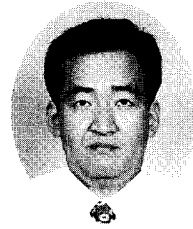


플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 연구 및 실용화 동향

- Research and Practicality Trend of Concrete using Fly-Ash -



최세진*



권영진**



김무한***

1. 서 론

최근, 산업이 발전함에 따라 전력 사용량이 증가되고 있으며 앞으로 계속적으로 전력수요가 예측되고 있기 때문에 이와 같은 전력수요에 대처하기 위하여 화력발전소의 건설이 계획·진행되고 있는 실정이다. <그림 1>은 전국의 화력발전소 현황을 나타낸 것으로서, 이러한 석탄 사용량 증가에 따라 발생하는 석탄회의 양은 2010년경에는 600만톤에 이를 것으로 예상하고 있어 이에 대한 처리문제가 사회적으로 커다란 관심사로 대두되고 있으며, 석탄회 매립지 파손으로 인한 환경피해 사례도 발생하고 있다.¹⁾

일반적으로 석탄회는 <그림 2>와 같이 분말형태로 가스와 함께 밖으로 배출되면서 집진기로 포집되는 플라이애쉬(fly ash)가 약 80%이며, 소성되어 로 밑으로 떨어지는 입도가 큰 바텀애시(bottom ash)가 20%를 차지한다. 플라이애쉬를 콘크리트용 혼화제로 사용하게 되면 콘크리트의 시공성이 개선되고, 단위수량을 줄일 수 있으며, 수화열의 발생이 낮아지고, 장기강도가 증진되며, 수밀성과 화학저항성이 향상되는 등의 기술적인 장점뿐만 아니라, 경제적이고 환경보호측면에서도 효과적이지만, 플라이애쉬의 품질상태에 따라 콘크리트에 미치는 영향이 크기 때문에 플라이애쉬를 콘크리트산업에 재활용하기 위해서는 충분한 연구·검토가 선행되어야 한다.

구미·일본의 경우 주로 국가기관에서 정책적으로 재활용을 추진하여 석탄회의 재활용율이 60~70%로 높은 반면, 국내의 경우 재활용율이 상대적으로 낮은 실정이다.¹⁾²⁾

본 고에서는 국내 석탄회의 발생현황·재활용 현황 및 품질규준을 살펴보고, 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 국내·외 연구 및 실용화 동향, 특히 최근 새로이 등장하여 점차 연구가 활발히 이루어지고 있는 플라이애쉬를 다량 사용한 콘크리트(HVFAC, High Volume Fly-Ash Concrete)³⁾¹¹⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾에 대한 연구 사례를 소개함으로써 석탄회의 재활용률 증대시키기 위한 참고자료를 제시하고자 한다.

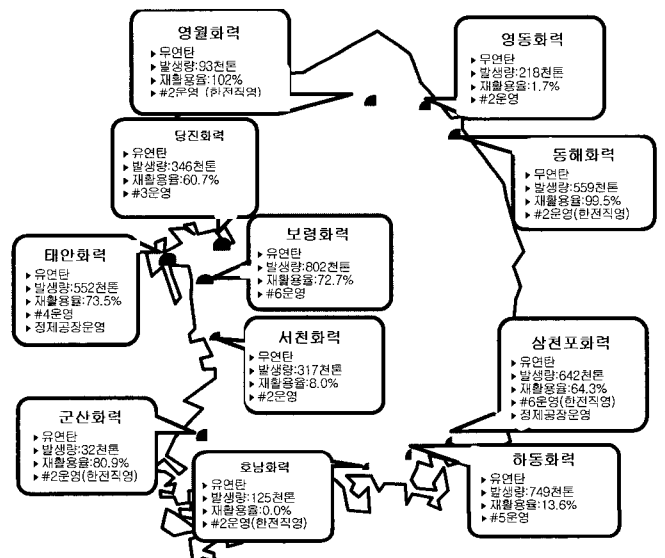


그림 1. 전국 화력발전소 현황(2000)²⁾

* 정희원, 충남대학교 대학원 박사수료
 ** 정희원, 홍용리플래시건설(주) 전무이사
 *** 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수

