

플라이애쉬를 이용한 환경보존 콘크리트 생산

이진용

(동아건설 기술연구원, 수석 연구원)

- | | |
|---------------------------------|-----------------|
| 1. 머리말 | 8. 플라이애쉬 생산량 |
| 2. 포틀랜드시멘트 생산 | 9. 플라이애쉬의 잠재성 |
| 3. 포틀랜드 시멘트의 에너지 소비 | 10. 새로운 기술 |
| 4. 온실가스 배출 | 11. 플라이애쉬의 이용 |
| 5. 비용고려 | 12. 다른추가적인 혼화재료 |
| 6. 개발도상국가의 현황 | 13. 제도적 제한 |
| 7. 플라이애쉬와 다른 추가적인 시멘트 혼화재료들의 역할 | 14. 생산비용 |
| | 15. 맺음말 |

1. 머리말

환경문제는 21세기 시멘트와 콘크리트산업 발전에 지속적으로 영향을 미칠 것으로 예상된다. 1992년 브라질의 Rio de Janeiro와 1997년 일본 Kyoto에서 세계정상급 대표들은 출처가 분명치 않은 오염물질은 더 이상 환경적, 사회적으로 허락할 수 없다는 것을 분명히 했으며, 환경오염의 주원인은 이산화탄소(CO₂)의 방출이라는 결론을 얻게 되었다. 물론 NOX, CH₄와 같은 다른 가스들도 심각한 영향을 미치고 있지만 CO₂와 비교하면 상대적으로 미비하다. 결과적으로 환경오염을 방지하기 위해 각 국가들은 CO₂ 방출에 대해 규제와 위임된 할당량을 지켜야하며, 주요 추진 사항으로 2010년까지 배출량을 1990년 수준

으로 안정화시키는 것을 목표로 하였다.

본문은 포틀랜드 시멘트의 제조가 CO₂ 방출에 영향을 미치기 때문에 많은 양의 플라이 애쉬와 다른 추가적인 혼화재료의 사용증가를 통해 시멘트 생산을 감소시키고 더불어 CO₂ 방출을 억제하는 방법을 논한 것으로 캐나다 CANMET에서 연구활동을 하고 있는 Malhotra 박사가 국제학술지 "Concrete International" 1999년 5월호에 게재한 기술기사를 번역한 것이다.

2. 포틀랜드 시멘트 생산

보통 포틀랜드 시멘트(OPC)는 주요 건설 재료이고 지속적으로 사용될 것이다. 시멘트 생산은 1995년에 약 14-15억톤에서 2010년

(표 1) 2010년 전세계 시멘트 생산 예상량
(단위 : 100만톤)

	1995	2000	2005	2010
유럽 연합국	168.1	187.9	194.1	189.3
그외 유럽국가	65.8	80.0	90.2	94.7
소련 연방	58.1	80.3	110.1	128.2
북미	92.9	94.9	94.8	94.7
아프리카	89.4	106.6	127.4	145.0
중남미	64.8	74.3	80.7	85.5
중앙아시아	63.5	75.6	76.9	73.4
동부아시아	623.4	732.7	798.8	844.3
동남아시아	161.2	219.1	255.0	279.2
오세아니아	8.0	10.6	11.1	11.8
총 계	1396.1	1662.1	1839.1	1946.1

에는 약 20-22억톤까지 증가할 것으로 예상된다(표 1)'. 특히 중국, 인도, 동유럽, 아프리카에서 많이 증가하고 북미와 서유럽은 증가세가 둔화될 것이다. 이러한 거대 소비량을 고려해 볼 때 환경 친화적으로 시멘트를 제조하는 기술개발이 필요하다. 만약에 이것이 불가능하다면 산업 부산물의 활용을 증가시켜 시멘트공장 건설을 현격히 줄여야 한다.

3. 포틀랜드 시멘트의 에너지 소비

알루미늄, 철 생산과 더불어 포틀랜드 시멘트의 제조는 가장 많은 에너지를 필요로 하는 공정으로서 톤당 약 4GJ가 필요하다.

