

산업부산물 재순환을 통한 농촌환경정비



유 찬

경상대학교 지역환경기반공학과

1. 서 론

인류는 지난 세기 눈부신 과학기술의 발전과 이를 바탕으로 한 산업혁명을 통하여 눈부신 산업발전을 이룩하여 왔다. 전기, 석유, 금속 그리고 고분자 재료의 활용을 통해 인간생활에 편의는 물론 각종 산업에서는 새로운 개념의 공정개발을 통한 안정적이면서 대량생산의 체제를 갖추게 되었으며, 이는 경제적으로 풍요로운 삶을 영위할 수 있는 기반을 제공하였다.

농업분야에서도 지난 20세기는 '녹색혁명'이라는 용어를 만들어 낼 만큼 새로운 시대였다. 농약과 비료의 사용으로 식량생산의 증대를 가져왔고, 수리체계의 확립과 농기계의 사용은 효율적이고 안정적인 식량공급에 기여할 수 있었다. 우리나라도 지난 세기 고도의 경제성장을 통하여 전 국민의 삶의 질 향상은 물론 이 과정에서 농업의 시스템 정비와 연구의 성과로서 주곡자급의 성과를 이룩하였다.

그러나 이러한 과정의 이면에는 다양한 사회적 문제를 야기하기도 하였다. 석유를 비롯한 화석연료의 사용은 지구 온난화의 주범으로 21세기 최대 환경문제를 야기하고 있으며, 이에 따른 환경오염은 인류의 지속적인 삶의 영위를 위협하는 수준에 도달하고 있다. 또한 최근 중국, 인도 그리고 브라질 등 신흥 개발국가들의 경제성장은 전세계 자연자원의 난개발을 부추기고 있으며, 이는 세계 경제의 흐름을 바꾸어 놓을 수 있는 정도로 심각한 전 지구적 문제

로 부각되고 있는 실정이다. 농업에서 과다한 농약과 비료의 사용은 토양 및 수질을 오염시키고 생태계파괴의 주범으로 인식되고 있으며, 한편으로는 인구증가에 따른 식량 부족의 문제에 직면하고 있는 것이 현실이다.

특히 산업화과정에서 필연적인 막대한 산업부산물의 발생은 대기, 수질 그리고 토양오염을 유발하고 있으며, 최근 까지도 대부분이 재활용되지 못하고 일정한 부지에 매립되고 있으며, 가까운 미래에는 이것도 부지확보 혹은 주변 환경문제 등으로 용이하지 않을 것으로 예상되고 있다.

이러한 산업부산물에 대한 적절한 대책수립이 인류의 지속적인 산업발전을 위한 전제조건이 되었으며, 21세기 산업활동에 있어서 산업부산물의 발생억제, 폐기물의 적절한 처리를 통한 재활용 그리고 에너지회수 등에 대한 연구의 필요성을 공통적으로 인식하고 있는 실정이다.

따라서 본 발표에서는 우리나라의 산업부산물 발생과 재활용 현황 등에 대해서 먼저 알아보고 기존 연구결과들을 고찰하면서 농촌환경정비에 산업부산물의 이용가능성에 대해서 알아보기로 하겠다.

2. 우리나라 폐기물관리 정책 및 발생 현황

가. 우리나라 폐기물관리 변천사(환경부 등, 2006)

우리나라의 폐기물관리법은 폐기물 문제가 심각하지 않았던 1980년 중반 이전에는 생활폐기물은 「오물청소법」,

사업장폐기물은 「환경보전법」에 의하여 이원적으로 관리되던 것이 1986년 「폐기물관리법」이 제정되면서 관리체계가 일원화된 이후에 다시 '재활용' 개념이 처음으로 도입되어 법률체계가 세분화·전문화되었다.

1991년에는 폐기물관리법을 개정하여 「일반폐기물」과 「산업폐기물」로 구분하던 폐기물의 분류체계를 국민건강에

대한 위해성의 정도를 기준으로 「일반폐기물」과 「특정폐기물」로 구분하고, 특정폐기물은 국가에서 일반폐기물은 지방자치단체에서 그 역할을 담당하는 처리책임을 부과하였다. 한편, 오수 분뇨 등은 1991년 『오수·분뇨및축산폐수의처리에관한법률』이 제정되면서 수질관리측면에서 다루어지게 되었다.

