

산업부산물을 콘크리트 포장에 사용하기 위한 기본계획 수립 연구

Planning Study for using Byproduct Materials in Concrete Pavement

안지환*, 권수안**, 김연복***

An, Ji-Hwan · Kwon, Soo-Ahn · Kim, Yeon-Bok

1. 개요

급속한 산업화와 경제발전과 더불어 소비와 생산형태의 변화로 인해 폐기물의 발생량이 꾸준히 증가하고 있다. 20세기에 도시에서 발생하는 폐기물에 대한 관리의 필요성이 대두된 이유는 쓰레기에서 발생된 세균으로 야기되는 전염성 질병 방지 등의 공중위생을 위해서였으며, 이의 해결책으로 일본에서는 1960년대 초에 소각시설이 장려되기도 하였다. 그러나, 1970년대 세계적으로 발생한 에너지 위기로 새로운 에너지원과 자원으로 폐기물을 재활용하기 시작했다.

국내에서 폐기물 재활용은 ‘폐기물관리법’과 1993년도에 제정한 ‘자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률’에 기반을 두고 있으며, 현재까지 건설폐자재를 비롯한 대규모로 발생하는 폐자재를 중심으로 재활용 활성화를 위한 법률적 기반을 정비하고, 각종 기준을 제정 중에 있다.

또한 우리나라는 2002년 11월 교토의정서 비준을 하였으며 2005년 2월16일 공식발효가 되었다. 우리나라는 아직 교토의정서에 따르는 법적 의무는 부담하고 있지 않으나 OECD 회원국으로서 멕시코와 더불어 온실가스 감축 압력을 받고 있다. 우리나라는 2차 의무 감축 대상국이 될 가능성이 높으며, 이에 따라 2013~2017년까지 온실가스를 감축해야 할 것이다.

우리나라는 경제규모에 비해 온실가스 배출량이 엄청나게 많다. 즉 “에너지 다소비형 산업구조”로 되어 있어서 에너지 소비증가율 및 CO₂ 배출증가율이 선진국과 비교하여 매우 높은 수준이다.

2000년 기준 CO₂배출량은 세계9위(433.5백만 CO₂ 톤)에 달하며, 1990년-1997년 온실가스 배출량은 1.7배 증가하고, 1인당 온실가스 배출량도 동일 기간 중 1.8배 증가하였다. 이는 철강, 석유화학산업, 시멘트 등 에너지 다소비업종의 비중 증가에 따른 것이다.

본 연구는 폐자재의 재활용에 따른 매립지난 해결과 환경보전 및 팔재 등의 자원 확보를 위해 산업부산물을 이용한 콘크리트 도로 포장 적용에 대한 연구를 수행하고자 한다.

2. 산업부산물의 선정

2.1 재활용 가능한 산업부산물

FHWA에서 발간한 “User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction” 자료를 보면 포장에 적용 가능한 폐기물 또는 부산물에 대해 제안을 하고 있다. 여기에서는 크게 6개의 도로시공분야에 대해서 언급을 하였으며, 19가지 폐기물 및 부산물에 대하여 적용 가능한 포장 시공분야에 대해 언

* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 · 연구원 · 031-910-0541 · jenix@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 · 수석연구원 · 공학박사 · 031-910-0174 · sakwon@kict.re.kr

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 · 연구위원 · 공학박사 · 031-910-0310 · ybkim@kict.re.kr



급을 하였다.

표 1은 도로포장에 적용과 재료사용에 대하여 설명하고 있다.

표 2는 시공분야별 적용 가능한 재료에 대하여 언급하였다.

표 1. 포장에 적용 및 재료 사용

| 적 용 | 재 료 |
|-----------|--|
| 아스팔트 포장 | 골재(Aggregate), 아스팔트(Hot Mix Asphalt), 상온아스팔트(Cold Mix Asphalt), 실코팅 또는 표면처리(Seal coat or Surface Treatment) 개질 아스팔트(Asphalt Cement Modifier), 채움재(Mineral Filler) |
| 콘크리트 포장 | 골재(Aggregate), SCM(Supplementary Cementitious Materials) |
| 기층 | - |
| 제방 또는 채움 | - |
| 안정처리 기층 | 골재(Aggregate), 시멘트 재료(Cementitious Materials), 포졸란(Pozzolan) 포졸란 활성화재료(Pozzolan Activator), 경화 재료(Self-Cementing Material) |
| 유동성 있는 채움 | 골재(Aggregate), 경화재료(Cementitious Materials), 포졸란(Pozzolan) 포졸란 활성화재료(Pozzolan Activator), 자체 경화재료(Self-Cementing Material) |