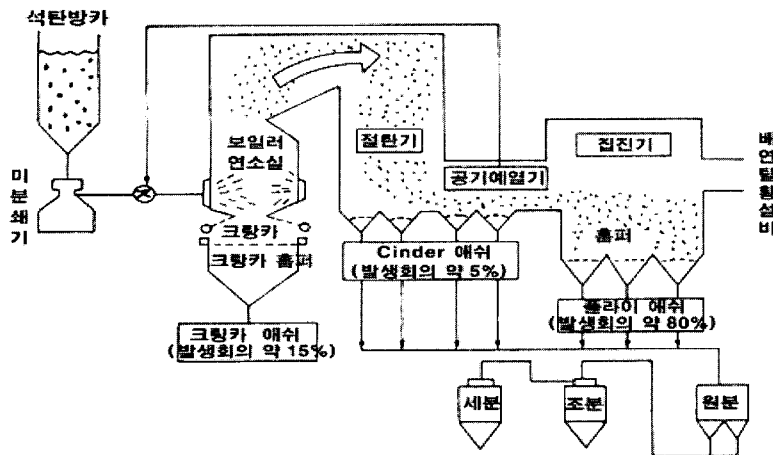


그림 2 석탄회 생성 과정

2. 석탄회의 발생 및 재활용 현황

화력발전소에서 석탄을 미분기로 분쇄하여 뜨거운 공기와 함께 고속으로 로내(爐內)로 주입하면 석탄에 함유된 대부분의 광물질 용융점 이상인 1,500±200℃ 온도범위에서 부유(浮游)상태로 순간적으로 연소하게 된다. 이 때 연소하고 남은 물질을 석탄회(Ash)라 하며, 무연탄의 경

우는 26~50%, 역청탄은 8~15% 정도가 발생되며 연소 후 모이는 장소에 따라 Bottom Ash, Fly Ash 등으로 구분한다.¹⁾

〈표 1〉은 국내에서 발생하고 있는 발전소별 석탄회의 발생현황 및 향후 발전 전망을 나타낸 것으로, 화력발전소의 경우에는 대규모 시설을 갖는 경우가 많고 현재까지의 설비투자로 인하여 발생하는 석탄회의

표 1. 석탄회 발생현황 및 향후 전망²⁾ (단위:천톤)

발전소명		연도	1995	1996	1997	2000	2005
화력발전소	서천		368	382	383	413	430
	영동		226	204	206	4	6
	영월		204	209	178	-	-
	부산		73	68	-	-	-
	군산		38	39	40	-	-
	동해		-	-	26	609	589
	보령		829	855	771	748	803
	삼천포		658	712	734	641	628
	호남		123	125	122	141	129
	태안		165	328	563	529	800
	하동		-	-	207	784	827
	당진		-	-	-	493	550
	영흥		-	-	-	-	880
	신규화력		-	-	-	-	70
소계		2,684	2,922	3,230	4,419	5,713	
열병합발전소	구미		49	54	59		
	반월		67	67	67		
	대구		39	39	39		
	울산석유		38	38	38		
	고려(주)		20	25	30		
	선경(주)		15	15	15		
	부산염색		20	20	20		
	동양화학		16	16	16		
	소계		264	273	284		
계		2,984	3,195	3,514	4,419	5,713	