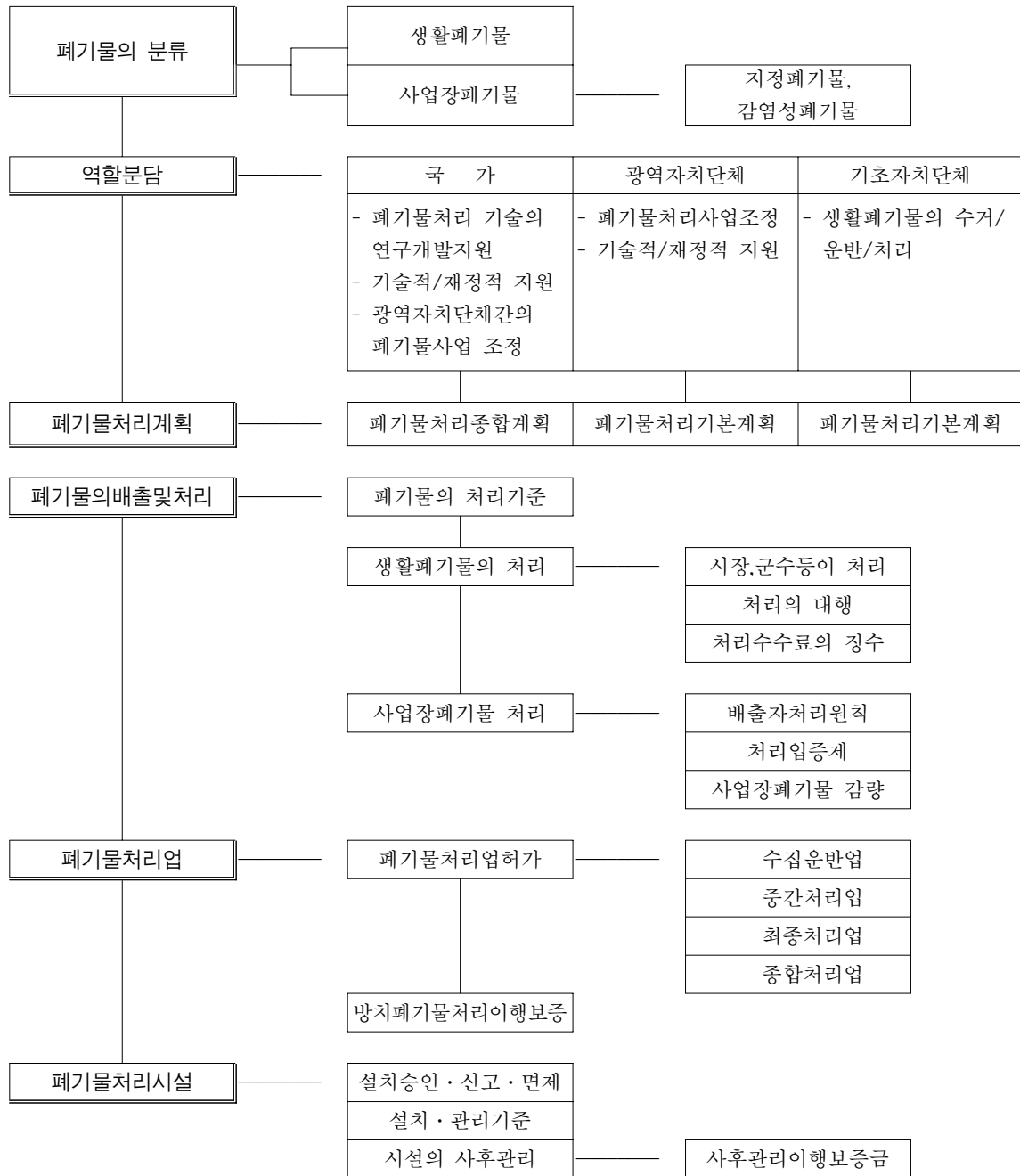


그림 1 우리나라 폐기물 관리체계

1992년 폐자원의 재활용촉진을 위해 폐기물관리법에서 『자원의절약과재활용촉진에관한법률』, 1995년에는 NIMBY 현상에 효과적으로 대처하기 위해 『폐기물처리시설설치촉진및그주변지역지원등에관한법률』, 1994년에는 우리나라가 바젤협약에 가입하면서 동 협약의 국내이행을 위해 『폐기물의국가간이동및그처리에관한법률』, 1999년에는 수도권매립지의 효율적 운영을 도모하기 위하여 『수도권매립지관리공사의설립및운영등에관한법률』을 각각 제정된 바 있었다.

이 시기는 지속가능한 발전을 위한 폐기물발생의 최소화 개념을 도입하여 1) 제품으로 인한 폐기물문제를 효과적으로 해소하기 위해 폐기물부담금 및 예치금제도가 도입되었고, 2) 1995.1부터 쓰레기종량제를 시행함으로써 폐기물 감량이 촉진되었을 뿐 아니라 재활용이 확대되었으며, 3) 폐기물관리정책이 “재활용”·“감량” 쪽으로 전환되어 가면서 생산·유통·소비의 전 과정에 걸쳐 폐기물 발생을 최소화하는 자원순환형 사회구축을 위한 기본 틀을 마련한 시기였다.

나. 우리나라 폐기물 관리체계

폐기물의 개념은 “쓰레기·연소재·오니·폐유·폐산·폐알칼리·동물의 사체 등으로서 사람의 생활이나 사업활동에 필요하지 아니하게 된 물질”(폐기물관리법 제2조제1호)이라 정의하고 있다. 이와 같은 폐기물은 당해 물건의 소유자인 배출자의 관점에서 정의되는 것으로서 배출자가 아닌 제3자에게 유용성이 있다고 하더라도 배출자가 제품의 제조과정상의 문제 또는 취급상의 부주의로 인하여 생산제품의 상품으로서 사용할 수 없게되어 저가 또는 무상으로 제3자에게 매각하고자 하는 경우에도 역시 폐기물로 분류되게 된다.

한편, 발생된 폐기물은 환경적인 위해가 최소화되도록 처리되어야 하는데, 이와 같은 “처리”는 폐기물의 소각·중화·과쇄·고형화 등에 의한 중간처리와 매립·해역배출 등에 의한 최종처리(법 제2조제5호)로 구분되고, 특히 폐기물을 재사용·재생이용하거나 재사용·재생이용할 수 있는 상태로 만드는 활동 또는 폐기물로부터 에너지를 회수하는 활동(에너지 회수기준: 저위발열량이 킬로그램당 3천 킬로칼로리 이상, 에너지 회수효율 75% 이상)을 재활용

(법 제2조제6호)이라 하여 중간처리의 한 유형으로 보고 있다.

특히 『자원의절약과재활용촉진에관한법률』은 자원의 효율적인 이용과 폐기물의 발생억제, 자원의 절약 및 재활용 촉진을 통하여 환경을 보전하고 지속적인 경제발전과 국민 복지향상에 이바지하기 위하여 제정된 법률로서 자원재활용을 촉진하기 위하여 국가차원에서 시책을 강구하고, 지방자치단체는 국가의 시책에 따라 당해 지역 안의 자원재활용을 촉진할 책무를 지도록 만든 법률이다. 이 법률에서는 전체 폐기물의 대부분을 차지하고 있는 건설폐기물과 슬래그 및 석탄재를 폐기물이 아닌 산업부산물로 별도로 지정하여 사업자가 자원재활용을 촉진하고 국가 또는 지방자치단체가 행하는 조치에 적극 협력할 수 있는 기반을 조성하였다.

다. 우리나라 폐기물의 분류(환경부, 2004)

폐기물관리법에 의한 폐기물의 분류는 발생원별 관리의 효율성을 기하고자 크게 생활폐기물과 사업장폐기물로 구분하고, 사업장폐기물은 발생특성 및 성상에 따라 다시 사업장일반폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물(감염성폐기물)로 세분되며, 종류에 따라 그 수집·운반·보관 및 처리에 관한 기준 및 방법을 달리하고 행정상의 책임과 의무에서도 많은 차이가 있는데, 환경 및 국민보건상 위해성이 높은 지정폐기물 및 감염성폐기물의 경우 다른 폐기물에 비하여 강화된 기준 및 방법을 적용받게 된다(그림 2 참조).

- 생활폐기물 : 가정에서 배출되는 폐기물로서 종량제 봉투와 재활용품인 종이, 병, 캔, 음식물류 등을 말한다.
- 사업장배출시설계폐기물 : 사업장에서 제품 제조, 시설 정비 등의 과정에서 발생하는 폐기물로서 폐고분자화합물, 분진, 슬러지 등을 말한다.
- 건설폐기물 : 주택공사, 토목공사 등의 건설공사 현장에서 발생하는 폐기물로서 폐콘크리트, 폐아스팔트 등을 말한다.

라. 폐기물의 발생 및 재활용 현황(국립환경과학원, 2006)

2006년도 국립환경과학원 발표자료(2005 전국 폐기물 발생 및 처리현황)에 따르면 2005년도 우리나라의 총 폐기물 발생량(지정폐기물 제외)은 290,389톤/일로, 전년