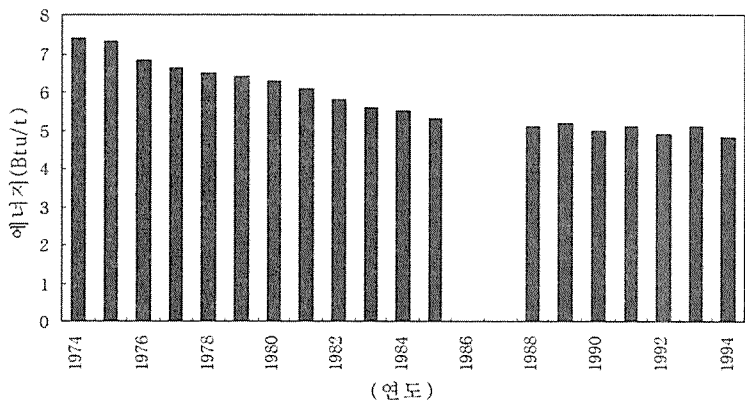
습식 생산 설비들을 새로운 현대적인 건조처리 시설로 대체하고 석유에 근거한 연료의 소비를 기피하는 움직임으로 지난 십 년이상 시멘트 산업은

에너지 소비 감소에 많은 발전을 가져왔다. 예를 들면, 미국에서 시멘트 산업은 톤당 1974년에 약 7GJ에서 1991년 약 5.5GJ 까지 평균에너지 사용을 줄일 수 있었다.(그림 1)² 그러나 시멘트 산업은 생산 과정에서 더 이상의 에너지 사용을 줄이는 것은 매우 어렵고 설치비가 비싸서 거의 한계에 도달했다.

포틀랜드 시멘트의 생산을 감소시키기 위해서는 오래되고 비능률적인 생산설비가 단계적으로 철수되고, 새로운 시멘트 공장설치의 제한이 유일한 선택으로 남아있다. 이러한 변화로 생긴 용량손실은 혼화재료(플라이애쉬, 슬래그, 실리카 흙등) 사용을 증가시켜 보존해야 한다.

4. 온실가스 배출

포틀랜드 시멘트의 제조는 고밀도 에너지를 발생할 뿐만 아니라, 온실가스 발생의 주원인으로서 톤당 대기 중에 약 1.0-1.2톤 정도의 CO₂와 적은 양의 NO_x, CH₄를 대기 중에 배출시킨다. 시멘트 톤당 전체 CO₂발생량은 습식공정에서 약 1.2ton이고 킬른에서 0.89ton이다. CO₂발생의 대략 반은 석회암(주요 원재료)의 추출과정에서 발생하고 나머지 반은 화



(그림 1) 에너지 소비경향(1Btu/t=1.064KJ)

석원료들의 완전연소에서 발생한다. Cahn³의 조사에 따르면 석회암 추출과정에서 CO₂배출은 시멘트 톤당 약 0.54-0.60톤 정도로 일정하지만 전체 배출량은 사용된 연료의 탄소량과 연료의 효율에 달려있다.

1995년 지구 전체에서 시멘트 생산량은 약 14-15억톤이었으므로 대기 중에 CO₂를 약 14-15억톤 발생시킨 것을 의미한다. 1995년 "The International Energy Outlook" 따르면 모든 산업에서 세계적으로 CO₂ 배출량은 216-238억톤으로 조사되었다. 즉 시멘트 생산시 발생하는 CO₂의 방출량은 전체의 약 7%로 시멘트 회사들의 조사에 의하면 앞으로 십년간 같은 비율을 유지할 것으로 예측하고 있다³. 왜냐하면 시멘트 회사들은 가까운 장래에 환경 친화적인 시멘트 제조 기술의 출현을 기대하고 있지 않기 때문이다.

5. 비용 고려

새로운 포틀랜드 시멘트 설비 비용은 최대 출력의 100만 톤에 대하여 1.75억 달러 정도이다. 최근까지 100만톤 용량의 공장이 최대의 효율적인 장치로 인식되어왔지만 현재 약 300만톤 정도의 용량을 가진 거대한 시멘트 설비들이 한국과 태국에서 출현하였다. 그러나 CO₂방출과 에너지 소비면에서 비용을 고려해 볼 때 새로운 대량 생산 시설이 설치되는 것에 대하여 많은 의구심을 갖는다. 대신에 온실 가스 방출에 대한 정부의 규제들은 앞으로 특수 시멘트 생산을 강요하거나 레미콘에 혼화재를 직접 사용할 수 있도록 권장할 것이다.

