한편 프리캐스트 제품은 1차양생이 끝난 후부터 시작해서 제품이 소비자에게 인도되는 시점까지가 2차양생 기간으로서, 2차양생기간을 길게 설정하고자 할 경우 넓은 부지가 필요하여 초기시설 투자비가 과도하게 소요된다. 또한 기존의 대부분의 프리캐스트 제품 공장은 제품을 야적할 부지가 협소하여 1차 양생후 2주일 이내에 대부분의 제품이 소비자에게 인도되도록 생산공정을 조절하고 있는 실정이다.

한편 배연가스의 잠열을 실제로 이용할 경우 2차양생 기간동안의 온도는 30℃ 보다 높은 온도를 유지할 수 있다.

따라서 이러한 점과 적어도 2주 동안에는 7%의 CO₂하에서도 중성화가 진행되지 않는 점을 고려하면 잔여경화와 포졸란 반응이 더욱 가속적으로 진행되어 압축강도나 인장강도가 대폭적으로 증가될 것이 예측된다.

그러므로 배연가스에 포함된 잠열을 2차 양생과정에 필요한 열량으로 활용하여 왕겨재 혼입 콘크리트 프리캐스트 제품을 생산하려는 계획을 실용화할 경우 기존의 콘크리트 프리캐스트 제품 공장에서 생산·판매하는 프리캐스트 제품에 비해서 경제성, 품질, 내구성 및 생산기간 단축의 관점에서 매우 유리한 방안을 알 수 있다.

제 8 장 왕겨 소각로의 배연가스 활용 방안

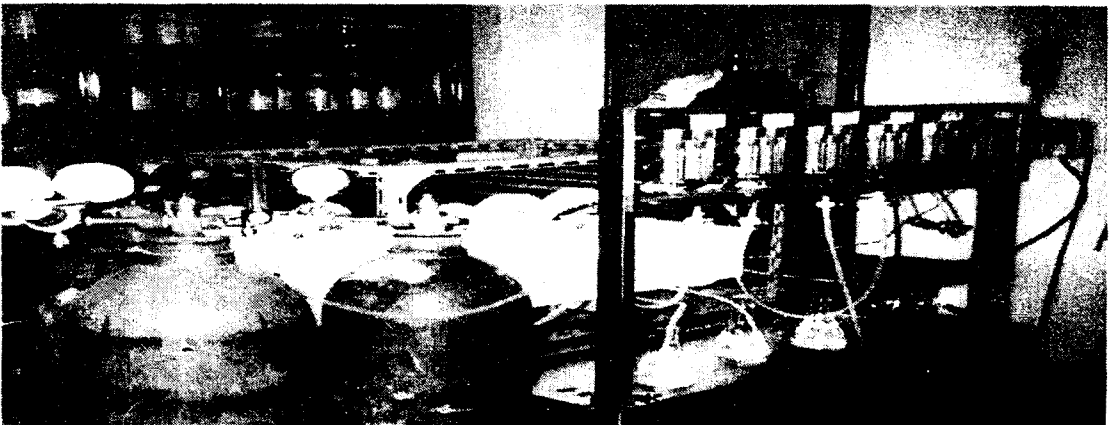
제 1 절 회분식 미세조류 배양 시스템

1. 시스템의 구성

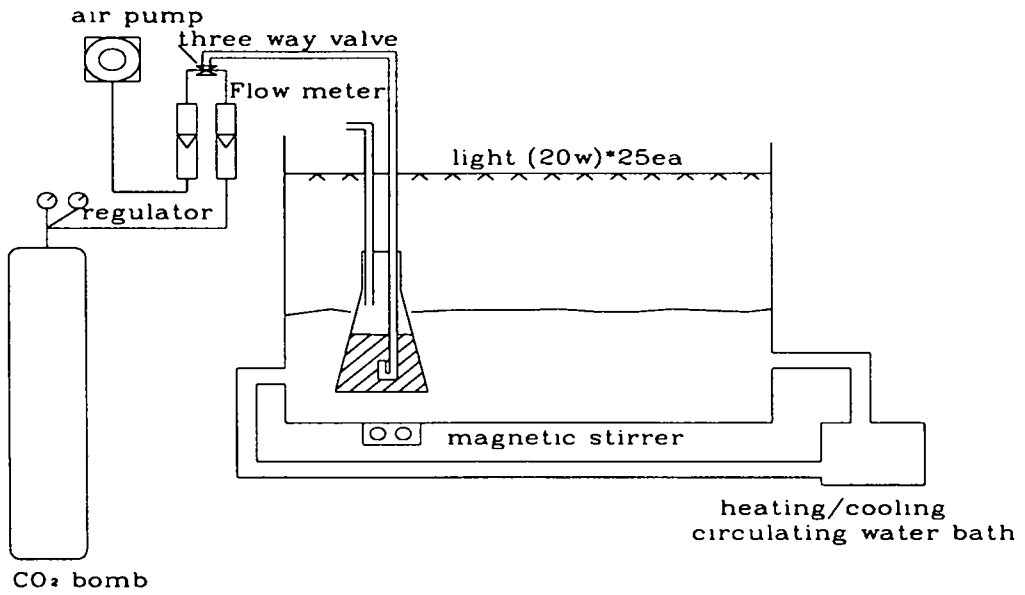
미세조류 배양을 위한 장치는 <그림 8-1>에 사진을 <그림 8-2>에 구성의 개념도를 나타내었다. 광원으로 20W 형광등을 이용하였으며, 온도는 저온 순환냉각기를 사용해 조절하였다. 배양액은 자석교반기를 이용하여 혼합을 했으며, 이산화탄소의 농도는 고압 이산화탄소(순도 99% 이상)와 공기를 각각의 유량조절계를 이용하여 부피비로 조절하였다. 배양기가 들어 있는 수조는 흰색으로 칠하여 빛의 투과를 최대한 줄였다.

2. 이산화탄소의 영향

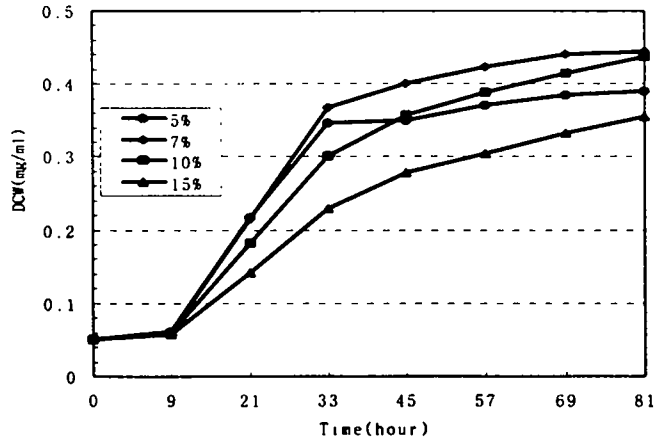
이산화탄소의 농도가 미세조류 배양에 미치는 영향을 조사하여 <그림 8-3>에 나타냈다. 이산화탄소의 농도가 7-10%인 경우가 최적농도로 판단되며, 이산화탄소의 농도가 15%에서 약간 성장이 둔화되기는 하지만 미세조류 배양에는 큰 지장을 주지 않는 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 본 실험을 위해 사용된 미세조류가 높은 농도의 이산화탄소에서도 성장할 수 있는 미생물이라는 결과와 유사하다(Watanabe, 1992).



<그림 8-1> 회분식 미세조류 배양 실험장치 사진



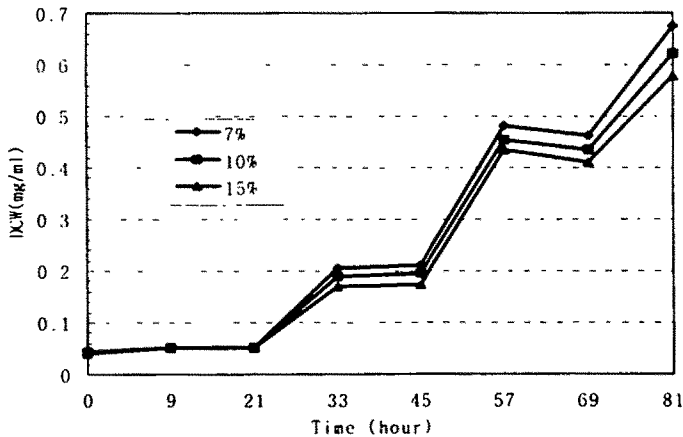
<그림 8-2> 회분식 미세조류 배양 실험장치의 구성도



<그림 8-3> 연속광 조사조건에서 이산화탄소 농도변화에 따른 미세조류 성장곡선 비교(초기 배지 pH 4.5, 온도 25℃, 광도 5-6 kLux)

3. 광주기의 영향

<그림 8-3>과 같이 실험 시간 내내 빛을 조사한 것이 아니라 실제 연못의 조류 성장처럼 주기적으로 빛을 조사하여 미세조류를 배양하여 결과를 그림 16에 나타냈다. 빛을 조사하지 않은 경우는 조류 성장이 멈추는 것을 알 수 있었다. 계속적으로 빛을 조사한 그림 15의 33시간이 주기적으로 빛을 조사한 그림 16의 57시간에 해당함으로 그 결과를 비교하면 건조질량 무게의 차이가 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 이산화탄소의 농도가 7%의 경우 각각 0.37, 0.48이었다. 그러나 빛을 받은 전체 시간이 33시간을 초과한 이후의 미세조류의 성장 곡선의 경우는 뚜렷한 차이점을 보여 주었다. 계속적으로 빛을 조사한 경우는 성장이 둔화된 반면(그림 8-3), 주기적으로 조사한 경우는 성장이 약간 둔화되기는 했지만 성장이 지속되었다(그림 8-4).