량이 상대적으로 소규모인 열병합발전소보다 많이 발생되고 있다.¹⁾²⁾

3. 각국의 플라이애쉬 품질 기준

〈표 2〉는 각국의 플라이애쉬 품질기준을 나타낸 것으로서, 미국과 캐나다의 경우 플라이애쉬를 포함한 포졸란물질을 다음 3가지로 분류하고 있는데, 즉 ①Class N은 가공하지 않은 그대로이거나 소성시킨 천연 포졸란물질이며, ②Class F는 무연탄이나 역청탄의 연소부산물로서 포졸란 성질을 가지는 것이며, ③Class C는 갈탄이나 아역청탄의 연소부산물로서 포졸란 성질과 결합재 특성을 가지며, CaO 함유량이 10%이상인 것이다. Class C는 포졸란 성질과 시멘트와 유사한 특성을 가지고 있어 강도발현이 우수하다.²⁾⁴⁾

호주에서는 플라이애쉬를 미분탄을 가열해 발생한 가스로부터 포집한 고체물질이라고 정의하며, Fine, Medium, Coarse로 구분하고 있다.⁵⁾ 또한, 일본의 경우 1999년 JIS A 6201을 개정하여 강열감량 및 분말도 등에 따라 I~IV종까지 4가지로 구분하고 있으나⁶⁾, 우리나라를 비롯한 그 외의 국가에서는 특별히 세분하고 있지 않고 있다.

4. 플라이애쉬 콘크리트의 연구 및 실용화동향

산업부산물인 플라이애쉬를 콘크리트용 혼화재로 사용할 수 있는 계기가 된 것은 1914년 Engineering News Record에 발표된 "An Investigation of Pozzolanic in Coal Ash"의 연구결과에서 비롯되었으며, 이후 전력회사를 중심으로 지속적인 연구가 진행되었다.

특히, 1932년에 와서 Cleveland Electric Illuminating Company 및 Detroit Edison Company와 같은 전력회사들의 광범위한 연구개발 성과를 바탕으로 플라이애쉬를 콘크리트용 혼화재료로 활용하기 시작하였으며, 플라이애쉬라는 용어가 처

표 2. 각국의 플라이애쉬 품질기준

분류	Australia			Austria	Canada			India	Japan				Denmark	Sweden	Turkey	USA			U.K	USSR	Korea
	AS 3382.1			B3320	A23.5-M86			IS: 3812	A6201						TS 639	ASTM C 618			BS3882 Part 1		L5405
	Fine	Medium	Coarse		N	F	C	I	II	III	IV	N				F	C				
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (min,%)	-			-				70						70	70	70	50				
SiO ₂ (min,%)	-			42~60	3	5	5		45										25	45	
SO ₃ (max,%)	3.0			3.5				2.75					4.0	4.0	5.0	4	5	5	2.0	3.0	
습분(max,%)	1.0			3.0	3	3	3	12	1.0				1.5		3.0	3.0			0.5	2.0	1.0
강열감량(max,%)	4.0	6.0	12.0	5.0	10	12	6		3	5	8	5	5.0	5.0	10.0	10	6	6	6.0	5.0	5.0
분말도	45 μ m체장분 (max,%)			-	34				10	40	40	70	40			34			12	25	
	비표면적(min, 1000cm ² /g)			-					5	25	25	15									24
압축 강도비 (%)	7일(min)			-											75				85		
	28일(min)			-	80	75			80	90	80	80	60		70	70	75			80	60
	91일(min)			-					100	90	90	70									
단위수량비 (max,%)	-			-					105	95	85	75				115	105	105	95	105	102
비중(min)	-			-					1.95										2.0		1.95

음으로 Davis의 연구문헌에 사용되기 시작하였다.⁷⁾

플라이애쉬가 건설산업의 콘크리트용 혼화재에 대규모로 이용되기 시작한 것은 미국의 Montana 주의 Hungry Horse Dam 공사이며, 이를 계기로 플라이애쉬의 사용 및 실용화에 대한 규격을 제정하기에 이르렀다.

미국의 경우, 1948년에 플라이애쉬의 규격을 제정하여 1954년에는 ASTM 규준으로 정식 제정을 하기에 이르렀으며, 몇 차례의 개정을 거쳐 1977년 C급 플라이애쉬를 포함시킨 규정을 완성하여 현재에 이르면서 부분적인 개정을 해왔다.

