

# 「산업부산물 재활용 도로 포장 잠정지침」 소개 II

## - 플라이애시와 고로슬래그 미분말 -



김 일 평 | 국토해양부 간선도로과 과장  
 윤 순 규 | 국토해양부 간선도로과 주무관  
 김 연 복 | 정회원·한국건설기술연구원 책임연구원  
 남 정 희 | 정회원·한국건설기술연구원 선임연구원

### 1. 개요

급속한 산업화 및 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 교토의정서에 비준을 하였으며 2005년 2월16일 공식발효가 되었다. 우리나라는 아직 교토의정서에 따르는 법적 의무는 부

담하고 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 CO<sub>2</sub> 배출증가율이 선진국과 비교하여 매우 높은 수준이다. 2000년 기준 CO<sub>2</sub> 배출량은 세계9위(433.5백만 CO<sub>2</sub> 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 다소비 업종의 비중 증가에 따른 것이다.

이에 본 지침에서는 폐자재의 재활용에 따른 매립지 난 해결과 환경보전 및 골재 등의 자원 확보를 위해 산업부산물을 이용한 시멘트 콘크리트 도로 포장의 적용을 위한 기준 등을 제시하였다.

## 2. 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.

### 2.1 국내 현황

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 플라이애시의 경우 강열감량(Loss On Ignition, LOI)이 높아 품질이 떨어지므로 재

활용에 한계가 있는 것으로 알려져 있다.

보통 전체 석탄회 발생량의 80%가 플라이애시이며, 20%정도가 바텀애시이다. 신더애시와 세노스피어의 경우 발생량이 미미하다.

〈표 1〉은 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. 2004년, 2005년의 경우 재활용률이 주춤하였는데 이는 중국에서 플라이애시를 수입하는 것과 국내 건설경기 위축으로 인하여 그 사용량이 감소하였다.

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 2〉 〈그림 1〉 〈그림 2〉

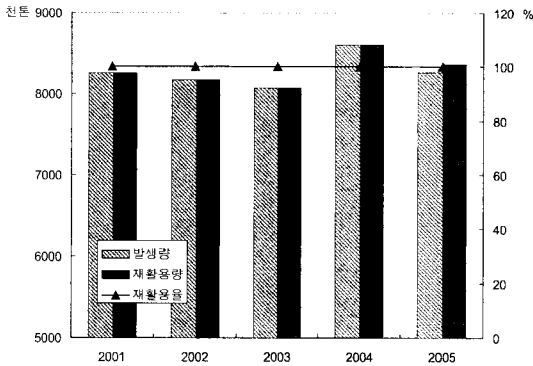
〈표 1〉 국내 석탄회 발생현황 및 재활용 현황

	1992	1996	1997	1998	1999	2000	2003	2004	2005
발생량(만톤)	190	295	330	380	400	450	527.7	552.1	591.9
재활용량(만톤)	20	70	90	120	180	250	408.1	360.3	344.8
재활용률(%)	10.5	23.7	27.3	31.6	45	55.6	77.3	65.3	58.3

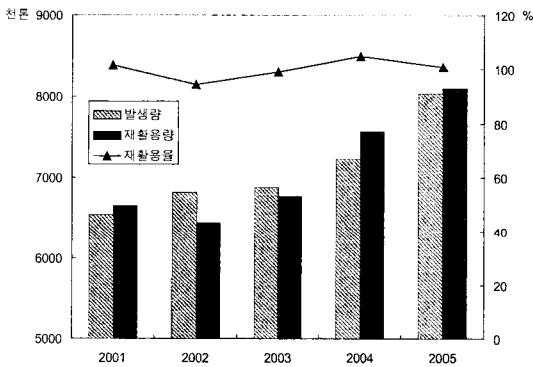
〈표 2〉 슬래그 발생량 및 재활용 량

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*

\*주)슬래그 누적재고량을 포함하여 재활용됨.