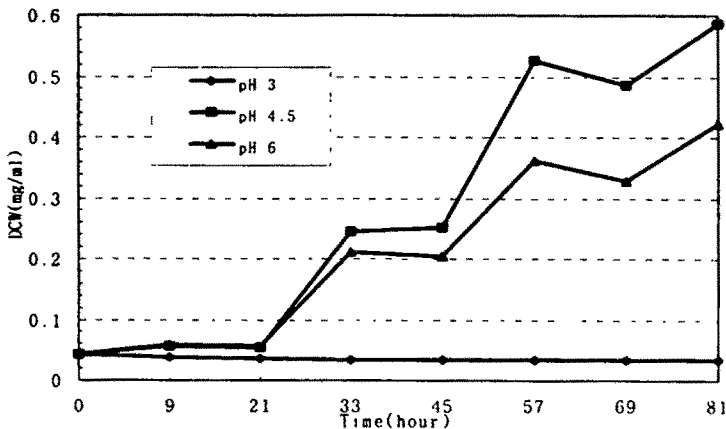


<그림 8-4> 주기적 광조사 조건에서 이산화탄소 농도 변화에 따른 성장곡선 비교(초기배지 pH 4.5, 온도 25℃, 광도 5-6 kLux)

4. 배지의 초기 산도의 영향

배양 조건을 확립하고자 배지 초기 pH 변화에 대한 영향을 조사

하여 결과를 <그림 8-5>에 나타냈다. 배지 초기 pH가 4.5인 경우가 6인 경우보다 성장이 좋았으며, pH 3인 경우는 완전히 성장이 저해되었다. 배양 후 pH 변화를 측정된 결과, 초기 배지 pH와 관계 없이 pH가 6 정도로 측정되었다. 이 결과로부터 이산화탄소가 배지의 pH 변화에 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 최적 배양을 위해 pH를 조절한다면 4.5 정도를 조절하는 것이 배양을 위해 좋을 것으로 사료된다.

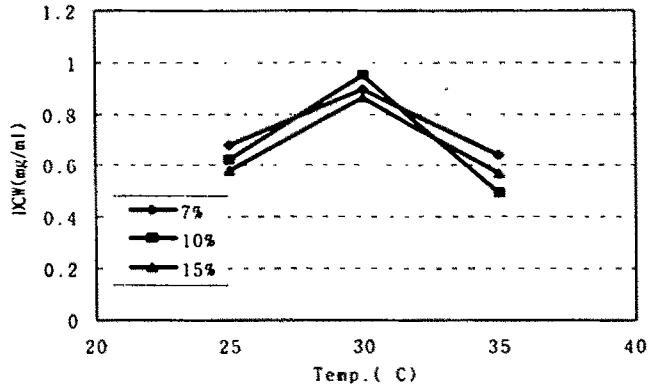


<그림 8-5> 초기배지 pH가 미생성장 성장에 미치는 영향
(온도 25℃, 광도 5-6 kLux)

5. 배양온도의 영향

각 이산화탄소 농도에 대하여 온도 변화에 따른 81시간 배양 후의 건조질량을 비교하여 결과를 <그림 8-6>에 나타냈다. 실험한 이산화탄소 농도 범위내에서 최적온도는 30℃이었으며, 25℃와 35℃는 30℃의 각 이산화탄소 농도별 건조질량의 평균값을 기준으로 해서 각각 69%와 73%에 해당했다. 그러나 미생물 실험이라 결과의 변이가 매우 큰데 유사한 다른 실험에서는 35℃가 최적의 온도로 나타나기도 하였다. 현재까지의 결론은 35℃가 오히려 최적에 가까운 것으로 판

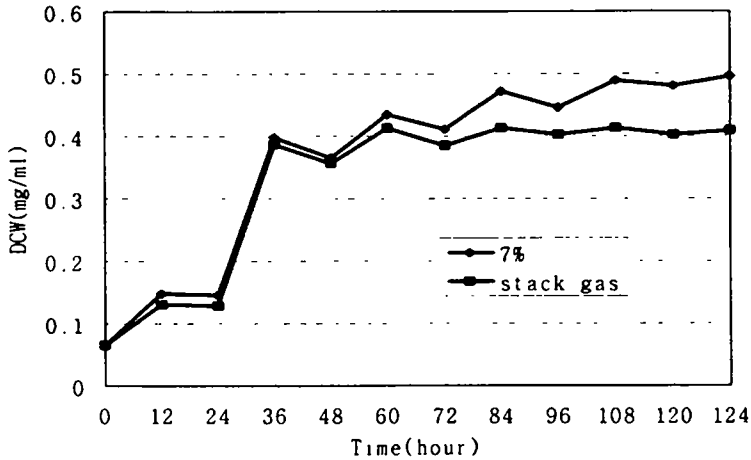
단하고 있다. 그러나 시스템의 여러 특성에 따라서 달라질 수 있을 것으로 생각되나 30-35℃는 별 차이가 없을 것이다.



<그림 8-6> 온도변화에 따른 배양 81 시간 후의 건조질량 변화(초기배지 pH 4.5, 광도 5-6 kLux)

6. 소각시스템의 배연가스의 적용

순수 이산화탄소가 혼합된 공기와 왕겨소각로의 배연가스만을 미세조류 배양에 적용한 결과 성장곡선에 별 차이가 나타나지 않았다. 약간의 차이가 나타난 경우도 있지만 반복실험의 결과 차이가 거의 없는 것으로 판단하였다. 이것은 여러 시스템(본 연구에서 회분식으로 제작한 실험장치 외 상업용 반응기 등)에 적용하여 본 결과이다. 이러한 결과로 유추해 볼 때 미세조류보다 성장력이 강한 일반 식물 재배에 배연가스를 직접 사용하여도 식물의 성장에는 별 문제가 없을 것으로 판단된다. <그림 8-7>은 약간의 차이를 보이는 한 실험의 결과를 보인 것이다.

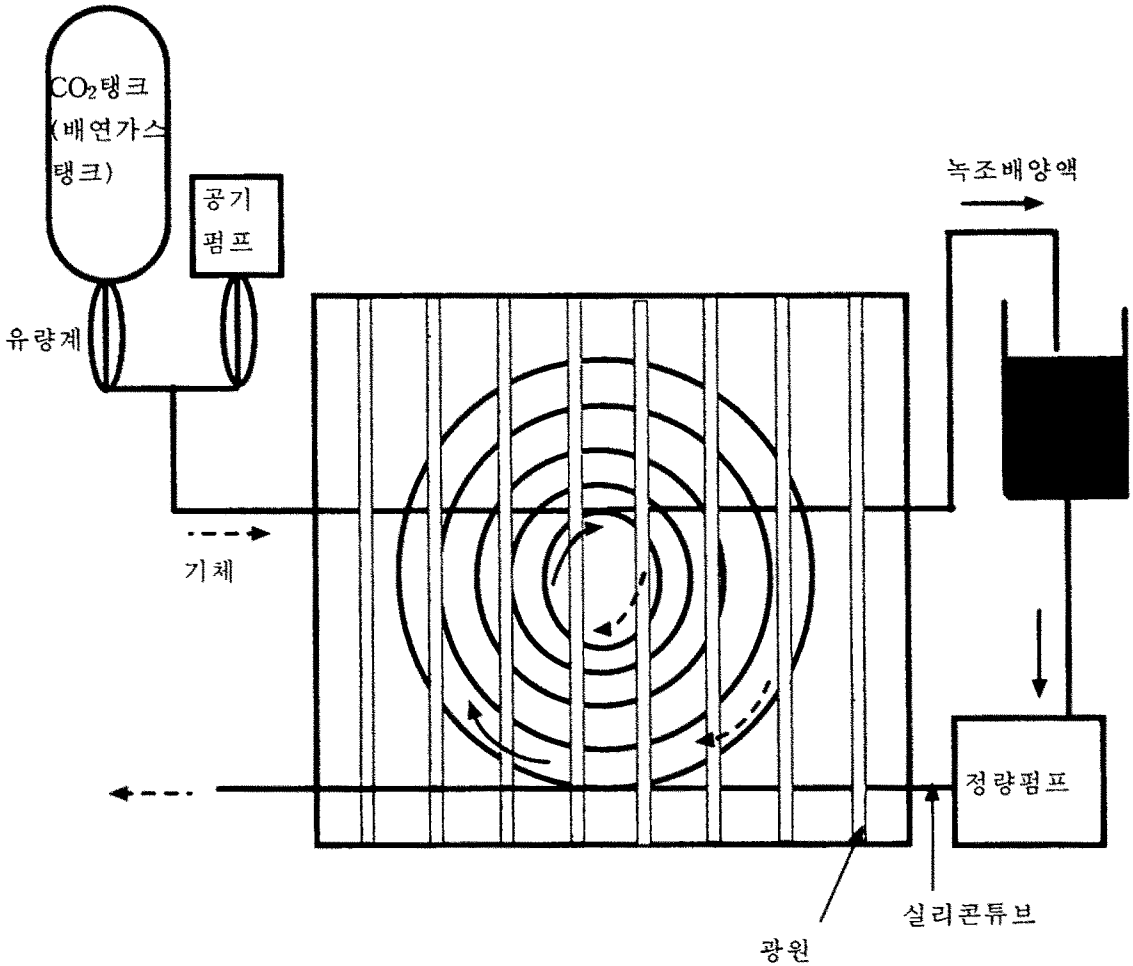


<그림 8-7> 왕겨 소각로의 배연가스와 순수 이산화탄소(7%)의 미세조류 배양효과 비교 (초기배지 pH 4.5, 온도 30℃, 광도 5-6 kLux)

제 2 절 관형 미세조류 배양 시스템

1. 시스템의 구성

왕겨 소각로의 배연가스를 활용하는 실용화 미세조류(녹조) 배양장치로서 <그림 8-8>과 같은 관형형태의 배양기를 설계 제작하였다. 이것을 간단히 설명하면 10 m 길이의 투명 비닐관을 빛 반사가 잘 되도록 필름처리한 합판 위에 동심원으로 배치하고 정량펌프로써 녹조배양액을 계속 순환시키며 순수 이산화탄소와 공기를 혼합하여 농도를 조절하면서 이 기체를 녹조배양액의 흐름과 반대 또는 동일한 방향으로 압송한다. 또한 비닐관위에는 수십개의 형광등으로 광도를 조절하고 배양액의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 온도조절기를 사용하였다.



