

# 고분말도 플라이애시를 사용한 조기교통개방용 콘크리트개발 가능성 검토

## Possibility Examination for Early-Opening-to-Traffic Concrete Development using Ultra Fine Fly Ash

최판길\*                      전성일\*\*                      윤경구\*\*\*                      권수안\*\*\*\*  
Choi, Pan-Gil              Jeon, sung-Il              Yun, Kyong-Ku              Kwon, Soo Ahn

### 1. 서 론

공용중인 도로포장에 손상이 발생하여 유지보수가 요구되면, 우회도로를 가설하여 교통량을 우회시키는 방법과 교통을 차단하고 손상부위를 보수한 후 교통을 소통시키는 방법이 있을 수 있다. 우리나라와 같이 국토의 면적이 협소한 경우 우회도로의 가설은 현실적으로 어려운 경우가 많으며, 게다가 높은 지가상승률은 용지보상비에 대한 부담을 증가시켜 우회도로 가설에 악재로 작용한다. 또한 보수작업을 위해 교통을 차단하게 되면 교통체증을 야기하여 각종 민원을 발생시키고, 사용자 부담이 증가하게 된다. 그리하여 교통량이 적은 야간에 보수를 하는 경우가 많은데, 포장 보수 후 교통개방시간을 앞당기는 것이 무엇보다도 먼저 고려되어야 할 사항이다. 이러한 관점에서 Fast-Track 개념의 콘크리트포장도로 유지보수공법이 도입되기 시작하였고, 현재 초속경시멘트, 가열형 폴리우레탄, 폴리머 콘크리트 등이 유지보수재료로 적용되고 있으나 소파보수의 경우에 적용되는 경우가 많고, 가장 큰 단점으로는 콘크리트포장 보수체와의 재료적인 이질성으로 인하여 잦은 조기파괴가 발생한다는 것이다. 따라서 사용자 비용을 최소화하고 포장의 공용성을 확보하기 위해서는 조기교통개방이 필수적이며 보수재료는 모체콘크리트와의 재료적 동질성을 지녀야 한다.

본 논문에서는 콘크리트계 조기교통개방형 유지보수재료 개발을 목적으로 경제성이 우수한 조강시멘트를 사용하고, 고분말도의 플라이애시를 적용하여 내구성 향상을 꾀하였고, 추가적으로 최근 피해사례가 늘고 있는 알칼리골재반응 억제하도록 플라이애시의 적용가능성을 검토하였다.

### 2. 실험개요

#### 2.1 실험개요

본 연구의 최종적인 목표는 공용년수가 지나 노후화된 콘크리트포장을 단시간 내에 효율적으로 보수하기 위한 재료 및 공법개발에 있다. 콘크리트의 기초 내구성 향상과 최근 포장콘크리트에 피해사례가 증가하고 있는 알칼리골재반응을 억제하기위하여 플라이애시의 적용가능성을 검토하였다. 조기교통개방의 특성을 만족시키기 위해 기타 시멘트(초속경시멘트, 초조강시멘트)에 비해 경제성이 좋은 조강시멘트를 사용하였다. 개발 재료는 슬럼프 폼 페이버(Slip Foam Paver)를 이용한 공법적용을 목표로 슬럼프 범위를 2~5cm로, 재령 1일 압축강도를 21MPa이상으로 설정하였다.

본 연구에서는 플라이애시 분말도와 종류에 따른 적용성을 검토하기 위하여 2종류의 미국산 울트라파인플라이애시(Ultra Fine Fly Ash : 이하 UFFA)와 국산 UFFA 1종과 파인플라이애시(Fine Fly Ash : 이하 FFA) 1종이 적용되었다. 각각의 플라이애시 종류별 치환율(0, 10, 20%) 따른 특성을 평가하고 적용 가능한 범위에 대해 검토하였다.

\* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 (033-250-6240, E-mail : pangil@kangwon.ac.kr)  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원 · 공학석사 (031-919-5675, E-mail : jeonsi@kict.re.kr)  
\*\*\* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (033-250-6236, E-mail : kkyun@kangwon.ac.kr)  
\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 공학박사 (031-919-5675, E-mail : sakwon@kict.re.kr)



### 2.2 사용재료

#### 1) 시멘트

본 연구에서는 국내 S사에서 생산중인 조강시멘트를 사용하였다. 3종시멘트는 KS L 5201의 3종(조강) 포틀랜드시멘트의 규격을 만족하는 제품으로서 조강시멘트의 화학조성은 표 1과 같다.

#### 2) 플라이애시

플라이애시는 학술적으로 입자의 크기의 따라 FA(fly ash), FFA(fine fly ash), UFFA(ultra fine fly ash)로 분류할 수 있다. 현재 KS 기준과 비교하면 FA는 2종에, FFA는 1종에 분류할 수 있고, UFFA는 분류기준이 없는 상태이다. 미국의 텍사스 교통국에서는 ASTM C 618 class F 기준을 만족하고, 3.25 $\mu$ m 이하의 입자가 50%, 8.50 $\mu$ m 이하의 입자가 90% 이상인 플라이애시를 UFFA로 규정하고 있다. 본 연구에서는 플라이애시 입자크기를 기준으로 UFFA 3종과 FFA 1종을 사용하였다. 표 2는 플라이애시의 화학성분을 나타낸다.

#### 3) 골재

굵은골재는 최대치수 32mm와 19mm 쇠석골재를 중량대비 1.24 대 1로 섞어서 사용하였다. 최근 생산되고 있는 골재의 대부분은 KS 규정에 준하는 콘크리트용 골재의 입도분포곡선 내에 들지 못하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서도 적절히 골재를 혼합하여 입도분포곡선을 만족시키도록 하였다. 잔골재는 천연강모래를 사용하였으며, KS 규정에 맞는 골재를 물로 세척하여 사용하였다. 표 3은 골재의 물리적 성질을 나타낸다.

표 1. 조강시멘트 화학조성

Type	Chemical Composition (%)						분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	비중 (g/cm <sup>3</sup> )
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>		
3종시멘트	19.7	5.9	3.0	62.1	3	4.2	3,300	3.16

표 2. 플라이애시 종류별 화학조성

시험항목	국산(G사)		미국산(B사)	
	FFA(K)	UFFA(K)	UFFA(A1)	UFFA(A2)
밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.42	2.58	2.53	2.49
분말도	브레인방법(cm <sup>3</sup> /g)	6,934		6,710
	망체 방법(%)	8.18	0.30	0.47
SiO <sub>2</sub> (%)	50.2	49.4	49.7	54.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		27.5		23.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		8.43		4.85
CaO (%)	5.85	4.95	12.8	8.51
MgO (%)	1.48	1.621	2.35	1.97
SO <sub>3</sub> (%)	0.23	1.12	1.71	1.19
Na <sub>2</sub> O (%)	1.23		1.01	
K <sub>2</sub> O (%)	1.21		0.95	

\*FFA(K) : 국산 FFA, UFFA(K) : 국산 UFFA, UFFA(A1, A2):미국산 UFFA 2종

표 3. 골재의 물리적 성질

구 분	최대치수	비중	조립률
잔골재	-	2.54	3.28
굵은골재(32mm:19mm = 1.24:1)	32mm	2.75	5.92



표 4. 콘크리트 배합표

플라이애시 종류	치환율 (%)	W/B (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m <sup>3</sup> )							
				Fly Ash (kg)	C (kg)	W (kg)	S (kg)	G (kg)	AE감수제 (%)	고성능감수제 (%)	AE제
FFA(K)	0	41	34	0	390	161	591	1,175	0.50%	-	-
UFFA(A1)	10	41	34	39	351	161	584	1,162	0.50%	-	-
UFFA(A2)	20	41	34	78	312	161	578	1,150	0.50%	-	-
UFFA(K)	0	36	40	0	390	140	719	1,099	-	0.5%	1.0%
	10	36	40	39	351	140	699	1,068	-	0.5%	1.0%
	20	36	40	78	312	140	678	1,037	-	0.5%	1.0%