표 2. 도로포장에 적용 가능한 재료

| 적용분야 | 재 료 |
|--|--|
| 아스팔트 포장의 골재 (Hot Mix Asphalt) | 고로슬래그, 바텀애쉬, 석탄 보일러 슬래그 주물사, 폐기물 처리용 미네랄, 도시폐기물 조각재, 비철 슬래그 재생 아스팔트, 지붕 재료 조각, 타이어 조각, 제강 슬래그, 폐유리 |
| 상온 아스팔트 포장의 골재 (Cold Mix Asphalt) | 바텀애쉬, 재생 아스팔트 |
| 실 코팅 또는 표면처리 | 고로슬래그, 석탄 보일러 슬래그, 제강 슬래그 |
| 아스팔트 채움재 | Baghouse Dust, 슬러지, 시멘트 킬른 재, 석회 킬른 재 플라이 애쉬 |
| 개질 아스팔트 | 지붕 재료 조각, 타이어 조각 |
| 콘크리트 포장용 골재 | 재생 콘크리트 |
| 콘크리트 포장 (Supplementary Cementitious Materials) | 플라이 애쉬, 고로슬래그 |
| 기층 | 고로슬래그, 석탄 보일러 슬래그, 폐기물 처리용 미네랄 도시폐기물 조각재, 비철 슬래그, 재생 아스팔트 재생 콘크리트, 제강 슬래그, 폐유리 |
| 제방 또는 채움 | 플라이 애쉬, 폐기물 처리용 미네랄, 비철 슬래그 재생 아스팔트, 재생 콘크리트, 페타이어 |
| 안정처리 기층용 골재 | 바텀 애쉬, 석탄 보일러 슬래그 |
| 안정처리 기층용 경화 재료 | 플라이 애쉬, 시멘트 킬른 재 석회 킬른 재, 황산염 폐기물 |
| 유동성 있는 채움 골재 (Flowable Fill Aggregate) | 플라이 애쉬, 주물사, 석분 |
| 유동성 있는 경화 재료 | 플라이 애쉬, 시멘트 킬른 재, 석회 킬른 재 |



2.2 외국의 산업부산물 활용 현황

미국의 경우, 여러 가지의 산업부산물 중 플라이 애쉬와 실리카 폼 또는 고로슬래그가 콘크리트 구조체 또는 콘크리트 포장구조체의 혼화재료로서 사용되고 있는 실정이다. 하지만 이들 재료들 중에서 플라이 애쉬의 활용도가 가장 높으며, 이는 재료의 확보 및 경제성이 우수하며 혼화재료로서의 물리적 화학적 특성이 뛰어난 점에 기초하고 있다고 분석된다.

실리카 폼이나 고로슬래그의 경우, 이러한 재료의 공급이 문제가 될 수 있는데 이는 산업부산물의 태생적 한계에 따른 문제라고 판단된다. 하지만 플라이 애쉬의 경우 미국의 여러 주에 산재해 있는 화력발전소로부터 비교적 지역에 따른 공급의 문제가 덜하며 이에 따른 운반비용 등으로 인한 경제성의 이점이 뛰어난 것으로 판단된다.

재활용 가능한 또 다른 재료로는 폐주물사와 페타이어가 있다.

1990년대 미국 주물업협회(American Foundrymen's Society)에서는 해마다 증가하는 폐주물사 처리를 놓고 처리비용 절감을 위해 다양한 재활용 연구를 수행하였다.

페타이어의 경우, 2001년 17,000천개, 2002년 24,000천개, 2003년 23,000천개로 해마다 발생량은 증가하는 반면 그 처리 방법은 시멘트 생산에 필요한 킬른(Kiln)공정에 소요되는 연료로 전체 발생량의 50% 이상이 소모되고 있다. 이러한 열이용 처리방법의 재활용은 단순 처리방법으로 자원의 효율적인 재활용 방법은 아니다. 보다 고부가가치의 자원재활용을 위해 아스팔트 포장에서는 페타이어 분말을 이용한 고무아스팔트 포장이 이용되어 왔으나 콘크리트포장에서는 그 활용도가 거의 없었다. 과거 페타이어 분말을 이용한 콘크리트 포장 재료 연구가 이루어져 왔으며 외국의 경우에도 이러한 연구는 진행 중에 있다.