<그림 8-8> 왕겨 소각로의 배연가스를 활용하는 실용화 시스템으로서의 관형 미세조류 배양 시스템

2. 시스템의 녹조 성장 특성

현재 실험이 80% 정도 진행되었으나 회분식에서 나온 결과와 크게 다르지 않다. 왕겨 소각로의 배연가스로써 배양시킬 때와 순수 이산화탄소와 공기의 혼합가스로써 배양시킬 때와 차이를 보이지 않았다. 따라서 이 시스템은 실용화의 가능성이 충분히 있는 것으로 판단되며 다만 녹조 성장을 더욱 증대시킬 수 있는 최적의 배양조건을 구명하기 위한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다. 현재까지의 구명된 최적조건에서는 실험실용 정밀 생물반응기에서의 성장율의

1/2에 불과하다. 그러나 현재 다른 나라에서의 실용화 연구 시스템(본 실험장치와 다른 대형 튜브형)의 결과보다는 좋은 것으로 나타나고 있다. <그림 8-9>는 녹조배양액의 순환흐름속도에 따른 녹조의 성장속도를 나타낸 것인데 실험범위내에서 흐름이 느릴수록 성장속도는 빨랐다. 이것은 난류를 만들어서 이산화탄소와 접촉을 많이 하여 성장속도를 촉진시키려는 원래의 의도와는 반대의 결과로서 정량펌프에서 녹조에 압력을 가하였기 때문인 것으로 추측된다.

제 9 장 혼화재료로서 왕겨재 타당성 및 실용화 효과

왕겨재가 콘크리트용 혼화재료로서 상업성을 가지기 위해서는 기존의 상업용 혼화재에 비해서 품질과 가격의 비교 우위적 경쟁력이 입증되어야 한다.

또한 최근의 지구 온난화 현상을 해소하고자 범세계적으로는 CO₂ 방출량 축소를 위한 국제적인 협약 추진이 진행되고 있으나 왕겨재를 생산하기 위해서는 소각과정에서 7% 농도의 이산화탄소를 대기중으로 방출시켜야 한다. 반면 왕겨재를 혼입시 시멘트의 일부를 대체하기 때문에 시멘트 생산과정에서 대기중으로 방출시키는 이산화탄소의 양은 오히려 줄여준다. 따라서 왕겨재를 콘크리트용 혼화재료로 개발하기 위해서는 방출 또는 억제되는 이산화탄소의 양에 대한 영향 즉 환경에의 영향성도 고려해야 한다.

또한 왕겨재를 콘크리트용 혼화재료로 개발할 경우 경제성이 보장되어야 하므로 왕겨재를 콘크리트용 혼화재료로 사용할 때 기대이익을 극대화하기 위한 방안의 규명이 필요하다.

제 1 절 품질 타당성

왕겨재가 콘크리트용 혼화재료로서 상업성을 가지기 위해서는 기존의 상업용 혼화재에 비해서 품질과 가격의 비교우위성이 입증되어야 한다. 품질의 비교우위적 경쟁력과 관련하여 왕겨재를 콘크리트용 혼화재료로 혼입시

첫째, 모든 콘크리트구조물의 설계기준으로 삼는 재령 28일의 압축강도가 보통의 콘크리트에 비해서 압축강도의 증가율(20 ~ 28%)이나 압축강도의 분산 폭이 가장 고가이면서 경합이 예상되는 기존의 상업용 혼화재인 실리카흄 보다도 우수하고 품질이 안정적이며,

둘째, 시멘트를 치환 가능한 왕겨재의 최대 혼입율의 범위가 시멘트

중량의 25%에 달하므로 실리카흙의 최대혼입율이 시멘트 중량의 10~20%인 점을 감안하면 왕겨재의 사용범위가 더욱 넓으며

셋째, 콘크리트의 품질을 좌우하는 중요한 요소중의 하나가 시공성인데 왕겨재를 혼입한 콘크리트의 시공성은 실리카흙을 혼입한 콘크리트보다 더욱 우수하며

넷째, 왕겨재 혼입 콘크리트의 인장강도 특성과 수화열 발열특성이 실리카흙과 비슷하며

다섯째, 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 보통의 콘크리트에 비해서 내황산염 저항성이나 내투수성 및 내부식성이 우수하며

다섯째, 온수양생시 특히 인장강도의 증가폭이 보통의 콘크리트보다 우수하다.

따라서 이러한 이유들로 인하여 왕겨재를 혼화재로 개발하여 기존의 혼화재료 시장에 출품시 관계자의 노력여하에 따라서는 시장점유율을 조기에 높일 수 있을 것이다.

제 2 절 경제적 타당성

왕겨재 혼입 콘크리트에서 동일한 목표슬럼프를 확보하는데 소요되는 재료의 양은 <표 7-6>에 나타내었으며 이를 1997년 현재의 시중 단가를 적용하여 콘크리트 1㎥를 제조하는데 소요되는 재료비를 계상하면 다음 <표 9-1>과 같다.

동 표에서 자갈과 모래의 양은 혼화재의 종류에 관계없이 거의 일정하므로 무시하였다. 또한 시멘트의 단가는 '97년도 1/4분기 조달청 공고 분말시멘트의 생산공장도 가격인 47,503원/kg을 적용하였으며, 감수제 단가는 '97년도 1/4분기 현장도착도 가격인 800원/kg을 적용하였고, 실리카흙 단가는 '97년도 1/4분기 현장도착도 가격인 900원/kg을 적용하였다.

<표 9-1> 단위결합재량별 소요 재료비

단위결합재량	혼화재	소요량 (kg/m ³)				소요재료비 (원/m ³)				
		시멘트	감수제	왕겨재	실리카흙	시멘트	감수제	왕겨재	실리카흙	소계
400	왕겨재 (10 μ m)	360	8.2	40	-	17,101	5,740	15,360	-	38,201
	실리카흙	360	12.91	-	40	17,101	9,037	-	36,000	62,138
500	왕겨재 (10 μ m)	450	10.24	50	-	21,376	7,168	19,200	-	47,744
	실리카흙	450	13.53	-	50	21,376	9,471	-	45,000	75,847
600	왕겨재 (10 μ m)	570	12.1	30	-	27,076	8,470	11,520	-	47,066
	실리카흙	570	13.74	-	30	27,076	9,618	-	27,000	63,694

한편 왕겨재 단가는 분쇄되지 않은 왕겨재 재료비와 분쇄비로 이루어진다. 분쇄되지 않은 왕겨재 재료비로서는 '96현재 왕겨의 전국 평균 판매가격이 21,900원/톤이며 소각시 왕겨재가 습윤단위중량의 15% 생성되는 점을 고려하여 분쇄되지 않은 왕겨재 재료비로 146원/kg을 추정하였다. 왕겨재 분쇄비용으로서는 다음 식(9-1)과 같이 46원/kg을 추정하였다. 이에 따라 미세하게 분쇄된 왕겨재 1kg 생산에 소요되는 원가는 192원이나 영업이익이나 기자재의 감가상각비를 고려하여 원가의 2배인 384원/kg으로 추정하였다.

$$0.13\text{Kwh}(\text{미세분쇄기로 15분 분쇄 소비전력}) \times 1,000\text{g/kg}(\text{왕겨재}) \div 40\text{g}(\text{1회 미세분쇄량}) \times 47.5\text{원/Kwh}(\text{'97년도 1/4분기 산업용 평균 주간전력단가}) \times 0.3(\text{연속대량분쇄시 예상축소비용}) \dots \dots \dots (9-1)$$

위 표에서 알수 있는 바와 같이 왕겨재를 혼화재료로 사용할 경우 가장 강력한 경합상대라 예상되는 실리카흙을 사용할 때 소요되는 재료비의 약 66%로 콘크리트를 제조할 수 있다.

더구나 이 단가내에는 왕겨 소각시 부수적으로 나타나는 소각열량의 부가가치가 포함되어 있지도 않은 상태에서 콘크리트 제조비를 떨어

뜨릴 수 있으므로 왕겨재를 혼화제로 개발하여 시판에 들어갈 경우 시행주의 입장에서는 저렴한 가격으로 높은 품질의 구조물을 축조할 수 있으므로 선호할 것이 예상되므로 비교우위적 가격 경쟁력이 있다 하겠다.

한편 왕겨 소각시 나타나는 소각열량의 부가가치는 다음과 같이 추정된다.

먼저 왕겨의 평균 고위발열량이 3,568kcal/kg 이고 소각로 전체효율이 59.5%이므로 왕겨 1kg 소각시 이용가능한 평균열량은 약 1,940kcal/kg 이다. 한편 왕겨를 소각시 약 15%(분쇄시 손실 포함)의 왕겨재가 발생하므로 왕겨재 1kg 생산시 까지 이용가능 열량은 12,930kcal 이다. 한편 수입경유 1ℓ 당 단가는 300원이고 수입경유의 열량이 약 9,200 kcal/ℓ 이므로 수입경유 1kcal 당 단가는 0.032608원/kcal 이다. 따라서 왕겨재 1kg 생산시 까지 나타나는 발열량의 잠재적 가치는 422원/kg 으로 추정된다.