2.3 콘크리트 배합설계

콘크리트 배합설계는 단위결합재량을 390kg, 물시멘트비를 41%, 잔골재율을 34%로 고정하고 플라이애시 종류를 변화시켜가며 총 9배합에 대해 플라이애시 치환율에 따른 특성을 평가하였고, 국산 UFFA(K)와 고성능감수제를 첨가한 3배합에 대해 조기교통개방용 콘크리트에의 적용성을 평가하고자 하였다.

3. 실험결과

3.1 공기량

공기량은 강도 및 내구성에 영향을 미치는 중요한 인자 중 하나이다. 보통 콘크리트의 경우 공기량이 작으면 굳은 콘크리트에서 공극이 상대적으로 작게 되어 강도 및 투수저항성은 커지나 동해에 의해 발생하는 내부 인장응력에 대한 저항성이 적게 되어 동결융해 저항성 및 스킨링 저항성이 떨어지게 된다. 반면에 공기량이 많아지면 동결융해 저항성 및 스킨링 저항성이 증가하지만 굳은 콘크리트에서 공극이 상대적으로 증가하여 강도 및 투수저항성이 저하된다. 따라서 적정의 공기량을 유지하는 것이 중요하다.

조강 시멘트에 포졸란 계열의 플라이애시를 첨가하면 콘크리트 구조에서 플라이애시의 내부 충전의 영향으로 인해 공기량이 줄어들게 된다. 이렇게 줄어든 공기량을 적정공기량 범위로 끌어올리기 위해 AE제, AE감수제 또는 고성능AE감수제가 사용되곤 한다. 본 연구에서는 나프탈렌계열의 AE감수제와 AE제를 사용하여 공기량을 확보하고자 하였다.

그림 1은 플라이애시 종류에 따른 공기량 특성을 나타내는 그래프로써, 플라이애시 첨가로 인한 공기량 저하현상은 발생하지 않았다. FFA(K) 10%가 치환된 경우를 제외하고는 3.0%이하로 측정되었다. AE제가 1.0% 첨가된 배합에서도 역시 공기량은 확보되지 않았다. 따라서 다른 종류의 AE제를 사용하거나 AE제의 희석농도를 높이는 방법을 모색하여야 할 것으로 평가되었다.

3.2 슬럼프

본 연구의 콘크리트 목표슬럼프는 슬럼프 페이퍼를 이용한 콘크리트포설을 목적으로 2~5cm 범위로 설정하였다. 그림 2는 플라이애시 종류별 치환량 변화에 따른 초기슬럼프를 나타내는 그래프로써, 플라이애시가 첨가되지 않은 조강콘크리트는 1cm로 나타났다. 플라이애시가 첨가되면서 초기슬럼프가 증가하였고, UFFA(A1)를 사용한 변수에서 슬럼프 증가현상이 뚜렷이 나타나 물시멘트비를 줄일 수 있는 요인으로 작용하였다. 반면에 UFFA(A2)를 사용한 변수에서는 슬럼프 증가폭이 다소 작은 것으로 나타났다. 국산 FFA(K)를 사용한 변수에서는 시멘트중량대비 10% 치환된 경우에는 3cm로 슬럼프가 증가하였고, 20% 치환된 경우에는 배출콘크리트의 상태는 양호하였으나 3cm로 동일한 슬럼프를 보였다.

이상의 결과에서 플라이애시 종류별 초기슬럼프 특성은 UFFA(A1)로 치환의 경우 동일슬럼프 조건에서 물시멘트비 저감을 통한 강도 및 내구성 개선이 가능할 것으로 사료되며, UFFA(A2)와 FFA(K)로 치환된 경우에는 슬럼프 증가폭이 다소 작아 배합변경의 여지는 없는 것으로 평가되었다.