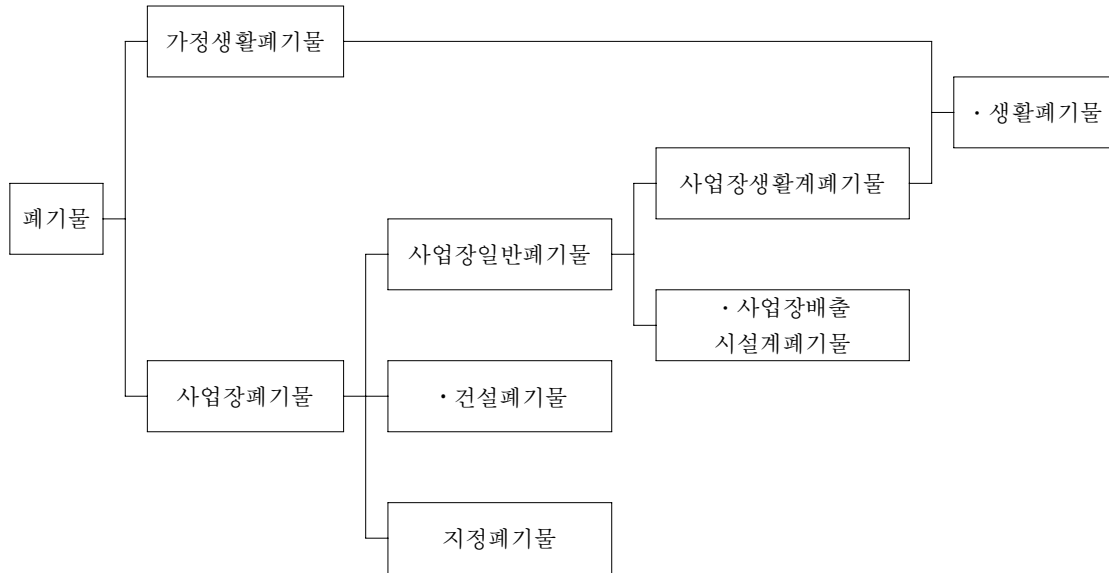


그림 2 폐기물 분류체계

도 303,514톤/일에 비하여 약 4.3% 감소하였으며(그림 3 참조), 폐기물 구성비는 생활폐기물 16.7%, 사업장배출 시설계폐기물 38.7%, 건설폐기물 44.6%로서 건설폐기물이 가장 큰 구성비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다(그림 4 참조).

폐기물의 처리방법은 재활용이 주류를 이루고 있으며, 2005년도 재활용율은 79.0%로 전년대비 3.3%포인트 증가한 것으로 나타났으며, 매립율은 11.5% 그리고 소각율은 5.5%로 전년대비 각각 18.7%, 3.7% 감소한 것으로 나타났다.

한편 폐기물 처리주체별 처리현황은 지방자치단체 처리가 11.7%, 처리업체 처리가 79.7% 및 배출자의 자가처

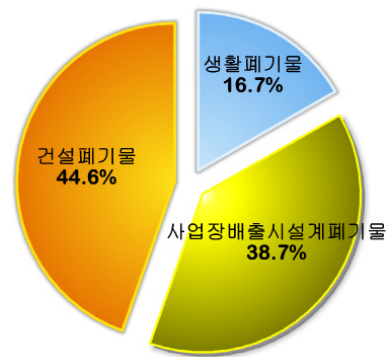


그림 4 폐기물 종류별 구성비율

리가 8.6%로 나타났다. 생활폐기물의 처리주체별 처리현황은 자치단체 61.8%, 처리업체 36.8%, 자가처리가

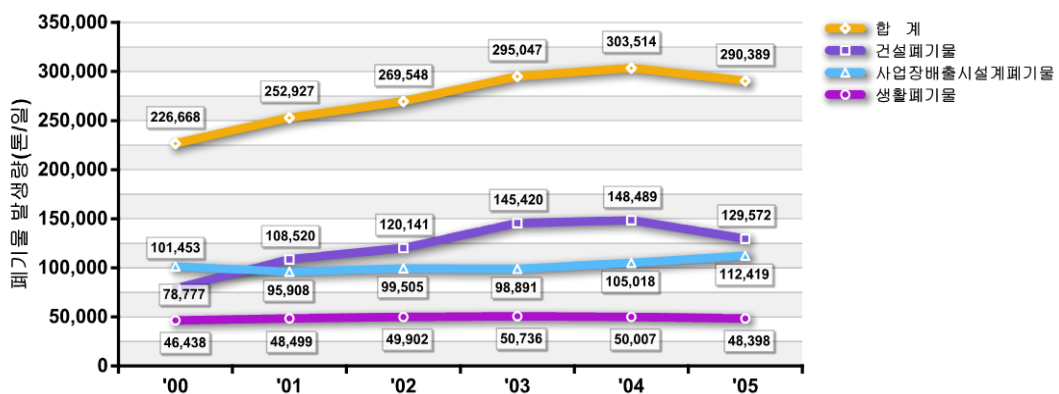


그림 3 폐기물 발생량 변화

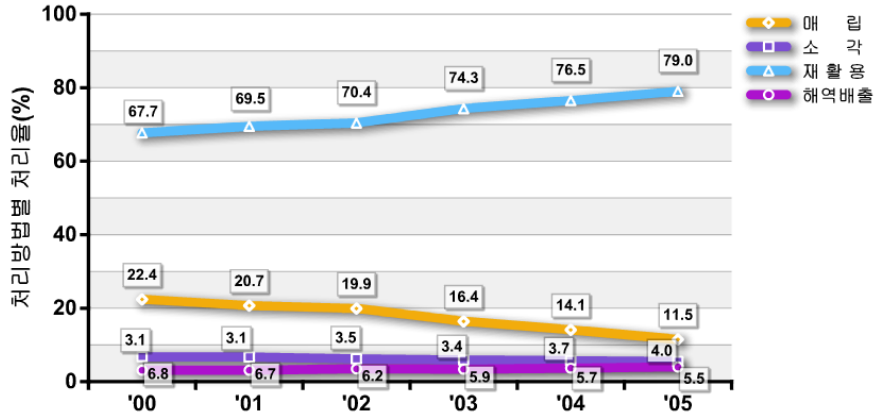


그림 5 폐기물 처리방법의 연도별 변화추이

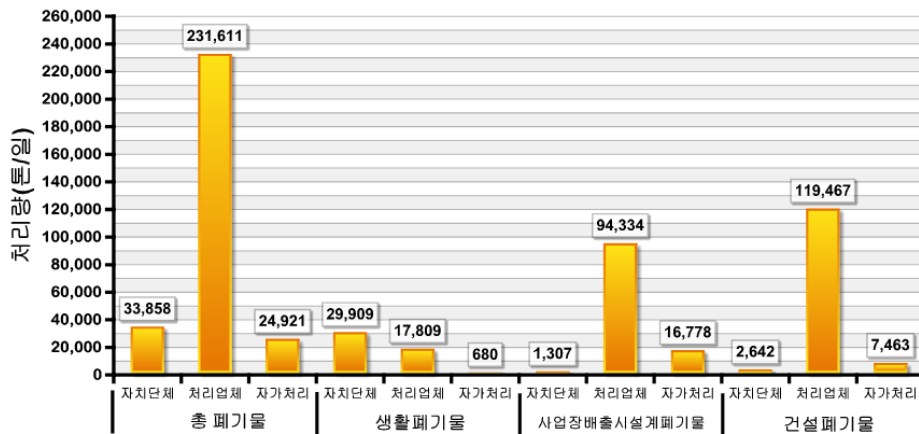


그림 6 폐기물 종류별 처리주체별 처리량

1.4%, 그리고 사업장배출시설계폐기물은 자치단체 1.2%, 처리업체 80.4%, 배출업체의 자가처리 18.4%로 나타났다. 그러나 건설폐기물은 자치단체 2.0%, 자가처리는 5.8%인 반면에 처리업체 92.2%로 처리업체에 의한 처리 비중이 매우 높게 나타났다.