그러므로 왕겨 소각시 나타나는 발열량을 40% 까지 이용한다 가정하고 왕겨재의 단가를 $(146 + 46 - 422 \times 0.4) \times 2$ (영업이익, 감가상각)로 계산하면 약 46원/kg으로 추정된다. 이 단가는 보통 포틀랜드시멘트 단가보다도 저렴하므로 시멘트의 치환율을 늘리면 늘릴수록 콘크리트의 재료비가 저렴해지므로 국가 경쟁력 향상에도 큰 도움이 될 것이다.

또한 발생열량의 이용효율이 증대할수록 왕겨로 인해 농어민들에게 돌아가는 수익이 더욱 더 커질 것이며 아울러 다른 어떤 기성제품의 혼화제 보다도 심지어 보통 포틀랜드시멘트 보다도 비교우위적 가격 경쟁력이 있을 것으로 추정된다.

제 3 절 환경 영향성

왕겨를 콘크리트용 혼화재료로 개발하기 위해서는 소각하여야 하므로 왕겨 1톤의 소각과정에서 농도 7%의 이산화탄소 1,360kg이 생산되어 대기중으로 방출된다.

한편 보통 포틀랜드 시멘트를 생산시 시멘트 1톤당 약 77.2kg의 이산화탄소가 대기중으로 방출되는 것으로 보고되고 있다.

왕겨재는 시멘트의 일부를 대체하므로 왕겨재 혼입율 만큼 시멘트를 적게 사용하므로 왕겨재 혼입콘크리트와 보통의 콘크리트 1㎥를 제조하는 데 따른 대기중 방출 이산화탄소의 양적 크기는 다음 <표 9-2>와 같이 추정된다.

<표 9-2> 단위결합재량별 이산화탄소 배출량

단위결합재량 (kg/m ³)	왕겨재 혼입율(%)	1m ³ 당 소요량(kg)		이산화탄소 배출량(kg/m ³)		
		시멘트	왕겨재	시멘트	왕겨재	소 계
400	0	400	0	30.9	0	30.8
	10	360	40	27.8	54.4	82.2
500	0	500	0	38.6	0	38.6
	10	450	50	34.7	68.0	102.7
600	0	600	0	46.3	0	46.3
	5	570	30	44.0	40.8	84.8

왕겨재 혼입 콘크리트를 제조시에는 보통의 콘크리트 보다도 약 2.38배의 이산화탄소가 대기중으로 방출된다. 그러나 왕겨재 혼입 콘크리트는 보통의 콘크리트에 비해서 내구성이 우수하여 구조물의 재건축에 소요되는 기간이 보통의 콘크리트 보다도 길어 지므로 장기간에 걸쳐서 비교할 경우 이산화탄소의 대기중 방출효과는 이보다 줄어들 것이다. 더구나 콘크리트 구조물을 재건축할 경우에는 시공장비나 교통마비로 인한 추가적인 이산화탄소 방출이 예상되므로 이들까지 감안하면 왕겨재 혼입 콘크리트를 보급할 경우 이산화탄소 방출량의 차이는 더욱더 줄어들 것이다.

한편 시멘트를 생산할 때는 석회석을 채취하기 위해서 자연을 훼손하고 분진의 발생이 극심하며 채굴된 석회석의 소성과 분쇄과정에서 소요 에너지를 수입경유에 의존하고 나아가 소음공해도 극심하다. 이처럼 계량하기 어려운 사회적 비용까지 고려하면 국가경쟁력 향상이나 콘크리트 구조물의 내구성 향상 차원 및 국토환경의 보전차원에서 왕겨재를 혼화재료로 개발·보급하는 것이 유리하다 판단된다.

제 4 절 실용화 효과

왕겨재를 콘크리트용 혼화재로 개발하여 보급시 기대되는 효과는 크게 혼화제로서 판매하는 경우의 효과와 프리캐스트 제품화로 진행시 효과로 나누어 분석할 수 있다.

1. 혼화제로 판매시 기대효과

97현재 전국적으로 산재해 있는 253개의 미곡종합처리장은 연평균 약 6,000톤을 건조벼를 도정하고 있으며, 왕겨의 평균적인 판매단가는 '96현재 21,900원/톤으로 추정된다.

한편 왕겨재를 혼화재로 개발 판매시 실리카흙과 경합이 예상되므로 왕겨재 판매단가를 여러 가지로 가정할 수 있으나 실리카흙의 판매단가인 900원/kg의 55%인 500원/kg으로 가정하고, 평균입경이 10 μ m 미세분쇄 왕겨재 생산에 소요되는 직접비 192원/kg(왕겨 재료비146원 + 왕겨재 분쇄비46원)의 50%를 감가상각비와 기타경비라고 가정하면 왕겨재 원가는 288원/kg으로 추정된다. 또한 왕겨재 1kg 생산할 때마다 422원으로 추정되는 열량이 생산되므로 이 열량의 40%를 이용한다 가정하면 왕겨재 1kg 생산할 때마다 168원의 가치가 현실화 된다.

따라서 이러한 추정치를 토대로 왕겨를 소각하여 혼화재로 판매하는 경우와 현행의 관행적 왕겨 소비형태를 유지하는 경우와 비교할 때 미곡종합처리장 1개소당 기대되는 효과를 추정하면 다음 <표 9-3>과

같다.

<표 9-3> 혼화재로 판매시 기대효과(미곡종합처리장 1개소당)

구분		혼화재로 판매시	현행 소비형태	차인(천원/년)	비고
왕겨 수익	연간벼도정량	6,000톤	6,000톤		
	연간왕겨생산량	1,200톤	1,200톤		벼중량의 20%
	단가	0	21,900원/톤		
	예상수익	0	26,280천원/년	△26,280	
혼화재 수익	왕겨재생산량	180톤/년	180톤/년		왕겨의 15%
	왕겨재 단가	500원/kg	0		실리카흙의 55% 가정
	왕겨재 원가	288원/kg			이윤50%,감가상각50%
	예상수익	38,160천원/년	0	38,160	100% 판매시
발열량 수익	1kg당 잠재가치	422원/kg			
	1kg당 현재수익	168원/kg			40% 열량 이용시
	예상수익	30,240천원/년		30,240	
소 계		68,400천원/년	26,280천원/년	42,120	

위 표에 나타나 있는 바와 같이 현행의 관행적 왕겨 소비형태인 축산시설의 깔개로 이용할 경우와 비교할 때 혼화재로만 판매할 경우에 발열량의 수익을 제외하더라도 미곡종합처리장 1개소당 연간 약 11,880천원의 추가 수익이 발생할 것으로 추정된다. 그러므로 전국 253개소의 미곡종합처리장을 대상으로 판단하면 연간 약 3,005백만원의 추가수익이 예상된다. 한편 현재 미곡종합처리장이 도정하는 왕겨량은 전국생산량의 37.5%에 불과한 것으로 추정되므로 전국적으로는 8,015백만원의 추가수익이 예상된다.

더구나 발열량의 이용효율을 40%라 가정한 현재적 수익까지 감안하면 미곡종합처리장 1개소당 연간약 42,120천원의 추가수익이 발생할 것으로 추정되며 전국적으로는 28,416백만원의 추가수익이 예상된다.

그러나 위의 분석은 미곡종합처리장 입장에서만 분석한 것으로 왕겨재를 혼화재로 개발·보급시 콘크리트 구조물의 제조단가가 실리카흙을 혼입할 경우보다 저렴하여 국가와 시행주의 국제적인 경쟁력을 높여주는 간접적 효과가 포함되지 않았으며, 실리카흙의 수입대체 효과가 계상되지 않았으며, 또한 왕겨재를 혼화재로 혼입시 콘크리트의

강도가 높아져서 구조물 치수가 줄어들기 때문에 나타나는 공사비의 절약분 효과가 계상되지 않았다. 또한 구조물 치수의 축소에 따라 재료(시멘트, 모래, 자갈)를 적게 사용하므로 이의 채취량 감소에 따른 국토환경 보전효과 등이 계상되지 않았다.

더구나 왕겨재를 혼입시 콘크리트 구조물의 품질과 내구성이 증대하므로 조기 재건축에 필요한 사회적·국가적 직접비용과 간접비용이 계상되지 않았다.

그러므로 혼화재료로만 판매한다 하여도 미곡종합처리장이나 국가적 입장에서 현행의 관행적 왕겨소비형태 보다는 막대한 부가가치가 추가로 창출될 수 있는 것으로 판단된다.

2. 프리캐스트 제품화로 발전시 기대효과

<표 9-3>에 나타나 있는 바와 같이 왕겨를 소각분쇄하여 혼화재료로만 판매시에는 현재와 같이 왕겨를 판매하는 것보다는 연간 약 11,880천원의 추가 수익이 미곡종합처리장 마다 발생하는 것으로 추정된다. 그러나 이러한 수익은 혼화재료로서 왕겨재를 100% 판매하는 것을 전제로 분석된 것임에도 불구하고 미곡종합처리장이 처해 있는 어려운 경영여건을 대폭적으로 향상시키기에는 미흡하다.

반면 왕겨재 생산시 나타나는 발생열량과 이산화탄소의 이용율을 늘리면 늘릴수록 미곡종합처리장의 수익이 극대화된다.

한편 왕겨의 연소 및 분쇄 작업은 가능한 한 낮동안에 하는 것이 인건비 절약차원에서 유리하다. 반면 발생열량을 물벼건조나 시설농업 또는 미곡종합처리장의 자체 난방에 이용하는 시간은 주로 야간이다. 그러므로 열량의 공급과 수요시점이 차이가 나타나므로 소각열량을 효율적으로 이용하기 어렵다.