(그림 1) 고로슬래그 발생 및 재활용 현황



(그림 2) 제강슬래그 발생 및 재활용 현황

## 2.2 SCM(Supplementary Cementitious Materials) 사용 재료의 특성

### ○ 플라이애시(Fly Ash)

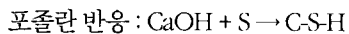
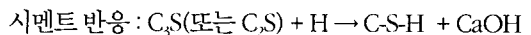
플라이애시는 무정형(amorphous 또는 유리성)의 상태와 결정질(crystalline)의 상태와의 혼합형태로 구성되어 있으며, 질량의 60~90%는 고형화와 내공이 비어있는 형태의 구상형태로 구성되어 있고, 나머지는 여러 가지 형태의 불규칙적인 결정질로 채워져 있다. 이러한 두 형태의 비율은 완전히 독립되어 있지 않고 결정형 유리성의 구상형 내에 존재하거나 그 표면에 붙어서 존재하게 된다. 따라서 이러한 두 개의 다른 형태의 조합이 플라이애시 재료의 분류와 특성을 규정하는데 많은 문제점을 나타내는 원인이 되기도 한다.

플라이애시는 일반적으로 시멘트보다 더 입자가 작으며 10~100 $\mu$ m 정도의 구(球)형태의 실트 크기의 입자로 구성되어 있다. 이러한 작은 구(球)형태는 시멘트 콘크리트의 유동성과 워커빌리티를 향상시킨다. 분말도(Fineness)는 플라이애시가 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 $\mu$ m 이하가 되게끔 미세하게 분쇄하고 공기와 함께 연소로 내에 분사하여 연소시키는 방식으로 석탄회의 80% 이상이 플라이애시로 배출되며 배출되는 플라이애시의 65% 이상이 10 $\mu$ m 이하의 미세한 입자인 것으로 알려지고 있다.

플라이애시는 단독으로 수경성을 갖지 않지만, 포졸란이나 백토처럼 가용성 SiO<sub>2</sub>를 다량 함유하고 있기 때문에, C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S에서 유리된 Ca(OH)<sub>2</sub>와 포졸란 반응을 일으켜, 불용성 C-S-H gel을 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 플라이애시의 포졸란 반응을 나타내고 있다. 시멘트속 C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S 이 물과 반응하여 수산화 칼슘 실리케이트(calcium silicate hydrate, C-S-H)와 수산화 칼슘을 생성한 후, 플라이애시 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 구분

되며, 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 혼화재로 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 약 75%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( $\text{CaOH}_2$ )와 반응하여 추가적인 C-S-H를 생성하며 계속적으로 반응하게 되는데 이는 공극용액중  $\text{CaOH}_2$ 이 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 포틀랜드시멘트의 생성물보다 좀 더 젤의 형태에 가까워 시멘트 풀의 밀도를 증가시키는 효과를 기대할 수 있다. 급속 냉각된 슬래그의 물과의 반응은 천천히 일어나며, 만약 포틀랜드시멘트가 사용되지 않았다면 28일 강도에 해당하는 강도에 도달하기까지는 훨씬 오랜 기간이 필

요하게 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 플라이애시의 단계와 대동소이하나 온도가 올라갈수록 시멘트의 알칼리 수산화물의 용해성이 훨씬 크기 때문에 알칼리 수산화물이 초기의 고로슬래그의 반응에 지배적인 영향을 미치게 된다.

### 3. 잠정지침의 주요 내용

본 잠정지침의 주요내용은 크게 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 재료에 관한 내용과 시공시 필요한 관리 사항에 대한 내용으로 구성되어 있다.

#### ○ 플라이애시

플라이애시는 우선 KS L 5405에 적합한 것으로 사용해야 하며 플라이애시의 사용범위는 포틀랜드시멘트 중량대비 10~30%범위이며 알칼리-실리카 반응 억제를 위하여 최소 20%이상 치환 사용 권장하고 있다. 또한 플라이애시에 들어있는 미연탄소성분으로 인한 AE 제 흡착 때문에 혼화제 사용시 품질관리 및 공기량 기준이 엄격하게 적용되어야 한다.