미국에 비해 일본은 1950년에 처음 플라이애쉬에 관한 연구를 시작하였으며, 1958년에 JIS A 6201 규준을 확립한 이래 몇차례의 개정을 거쳐 1999년에 새로이 정립하였는데, 이는 대부분 F급 플라이애쉬에 관한 것으로, C급 플라이애쉬에 관한 규준은 없는 상태이다. 프랑스도 비슷한 시기에 플라이애쉬 시멘트의 규준을 정립하였으며, 러시아와 영국의 경우에는 1963년과 1965년에 각각 이에 대한 규준을 확립하기에 이르렀다.

한편, 국내의 경우는 1964년에 KS L 5405를 제정하였으며, 지속적인 보완을 거쳐 최근인 1994년에 다시 개정하게 되었다.

플라이애쉬의 사용은 매시브한 대형구조물의 콘크리트에 적용하는 사례가 많은데, 주로 매스 콘크리트의 수화열 저감 및 초기 재령에서의 균열감소를 목적으로 널리 활용되어 왔으며, 이러한 플라이애쉬의 증가추세는 산업부산물의 재활용으로 인하여 얻는 경제적인 효과외에도 환경보존, 에너지 절감 등의 효과도 기대할 수 있다.

국내·외 플라이애쉬 콘크리트의 연구 및 실용화동향을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

4.1 국내의 연구 및 실용화동향

최근, 국내에서도 플라이애쉬에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 현장에서 콘크리트의 제조시에 시멘트의 5~15%정도를 플라이애쉬로 치환하여 재료비 절감, 유동성개선, 수화열 저감 효과 및 콘크리트의 운반시간에 따른 품질저하를 방지할 목적으로 사용되고 있다.

〈표 3〉은 석탄회 연구 및 활용분야를 나타낸 것으로,¹⁾²⁾³⁾ 현재 국내의 석탄회 재활용 현황을 고려해 볼 때 재활용율이 지속적으로 증가하고 있으나 주로 플라이애쉬에 국한된 것으로 바텀애시나 신더애시 등에 관해서는 연구가 많이 이루어지지 않아 대부분을 매립·폐기하고 있는 실정이며, 플라이애쉬를 사용한 콘크리트에 대한 시공지침의 미비, 기술력 및 전문인력의 부족 등으로 활성화되지는 못하고 있는 실정이다.

4.2 국외의 연구 및 실용화동향

선진국의 경우에는 플라이애쉬 발생량의 약 60~80% 정도를 유효하게 재활용하고 있는데, 특히 최근에는 환경보존 및 자원의 유효이용 측면에서 대량 활용에 대한 연구가 더욱 활발히 이루어지고 있으며, 대부분의 국가에서 석탄회의 재활용율을 증대시키기 위하여 이에 대한 연구 및 시설투자뿐 아니라 법적인 규제도 장려하는 경우도 많다.

일본의 경우 1999년 日本建築學會에서 「플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 조합설