6. 개발도상국가의 현황

개발도상국의 기간 산업 확장의 필요성은 포틀랜드 시멘트에 대한 요구가 증가하는 것을 보

여주고 있다[표 1]. 이러한 결과는 중국, 인도, 남미국가에서 다수의 새로운 시멘트 설비공장들의 설치를 이끌어 내었다. 예를 들면, 2002년에 인도는 포틀랜드 시멘트의 약 1.9억 톤을 생산할 것이다. 그리고 화력 발전소의 석탄재(플라이애쉬)는 연간 약 1.3억 톤에 도달할 것이라고 예상된다. 불행히도, 이들 국가에서 산업 발전에 필요한 많은 것들이 두가지 방법에서 환경에 역으로 영향을 미치고 있다. 즉 새로운 시멘트 설비들의 설치는 CO₂ 배출을 증가시키고, 매우 높은 용량의 화력 발전소들의 건설은 재생되지 않는 거대한 양의 플라이애쉬 발생의 원인이 되고 있다. 대부분의 플라이애쉬는 석호속, 쓰레기 매립장, 채석장에 쓰레기 더미 상태로 함부로 버려지고 있고 어떤 경우에는 공해상에 아무렇게나 버려지고 있다.

이처럼, 온실 가스 방출을 줄이고, 경제적이고 내구성인 콘크리트를 만들 수 있는 잠재적인 귀중한 혼화재들이 낭비되고 있는 것이다.

7. 플라이애쉬와 다른 추가적인 시멘트 혼화재료들의 역할

혼화재료를 콘크리트에 사용하기 위해서 포틀랜드 시멘트의 주요 부분을 대신할 수 있는 특징을 찾아내는 것이 중요하다. 그러나 현재는 시멘트 생산에서 경제적이고 환경 친화적인 포틀랜드 시멘트를 제조하기 위한 새로운 기술이 없으며 많은 양의 혼화재료를 시멘트 대체재로 사용할 수 있는 기술이 가능한지에 대한 의구심을 가지고 있다

8. 플라이애쉬 생산량

1989년 전 세계 플라이애쉬 생산은 연간 약 4억 톤 정도였다. 소련이 0.90-0.99억 톤, 중국이 0.55-0.61억 톤으로 그 뒤를 따랐다.⁴ 세

계에서 플라이애쉬 생산의 주요 국가는 미국의 0.48-0.53억 톤과 인도는 0.36-0.40억 톤이었다[표 2]. 그러나 중국과 인도는 2000년까지 각각 플라이애쉬를 1.0-1.1억 톤 생산할 것으로 예상되며 이러한 영향은 다른 나라들의 생산증가를 가져올 것이다. 비록 제한적인 정보이지만 2000년까지 플라이애쉬의 생산량이 14-15억 톤, 포틀랜드 시멘트 생산은 6.61억 톤이 될 것이다.

[표 2] 1998년에 집계된 플라이애쉬 생산과 이용
(백만 톤)

나 라	생 산	소 비
오스트리아	9	< 1
중 국	> 100	14
독 일	28	12
인 도	> 80	2
일 본	5	3
러시아	62	5
한 국	28	N/A
스페인	8	1
영 국	10	6
미 국	60	8

대다수의 플라이애쉬는 저칼슘(ASTM C 618 Class F)으로 역청탄이나 유연탄에서 생산된다. 저칼슘 플라이애쉬는 수경성이 적거나 없다 하더라도 습기 중에서는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 수화 작용을 한다. 최근에 고칼슘(ASTM C 618 Class C) 플라이애쉬는 미국, 캐나다, 폴란드, 그리스, 그리고 다른 몇나라에서 생산되고 있다. 이들 플라이애쉬들은 갈탄 혹은 하부 역청탄을 불태우고 난 후의 부산물들이며 자체 수경성을 가지고 있다.

9. 플라이애쉬의 잠재성

생산된 플라이애쉬를 콘크리트에 이용하기

위해서는 분말도와 감열감량이 시방서 기준에 맞아야 하고 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 기술들이 현재 개발되었다고 생각한다. 이것은 분리기술, 부양기술, 그리고 연마공법을 포함한다.