3. 폐기물의 활용방안

가. 건설폐기물

2005년도 건설폐기물 발생량은 129,572톤/일이며, 전년도 148,489톤/일에 대비 12.7% 감소하였는데, 그 이유는 2005년도 건축허가현황과 주택건설실적이 전년도에 비해 각각 5.1%, 6.1% 감소하였기 때문으로 추정되고 있다. 그러나 건설폐기물의 총 폐기물 중 점유율은 44.6%로

상대적으로 높은 것으로 나타나고 있다. 또한 재활용율은 96.7%로서 다른 폐기물보다 높게 나타나고 있으나 이는 중간 처리업체에 위탁을 맡긴 경우도 포함되기 때문에 실질적인 의미의 재활용이라는 측면에서는 중간처리업체 경과이후의 재활용 정도가 중요할 수 있다.

우리나라에서 건설폐기물의 주요 재활용 분야는 성토재료였으나 외국은 도로 포장체의 기층(base course)과 보조기층(subbase)에도 많은 적용사례를 가지고 있다. 이는 건설폐기물의 큰 부분을 차지하고 있는 콘크리트를 파쇄한 골재가 자체 수경성을 가지고 있어 시간 경과에 의해서 강성이 증가되므로 기층 재료로서 유리한 특성을 가지고 있기 때문이다.

한편 과거 30여 년 동안 많은 관심을 모으면서 진행되었

던 연구 분야 중 하나는 건설폐기물을 콘크리트의 골재로 재활용하는 방안이다. 20세기 후반에 개발도상국들의 급속한 경제발전 과정에서 일부 지역에서는 콘크리트 골재의 부족을 종종 경험하였으며, 원거리로부터 골재의 운반은 공사비 증가의 요인이 되었다. 실제로 우리나라의 경우에도 1988년 하천골재가 차지하는 비율이 54.2%에서 1997년 28%로 감소되었으며, 이를 대신하기 위하여 쇄석 골재의 비율이 같은 기간 동안 26.5%에서 41.8%로 증가하는 등 양질의 천연 골재 확보에 어려움을 경험하고 있다(이상은, 1998). 그러나 그 동안의 몇몇 연구 결과들에서는 건설폐기물 재생골재를 구조물의 콘크리트 골재로 재활용하여 사용하는 경우에 몇 가지 문제점들을 확인시켜 주었다. 예를 들면 Topçu, I.B. & N.F. Günçan(1995)는 건설폐기물 재생골재를 사용하는 경우에는 일반골재를 사용하는 경우보다 단위중량이 작고, 워커빌리티가 낮아지며 흡수율이 커진다고 보고하고 있으며, 또한 28일 강도를 기준으로 했을 때, 재생골재를 사용한 경우의 공시체의 압축 강도와 탄성계수는 일반적인 경우의 80%정도밖에 이르지 못하는 것으로 보고하고 있다. 이러한 문제점들에 대해서는 70년대와 80년대를 거치면서 많은 실험들을 통하여 계속적인 해결방법을 찾고자 노력하였으며, 재생골재의 재활용을 위한 지침 등을 만들어 나갔다.

나. 철강슬래그

철강슬래그는 철강의 제조 공정에서 철의 원료인 철광석 등으로부터 철을 분리하고 남은 암석성분으로 POSCO의 경우 연간 고로슬래그 800만톤 제강 슬래그 400만톤 등 총 1,200만톤의 슬래그가 발생하고 있다.

1) 고로슬래그

고로 슬래그는 고로슬래그 철광석, 코크스, 석회석 등을 고로(용광로)에서 용융하면 약 1,500℃의 쇳물과 함께 광물성분이 용해된 용융슬래그가 발생되는데, 냉각방법에 따라 서냉, 급냉 그리고 반급냉 슬래그로 나뉘며, 그 성상도 각각 다르게 나타난다. 서냉슬래그는 도로보조기층재료, 규산질비료, 콘크리트의 골재 등으로 사용되며, 급냉슬래그의 경우에는 고로슬래그 시멘트의 원료로 주로 사용되고 있다. 고로슬래그의 활용성이 높은 콘크리트의 경우에는 고로슬래그를 시멘트의 원료나 혼화재 그리고 골재로 사용

하고 있는데 고로슬래그 분말 자체에는 보통 수경성이 없어 초기강도는 저하하지만 장기재령에서는 시멘트의 수화 생성물인 수산화 칼슘과 같은 알칼리 물질의 자극에 의한 포졸란 반응으로 강도와 내구성을 증가시키는 것으로 알려져 있다(문한영등, 1996).

고로슬래그를 골재로 사용하는 경우에는 서냉슬래그를 파쇄하여 콘크리트용 굵은골재로 사용하는 방법과 급냉슬래그를 콘크리트용 잔골재로 사용하는 두가지 방법이 있다. 특히 대기 중에서 서서히 냉각된 서냉슬래그의 경우에는 일반 쇄석골재와 마찬가지로 공학적으로 마찰각이 크고 풍화와 침식에 대한 저항성이 커서 골재로서 양호한 성질을 가지고 있다(이관호, 1997).

2) 제강슬래그

제강슬래그는 철에서 강을 만들기 위해 쇳물에 녹아있는 탄소, 규소성분 등을 제거하는 공정에서 발생되며, 고로에서 제조된 쇳물에 고압의 산소를 불어넣어 정련하는 공정에서 생성되는 전로슬래그(BOF Slag)와 고철 등을 전기로에서 정련할 때 생성되는 전기로슬래그(EAF Slag)로 크게 구별할 수 있다.

전로슬래그는 생성당시 10~50 cm 크기이지만 철분함량이 많아 이 철분을 회수하여 재사용하기 위하여 40 mm이하로 파쇄하는 공정을 거치는데 약 25%정도가 회수되어 다시 전로로 투입되고 남은 75%는 슬래그로 생산된다. 이 제강슬래그중에서 약 53%정도가 매립되고 있는 것으로 알려져 있다(구성은등, 2000).

제강슬래그의 경우에는 유리석회(free CaO)에 의한 팽창붕괴성이 있어 콘크리트 골재등 고부가가치 건설재료로 활용되지 못하고 대부분이 도로의 보조기층재, 성토 및 복토 등 매립용으로 사용되고 있는 실정이다. 따라서 건설재료로서 슬래그의 적용범위를 확장하기 위해서는 안정화(aging)처리에 의해 팽창성 물질을 제거한 후 사용하는 방법이 필요하다.

유리석회란 선철, 고철과 같은 제강원료를 정련하는 과정에서 부원료로 사용되는 생석회가 충분히 슬래그화 되지 않으면 불안정한 상태로 전로슬래그 내부에 잔존하게 되는 성분을 말한다. 전로슬래그 중 유리석회 성분은 보통 연회색으로서 육안으로 식별이 가능하며 반응성이 높기 때문에 대기중의 수분 등과 접촉하면 수산화칼슘이 생성되며 체적

이 2배정도 증가하여 팽창과 붕괴를 반복한 후 최종적으로 안정화 된다. 그러나 전로슬래그에 함유된 유리석회 전부가 반응하지는 않으며, 안정화 후에도 일부 유리석회 성분이 남아 있으며, 이때의 유리석회 성분의 존재상태에 따라서 재활용후 슬래그의 팽창정도가 다르게 나타날 수 있다. 따라서 제강슬래그를 건설/토목 목적으로 고부가가치를 가지는 재료로 재활용되기 위해서는 안정화(aging)을 시켜 주어야 한다.