표 3. 석탄회 연구 및 활용분야

분 야	용 도	활 용 기 술 개 요
콘크리트분야	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시멘트 원료 ○ 콘크리트 혼화제 ○ 혼합시멘트 ○ 매스콘크리트 ○ 고강도콘크리트 ○ 고유동콘크리트 ○ 수로구조물 ○ 기포콘크리트 	<ul style="list-style-type: none"> - 시멘트원료중 점토대용으로 원료량의 4~5%대체 사용가능 - 시멘트에 5~20% 대체 사용 - 등급에 따라 5~30% 혼입가능 - 매스콘크리트에서의 수화열 저감효과 이용 - 수화열저감 및 장기강도의 증진효과 - 고유동콘크리트에서의 분체량 증진 및 점성부여 - 댐, 터널 등에 활용 - 기포콘크리트로 사용할 때 단열우수
건축분야	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인공경량골재 ○ 기와, 세라믹 ○ 시멘트 2차제품 	<ul style="list-style-type: none"> - 자갈대용으로 사용, 고층건축물의 경량화 가능 - 점토대용으로 사용 - 블록, 흙관, 전주 등 제조
토목분야	<ul style="list-style-type: none"> ○ 아스팔트 필러 ○ 路盤材 ○ 路床材 ○ 매립, 盛土用 ○ 충전재 ○ Grout 공사 	<ul style="list-style-type: none"> - 아스팔트 안정화와 골재 틈새 채움재 - 시멘트 안정처리 路盤, 석회 안정노반의 대체 - 한냉지 동상억제 또는 연약지반 도로용 토사의 대체 - 간척사업, 육상 저습지 매립 또는 盛土 매립 - 탄광, 抗內 충전재로 사용 - 터널매립, 보링구멍 매립재로 사용
농수산분야	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비료 ○ Compost ○ 인공 魚礁 	<ul style="list-style-type: none"> - 규산비료 원료 - 플라이애쉬를 단독 또는 유기폐기물과 혼합 토양개량제로 이용 - 플라이애쉬를 수지, 모래와 함께 성형 또는 탈황석고, 시멘트등으로 경화

계·시공지침(안)·동해설」을 제정하여 플라이애쉬 콘크리트의 활성화를 적극 도모하고 있으며, 또한 최근들어 HVFAC (High Volume Fly Ash Concr ete)라는 개념으로 플라이애쉬를 콘크리트에 다량 사용하는 연구가 구미 및 일본 등지에서 활발히 이루어지고 있다.¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁸⁾¹⁹⁾

HVFAC의 제조시스템은 크게 단위시멘트량에 대하여 대체하는 방법(內割: Replacement Method) 및 잔골재에 대한 대체하는 방법(外割 : Addition Method)의 두 가지 방법으로 나눌 수 있는데 구미의 경우 전자를, 일본의 경우에는 주로 후자의 방법으로 연구를 진행하고 있다.

각 사용방법에 따른 HVFAC의 시스템 및 특성을 살펴보면 다음과 같다.

1) 단위시멘트량에 대한 대체

(내할, Replacement Method)

이 방법은 단위 결합재량을 고정한 상태에서, 결합재의 일부를 플라이애쉬로 치환하는 방법으로서, 온도저감효과와 적당한 수준의 초기강도가 요구되는 매스콘크리트에서 사용하기 위해 처음 개발되었다.¹⁵⁾

내할치환 HVFAC의 제조는 일반적으로 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하여 제조하며, 간혹 3종(조강)시멘트를 사용하여 제조하기도 하는데, 시멘트의 물리·화

학적 특성에 따라 각각 다른 강도 및 내구 특성을 나타낸다. <그림 3>은 1종 및 3종 시멘트를 사용한 내할치환 HVFAC의 강도발현 예를 나타낸 것이다.¹⁵⁾

또한, 단위수량을 아주 적게 사용하기 때문에 적당한 시공성을 얻기 위해서는 반드시 고성능감수제를 사용하여야 하는데, 기존 연구결과¹⁵⁾에 따르면 나프탈렌계 고성능감수제로 충분한 효과를 발휘하는 것으로 나타났다.

<표 4>은 내할치환의 일반적인 배합 예를 나타낸 것으로서¹⁶⁾, 간혹 3종 시멘트나 C급 플라이애쉬를 사용하기도 한다.