현재 플라이애쉬 생산량의 10% 정도만이 시멘트 대체재로 사용하고 있으며 중국에서 재활용률은 15%, 인도에서는 5%, 북아메리카에서 재활용률은 모든 생산된 콘크리트의 10%정도 된다. 홍콩 그리고 네델란드와 덴마크처럼 몇몇 유럽 국가들에서 플라이애쉬의 이용은 매우 높지만 전체 포함된 양은 얼마 되지 않는다. 이와 같이 세계적으로 콘크리트에 플라이애쉬 재활용률은 앞으로 증가 할 것으로 예상된다.

1984년 저명한 미국 콘크리트 기술자인 Ed Abdun-Nur⁵에 의하면 “실제로 현재 콘크리트에서 플라이애쉬는 포틀랜드 시멘트, 골재, 배합수, 화학 혼화제와 같이 필수적인 성분이다. 저자는 대부분의 콘크리트에 포틀랜드 시멘트보다 조금 더 많은 양의 플라이애쉬를 사용한다. 그러므로, 이것은 혼화제가 아니라 일종의 추가된 혼합물이다. 앞으로 플라이애쉬와 화학 혼화제가 없는 콘크리트는 박물관의 전시장에서나 볼 수 있는 골동품이 될 것이다.” 저자도 위의 진술을 전적으로 동의하고 있고 이와 같은 현상은 서서히 현실화되고 있다.

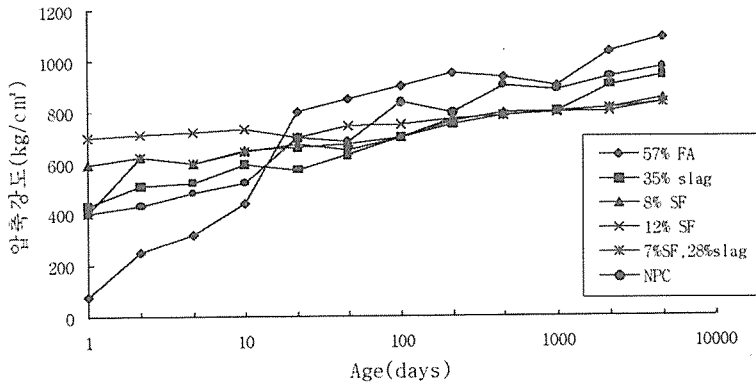
10. 새로운 기술

콘크리트에서 플라이애쉬 이용 범위에 주요한 개발중 하나는 고성능, 고밀도 플라이애쉬 콘크리트 제조 기술이었다.^{5,6} 앞으로 몇 년안에 콘크리트에 플라이애쉬 사용의 혁명이 일어날 것으로 믿어진다. 예를들어 고성능, 고밀도 플라이애쉬 콘크리트의 생산은 포틀랜드 시멘트의 약 60% 정도를 ASTM 등급 F 플라

이애쉬로 하고 물/혼화재 비율은 각각 150kg/m³ 그리고 225kg/m³의 포틀랜드 시멘트와 플라이애쉬 내용물을 0.30에 유지한다. 혼합물의 함수비는 대략 120kg/m³ 정도 낮게 하고 많은 양의 유동화제의 투과하여 만

들어진다.

약 10년 전에 개발된 이 콘크리트는 내구성이 좋은 것으로 많은 설문지와 건설 현장에서 이미 규명되었다. 이렇게 만들어진 콘크리트의 초기강도는 1일 후에 60-80kg/cm²로 추운 지방을 제외하고는 거푸집을 제거하기에 충분한 강도이며 10년 후 압축강도는 약 1,100kg/cm²로 콘크리트 블록 시험을 통하여 얻을 수 있었다. [표 3, 그림2] 이 블록은 캐나다 Toronto에서 양생된 것으로 캐나다 동부에서 수행한 몇몇 다른 연구과제로서도 비슷한 결과를



(그림 2) 고성능 콘크리트의 재령별 압축강도

(표 3) 재령에 따른 압축강도 발현

재 령	배 합					
	1	2	3	4	5	6
	시멘트 함유량, kg/m ³					
	485	484	488	486	350	485
	시멘트=65% 슬래그=28% 실리카 톱=7%	시멘트=65% 슬래그=35%	시멘트=92% 실리카 톱=8%	시멘트=88% 실리카 톱=12%	시멘트=43% 플라이애쉬 =57%	시멘트=100%
	압축 강도 (100×200mm), Kg/cm ²					
1	417	456	584	694	78	415
3	643	550	635	-	271	475
7	632	572	634	718	340	514
28	694	634	668	758	499	599
91	708	633	691	729	825	756
182	696	694	714	787	870	743
365	785	762	792	808	956	882
546	766	793	803	822	1,005	947
730	786	847	853	853	999	959
912	818	839	-	-	968	955
1460	841	973	871	882	1,099	994
3650	876	998	912	892	1,123	1,023

얻었다. 이와 유사한 형태의 콘크리트는 ASTM 등급 C플라이애쉬를 이용해도 생산이 가능하다.