#### ○ 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말은 KS F 2563에 적합 것으로 사용하며 고로슬래그 미분말의 사용범위는 포틀랜드시멘트 중량의 30~70%범위에서 사용목적에 맞게 사용하도록 하였다. 물론 플라이애시와 마찬가지로 혼화제에 대한 품질관리가 엄격히 적용되어야 한다.

#### ○ 시공

플라이애시와 고로슬래그 미분말 사용시 콘크리트

의 초기강도발현이 늦어지므로 이를 고려한 줄눈절단 시기를 현장에 맞게 사전 검토해야 한다. 또한 재료의 점성이 높으므로 양호한 믹싱을 위하여 믹싱타임 규정 강화(반드시 60초 이상)하였다. 환경조건으로는 포설 시 일 평균기온 4℃~35℃ 사이에서 시공하도록 하였으며 과도한 진동으로 인한 재료분리를 막기 위하여 진동횟수 제한(6,000~8,000회/분)하였다.

#### 4. 기대효과

산업부산물인 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 시멘트 콘크리트 포장에 재활용할 경우 다음과 같은 기대효과를 볼 수 있다.

##### ○ 플라이애시

플라이애시의 경우 우선 산업부산물의 고부가가치 재활용이 가능하며 시멘트 콘크리트 포장에 발생할 수 있는 알칼리-골재 반응을 사전에 방지할 수 있으며 장기내구성 향상으로 도로포장 유지보수비 절감 및 유지보수시기 지연에 따른 교통지체비용 감소(국민편익증진)를 가져올 수 있다. 또한 흡서기 공사시 플라이애시 사용으로 인해 수화열 감소 효과가 있다.

경제성 부분에 있어 시멘트를 플라이애시로 20% 대체 사용시 순수 재료비는 8.7% 감소하며 향후 5년간 고속국도 시멘트 콘크리트 포장 추정량인 313만m<sup>3</sup>(한국도로공사 자료)를 고려할 때 5년간 약 90억원 절감 효과가 발생한다.

##### ○ 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말을 시멘트 콘크리트 포장에 재활용할 경우 플라이애시와 마찬가지로 산업부산물의 고부가가치 재활용이 가능하며 성능으로는 수화열 감소, 알칼리-골재반응 차단, 황산염에 대한 화학 저항성 향상 및 염화물 이온에 대한 저항성이 향상되며 또한 겨울철 제설제(염화칼슘) 사용에 대한 내염성이 우수하다.

고로슬래그 미분말로 40% 대체 사용시 경제적 효과는 순수 재료비 절감이 약 10% 감소하며 향후 5년간 고속국도 시멘트 콘크리트 포장 추정량을 고려해 볼 때 5년간 약 100억원 절감 효과가 발생한다.

#### 5. 맺음말

급속한 산업화로 인한 환경파괴 및 오염에 대한 억제와 방지는 90년대부터 국가적 차원에서 꾸준히 체계적으로 정비하여 왔으며 재활용이란 의미로 다가왔다. 그러나 이러한 노력이 결실을 맺기 위해서는 우리의 생활과 밀접한 곳에서 이루어지고 있어야 한다. 기본 틀은 마련되어 왔지만 인식과 구체적 방법의 부재로 인하여 미루어 온 산업부산물에 대한 재활용은 도로포장지침으로 보다 가까이 다가왔다. 환경을 보전하고 국가에 산을 절감하면서 도로포장의 내구성을 증진시킬 수 있는 이번 지침으로 인하여 도로포장에 대한 새로운 인식을 마련하는 기회가 될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부, “전국 폐기물 발생 및 처리 현황” 1998~2005년
2. 한국철강협회, www.kosa.or.kr
3. 건설교통부, “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 (2단계, 1,2,3차년도)”, 2005~2007년
4. Warren H, et. al., “User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction” FHWA-RO-97-148
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