내할치환 HVFAC의 배합은 요구되는 구조물의 시방특성이나 적용조건에 따라 다소 변경될 수 있으나, 일반적인 원칙은 ①가능한 플라이애쉬를 많이 사용하고, ② 고성능콘크리트의 특성을 만족시키기 위해 단위수량과 물결합재비를 가능한 낮추며,

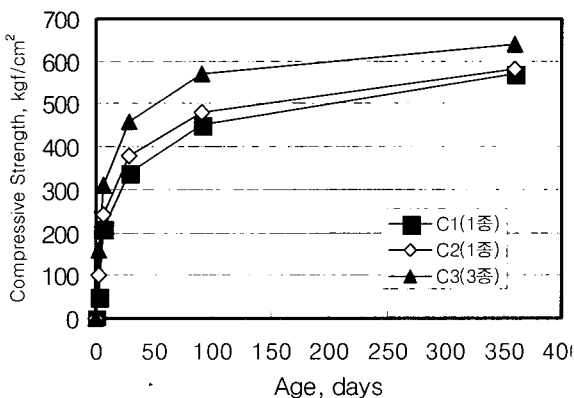


그림 3. 내할치환 HVFAC의 강도발현 특성¹⁵⁾

표 4. 내할치환 HVFAC의 배합예¹⁶⁾

분 류	28일 압축강도 (kgf/cm ²)	W/B (%)	FA (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	s/a (%)
저강도	150~250	39.7	57	115	125	41
보통강도	250~400	32.4	58	120	155	35
고강도	400~600	27.5	55	110	180	41

③적당한 워커빌리티를 얻기 위해 반드시 고성능감수제를 사용하는 것을 들 수 있다.

내할치환을 사용하는 경우에는 치환율이 증대할수록 단위시멘트량이 감소하기 때문에, 일반적으로 보통 포트랜드시멘트만을 사용한 콘크리트와 비교하여 특히 초기재령에 있어서 강도가 낮게 된다.

내할치환에서는 단위 결합재량이 일정한 조건하에서 석탄회를 사용하기 때문에 ①콘크리트를 구성하는 재료중에서 가장 코스트가 높은 시멘트의 사용량을 감소시키고, ②양질의 석탄회를 사용할 경우 유동성이 향상되며, ③고강도콘크리트와 같이 고분체계 콘크리트의 수화발열을 저감시킬 수 있다는 이점이 있다.

2) 잔골재에 대한 대체

(외할, Ad dition Method)

외할치환이란 단위 시멘트량과 단위수량을 고정한 상태에서(물시멘트비 고정) 잔골재의 일부를 플라이애쉬로 치환하는 방법으로서, 치환율이 증가함에 따라 물결합재비가 감소하게 된다.

외할치환에서는 플라이애쉬 사용량에 따라 물결합재비가 크게 변동하며, 보통콘크리트에서 고강도·고유동 콘크리트까지 광범위한 배합이 가능하다. 동시에 잔골재 체적도 크게 변동하기 때문에, 석탄회 사용량에 따른 각 재료의 사용량을 설정하고 콘크리트의 성상을 예측할 수 있는 배합을 확립할 필요가 있다. 외할치환의 배합 예를 살펴보면 <표 5>와 같다.¹⁸⁾

외할치환 방법의 가장 큰 장점은 플라이애쉬를 다량 치환함으로써 야기될 수 있는 초기강도 저하문제를 방지할 수 있다는 것이다. 즉, 잔골재 대체재로서 석탄회를

활용할 경우, 단위 시멘트량이 어느정도 확보되기 때문에 초기재령에서의 콘크리트 강도지연을 방지할 수 있으며, 조직이 치밀해지고 중성화속도가 감소하는 등의 장점이 있다.¹⁴⁾¹⁹⁾

<그림 4>는 외할치환 HVFAC의 강도발현특성을 나타낸 것으로, 치환율이 증대할수록 압축강도도 증가하고 있음을 알 수 있다.¹⁷⁾

또한, 최근 바다모래 채취에 관한 규제 및 천연자원의 고갈화에 따른 공급량의 한계로, 앞으로 바다모래에 대체할 수 있는 대체재의 개발이 크게 부각될 것으로 예상되며, 플라이애쉬를 잔골재 대체재로서 활용할 경우 바다모래 및 갯모래 등의 세척에 따라 손실되는 미립분을 보완할 수 있는 이점도 있다. 이외에도, 포졸란반응에 의한 강도증진 효과 및 조직의 치밀화에 의한 내구성의 향상이 기대되고, 강도에 관여하지 않는 부분에 대하여 비교적 이용률이 낮은 저분말도 석탄회로 치환할 수 있다는 이점이 있다.