11. 플라이애쉬의 이용

“Tradeable Emission Right”는 엄격히 배출물을 감소시키려는 목적으로 1997년 Kyoto에서 제정되었다. 현재 배출물에 대하여 국제적으로 거래하는 것은 규정이 없으나 배출물 1 톤은 약 100달러(US)의 가치가 있는 것으로 알려져 있다⁷. 예를들면 어떤 국가가 플라이애쉬 또는 슬래그를 사용하여 시멘트의 20%를 교체한다면, 그 국가는 약 20%의 CO₂ 발산물을 줄이게 될 것이다. 즉 5억 톤의 시멘트를 생산하는 나라에서 시멘트의 20%를 플라이애쉬로 교체하면 CO₂를 1억 톤을 줄이게 된다. 다시 말하면, 10억 달러의 무역수지 개선 효과가 있다.

“Tradeable Emission Right”의 가치는 오직 합의되지 않은 평가 방법이다. 왜냐하면 아직까지 국제적으로 이 문제에 대해 결론에 도달하지 못했기 때문이다.

앞으로 정치적, 환경적으로 플라이애쉬의 소비증대에 압력이 가해지고 그 유용성을 개발하기 위해 많은 투자가 필요할 것이다. 그러

나 선진국들이 플라이애쉬의 유용성 기술을 개발 도상국가에 전수한다면 이 나라들은 새로운 시멘트 공장설치의 감소와 CO₂배출을 감소시킬 것이다.⁸ 예를들어 캐나다는 1990년부터 온실가스 방출 수준을 6%로 제한하기 위해 약 15년 동안 약 100억 달러 이상의 비용을 투자하였다.

12. 다른 추가적인 혼화재료

플라이애쉬와 마찬가지로 슬래그, 실리카 흙등이 콘크리트에서 포틀랜드 시멘트와 부분적으로 교체될 수 있지만 플라이애쉬의 양과 비교하면 이러한 재료의 이용은 상대적으로 적은 편이다. 전 세계적으로 슬래그가 축적되는 양은 1년에 약 2억톤이고 실리카 흙의 사용은 매우 제한되어 있으며 포졸란 재료의 사용은 화학 물질에 심하게 노출된 부위에 부분적으로 사용되고 있다⁹. 그러나 슬래그 이용은 최근에 상당히 증가되고 있으며, 이러한 현상은 계속될 것으로 기대된다. [표 4]는 혼화재료를 첨가한 콘크리트의 내구성을 보여준다.

13. 제도적 제한

플라이애쉬와 다른 추가적인 혼화재료의 사

[표 4] 배합비와 염소이온 투과 저항성(10년)

배합명	혼화재, kg/m ³						전하 (coulombs)
	총 계	포틀랜드 시멘트	실리카 톱	슬래그	플라이 애쉬	물-혼화재 비율(w/cm)	
1	485	315	35(7%)	123(28%)	-	0.29	102
2	484	317	-	-	-	0.28	237
3	488	449	39(8%)	-	-	0.27	565
4	486	427	59(12%)	-	-	0.27	118
5	350	150	-	-	200(57%)	0.29	0
6	485	485	-	-	-	0.27	381

용에 대한 가장 큰 장애는 “표준화”이며, 이것은 혼화재들이 많이 사용되는 것을 방해한다. Mehta⁹는 혼화재의 사용량을 증가시키기 위해서는 현재의 모든 규정들을 제거함으로써 가능하다고 하였다.

또한 두 가지이상의 혼화재를 사용하여 3성이나 4성분계 시멘트를 개발함으로써 특수시멘트의 발전을 가속화시킬 수 있을 것으로 믿고 있다.