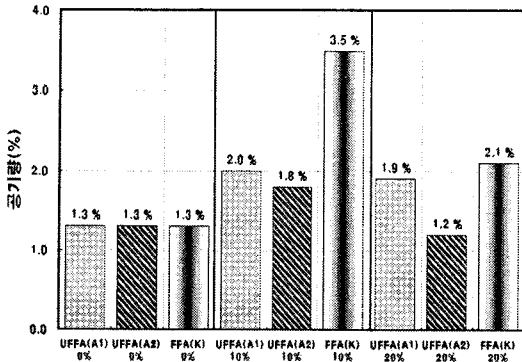


그림 1. 플라이애시 종류 및 치환율에 따른 공기량

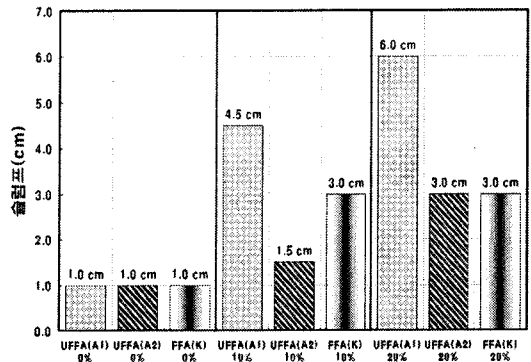


그림 2. 플라이애시 종류 및 치환율에 따른 초기 슬럼프

### 3.3 압축강도

#### 1) 플라이애시 종류에 따른 압축강도 특성

플라이애시는 포졸란 재료이므로 초기강도는 저하되고 장기강도는 증진되는 특성을 갖는다. 따라서 조기통개방용 콘크리트에 적용하기에는 적합하지 않다. 그러나 이러한 이론은 일반적인 1종 플라이애시가 적용되었을 경우에 해당되므로, 입자의 크기가 작은 고분말도의 UFFA 혹은 FFA가 적용되었을 때는 강도발현 메커니즘이 다르게 일어날 수 있다고 가정할 수 있다. 그러나 고분말도의 UFFA를 적용해 본 결과 강도증진 현상은 확인할 수 없었지만, UFFA(A1)이 적용된 일부의 경우를 제외하고는 현격한 초기강도 저하현상은 나타나지 않았다. 이러한 결과는 UFFA가 조기교통개방형 콘크리트에 사용될 수 있음을 나타내는 결과라 할 수 있다.

그림 3은 UFFA(A) 타입의 플라이애시가 사용된 콘크리트의 압축강도를 나타내는 그래프로써, UFFA(A)가 10, 20% 치환된 경우 1일강도 확보를 위해서는 별도의 방안이 마련되어야 하며, 폴리카본산계 고성능AE감수제의 사용이 추천될 수 있다. 플라이애시 치환율에 따른 강도발현 특성에서는 특이할만한 강도특성이 나타나지는 않았다.

그림 4는 UFFA(A1), UFFA(A2) 및 FFA(K)가 적용된 조강콘크리트의 재령별 압축강도를 나타내는 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 국산 FFA(K)가 적용된 경우에 강도저하 폭이 가장 작은 것으로 나타났다. 따라서 국산 FFA(K)를 UFFA 수준으로 개량하면 보다 좋은 성능을 발휘할 것으로 기대되었다.

최적 조건의 콘크리트 배합을 찾기 위해서는 강도특성, 균열저항성 및 기초내구성 실험을 통해 성능을 평가하여야 하지만, 이상의 실험결과를 통해 국산 FFA(K)의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

#### 2) 플라이애시 종류별 치환율에 따른 압축강도특성

그림 4는 플라이애시 치환율이 10%인 경우의 플라이애시 종류별 압축강도를 나타내는 그래프이다. 재령 1일 압축강도에서 국산 FFA(K)가 적용된 변수가 17MPa로 가장 높게 평가되었다.