그러나 미곡종합처리장에 왕겨연소로와 분쇄기 및 프리캐스트 콘크

리트 제품공장을 동시에 설치할 경우 콘크리트 제품공장은 주로 낮동안에 작업을 진행하므로 소각열량을 즉시에 이용할 수 있으므로 열량의 잠재적 가치를 최대한으로 이용할 수 있으므로 <표 9-3>에 언급된 발생열량의 현재적 가치를 더 높일 수 있다.

따라서 농어민이나 미곡종합처리장 입장에서 보면 발생열량의 잠재적 가치를 최대한으로 활용하여 수익을 극대화 시키는 방안의 하나가 미곡종합처리장에 왕겨연소로와 분쇄기 및 프리캐스트 콘크리트 제품공장을 동시에 설치하는 안이라 할 수 있다.

이 경우 프리캐스트 제품의 판매에 따른 추가 수익이 예상됨은 물론 지역농민들 입장에서는 고용기회가 늘어나므로 농외소득이 증대될 것이 예상된다.

그러나 현재의 미곡종합처리장 규모로서는 분쇄된 왕겨재가 연간 약 180톤 생산되므로 이러한 양으로는 농업토목시설물에 광범위하게 널리 쓰이는 수로형 품류를 연간 약 4500㎡(1일 평균 77개, 규격 0.5X0.5X0.05X2) 생산할 수 있다.

또한 전국에 산재해 있는 수로형 품류 생산업체에서 생산하는 수로형 품류의 판매 이익금을 원가분석하면 <표 9-4>와 같이 1㎡ 당 평균 약 54,000원 ~ 74,000원 이므로 연간 6,000톤을 도정하는 현재의 미곡종합처리장 규모에서 예상되는 연간 판매 이익금은 평균 288백만원으로 추정된다.

반면 전국의 프리캐스트 공장은 물량수주를 위하여 덤핑입찰도 불사하고 또한 제품의 입찰이 주로 동절기에 밀집해서 발생하므로 단기간에 많은 물량을 생산하기 위해서는 기계설비와 2차양생을 위한 부지가 더욱 넓게 필요하므로 수익은 이 보다도 줄어들 소지가 있다.

그러나 정상적으로 콘크리트 프리캐스트 제품을 생산하고 판매하는

경우에는 최대로 연간 288백만원의 수익이 예상되므로 <표 9-3>에 나타나 있는 혼화재와 발생열량의 잠재적 가치까지 합한 68백만원/년 보다는 4.2배로 늘어난다.

<표 9-4> 수로형 플룸 1m² 당 원가 분석(A 회사자료)

구 분	금 액(단위 : 원)	비 고
재 료 비	47,550	'97 단가 기준
인 건 비	44,000	'97 단가 기준
- 직접인건비	29,000	
- 간접인건비	15,000	
제 조 경 비	34,570	'97 단가 기준
- 양생비	3,326	
- 동력비	1,330	
- 소모품비	8,770	
- 기타	5,350	
- 감가상각비	15,800	
제 조 원 가	126,120	
평균 판매단가	180,000 ~ 200,000	
평균 수익	53,880 ~ 73,880	

그러나 위 원가분석표에는 부지매입이나 기자재 구입에 따른 균용비용이 포함되어 있지 않으므로 이를 토대로 추정한 연평균 수익금 288백만원은 과대하게 평가될 수도 있다.

제 5 절 실용화 모델

현재 국내의 시간대별 인건비 상황을 살펴보면 근로기준법에 의거 야간작업시 별도의 수당을 지급해야 하므로 단위 시간당 인건비는 주간에 작업을 수행하는 것이 경영성 향상 차원에서 유리하다. 그러므로 왕겨의 연소 및 분쇄 작업은 가능한 한 낮동안에 하는 것이 유리하나 발생열량을 물벼건조나 시설농업 또는 미곡종합처리장의 자체 난방에 이용하고자 할 경우 열량의 필요한 시점이 주로 야간이어서 소각열량의 공급과 수요시점이 차이가 나타나며 이로인해 소각열량을 효율적으로 이용하기 어렵다.

반면 이산화탄소 이용 측면에서 살펴보면 주간에 소각할 경우 이산화탄소가 주간에 발생하며 시설농업에서 이산화탄소를 요구하는 시점 역시 주간이므로 이산화탄소를 주간에 이용하는 것은 무리가 없다.

따라서 소각시 발생하는 열량과 이산화탄소의 활용시기를 주간으로 일치시키는 시스템 모델을 개발하는 것이 부수적으로 발생하는 소각 열량과 이산화탄소를 동시에 이상적으로 활용할 수 있는 방안이다.

이러한 이상적인 시스템 모델로서 생각할 수 있는 것이 미곡종합처리장에 왕겨연소로와 분쇄기 및 프리캐스트 콘크리트 제품공장을 동시에 설치하는 시스템이다.

이러한 시스템에서 프리캐스트 콘크리트 제품공장은 주로 낮동안에 작업을 진행하므로 주간에 발생하는 소각열량을 동시에 이용할 수 있으며 배연가스에 내포된 이산화탄소와 잠열은 인근에 설치된 시설농업이나 프리캐스트 콘크리트 제품의 2차 양생과정에 활용할 수 있으므로 <표 9-3>에 언급된 발생열량의 현재적 가치를 더 옥더 높일 수 있다.

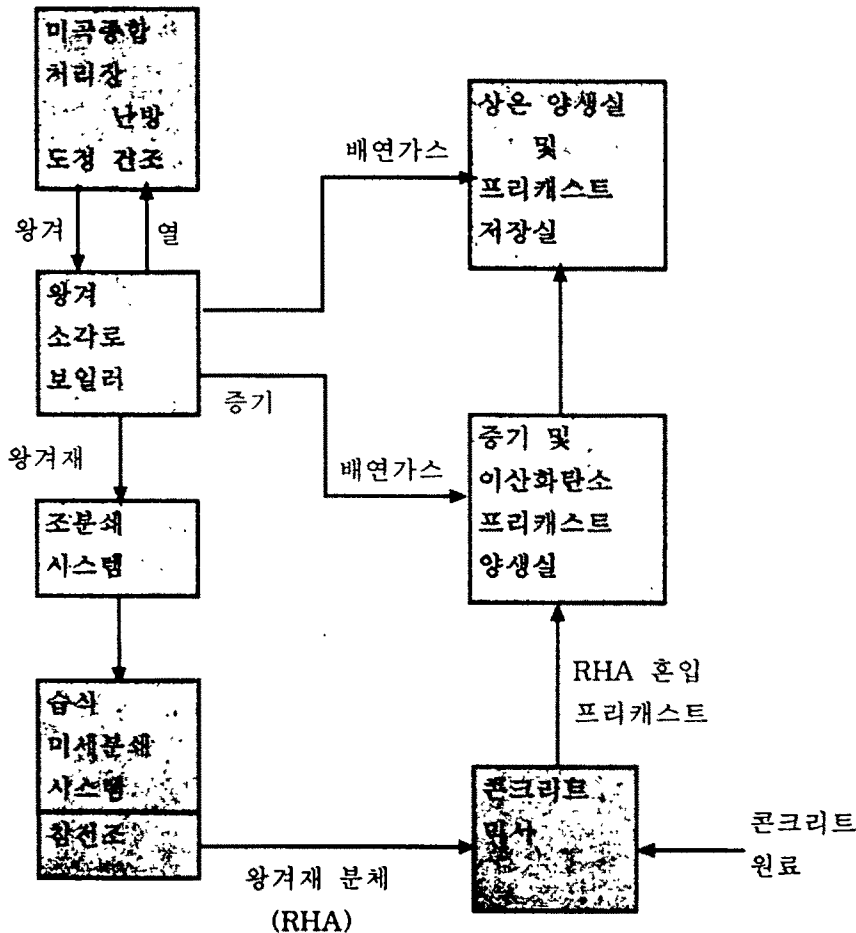
따라서 농어민이나 미곡종합처리장 입장에서 볼 때 발생열량의 잠재적 가치를 최대로 활용하여 수익을 극대화시키는 이상적인 시스템은 미곡종합처리장을 중심으로 왕겨연소로와 분쇄기 및 프리캐스트 콘크리트 제품공장을 동시에 설치하는 안이라 할 수 있다.

이러한 시스템의 개략적인 개념은 <그림 9-1>과 같으며 <그림 9-2>는 이 중에서 콘크리트 프리캐스트제품공정이 생략된 구체적인 시스템의 도면이다.