일본의 경우, 이러한 방법으로 제조한 콘크리트의 실시공 사례도 발표되고 있는 등 실용화를 위하여 활발히 연구가 이루어지고 있다.²⁰⁾

5. 결론

최근, 전력사용량의 증가에 따라 발생되는 석탄회의 양도 꾸준히 증가하고 있으며, 이러한 석탄회 매립지의 부족 및 환경오염 등이 사회적으로 커다란 관심사로 대두되고 있다.

선진국의 경우 플라이애쉬 발생량의 60~80% 정도를 유용하게

재활용하고 있으며, 국가기관에서 정책적으로 재활용을 추진하고 있다. 특히, 최근에는 HVFAC라는 개념으로 플라이애쉬를 대량 콘크리트에 활용하기 위한 연구를 활발히 진행하고 있다.

국내의 경우에도 플라이애쉬 콘크리트에 관한 연구가 최근에 들어서 활발히 이루어지고 있으나 시공지침의 미비, 전문인력 및 기술력의 부족으로 활성화되지 못하고 있으며, 이에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다.

플라이애쉬를 콘크리트에 유효하게 사용할 경우, 작업성개선, 수화열감소, 알칼리골재반응 억제 및 장기강도 증진 등 콘크리트의 내구성을 향상시킬 수 있어, 자원의 재활용 및 환경오염의 방지라는 측면에서 플라이애쉬의 자원화개념을 조속히 정립시키는 것이 필요할 것으로 사료된다. □

참고문헌

1. 차동원 외, 한전의 석탄회 및 탈황석고 재활용 현황, 고성능콘크리트 국제 워크숍, 1999. 10.
2. 한전산업개발, 석탄회 재활용현황, kepido.co.kr
3. 이상수, 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 공학적특성 및 그 현장적용성에 관한 연구, 충남대학교, 2000. 2.
4. 김무한 외, 플라이애쉬를 대량 사용한 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 제12권 2호, pp.549~554, 2000.

표 5. 외할치환 HVFAC의 배합예¹⁸⁾

W/C (%)	W/B (%)	단위 중량(kg/m ³)				
		C	W	FA	S	G
65	65	285	185	0	747	1080
	55			51	683	1080
	45			126	587	1080
	40			178	521	1080
	35			244	435	1080

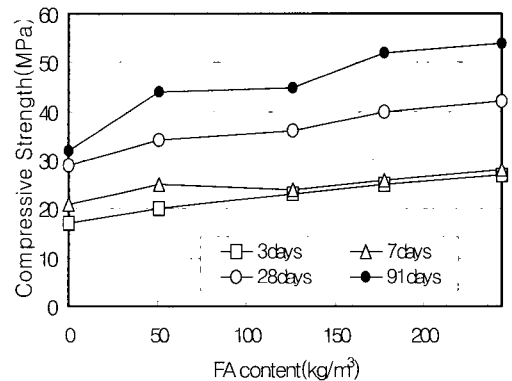
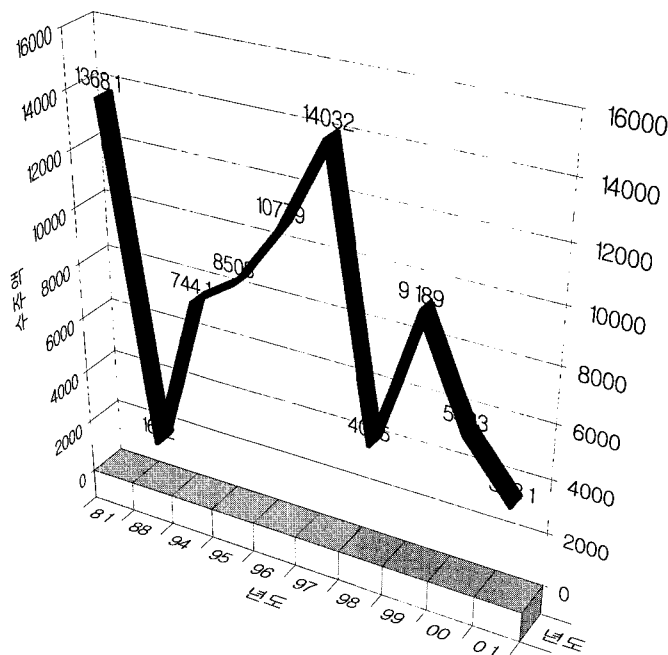