그림 5는 플라이애시 치환율이 20%인 경우의 플라이애시 종류별 압축강도를 나타내는 그래프로써, 10% 치환된 경우와 마찬가지로 국산 FFA(K)에서 가장 양호한 강도특성을 보이고 있다. 그러나 전반적인 1일 강도가 교통개방 가능기준인 21MPa보다 작게 평가되어 고성능AE감수제를 사용하는 등의 배합개선이 요구되었다.

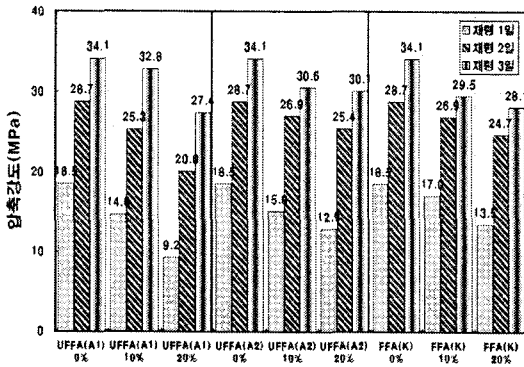


그림 3. 플라이애시 종류 및 치환율에 따른 압축강도

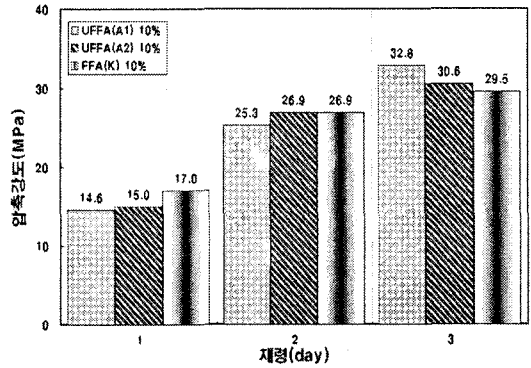


그림 4. 플라이애시 종류에 따른 압축강도 (10% 치환)

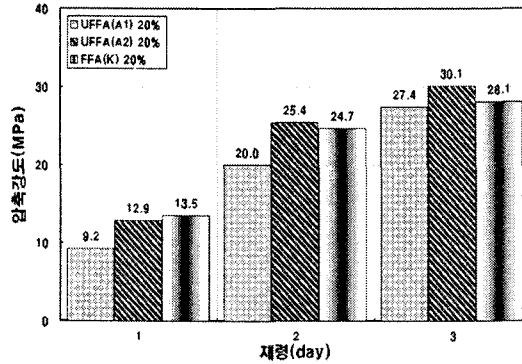


그림 5. 플라이애시 종류에 따른 압축강도 (20% 치환)

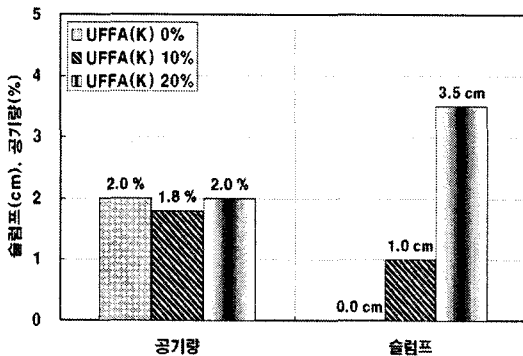


그림 6. UFFA(K)-공기량, 슬럼프

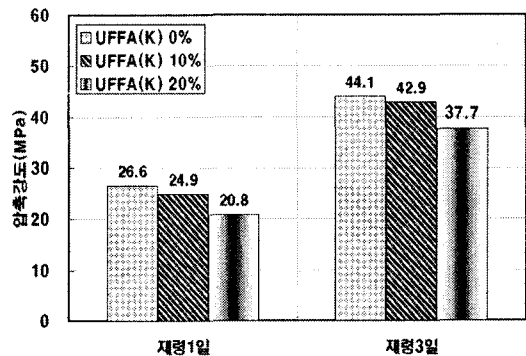


그림 7. UFFA(K)-압축강도

### 3.4 UFFA(K) 실험결과

앞서 수행된 플라이애시 종류에 따른 기초실험을 토대로 국산 FFA(K)를 개량하여 UFFA 수준으로 분말도를 증가시킨 플라이애시 UFFA(K)를 적용하여 콘크리트 배합을 실시하였다. 더불어 고성능감수제를 첨가