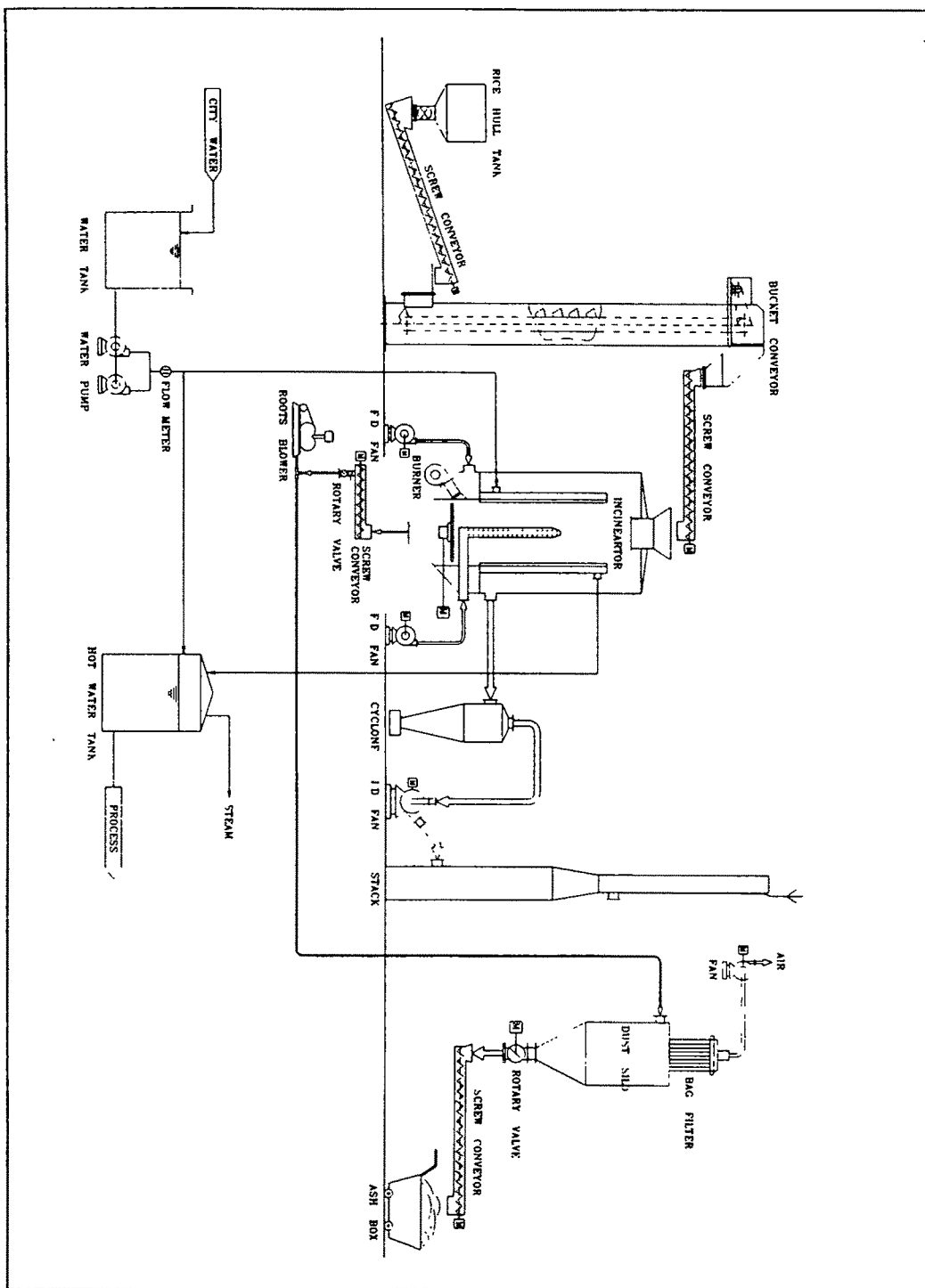
그러나 현재의 미곡종합처리장 규모로서는 연간 예상되는 최대의 수익이 288백만원에 불과하고 또한 1일 생산할 수 있는 개거식(Flume) 프리캐스트 수로구조물이 77개에 불과한 초소형 규모이다. 반면 기존

의 대부분의 프리캐스트 공장이 1일 평균 약 200-300개의 개거식 프리캐스트 콘크리트 수로구조물을 생산할 수 있는 능력을 갖추고 있는 점을 감안하면 현재의 미곡종합처리장의 규모로는 콘크리트 프리캐스트 공장을 병설하더라도 규모의 영세성으로 인해 기존의 프리캐스트 제품생산 업체와의 자유경쟁에서 생존하기가 쉽지 않다.

따라서 왕겨를 콘크리트용 혼화재로 개발하여 미곡종합처리장의 경영성을 향상시키기 위해서는 미곡종합처리장의 규모 확대가 필요하며, 확대된 규모에 알맞은 콘크리트 프리캐스트 제품공장과 왕겨재 소각로 및 분쇄기를 동시에 설치해야 할 당위성이 강력히 제기된다.



<그림 9-1> RHA혼입 프리캐스트 생산시스템의 실용화 모델의 개념도



<그림 9-2> 실용화 시스템 모델 공정도

제 10 장 종합 결론

본 연구는 부가가치가 낮은 방향으로 소비되고 있어서 단순히 농업 부산물로 여겨지고 있는 현행의 관행적 왕겨 소비형태를 지양하고 좀더 부가가치가 높은 방향으로 소비형태를 변환시켜 왕겨를 농어민의 새로운 소득원으로 개발하기 위해서 콘크리트용 혼화재로 왕겨를 활용할 수 있는 기술을 개발하고자 착수하였다.

이에 따라 1995~1997까지 3개년에 걸쳐 연구를 수행하였으며 연구과정에서 얻어진 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ° 지역별, 산지별, 품종별 왕겨의 물리화학적 특성을 분석한 결과 뚜렷한 차이점을 발견할 수 없었으며 대체적으로 소각후 왕겨재로 남는 무기물의 중량은 왕겨중량의 약 15%로 나타났다.

- ° 왕겨의 고위발열량은 평균 3,569kcal/kg 으로서 왕겨 2.7kg은 수입경유 1ℓ 과 열용량이 같은 것으로 나타났다.

- ° 지역별, 산지별, 품종별 왕겨재가 혼화재로 사용될 경우 콘크리트의 강도특성이나 시공성에 미치는 영향을 발견할 수 없었다.

- ° 연구실험용 연소로로 저온제어(600~620℃) 소각할 경우 비결정형 SiO₂가 다량으로 생성되며 분쇄성이 좋고 활성기공이 다량으로 생겨 시멘트 수화물과의 2차적인 포졸란반응을 일으키기 쉬우며 이로인해 혼화재로 사용시 콘크리트의 강도가 더욱 증가한다.

- ° 분쇄기종은 충격식 보다는 Mill형의 Attrition Mill이 유리한 것으로 판단되었으며 연속적인 자동분쇄와 소음 및 분진의 공해방지 차원에서 습식 Attrition Mill이 유리한 것으로 나타났다.

- ° 충격에너지를 이용하는 L.A.마모시험기로는 1시간 이상 분쇄하여도 평균입경을 20 μ m 이하로 분쇄하기가 어렵다.

- ° 저온제어(600~620℃)로 소각한 왕겨재를 혼화재로 사용한 모

르터 공시체의 28일 압축강도는 고온제어(600~620℃)로 소각한 왕겨재에 비해서 약 20-30% 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다.

° 평균입경 10 μ m 또는 20 μ m인 왕겨재가 혼화재로서 콘크리트의 28일 압축강도를 보통의 콘크리트 보다 증대시키려면 단위결합재량은 320kg/m³ 이상이어야 한다.

° 평균입경 10 μ m인 왕겨재의 최적혼입율은 단위결합재량이 320~500kg/m³에서는 10%로 나타났으며 단위결합재량이 600kg/m³인 경우 5%로 나타났다. 또한 이때의 재령 28일 압축강도는 보통의 콘크리트에 비해서 20~28%(평균 23%) 증가하는 것으로 나타났다.

° 평균입경 20 μ m인 왕겨재의 최적혼입율은 단위결합재량이 320~500kg/m³에서는 10%로 나타났으며 단위결합재량이 600kg/m³인 경우 5%로 나타났다. 또한 이때의 재령 28일 압축강도는 보통의 콘크리트에 비해서 11~18%(평균 14%) 증가하는 것으로 나타났다.

° 평균입경 10 μ m인 왕겨재의 최대혼입율은 단위결합재량이 320~600kg/m³에서 25%로 나타났으며, 평균입경 20 μ m인 왕겨재의 최대혼입율은 최적혼입율과 같게 나타났다.

° 콘크리트의 시공성과 강도증진을 및 품질의 균질성을 기준으로 살펴보면 평균입경이 10 μ m인 왕겨재가 평균입경 20 μ m인 왕겨재나 상업용 혼화재로서 가장 고가인 실리카흙 보다도 우수하다.

° 왕겨재로 시멘트를 치환시 재령 초기에는 치환하지 않은 보통의 콘크리트 보다 강도가 작은 경향을 보이나 28일에 이르면 보통의 콘크리트보다도 증가한다.

° 고로슬래그를 혼화재로 사용시 단위결합재량이 500kg/m³ 이상인 경우에 28일 압축강도가 보통의 콘크리트 보다 크게 나타난다. 28일 압축강도를 최대화하는 고로슬래그의 최적 혼입율은 10%로

나타났으며 이 때의 재령 28일 압축강도는 보통의 콘크리트 보다 7~28% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 고로슬래그의 최대혼입율은 단위결합재량이 500kg/m³ 인 경우에는 시멘트 중량의 50%이나 단위결합재량이 600kg/m³ 인 경우에는 30%로 나타났다.

◦ 왕겨재를 혼화재로 개발시 가장 경합이 예상되는 혼화재는 실리카흄이다. 실리카흄을 혼화재로 사용시 단위결합재량이 400kg/m³ 이상인 경우에 28일 압축강도가 보통의 콘크리트 보다 크게 나타난다. 28일 압축강도를 최대화하는 혼입율은 단위결합재량이 400~500kg/m³ 인 경우 10%이고 600kg/m³인 경우 5%로 나타났다. 또한 이 때의 재령 28일 압축강도는 보통의 콘크리트 보다 10~20% 증가하는 것으로 나타났다. 아울러 실리카흄의 최대혼입율은 단위결합재량이 400kg/m³ 인 경우에는 시멘트 중량의 20%이고, 단위결합재량이 500kg/m³ 인 경우에는 15%, 600kg/m³ 인 경우에는 10%로 나타났다.