14. 생산비용

혼화재의 사용은 콘크리트 생산비용에 영향을 주며 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트는 일반적으로 포틀랜드 콘크리트 보다 비용이 적게 든다. 그러나 슬래그, 실리카 흙을 혼합한 콘크리트 경우에 생산비용이 같거나 더 비싸다. 이러한 비용은 내구성, 사용기간, 환경문제의 비용이라고 해도 과언이 아니다. 한 가지 예로 동부 캐나다 도시의 경우를 보면 고성능, 고밀도 플라이애쉬 콘크리트는 유동화제를 약 5kg/m³ 첨가하여 포틀랜드 시멘트 보다 약 12불 정도가 경제적인 콘크리트를 생산한다. 그러나 생산 비용은 지역에 따라 차이가 있다.

15. 맺음말

포틀랜드 시멘트 생산은 에너지와 자원보존 그리고 공장가동에 따른 CO₂ 발생으로 플라이애쉬와 슬래그의 사용을 증가시키고 있다.

많은 양의 플라이애쉬를 사용하는 기술은 전 세계에 널리 알려져 있으며 고내구성 플라이애쉬 콘크리트 생산기술의 발전과 새로운 시멘트 공장 설치의 필요성은 혼화재료의 이용 가능성을 높이고 있다.

유동화 콘크리트는 전체 시멘트 무게의 최대 60%에서 70%의 플라이애쉬와 슬래그가 포함

되어 있으며 고강도와 고내구성 특징을 나타낸다. 이러한 개발은 플라이애쉬와 슬래그 사용에 대한 강한 반대 의견을 일축했다. 특히 메스콘크리트 생산을 위한 혼화재 사용은 경제적, 에너지효율, 내구성등 콘크리트의 전반에 고부가가치가 있다는 것을 명백히 하였다.

오래된 포틀랜드 시멘트 공장은 선진국에서 단계적으로 폐쇄하고 있으며 이에따른 시멘트 생산의 감소를 혼화재로 충당하고 있다. 이에 대해 Mehta⁹는 “21세기가 다가오고 우리는 계속 발전 할 수 있는 시점에 있으며, 콘크리트 산업은 인간 사회의 필수적인 요소이다. 다시 말해서 환경보호와 세계의 산업화, 도시화를 촉진시키는 기본이 된다. 따라서 경제적이고, 안정적인 구조물을 확보하기 위해서는 플라이애쉬와 슬래그 같은 혼화재를 사용해야 한다”고 언급 하였다.

산업 부산물인 플라이애쉬와 슬래그를 콘크리트의 혼화재로 사용하는 것은 매우 어려운 발견이었다. 다시 말하면 환경보존 차원에서 추가적인 시멘트 재료를 개발하지 않을 수는 없는 것이다. 예를들어 수퍼 플라스틱이나 새로운 시멘트 재료를 사용한 것은 경제적이고 고성능 콘크리트 재료로 내구성을 강화시킬 수 있을 것이다.

참고문헌

1. World Cement Annual Review 1997, World Cement, V. 28, No. 7, July 1997, pp. 3-60.
2. PCA Economic Research Dept., U. S. Cement Industry Fact Sheet, 14th Edition, World Cement, V. 28, No.8, August 1997. p. 65.
3. Cahn, D., et al., “Atmospheric CO₂ and the U.S. Cement Industry,” World

- Cement, V 28, No. 8, August 1997, pp. 64-68.
4. Manz, O.E., "Worldwide Production of Coal Ash and Utilization in Concrete and Other Products," presented at the CANMET/ACI Third Interational Conference on Fly Ash, Sillica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Paper, Trondheim, Norway, 1989, 15 pp
 5. Malhotra, V. M., and Ramezianpour, A. R., "Fly Ash in Concrete," 2nd Edition, CANMET Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, 1994, 307 pp.
 6. Malhotra, V. M., "CANMET Investigations Dealing with High-Volume Fly Ash Concrete," Advances in Concrete Technology, 2nd Edition, CANMET, Ottawa, 1994, pp. 445-482.
 7. Corcoran, T., "Churchill Falls not Tradeable," Globe and Mail, Toronto, March 10, 1998.
 8. CP News, Globe and Mail, Toronto, March 10, 1998.
 9. Mehta, P. K., "Rice-Husk Ash—A Unique Supplementary Cementing Material," a chapter in Advances in Concrete Technology, CANMET, 1994, pp. 419-444.
 10. Mehta, P. K., "Bringing the Concrete Industry Into a New Era of Sustainable Development. " Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology, Rome, Italy, October 1997, pp. 49-68.