하여 강도증진을 모색하였고, AE제 첨가량을 1.0%로 증가시켜 적정공기량을 확보하고자 하였다. 배합개선을 통해 콘크리트의 재령 1일 압축강도는 현저하게 증가하였고, 플라이애시가 치환되지 않은 조강콘크리트의 재령 1일 강도는 26.6MPa로 측정되었고, 10, 20% 치환된 경우도 목표 강도를 만족하는 것으로 평가되었다.

UFFA(K) 첨가를 통한 콘크리트내부 밀실효과로 압축강도 증진을 모색하였지만, 초기강도가 저하되는 현상을 제어하지는 못했다. UFFA(K)로 20% 치환된 경우 콘크리트 배합은 단위시멘트량이 312kg으로 그리 크지 않음에도 불구하고 재령 1일 강도가 확보되었다는 점이 본 실험에서 얻을 수 있는 가장 큰 성과라 하겠다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 노후화된 콘크리트포장을 단시간 내에 효율적으로 보수하기 위한 Fast-Track 개념의 콘크리트포장 보수재료를 개발하기 위하여, 경제성이 좋은 조강시멘트의 사용을 검토하였고, 최근 피해사례가 증가하고 있는 알칼리골재반응의 억제와 콘크리트 내구성 향상을 위해 고분말도의 플라이애시의 적용성을 검토하였다. 이상에 대한 결론을 간략히 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고분말도의 플라이애시(UFFA)를 적용하여 콘크리트 내부 밀실효과를 통해 초기강도 증진을 모색하였으나, 플라이애시가 첨가되지 않은 콘크리트와 비교하여 압축강도 증진현상은 확인되지 않았다.
- 2) 국산 FFA(K)가 적용된 콘크리트의 재령 1일 압축강도저하 폭이 다소 작게 평가되어 조기교통개방용 콘크리트에의 적용가능성이 확인되었다.
- 3) 국산 FFA(K)를 UFFA 수준으로 분말도를 조절하고, 고성능감수제를 첨가하여 물시멘트비를 저감시킨 결과 UFFA(K) 10%, 20% 치환된 변수에서 공히 재령 1일 압축강도가 목표 강도를 만족하는 것으로 나타났다.
- 4) 현재 사용되고 있는 나프탈렌 계열의 고성능감수제 전용 AE제(바인더 대비 1.0% 첨가)로는 적정공기량을 확보할 수 없으므로, 전용 AE제의 농도를 조절하거나 다른 종류의 AE제 사용을 통하여 공기량을 조절할 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 CTRM 연구과제, “장수명·친환경 도로포장 재료 및 실계시공기술 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. KS L 5405, “플라이 애시”
2. ASTM C 618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”
3. Davis, R. E. (1954), “Pozolanic Materials with Special Reference to Their Use in Concrete Pipe”, Tech, Memo, Am. Concrete Pipe Assoc., Vienna, Va.
4. Haque, M. n., and Kayali, O. (1998), “Properties of High-Strength Concrete Using a Fine Fly Ash”, Cem. Concr. Res., 28(10), 1445-1452
5. Karthik, Obla (2000), “Durability of Concrete Containing Fine Pozzolan”, International HPC Symposium in Orlando, Florida
6. NCHRP (2005), “Guidelines for Early-Opening-to-Traffic Portland Cement Concrete for Pavement Rehabilitation” Report Number 540, TRB.
7. Texas Department of Transportation, “Quality Monitoring Program Requirement”