◦ 플라이애쉬를 혼화재로 첨가시 재령 28일 이내에서는 콘크리트의 강도를 높여주지 못한다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트의 수화열은 보통의 콘크리트 보다 약간 작게 나타난다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 보통의 콘크리트에 비해서 내황산염 저항성이 크고 투수에 대한 저항성이 크며 내부식성이 크게 나타나므로 보통의 콘크리트에 비해서 내구성이 있다고 판단된다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 증기양생 보다는 온수양생시 압축강도 또는 인장강도의 조기발현 효과가 크게 나타났다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트를 온수로 축진 양생시 최고온도는 70℃가 최적이며 그 지속시간을 길게 할수록 보통의 콘크리트에

비해서 압축강도나 인장강도가 조기에 가장 크게 발현되었다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트를 농도 7%의 CO₂하에 2주일간 노출시켜도 중성화특성이 나타나지 않으므로 풍부한 열량과 농도 7%의 CO₂로 구성된 배연가스를 왕겨재 혼입 콘크리트 프리캐스트 제품의 2차양생에 활용할 수 있는 것으로 나타났다.

◦ 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 색깔이 검어져서 태양복사에너지의 흡수에 유리하며 아울러 강도와 내구성이 우수하므로 특히 동절기 제설작업이 불가한 농어촌의 소규모 도로(마을간 연결도로, 경작로, 농로)의 포장재로 매우 유리할 것으로 판단된다.

◦ 왕겨재를 혼화재로 사용시 콘크리트의 제조단가가 실리카흙의 약 66%로 추정된다.

◦ 이산화탄소의 농도가 7-10%일 경우 미세조류의 성장이 가장 활발하였으며, 광(光) 조사는 주기적으로 하는 것이 연속적으로 하는 것에 비해서 미세조류의 성장에 유리한 것으로 나타났다.

◦ 왕겨재를 혼화재로만 판매할 경우 기존의 관행적 왕겨 소비형태에 비해서 미곡종합처리장 1개소당 연간 약 12백만원의 추가 판매이익이 예상되며 전국적으로는 8,015백만원의 추가 이익이 예상된다.

◦ 왕겨재와 소각열 및 배연가스를 동시에 활용하는 이상적인 실용화 모델 시스템은 미곡종합처리장과 왕겨 소각시스템(연소로, 보일러, 분쇄시스템) 및 콘크리트 프리캐스트 공장을 동시에 설치하는 시스템으로 판단되며, 이 경우 미곡종합처리장 1개소당 예상되는 최대의 가능한 이익은 연간 약 288백만원으로 추정되었다.

제 11 장 실용화에 대한 건의

본 연구는 왕겨재를 콘크리트용 혼화재로 활용하는 기술을 개발하는 과제이므로 본 연구의 수행과정에서 얻어진 결과를 종합할 때 다음의 사항이 계획적으로 시행된다면 본 연구의 성과가 조기에 실용화되어 농어민의 소득증대와 국내 수도작 농업의 경쟁력 확보에 크게 기여할 것이다.

1. 지역의 노동력, 수자원과 같은 천연자원, 지역자본 등과 같은 지역 자원을 최대로 활용하여 지역민의 소득을 극대화할 수 있는 지역종합개발계획을 먼저 수립한 후 이 계획에 의거 미곡종합처리장의 규모나 위치등이 결정되고 설치되어야 할 것이다.

2. 현재 전국적으로 설치되고 있는 미곡종합처리장은 규모를 좀더 대형화하는 것이 유리하며, 향후 미곡종합처리장을 설치하고자 할 경우 지역 농민의 소득 극대화와 미곡의 국제 경쟁력 확보를 위해서 왕겨 소각시스템(소각로, 열교환기, 분쇄기)과 콘크리트 프리캐스트제품 생산공정을 동시에 설치하여 왕겨 소각과정에서 나타나는 발열량과 배연가스를 동시에 재활용할 수 있는 시스템으로의 전환이 필요하다.

3. 관개배수 시설물, 문화마을 시설물, 농어촌 도로, 산촌 마을 시설물, 농공단지 및 축산단지용 시설물 등과 같은 농업생산기반 시설물과 농어민 소득증대 사업용 시설물들의 상당수가 콘크리트 제품으로 이루어져 있다. 물과 접촉할 기회가 거의 없어서 내구연한 동안 구조물이 아주 좋은 환경하에 놓여 있는 일반적인 건물이나 교량과 달리 이러한 농어촌 개발용 시설물들은 영농기 동안 항상 물과 접하고 있으므로 콘크리트 조직이 조기에 노후화된다. 영농기 동안 콘크리트의 조직 내부로 스며든 물은 콘크리트 공극내의

알칼리 농도를 저하시키고 이에따른 철근부식을 촉진 시키며 나아가 산이나 염에의 피해를 쉽게 받게 하며 동결기의 혹한은 영농기 동안 콘크리트속에 침투한 물을 동결시켜 콘크리트에 심각한 동해 손상을 일으키는 등 다른 어떤 분야의 콘크리트보다도 매우 유해한 환경 하에 놓여있다. 그러므로 농어촌 개발용 시설물들이 요구하는 역학적인 품질수준이 일반 콘크리트 구조물과 동일할지라도 더 큰 내구성과 내화학적 및 강도를 가질 수 있도록 콘크리트 조직이 치밀하게 설계 및 시공되어야 한다.

그러나 이러한 농어촌 개발용 시설물의 품질 또는 내구성에 대한 어떠한 기준치도 아직까지는 정립되어 있지 않으므로 이 분야에 종사하는 기술자들은 건설교통부에서 제정 공표한 일반적인 조건 하에 놓인 콘크리트 구조물이 요구하는 품질 또는 내구성 기준치를 따르고 있을 뿐이다.

따라서 농어촌개발용 콘크리트 구조물의 설계 및 시공에 적용할 목표품질 및 목표 내구성의 기준을 시급히 정립하여야 한다. 이를 위해서는 많은 실험적 자료를 토대로 압축강도와 내구성 및 콘크리트 품질간의 상관성을 규명하는 추가적인 연구를 지속적으로 수행할 것이 요구된다.

4. 대부분의 농업토목 시설물들은 작물을 수확한 후부터 다음 해의 파종기까지 동결기 동안에 공사가 진행되며 이로인해 콘크리트 구조물의 품질 및 내구성이 현저히 저하된다. 더구나 콘크리트 구조물이 설치될 위치가 산간지나 저습지역과 같이 공사 진행에 아주 불리한 지역이므로 공사용 자재는 물론이고 공사과정 중의 품질을 건교부 제정 일반콘크리트 시방서가 요구하는 수준까지 유지하기가 어렵다. 그 외에도 소형의 농업토목시설물들이 산악지역등

에 설치되어야 하는 등 접근로가 없어 유지관리가 대단히 어렵다.

따라서 이러한 모든 불리한 여건을 고려하여 농업토목시설물의 목표품질과 내구성을 새롭게 선정하여야 하나 건교부에서 제정한 콘크리트 시방서에서는 이에대한 구체적인 규정이 없다.

따라서 콘크리트 구조물의 내구성을 진단 예측하는 이론과 콘크리트 구조물의 목표품질 및 목표내구성을 규명하는 새로운 연구가 후속적으로 수행되어야 한다.

5. 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 강도와 내구성이 높고 화학 저항성이 보통의 콘크리트 보다도 크므로 가혹한 환경하에 놓일 농업토목 구조물에서는 보통의 콘크리트 보다도 왕겨재를 혼입한 콘크리트가 유리한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 조기 실용화와 이에따른 농어민의 신규 소득원 창출을 위해서는 왕겨재를 혼화재로 널리 보급하기 위한 법적·제정적 지원이 뒤 따라야 한다.

6. 아스팔트 포장은 콘크리트 포장에 비해 공사비가 싸고 차량의 주행성이 좋으며 동절기 태양복사 에너지의 흡수능력이 커서 빙판이 적게 발생하므로 도로의 효율성이 높다. 반면에 강도와 내구성이 떨어져 자주 보수 또는 보강공사를 해야하며 시공시 다짐작업을 충분히 해야한다.

반면 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 아스팔트 포장재 이상으로 색깔이 검어져서 동절기 태양복사 에너지를 흡수할 수 있는 능력이 아스팔트 포장재 이상으로 높다. 더구나 아스팔트 포장재와 달리 강도와 내구성이 높고 시공시 별도의 다짐작업 필요없다.

한편 농어촌지역에 설치되는 농로나 기계화 경작로 또는 마을간 연결도로 등은 인력이 부족하고 통과차량이 적으므로 동절기 제설작업이 불가하여 특히 동절기에는 도로로서 효율이 극히 떨어진

다. 특히 최근에는 교통정체 구간이 급속히 늘어나면서 지방도나 마을간 연결도로를 불문하고 중차량이 빈번히 통과하고 또한 농작업용 기계들도 효율을 높이기 위해서 점차 대형화·중량화 하는 추세이므로 농어촌에 산재해 있는 소규모 도로가 손상될 가능성은 점차 증가하고 있는 반면 도로의 기능을 원상 회복하기 위한 보수나 보강공사는 인력부족과 원거리 등으로 인해 국도나 지방도에 비해 매우 어려운 실정이다.

따라서 관리가 어려운 농어촌의 도로는 연성포장인 아스팔트 포장보다는 강도나 내구성 및 내화학성이 높은 왕겨재 혼입 콘크리트를 이용한 포장이 유리하며 특히 검은색을 띄고 있으므로 태양복사 에너지의 흡수능력이 뛰어나 용설효과가 높을 것이 예상되므로 동절기 인위적인 제설을 그다지 요하지 않아 더욱 유리할 것으로 예상된다.