다. 석탄회

석탄재는 석탄발전소에서 석탄을 미분기로 분(2000 Mesh 체 70~80%통과)하여 뜨거운 공기기류와 함께 고속으로 연소로내로 주입되어 석탄에 함유된 대부분의 광물 질의 용융점인 1,500±200℃ 온도 범위에서 부유상태로 순간적으로 연소된다. 국내탄(무연탄)의 경우는 30~50%, 석탄(유연탄)은 10~15% 정도의 회분을 함유하고 있어 이것이 보일러 내에서 연소 후 석탄회가 되며, 석탄회는 연소온도, 탄중, 분쇄도, 체류시간에 따라 여러 가지 물리적·화학적 성질이 변화된다. 미세한 분말상태인 미분탄은 연소되어 배연가스와 함께 보일러에서 배출되어 집진기 하부에서 포집되는데 이 회를 비회(Fly Ash, 75~90%)라 하고, 보일러 하부로 낙하되는 괴상 또는 입자가 큰 회를 저회(Bottom Ash, 10~25%)라 한다. 저회(B/A)는 분쇄기로 분쇄하여 비회(F/A)와 같이 혼합되어 해수에 의해 회 처리장으로 이송 후 매립된다.

석탄회는 집진위치 뿐만 아니라 사용 석탄의 품질에 따라서도 차이가 있다. 준 역청탄 또는 갈탄을 태워서 생성된 비회를 등급 C 비회라고 하며, 이는 자체적으로 석회나 다른 성분들로 인해서 강도증진 효과를 가지고 있으며, 점착력이 크다. 역청탄 무연탄에서 발생되는 비회는 등급 F비회로서 이는 포조란 성질은 가지고 있지만 자체적으로 강도증진 효과는 약하며, 점착력도 거의 없다.

비회 중의 가용성 SiO₂는 시멘트 수화시 생성 되는 수산화칼슘과 상온에서 서서히 화합하여 불용성의 안정된 규산칼슘을 생성시켜 장기적으로 콘크리트의 강도를 증진시킨다. 그리고 비회 사용 시 초기강도는 떨어지나 28일 이후부터 강도는 계속 증가 하여 교량건설에 적합하다. 입자가 구형인 비회는 Ball-Bearing과 같은 작용에 따른 유동성

개선으로 펌프성, 표면처리 등을 좋게 한다

시멘트에 비회를 혼화하면 콘크리트의 수화열이 감소하여 온도상승은 대체율이 증가한 만큼 감소하기 때문에 댐 공사 등에 적합하다. 어떤 종류의 골재가 시멘트와 알칼리분이 장기간 반응하고 콘크리트가 팽창하여 균열이 생겨 붕괴되는 알칼리 골재반응은 비회를 사용함으로써 알칼리 골재반응이 억제된다. 비회를 혼합한 콘크리트 몰탈의 건조수축율은 시멘트량과 물-시멘트비에 의해 좌우되지만 비회의 대체율이 증가한 만큼 시멘트량이 감소되고 수축율이 적어져 균열현상이 일어나지 않는 견고한 구조물이 된다. 시멘트중의 유리석회와 비회의 규산과 알루미늄이 결합하여 불용성의 견고한 물질을 만들어 콘크리트의 조직을 치밀하게 하기 때문에 수밀성이 증가되고 시간이 경과할수록 현저한 효과를 발휘 하므로 지중 공사에 유효하게 사용한다. 석탄회 사용으로 위 사항의 장점등을 활용할 수 있으며, 부수적으로 원재료비 절감에 따른 원가부담을 해소한다.

한편 상대적으로 활용도가 매우 낮은 저탄회의 경우에는 최근에 그 활용법을 활발하게 모색하고 있다.

라. 굴패각

굴 패각은 방해석 구조로 된 고순도 탄산칼슘(CaCO₃) 생체 광물로서 주성분과 광물상이 천연 석회석과 동일하며, 조직이 다공성으로 분쇄가 용이하고 채광의 부담이 적은 장점을 가지고 있다. 하지만 굴 패각을 건설재료로 사용하기 위해서는 염분제거, 생석회나 소석회의 생성을 위한 전처리 단계 그리고 분쇄단계 등 몇 가지 필요한 공정을 거쳐야 비로소 활용이 가능하며, 굴양식장이 넓게 분포하고 있어 패각을 한곳에 집중적으로 모아서 활용하기 위해서는 운반 및 보관에 대한 기본검토 이루어져야 한다는 단점이 있다.

기존 연구들에 의하면 굴패각의 성분은 산지별로 큰 차이가 없으며, 패각의 부위별로도 차이가 없었으며, CaCO₃의 함량이 최고 97.6%에서 최저 95.9%로서 다른 광물들에 비해서 매우 양호한 원재료 조건을 가지고 있는 것으로 나타났다.

마. 인산석고

인산석고는 인산비료산업의 부산물로서 인광석(phos-

phate rock)에서 인산(phosphoric acid)을 추출하는 과정에서 발생되고 있다. 인광석은 미국의 플로리다를 비롯하여 인도, 남아프리카공화국 등 세계 각지에 분포하고 있으며, 주로 이 지역들 주변에서 발생하고 있다. 인산석고의 주요 구성성분은 인광석의 조성과 생산공정에 따라서 다양할 수 있는데, 일반적으로 주요성분이 CaO 37.17%, SiO₂ 2.59%로 전체 약 39.76%로 나타났으며, 전체 함량의 53.32%는 황산염(sulfate, SO₄)로 나타났다. 석영과 정장석(orthoclase), 사장석(plagioclase) 그리고 운모(mica) 광물들이 존재하고, 대부분 이수석고로 이루어져 있다.

4. 친환경 농촌정비에서 산업부산물의 활용 방안

농촌지역은 그 동안 대표적인 토양오염의 피해 지역이었다. 이는 농촌지역이 먹거리 생산의 주요 기반이고, 각종 생태자원의 근원이기 때문에 실질적으로 그 피해상황이 현저하게 나타나고 또 그 만큼 국민의 관심을 많이 받는 특징을 가지고 있기 때문일 것이다.

농촌지역에서 발생하는 환경오염의 원인은 일부 영농활동에서 발생하는 경우도 있지만, 대부분은 국가차원의 산업활동 또는 도시지역의 발전과정에서 기인하는 경우에 그 원인을 찾을 수 있다. 그 예로서 각종 산업시설에서 배출되는 폐수/매연/폐기물 등, 쓰레기 매립장 주변, 휴폐광산 주변지역에서의 토양 및 수질오염 등이다. 또한 우리나라는 자연재해가 주로 건조기에 발생하는 산불과 우기철의 홍수로 대별될 수 있는데, 그 피해지역 또한 대부분 농촌지역에 집중되고 있다.

이러한 농촌지역의 환경오염은 그 복원이 시급하지만, 그 대상매체와 범위가 넓기 때문에 대책방안 마련이 용이하지 않는데 그 문제점이 있다. 예를 들면 산불 피해지역, 휴폐광산에 의한 피해지역 등은 그 범위가 넓어 그 복원을 위해서는 막대한 경제적 부담과 장기간의 시간이 소요될 것으로 예상되고 있다.