그림 4. 외할치환 HVFAC의 강도발현 특성¹⁷⁾

5. K. Wesche., Fly Ash in Concrete -Properties and Performance, Report of Technical Committee 67-FAB use of Fly Ash in Building, RILEM, 1991.
6. Standards Association of Australia, Supplementary Cementitious Materials for Use with Portland Cement, AS 3582.1, 1991.
7. 日本建築學會, フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説, 1999.
8. Davis R.E., Carlson R.W., Kelly J.W., and Davis H.E., Properties of Cement and Concrete Containing Fly Ash, ACI Journal, Proceedings, Vol.33, No.5, pp.577~612, 1973.
9. 수자원공사, 수로터널 라이닝시 요구되는 콘크리트의 물적특성에 관한 연구, 1998.
10. 소양섭 외, 플라이애쉬 골재 특성 및 콘크리트의 적용, 대한건축학회 학술발표논문집, 제18권제2호, pp.569~574, 1998. 10.
11. 원종필 외, 다량의 플라이애쉬를 사용한 저장도 고유동 충전재의 내구특성에 관한 연구, 콘크리트학회논문집, 제12권1호, pp.113~122, 2000.
12. 이진용 외, 플라이애쉬 함유량이 콘크리트의 공기전 성질 및 역학적 특성에 미치는 영향, 콘크리트학회논문집, 제11권6호, pp.25~33, 1999.
13. 김무한 외, 굵은골재 최대치수 및 용적비에 따른 고유동콘크리트의 유동특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 17권 1호, pp.107~112, 2001.
14. 최세진 외, 산업부산물인 Fly Ash의 라이닝콘크리트에의 적용에 관한 실험적 연구, 한국폐기물학회지, 제17권제4호, pp.505~511, 2000.
15. Carette, G.G., Bilodeau, A., Chevrier, R.L. and Malhotra, V.M., Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volume of Fly Ash from Sources in the U.S., ACI Materials Journal, Vol.90, No.6, pp.535~544, 1993.
16. A. Bilodeau and V.M. Malhotra, High-Volume Fly Ash System, International Workshop on high performance concrete utilizing supplementary cementitious materials, pp.43~64, 1999. 10.
17. 김영수 외, High-Volume 플라이애쉬 콘크리트의 동결저항성, 대한건축학회 학술발표논문집, 제19권제2호, pp.530~535, 1999.
18. 松藤 泰典 ほか, 石炭灰のコンクリートの大量使用に関する研究, 日本建築學會學術講演梗概集, pp.437~454, 1999. 9.
19. 友澤史紀 ほか, フライアッシュを細骨材の一部として使用したコンクリートに関する研究(その1~2), 日本建築學會大會學術講演梗概集, pp.77~80, 1997.
20. 馬越唯好 ほか, Ⅲ種フライアッシュを多量に用いたコンクリートの實構造物施工, コンクリート工學年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp.139~144, 1999.

<연도별 해외건설 수주 현황> (2001년 11월 30일 현재)



<자료 : 건설교통부>