2.3 산업부산물 선정

산업부산물 재활용 포장에 대한 품질기준 및 시공지침 연구 중 콘크리트 포장에서 적용할 산업부산물을 선정하기 위해 산업부산물 재활용 도로 포장 지침 개발 관련 실무자 및 학계 의견 수렴을 2005년 4월에 실시하였으며, 업계와 학계 전문가 회의 및 국내·외 문헌조사 및 현황파악을 종합적으로 분석한 결과, 플라이 애쉬와 고로슬래그를 선정하였다. 이는 단순히 성능이 우수한 것이 외에 토목 전반에서 어느 정도 검증이 되어왔고 외국에서도 적용이 되어있는 산업부산물이기 때문이다. 다만 국내 포장분야에 적용되지 못하였으며 적용시 그 우수성이 가시적으로 검증되는 재료로 선정하였다.

3. SCM(Supplementary Cementitious Materials) 재료의 특성

SCM(Supplementary Cementitious Materials)이란 시멘트 대체 재료로 사용되고 있는 재료이다. 처음 사용목적은 시멘트 비용절감과 지속적인 시멘트 재료 확보를 위한 장기적인 관점에서 출발하였으나 사용 후 알칼리-실리카 반응(Alkali-Silica Reaction, ASR) 억제 및 장기강도 증진 등 역학적, 장기 공용성 관점에서 많은 장점이 있는 것으로 나타났다.

3.1 국내현황

국내에는 총 11개의 화력발전소가 있으며 이중 유연탄을 사용하는 발전소는 7개가 있으며 무연탄을 사용하는 발전소는 4개가 있다.

유연탄은 주로 외국에서 수입하여 사용하며 무연탄은 국내 석탄산업보호를 위해 정책적으로 사용하고 있다. 무연탄 화력발전소의 플라이 애쉬의 경우 강열감량(Loss On Ignition, LOI)이 높아 품질이 떨어지므로 재활용에 한계가 있는 것으로 알려져 있다.

보통 전체 석탄회 발생량의 80%가 플라이 애쉬이며, 20%정도가 바텀애쉬이다. 신더애쉬와 세노스피어의 경우 발생량이 미미하다.



표 3은 국내 석탄회 발생현황과 재활용 현황을 나타내고 있다.

석탄회 발생량은 매년 증가하고 있음을 알 수 있으며, 화력발전소의 증설로 인해 그 발생량은 계속적으로 증가될 전망이다. 90년대 초반 해도 석탄회의 재활용 비율이 미비했으나 2000년도에 들어서며 재활용 비율이 매우 증가하였다. 2004년의 경우 재활용률이 주춤하였는데 이는 중국에서 플라이 애쉬를 수입하는 것과 국내 건설경기 위축으로 인하여 그 사용량이 감소하였다.

표 3. 국내 석탄회 발생현황 및 재활용 현황

| | 1992 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2003 | 2004 |
|----------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 발생량(만톤) | 190 | 295 | 330 | 380 | 400 | 450 | 527.7 | 552.1 |
| 재활용량(만톤) | 20 | 70 | 90 | 120 | 180 | 250 | 408.1 | 360.3 |
| 재활용률(%) | 10.5 | 23.7 | 27.3 | 31.6 | 45.0 | 55.6 | 77.3 | 65.3 |

철강협회 자료에 따르면 고로슬래그 발생량은 8000천톤을 상회하는 것으로 나타났고 제강슬래그의 경우 꾸준히 증가하는 추세이다. 재활용률에서는 고로슬래그와 제강슬래그 둘 다 거의 100% 전량 재활용 되는 것으로 나타났다.

표 4. 슬래그 발생량 및 재활용 량

| 종류 | 천톤 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|-------|------|-------|------|------|-------|-------|
| 고로슬래그 | 발생량 | 8258 | 8169 | 8076 | 8599 | 8264 |
| | 재활용량 | 8258 | 8169 | 8076 | 8599 | 8364 |
| | 재활용율 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 제강슬래그 | 발생량 | 6538 | 6823 | 6877 | 7223 | 8034 |
| | 재활용량 | 6649 | 6441 | 6772 | 7564 | 8097 |
| | 재활용율 | 101.7 | 94.4 | 98.9 | 104.7 | 100.8 |