그런데 앞서 살펴본 산업부산물들의 특성들을 이러한 지역들에서 활용한다면 경제적 부담을 줄여주면서 산업부산물의 재활용을 촉진시킬 수 있으며, 이는 국가 전체의 자원순환적인 측면에서도 매우 획기적인 전기를 마련할 수 있는 기회가 될 것으로 예상된다.

따라서 여기서는 이와 관련된 몇 가지에 사례에 대해서만 정리하여 논의해 보고자 한다.

가. 석탄재 (USDA-ARS)

앞서 언급한 사업장 폐기물 중 철강슬래그와 석탄재가 재활용촉진을 위한 다양한 방안을 모색 중에 있다. 특히 석탄재는 국내 10개 화력발전소에서 연간 약 600만톤이 발생하며, 이중 약 350만톤(58%)은 시멘트 대체제로 사용하고 나머지 약 250만톤(42%)은 인근 매립장에 매립 처리되고 있다. 특히 석탄재 중 바닥재(bottom ash)는 활용하기 어려워 전량 매립장에 매립 처리되고 있는 실정이다. 따라서 일부 발전소에서는 매립장 용량이 한계에 부딪혀 최악의 경우 전기 생산을 중단할 수밖에 없는 위기에 처할 수도 있는 상황에 직면해 있다.

그런데 석탄재는 석탄의 종류와 원료 그리고 연소시설의 특성 등에 따라 달라질 수 있지만, 주요 화학적 구성성분들이 Al, Ca, Fe, Mg, K, Si, Na 그리고 Ti 등 8가지 성분들이 전체의 95%정도를 차지하고 이중 5가지는 식물생장에 중요한 영양분들이다.

물론 석탄재 중 비회에는 미량원소(trace element)로 다량의 As, Cu 그리고 Se가 함유되어 있어 환경적인 문제를 유발할 위험성이 있다. 그러나 저회 경우에는 연소과정에서 대부분 휘발되어 그 양이 적기 때문에 식물생육에 활용성은 매우 높은 것으로 예상된다.

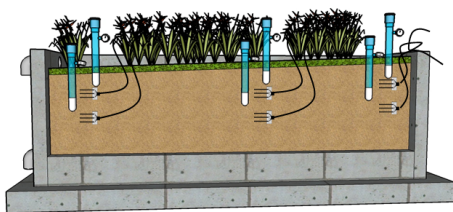
저회 경우에는 용해성 염분이나 붕소의 함유량이 높다는 문제 등이 지적되고 있는데, 이는 종자의 발아와 식물의 정착에 문제점을 유발할 수 있기 때문이다. 이러한 문제점은 부산물을 표면에 살포한 뒤에 자연현상으로 그 농도를 저하시킨 후 경운을 통해서 부산물을 종자를 심는 층보다는 아래에 놓이도록 하여 가급적이면 부산물과 초기 종자의 접촉을 최소화하거나 일정기간이상 야적장에 방치되어 그 농도가 저하된 재료를 사용하는 방법 등으로 문제를 해결할 수 있다. 현재 우리나라는 대부분 오랜 기간 동안 방치되었던 재료들이 많기 때문에 이 방안은 현실적인 것들이 될 것이다. 실제 외국의 경우에는 발생되지 얼마되지 않은 경우에는 86 ton/ha만 사용하여도 문제가 발생하였지만 일정기간 이상 방치되었던 석탄재를 사용한 경우에는 131 ton/ha를 사용해도 문제가 없었던 것으로 보고된 바

있다(Martens & Beahm, 1976).

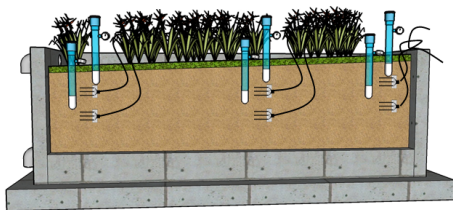
또한 과수원 고랑에 112 ton/ha의 석탄재를 사용 후 4년간 잡초의 생장을 억제하였으며, 6년 동안 과수의 생산은 재배품종 중 3/4이 수확량이 증가한 것으로 나타났다. 또 다른 사례에서는 원예산업 분야에서 토양 표면에 5 cm 정도 석탄재를 포설하여 배지로서 활용한 사례가 있는데, 재배용 토양의 확보에 여유가 생기고 표면에만 포설함으로써 높은 염분농도에 의한 피해를 줄일 수 있었다. 또한 표면이 입단화되면서 수분의 공급이 원활하고 반대로 증발산을 조절해 주는 역할을 수행해 줄 수도 있다.

따라서 석탄재는 식물의 성장과 관련해서 화학적으로는 식물에 필수 영양소의 공급해 줄 수 있고 식물생장에 적절한 매개체로서 토양의 물리성을 개선하여 토양의 입단화와 물의 침투력을 개선시킬 수 있다. 이러한 특성은 석탄 부산물을 보조적인 영양공급원으로 사용한다면 위해성을 줄이면서 그 효과를 크게 할 수 있을 것이다.

실제로 이러한 특성을 이용하여 석탄재를 이용한 오염지역 표층 복토재 개발에 관한 연구수행결과에서는 석탄회 혼합토가 식생기반 조성에 탁월한 효과가 있는 것으로 확인된 바 있다. 그림 7은 일반토사에 석탄재를 혼합(35%)한 경우에 식물생장에 미치는 영향을 야외에서 실험한 사례이다. 실험에서는 국내 자생종 식물 4종류를 대상으로 일반 토양과 일반토양에 석탄재(저회)를 35%혼합한 경우



(a) 일반 토사



(b) 일반토사(65%) + 석탄재(35%)

그림 7 석탄재 혼합이 식생조성에 미치는 영향평가 실험

표 1 산업부산물 혼합토의 주요 시기별 피복식물의 수량특성

축분퇴비 처리량 (톤/ha)	복토지 충진재료	식물체 총 생체중 (톤/ha)			
		2007/8/2	8/25	9/10	10/17
40	토양	7.3	13.6	35.3	83.3
	토양+석탄회	7.8	18.7	23.9	91.7

에 대해서 축분퇴비를 이용하여 비료조건을 맞춰 준 후 그 결과를 2007년 7월부터 2007년 10월까지 비교하였는데, 표 1과 같이 석탄재를 혼합한 경우에서 결과가 양호한 것으로 나타났다(환경부, 2008).

나. 철강 슬래그

앞서 언급한 바와 같이 철강슬래그는 크게 고로 슬래그와 제강 슬래그로 나눌 수 있는데, 슬래그류 부산물은 이미 오래전부터 토목공사에서 널리 재활용되어 왔다. 그러나 제강슬래그의 경우에는 그 재활용 정도가 낮았는데, 최근에는 이 제강슬래그가 환경과 관련되어 몇 가지 새로운 활용 가능성을 보여주고 있다.

제강슬래그의 주요성분은 Ca, Fe, Si, Mg 그리고 Mn 이 각각 29%, 21%, 5%, 5% 그리고 3%로 알려져 있으며 미량이지만 인산도 0.5% 그리고 free lime형태의 CaO가 약 7%정도 함유되어 있다. 따라서 제강슬래그는 토양 pH의 개량제나 Ca의 공급원으로 이용될 수 있는 가능성이 높으며 Mg 결핍 토양의 개량제로 이용 가능성이 높다.