따라서 향후 농어촌에 경작용 도로포장 계획을 수립 또는 시행할 경우에는 콘크리트 포장이나 아스팔트 포장을 여과없이 관행적으로 시공하는 것을 지양하고 시험연구사업의 일환으로서 왕겨재 혼입 콘크리트를 도로 포장재료로 우선 시공하여 품질의 우수성에 대한 객관적인 자료획득과 분석을 거친 후 전국적으로 확대할 경우 본 연구의 실용화 효과는 극대화 될 것이다.

시험연구사업으로서는 시험사업 구간을 설정하고 시험사업 구간 내에 다양한 포장공법에 따라 시험시공하고 이를 면밀히 관찰 분석하여 포장공법별 적절한 도로포장층의 두께나 시공방법의 선정과 통과중량과 통행속도 등의 제한사항을 규명하고 도로포장 공법별 내구성을 규명하며 포장공법별 효과등을 분석하는 등 일련의 체계적인 연구가 필요하다.

7. 왕겨가 가진 잠재적 가치를 최대한으로 현재화하기 위해서는 왕겨재는 콘크리트용 혼화재로 활용하고 소각열량은 왕겨재를 혼입한 콘크리트 프리캐스트 제품의 1차 양생에 활용하고 배연가스에 내포된 열량과 이산화탄소는 프리캐스트 콘크리트 제품의 2차 양생과정에 활용하는 시스템이 가장 이상적인 모델이라 판단된다.

그러나 이러한 이상적인 모델을 실용적으로 현재화하기 위해서는 사전에 많은 기술적·경제적인 검증이 거쳐야 한다. 즉 소각로의 효율을 높이면서 소각온도를 제어하는 기술의 개발과 최적의 소각로 규모 결정, 최적의 분쇄기 규모 및 형식 결정, 프리캐스트 공장제품의 수익을 극대화하기 위한 생산공정과 적정 생산규모 및 생산 품목의 선정, 다짐작업과 다짐기계의 선정, 품목별 합리적인 양생방법의 결정, 제품의 비수기에 대한 대책, 제품의 소비촉진을 위한 규격화·KS화 등 기술적·경제적 타당성이 검증되어야 한다.

따라서 이를 위한 구체적이고 심층적인 추가 연구가 수행되어야 하며 연구기간도 연구의 성격상 3년 이상이 소요된다.

참 고 문 헌

1. Kiyoji Asai, "Study on the Control of Alkali-Aggregate Reaction Concrete by Adding Rice Husk Ash(I)", "농업토목학회 논문집, Trans. of JSIDRE NO.174, pp.9 5~101, Dec.,1994.
2. R.G. Smith, "Cement from Rice Husks", International Cement Review, pp.49, Dec., 1991.
3. R.G. Smith, "Rice Husk Ash Cements-Small Scale Production for Low Cost Housing", Central Building Research Institute, Roorkee, India, pp.687~695, Nov., 1984.
4. R.G. Smith and G.A. Kamwanja, "The Use of Rice Husks for Making a Cementitious Material", Building Research Establishment, pp.1~6, Oct., 1986.
5. R.G. Smith "Rice Husk Ash Cement", Appropriate Technology, Vol.11, No.3, p.9, Dec., 1984.
6. R.G. Smith, "Alternatives to OPC", Building Research Establishment, pp.1~17, March, 1993.
7. R.G. Smith, "Rice Husk Ash Cement in Guyana", Building Research Establishment, Department of the Environment, pp.1~7, June, 1989.
8. P.K. Metha, "Properties of Blended Cements Made from Rice Husk Ash", ACI Journal, pp.440~442, Sep., 1977.
9. V.M.Malhotra, "Fry Ash Siag, Silica Fume, and Rice-Husk Ash in Concrete : A Review", Concrete International, pp.23~28, April, 1993.
10. Sigeyoshi Nakataki, Hiroyuki Ohga and Takeshi Inoue, "Effect of Fly Ash in Controlling Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction and it's Mechansim", 토목학회논문집, 제414호, V-12, pp.175~184, Feb., 1990.
11. Somjai Kajorncheappunngam and D.F. Stewart, "Rice Husk Ash in Roller

Compacted Concrete” , Concrete International, pp.38~44, April, 1992.

12. 趙興坤, “眞空式 溫水 보일러의 開發動向”, 産業技術情報院. pp.1~55, 9, 1994.

13. 농림수산부, “농림수산 주요통계연보”, 1996.

14. 김광수, “ 왕겨를 이용한 활성탄 제조공법 ”, 건설기술정보, 8., 1995.

15. 농어촌진흥공사, “UR대은 심포지움 종합보고서, 첨단시설농업의 발전방향”, 6., 1994.

16. 한국첨단농업시설협의회, “제 3회 첨농협 정기총회 기념연구발표”, 10., 1996.

17. 서울대학교 농업개발연구소, “국제화시대의 농업구조 개선전략”, 5., 1994.

18. 서울대학교 농업개발연구소, “국내 시설원예산업 발전을 위한 심포지움”, 8., 1993.

19. P.K. Metha & N. Pitt, “Energy and Industrial Materials from Crop Residues”, Resource Recovery and Conservation, No.2, 1976.

20. P.K. Metha & T. Milos Polivka, “Use of pozzolans for Reducing Expansion in Concretes Containing Reactive Aggregates”, Living with Marginal Aggregates, ASTM, 1976.

21. P. V. Nelson, “Greenhouse Operation and Management”, Prentice-Hall, Inc., 1991.

22. T. Nanaka & T. Mori, “Significance of Iron Layer as an Indicator to Determine the Microbial Corrosion of Concretes”, pp.15~24.

23. P.K. Metha, United States Patent. No.3, 951, 907, Apr., 20, 1976.

24. H.E. Haxo & P. K. Metha, “Ground Rice-Hull Ash as a Filler for Rubber”, V48, Rubber Chemistry and Techology.

25. R.G. Smith, “Rice Husk Ash Cement and other Cementitious Materials”, Intermediate Technology, V11, No.3, Dec., 1984.

26. J. James & M. S. Rao, “Reactivity of Rice Husk Ash”, Cement and Concrete

Research, V16, pp.296~302, 1986.

27. V.M. Malhotra, "Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzloans in Concrete", Proceedings, 3rd International Conference, Sp-114, V2, Trondheim, Norway, 1989.

28. V.M. Malhotra, "Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzloans in Concrete", Proceedings, 3rd International Conference, Sp-114, V2, Trondheim, Norway, 1989.

29. 권순찬, 김진상, 한국생물공학회지 8(5), pp.438~445, 1993.

30. 김지동외, 에너지 4(2), pp. 74-89, 1981.

31. 박승제, 노상하, 한국농업기계학회지 8(2), pp.39-48, 1983.

32. 박승제, 서울대학교 박사학위 논문, 1988.

33. 박인식, 에너지 연구 4(6) pp.98~109, 1981.

34. 배순훈, 대한건축학회지 21(75), pp. 21-25, 1977.

35. 서정일 외, 태양에너지 2(2), pp. 11-20, 1982.

36. 성기훈 외, 한국산업미생물학회지 22, pp 197-202, 1994.

37. 이선복, 박찬범, 서인수, 화학공업과 기술 13(4), pp. 13-19, 1995.

38. 이용국, 박승제, 백풍기, 노상하, 한국농업기계학회지 12(4), 1987.

39. 이진석, 태양에너지학회 발표 초록, 1993.

40. 조명제 외, 에너지 4(2), pp. 66-73, 1981.

41. 조순행 외, 화학공학의 이론과 응용 1(1), pp. 7-10, 1995.

42. 한국농촌경제연구원, 보고서, 1981.

43. 한국동력자원연구소, 에너지 센서스 결과보고서, 1981.

44. 한국열관리사회, 온수보일러 시공 교육교재, 1981.

45. 홍성길, 화학공학의 이론과 응용 1(1), pp. 15-17, 1995.

46. Antero, S. M., Annual Convention of the Philippine Society of Agri.

Engineers.

47. Beagle, E. C., FAO Agricultural service bulletin, 1978.
48. Becker, E. W., Microalgae. Cambridge University Press, 1994.
49. Cresswell, R. C., Rees, T.A., and Shah N., Algal and Cyanobacterial Biotechnology. John Wiley & Sons Inc., 1989.
50. Ebeling, J. M. & B. M. Jenkins, Trans. of the ASAE 38(3), pp. 898~902, 1985.
51. Gilchrist, J. D., Fuels, furnaces and refractories. Pergamon Press, 1977.
52. Hong, S., and Lee, N. J., Microbio. and Biotech. 3, pp. 19~23, 1993.
53. Jaiswal, D. K. & R. C. Maheswari, Indian J. Agri. Sci. 50(11), pp. 862-868, 1980.
54. Javanmardian, M. and Palsson, B. O., Biotech. Bioeng. 38, pp. 1182~1189, 1991.
55. Jeon, T. W., Non Conventional Source of Energy, IRRI., 1982.
56. Kim, N., and Pack, M. J., Microbio. and Biotech. 3, pp. 214~216, 1993.
57. Lee, Yuan-Kun and Low, Chin-Seng, Biotech. Bioeng. 40, pp. 1119~1122, 1992.
58. Matsunaga, T. etc., Appl. Biochem. Biotechnol. 28, pp. 157-167, 1991.
59. Robertson, W. S. Boiler Efficiency and Safety. Macmillan Press., 1981.
60. Shimizu, H., A. Kanno & Y. Nishiyama, JSAM 39(4), pp. 477~481, 1978.
61. Shimizu, H. & T. Kimura, JSAM 42(3), pp. 383-388, 1981.
62. Shimizu, H. & T. Kimura, JSAM 46(1), pp. 633-638, 1985.
63. Staniforth, A. R., 1979, Cereal. 1994. Engineering Research Center, R & D Report of Global Environmental Department 14.
64. Watanabe, Y. etc., Energy Convs. Mgmt. 33 L 545-561, 1992.