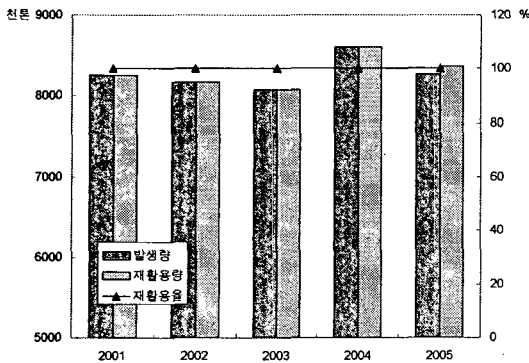


그림 1. 고로슬래그 발생 및 재활용 현황

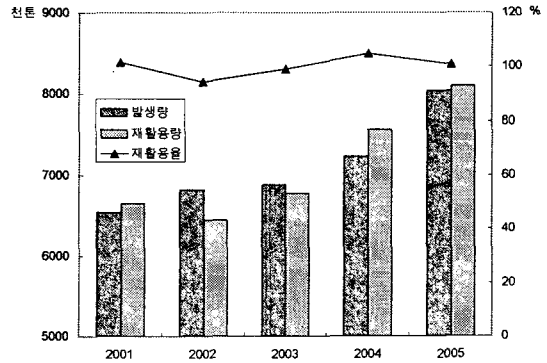


그림 2. 제강슬래그 발생 및 재활용 현황



3.2 SCM(Supplementary Cementitious Materials) 사용 재료의 특성

플라이 애쉬

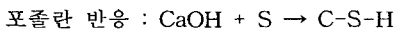
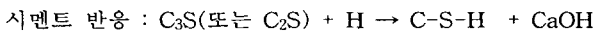
플라이 애쉬는 무정형(amorphous 또는 유리성)의 상태와 결정질(crystalline)의 상태와의 혼합형태로 구성되어 있으며, 질량의 60~90%는 고형화와 내공이 비어있는 형태의 구상형태로 구성되어 있고, 나머지는 여러 가지 형태의 불규칙적인 결정질로 채워져 있다. 이러한 두 형태의 비율은 완전히 독립되어 있지 않고 결정형 유리성의 구상형 내에 존재하거나 그 표면에 붙어서 존재하게 된다. 따라서 이러한 두 개의 다른 형태의 조합이 플라이 애쉬 재료의 분류와 특성을 규명하는데 많은 문제점을 나타내는 원인이 되기도 한다.

플라이 애쉬는 일반적으로 시멘트보다 더 입자가 작으며 10~100 μ m 정도의 구(球)형태의 실트 크기의 입자로 구성되어 있다. 이러한 작은 구(球)형태는 콘크리트의 유동성과 워커빌리티를 향상시킨다. 분말도(Fineness)는 플라이 애쉬가 포졸란 반응에 기여하는 중요한 특성중 하나이다.

현재 국내에서 석탄을 연료로 하는 발전소의 경우, 예외 없이 미분탄 연소방식을 채택하고 있으며 미분탄 연소로는 연료탄의 80% 정도를 74 μ m 이하가 되게끔 미세하게 분쇄하고 공기와 함께 연소로 내에 분사하여 연소시키는 방식으로 석탄회의 80% 이상이 fly ash로 배출되며 배출되는 fly ash의 65% 이상이 10 μ m 이하의 미세한 입자인 것으로 알려지고 있다.

플라이 애쉬는 단독으로 수경성을 갖지 않지만, 포졸란이나 백토처럼 가용성 SiO₂를 다량 함유하고 있기 때문에, C₃S, C₂S에서 유리된 Ca(OH)₂와 포졸란 반응을 일으켜, 불용성 C-S-H gel 을 생성한다. 따라서 재령 28일까지의 단기강도는 낮지만, 6개월 이상의 장기강도는 보통 포틀랜드 시멘트보다 우수하다고 알려져 있다. 그리고 또한 포졸란 반응에 의해 생성된 수화물이 조직을 치밀하게 하기 때문에, 방수성, 화학적 저항성 모두 증가한다고 알려져 있다.

다음식은 플라이 애쉬의 포졸란 반응을 나타내고 있다. 시멘트속 C₂S, C₃S 이 물과 반응하여 수산화 칼슘 실리케이트(calcium silicate hydrate, C-S-H)와 수산화칼슘을 생성한 후, 플라이 애쉬 속 실리케이트(S)가 다시 수산화칼슘(CaOH)과 반응을 일으킨 후, 추가적인 C-S-H를 발생시킨다. 즉 2차 반응이 포졸란 반응이다



고로슬래그

슬래그는 그 제조방식에 따라 고로슬래그 (Blast Furnace Slag), 제강슬래그, 비철슬래그 등으로 구분되며, 고로슬래그(Blast Furnace Slag)는 비금속질로서 주로 규산염(silicate) 또는 칼슘알루미늄규산염(aluminosilicate of calcium) 등으로 구성된 물질이며 고로에서 선철(iron)의 생산과 동시에 녹아있는 형태로 생산되며 이를 냉각시켜 분쇄한 재료이다.