외국에서는 이러한 특성에 착안하여 제강슬래그를 Ca 공급원, 즉 토양개량제로서 강산성 산림에 사용하였을 경우에 pH 증가, 수용성 Al의 감소를 확인하였고 적정 제강슬래그의 사용 수준은 3,000~5,000 kg/ha인 것으로 알려져 있다. 과수원 나무 1개체당 315 g의 제강슬래그를 사용한 2년 후 성장량이 32%증가 되었으며, Corsican 소나무에 제강슬래그를 사용했을 때 수목 성장량과 생존율이 증가되었다는 보고도 있다. 특히 제강슬래그, 석회석 그리고 돌로마이트(dolomite)의 비교실험에서 제강슬래그가 다른 토양개량제와 유사한 효과를 나타내었으며, 제강슬래그의 사용이 식물체의 Ca, Mg, P함량의 증가와 K, Mn 함량의 감소를 가져와 결과적으로 목초생산이 증가한 것으로 나타났다. 한편 pH 4.8인 토양에서 제강슬래그의 사용

은 석회질비료의 시용보다 pH 증가효과는 적었으나 유체 재배의 경우 식양토에서는 석회질비료와 비슷한 수량증대를 얻었으며 미사질토양에서는 유의하게 높은 수량을 얻었으며, pH 6.4의 토양에서 sweet papper의 수량증대에 기여하고 제강슬래그의 적정 시용량은 3780 kg/ha인 것으로 보고된 경우도 있다. 또한 제강슬래그가 벼의 영양생장에 적합하다는 보고도 있었다.

실제 국내에서는 임준택등(1999, 2000a, 2000b)이 제강슬래그를 논과 밭의 토양개량제로 시비한 후 1년경과 후 제강슬래그 4~8 ton/ha가 시용된 경우와 비교구(control)로 시용된 석회 2 ton/ha가 시용된 포장에서 비슷한 경향을 나타내었으며, 특히 생육후기에 제강슬래그 시용 포장에서 식물의 생장이 석회가 시용된 포장보다도 우수한 것으로 나타났다. 또한 논외의 경우에는 1년 후에도 그 효과가 지속되고 있다는 사실을 보고하였다.

묘포와 소나무림을 대상으로 한 박인협등(2001) 등의 제강슬래그의 토양개량성능 실험에서도 시용효과는 수종 간 적정 pH범위에 따라 다르게 나타났지만 산성도가 심한 토양에 대해서 큰 효과가 기대된다고 하였다.

한편 제강슬래그의 경우에는 수질처리에도 높은 효과를 나타내는 것으로 보이는데, 국내의 하수처리장에서 최종부산물로 발생하는 하수슬러지 케익은 높은 유기물함량과 함수비 때문에 매립작업에 많은 어려움이 있는데, 김응호등(1999)은 하수슬러지 중량에 제강슬래그 20~40%와 생석회 5~10%를 적정비율로 혼합하여 3~7일간 양생시킨 경우 강도발현이 양호하였고 용출실험에서도 문제가 없는 것으로 보고하고 있다.

또한 최근에 생석회(CaO)나 소석회(Ca(OH)₂)가 바다의 적조방지제 혹은 하천의 녹조방지를 위한 재료로 연구되고 있는데, 제강슬래그의 경우에도 실제로 하천에 생물학 처리시스템을 운용한 결과 폐수가 유입되는 조건에서도 용존산소량(DO)이 35% 증가하고 부영양화의 원인인 인(P)의 제거율도 탁월하였으며, 금속의 부식억제 효과도 확인되었다.

반폐쇄적 오염수역이나 양식장내 퇴적층과 같은 해저 퇴적물을 효율적, 경제적으로 정화하기 위해 제강슬래그를 복토재로 활용하는 방안에 대해서 연구도 있었는데, 박기영등(2001)은 해역의 부영양화가 오염퇴적물에서 대량의

황화수소와 인산염 등이 용출되어 발생한다는 사실에서 퇴적층 상부에 슬래그를 복토한 후 양식한 굴의 생장이 비복토한 경우보다는 양호해 졌다는 사실을 밝혀냈다. 어류의 경우에도 Iitaka(1973)의 연구결과에 따르면, 약 8~9% 슬래그 투입 수조에서 어류의 생장이 잘 되었고 어란과 치어의 성장과 생존율도 좋은 것으로 나타났다(진평등, 2001).

또한 제강슬래그는 pH상승과 침전유발물질을 함유하고 있으며, 그 결정구조가 다공성이기 때문에 표면흡착으로 토양내 오염물질의 제거효율이 높을 것으로 기대된다.

실제로 김동민등(1980)은 Column실험을 통하여 폐수에서 pH=7인 조건에서 일반모래가 10%정도의 효율을 보인 반면 슬래그는 70%정도의 제거효율을 보여 매우 우수한 것으로 나타났다. 또한 비소오염토양에 대해서 평가

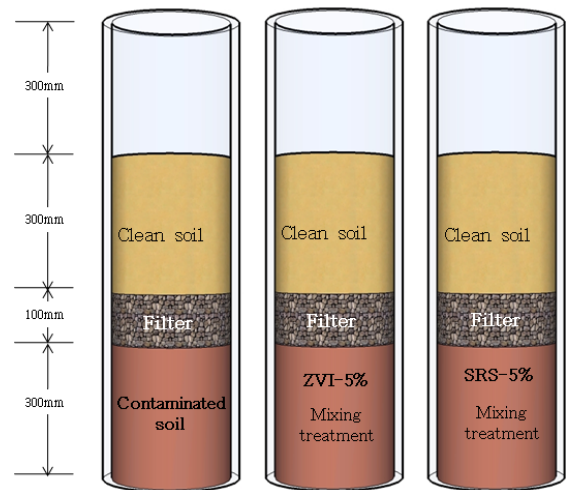


그림 8 영가철과 제강슬래그 처리 비소오염토양의 컬럼 실험

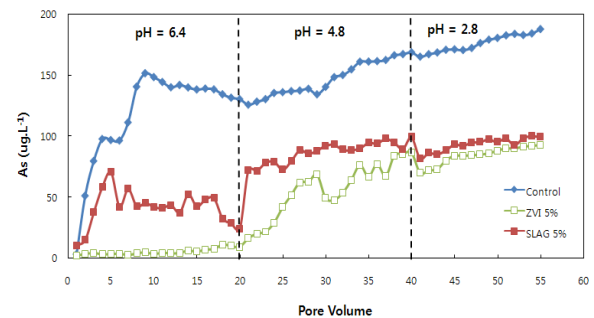


그림 9 제강슬래그에 의한 비소오염 처리사례

철과 제강슬래그를 처리한 후 용출저감 특성을 알아보기 위한 그림 8과 같은 column실험 결과에서는 그림 9와 같이 용출수내 포함된 비소의 함량이 규정값 이하로 저감된다는 사실도 확인된 바 있다.

다. 굴폐각

앞서 언급한 바와 같이 우리나라 굴폐각은 남해안을 중심으로 집중적으로 발생되고 있으나, 아직까지 굴폐각의 수집이나 운반, 야적을 위한 체계적인 제도의 미비로 실용화를 위해서는 이의 선결이 요구되는 실정이다. 그러나 굴폐각의 재활용 방안을 위한 연구는 최근에 들어서 매우 활발한데, 토양개량제, 수질처리 등에서 그 가능성을 인정받고 있다. 특히 수질처리의 경우에는 하천과 호소 등의 부영양화의 원인인 인(P)의 저감에 좋은 효과를 보여주는 것으로 나타나고 있는데, 그림 10과 같은 굴폐각 입자를 이용한 농업용 배수로 내 인저감장치(완충대) 실험결과에서는 평균 15%이상의 인제거 효율을 나타내서 연속적으로 복수개의 저감장치를 설치할 경우에는 높은 효율을 기대할 수 있을 것으로 기대 되었다.

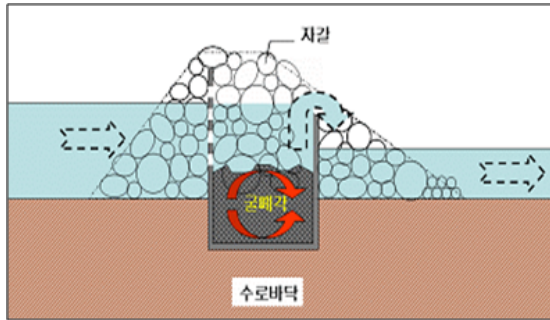


그림 10 농업용 배수로 내 인저감장치(완충대)

표 2 2연속 저감장치 내 인제거 효율

Time (days)	PO ₄ ³⁻ -P (mg · L ⁻¹)				
	Input	1 st Buffer zone	Reduction (%)	2 nd Buffer zone	Reduction (%)
1	0.235	0.229	2.55	0.212	9.79
2	0.226	0.202	10.84	0.191	15.49
7	0.359	0.332	7.39	0.304	15.20
14	0.334	0.300	10.17	0.278	14.97
28	0.274	0.222	18.97	0.113	58.76

5. 맺음말

그동안 우리 주변의 산업부산물들은 ‘폐기물’로서 각종 오염의 원인이고 인간의 삶에서 접근을 꺼려하는 ‘남비현상’의 대상으로서 거부감을 가지고 있었다. 그러나 전 지구적인 차원의 물질순환 측면을 고려했을 때에는 이러한 부산물들은 항상 우리 곁에서 적치되어 있어야 하고 지속적으로 우리에게 영향을 미치는 운명적인 현실을 외면하고 지낼 수만은 없는 것도 우리의 현실이다.

따라서 이제부터라도 또 다른 관점에서 산업부산물의 활용에 관심을 더 가져야할 시기가 되었으며, 이상의 내용에서 언급한 바와 같이 우리 주변에서 필요로 하는 곳에서는 또 다른 형태의 자원으로써 재활용될 수 있다는 사실에 주목할 필요가 있다.

특히 농촌환경정비 사업과 관련되어서는 파괴된 자연환경과 생태계의 복원, 생산기반의 친환경적정비사업 등에서 경제적이면서 높은 효율을 기대할 수 있는 자원으로써 적극적인 활용방안에 대한 연구도 더욱 활성화되어야 할 것이며, 나아가서 이러한 자원을 이용한 고부가가치 환경산업을 농촌지역에서 선도하여 미래 환경산업에서 주도적인 위치를 선점하는 것도 매우 중요한 사안으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 구성은, 황경진, 김동수(2000), 제강슬래그 처리 및 재활용의 최적화를 위한 분쇄 특성에 관한 연구, 한국환경공학회지, 제 22권 6호, pp. 1139~1148
2. 김응호, 조진규, 조태룡(1999), 제강전로슬래그로 고화처리된 하수소화슬래지의 일일/중간복토재로의 활용을 위한 토질공학적 특성, 한국물환경학회지, 15권 2호, pp. 277~282
3. 김동민, 안승구, 박종웅(1980), 슬래그 노재에 의한 폐수로 부터의 카드뮴 제거에 관한 타당성 연구, 대한환경공학회지, 제 2권 1호, pp. 27~35
4. 문한영, 최연왕(1996), 고로슬래그 분말을 혼화재로 사용한 고강도콘크리트의 강도 특성에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제I-4호, pp. 463~472
5. 박기영, 박현우, 박광석, 전희동, 정시현(2001), 해양 저질 환경 개선을 위한 제강슬래그의 복토제 활용 연구(II), 춘계 수산관련학회 공동학술대회 발표 요지집, pp. 348~349
6. 박인협, 서영권, 임준택, 이충일(2001), 제강슬래그의 시용

- 이 묘포 및 소나무림의 토양과 식물생장에 미치는 영향, 한국임학회지, 제 90권 6호, pp. 699~706
7. 이관호(1997), 슬래그를 이용한 아스팔트 공시체의 마찰다짐특성, 대한 토목학회 학술발표대회 논문집, pp. 25~28
 8. 이상은(1998), 건설폐기물을 이용한 건설자재 개발의 활성화, 토목, 제46권, 제12호, pp. 2~3
 9. 임준택, 이 인, 박인진, 이충일, 현규환, 권병선, 김학진(2000a), 논토양 벼 재배에서 제강슬래그의 토양개량제로서의 사용효과, 韓土肥志, 제 33권 3호, pp. 205~211
 10. 임준택, 이 인, 박인진, 이충일, 현규환, 권병선, 김학진(2000b), 발토양 콩 재배에서 제강슬래그의 토양개량제로서의 사용효과, 韓土肥志, 제 33권 6호, pp. 493~497
 11. 임준택, 이 인, 박인진, 이충일, 현규환, 권병선, 김학진(1999), 논토양 벼재배에서 제강슬래그의 토양개량제로서의 사용효과, 韓土肥志, 제 32권 3호, pp. 295~303
 12. 진 평, 김경선, 이정아, 김진미, 신윤경(2001), 수중 수산생물의 생존에 미치는 복합슬래그의 영향, 한국수산학회 2001년 추계 수산관련학회 공동학술대회 발표요지집, pp. 321~322
 13. 광해방지사업단, 2007, 둔전, 추동, 옥계광산 토양오염 복원정밀조사 용역
 14. 국립환경과학원, 2006, 2005 폐기물통계조사
 15. 농촌진흥청, 2007, 농경지로부터 염류유출 저감기술 및 유출염류의 효율적 처리방안 연구
 16. 환경부, 2004, 폐기물관리법 해설
 17. 환경부, 한국환경자원공사, 2006, 2005년도 건설폐기물 재활용통계조사보고서
 18. 환경부, 2008, 매립지의 복합형 최종복토시스템의 단점 보완을 위한 단층형 복토시스템의 개발
 19. Martens, D.C. & B.R. Beahm. 1976. Growth of plants in fly ash amended soils, In J.H. Faber, A.W. Babcock, & J.D. Spencer, eds., Proceedings of the 4th International Ash Utilization Symposium, St. Louis, Mo, MERC SP-76/4, pp. 657~664.
 20. Topçu, I.B. & N.F. Günçan(1995), Using waste concrete as aggregate, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1385~1390
 21. USDA-ARS, Agricultural Uses of Municipal, Animal, and Industrial Byproducts