냉각방식에 따라 급냉과 반급냉, 서냉 슬래그로 구분되며 콘크리트의 혼화재료 사용되기 위해서는 물을 사용하여 급속히 냉각(quenching)시킨 슬래그가 사용된다. 이는 급랭되는 과정에서 유리화 (glass)하여 반응성이 높은 것으로 알려져 있다.

제강슬래그에는 전로슬래그 및 전기로슬래그가 있다. 제강공정에서 발생하는 전로슬래그는 약 89%, 전기로슬래그는 약75%가 재자원화 되고 있다(1990년 실적).

전로슬래그가 고로슬래그에 비해 재자원화가 부진한 것은 유리석회분이 많고 팽창·붕괴성이 높은 데에 원인이 있다. 또한 전기로슬래그가 전로슬래그에 비해 재자원화율이 현저히 낮은 것은 내륙입지 공장이 많고 토목용재 등의 주요 수요처와 격리되어 있기 때문이다. 한편 전기로슬래그 가운데 환원기 슬래그의 재자원화율이 크게 떨어지는 것은 전로슬래그보다 유리석회분이 훨씬 많아 붕괴성이 높은 데에 기인한다.

고로슬래그의 반응은 칼슘수산화물(CaOH₂)와 반응하여 추가적인 C-S-H를 생성하며 계속적으로 반응하게 되는데 이는 공극용액중 CaOH₂이 남아 있는 동안 그리고 C-S-H가 차지하게 될 배합수의 공간이 남아



있는 동안 계속적으로 진행된다. 고로슬래그의 수화반응 메커니즘은 포틀랜드시멘트의 그것과 크게 다르지 않으며, 최종적인 생성물은 C-S-H 이다.

고로슬래그에 의해 생성된 반응생성물은 포틀랜드 시멘트의 생성물보다 좀 더 젤의 형태에 가까워 시멘트풀의 밀도를 증가시키는 효과를 기대할 수 있다. 급속 냉각된 슬래그의 물과의 반응은 천천히 일어나며, 만약 포틀랜드 시멘트가 사용되지 않았다면 28일 강도에 해당하는 강도에 도달하기까지는 훨씬 오랜 기간이 필요하게 된다. 따라서 반응속도를 높이기 위하여 배합시 알칼리 소금이나 석회 등을 첨가하여 배합하게 된다. 고로슬래그의 반응은 수산화물 이온과 시멘트의 초기 수화열에 의해 유리성 슬래그 구조의 붕괴와 분해에 크게 영향을 받는다.

상온에서의 반응단계는 앞서 설명한 플라이 애쉬의 단계와 대동소이하나 온도가 올라갈수록 시멘트의 알칼리 수산화물의 용해성이 훨씬 크기 때문에 알칼리 수산화물이 초기의 고로슬래그의 반응에 지배적인 영향을 미치게 된다.

4. 향후 연구계획 및 기대 효과

선정된 산업부산물(플라이 애쉬, 고로슬래그)의 콘크리트 포장에 적용하기위한 본 연구의 향후 계획은 다음과 같다.

- 플라이 애쉬와 고로슬래그의 최적 함량선정
- 현장적용시 적합한 줄눈 컷팅 시기, 양생방법, 시공방법등 현장시공 방법 선정
- 산업부산물 재활용 포장에 대한 품질기준 및 시공지침 개발

본 연구가 현장 콘크리트 포장에 적용된다면 시멘트 대체에 따른 비용절감 및 콘크리트 포장의 내구성 강화, 산업부산물의 재활용에 따른 환경오염 감소 및 시멘트 생산에 따른 이산화탄소 발생량 감소에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는交通部 수탁과제인 "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구"의 일부 성과물로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 건설교통부, "전국 폐기물 발생 및 처리 현황" 1998~2004년
2. 한국철강협회, www.kosa.or.kr
3. Warren H. et. al., "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction" FHWA-RO-97-148
4. V.M. Malhotra, A.A. Ramezani pour, "FLY ASH IN CONCRETE," CANMET, 1994
5. American Coal Ash Association, "Fly ash Facts for Highway Engineers,"FHWA-IF-03-019, ACAA,06-13-200
6. J. Francis Young at., "Concrete" Prentice Hall, 2002