

# 석탄재가 혼입된 콘크리트 강도발현에 관한 연구

배성용  
(주)미산건설

## An Experimental Study on Strength Development of Concrete Including Fly Ash

SUNG-YONG BAE

Civil Department, Construction of Mi-San 332-9 Dae-Myeung Nam-Gu, Taegu 705-039, Korea

**KEY WORDS:** Fly ash 석탄재, Strength development 강도발현, Chemical activation 촉진제, Slump 유동성, Air content 공기량, Short term strength 조기강도

**ABSTRACT:** The main objectives of this study are to carried out in order to evaluate strength development of Fly Ash concrete containing various amounts of Fly Ash such as 0%, 10%, 20% and 30%. The experimental variables included in this test program consist of content of Fly Ash, concrete strength and chemical activation. As Fly Ash content increases, air content, strength development of concrete and slump loss of normal strength concrete were gradually decreased. The inclusion of  $Na_2SO_4$  increased the short-term strength of concrete that contains Fly Ash. In addition, the strength development of concrete that contains Fly Ash and  $Na_2SO_4$  were improved.

### 1. 서 론

화력발전소에서 석탄을 연소할 때 발생하는 플라이애쉬는 산업폐기물로서 막대한 처리비용과 매립장의 부족 등은 여러 가지 문제점을 야기되고 있으며, 외국의 경우 플라이애쉬를 콘크리트의 혼화재로 사용함으로써 원가절감 및 더불어 콘크리트의 품질을 향상시키는데 사용하고 있다. 앞으로 화력발전소에서 발생하는 플라이애쉬를 처리문제가 해결해야 할 당면 과제로 직면하고 있는 실정이다. 특히, 자원절약과 재활용촉진에 관한 법률에 의하면 산업부산물인 플라이애쉬를 재활용 할 수 있도록 규정하고 있다. 국내에서는 연간 2,600만톤 정도의 플라이애쉬가 생산되었으며, 재활용량은 약 15%로 일본과 미국은 40%, 이탈리아와 벨지움은 각각 60%, 70%에 비해서 상당히 떨어져 있으며, 2,000년대에는 플라이애쉬의 생산량이 4,000만 톤으로 예상하고 있어 재활용 촉진을 위한 기술개발이 절실히 요구되고 있다. 플라이애쉬는 인공포졸란에 속하며, 그 자체는 수경성이 없으나 실리카성분이 석회와 시멘트의 수화 생성물인 수산화칼슘과 상온에서 서서히 반응하여 안정된 불용성화합물을 생성하여 경화하는 성질을 가지고 있다. 양질의 플라이애쉬는 콘크리트에 혼화재로 사용함으로써 굳지 않은 콘크리트의 작업성을 개선하며, 수화열을 적게 발생시킨다.(권중현, 1998; 오병환, 1991; 한국전력공사 1994) 경화된 콘크리트는 장기강도의 증가, 수밀성, 내약품성의 향상 및 건조수축을 감소시키는 성질을 가지고 있다.(오성원, 1996; Popovics 1986; ACI Committee 226; Hague, 1984) 최근, 해양콘크리트구조물이 증가하여 해수의 물리·화학적 작용에 따라 성능이 우수한

콘크리트가 필요한 실정이다. 콘크리트구조물에 플라이애쉬를 사용하므로써 콘크리트의 특성에 영향을 미치는 요인들을 고찰하고, 콘크리트에 플라이애쉬를 혼입량에 따른 조기강도발현이 늦어 촉진제를 첨가하여 조기강도 및 장기강도특성을 비교 분석한다. 또한, 플라이애쉬를 사용할 수 있는 기초자료로 제 공하고자 한다.

### 2. 실험개요

#### 2.1 실험 재료

플라이애쉬의 화학성분은 KSF 4049와 KSL 5405에 각각  $SiO_2$  가 45%이상,  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  는 70%이상으로 요구되고 있다. 국내에서 발생하는 플라이애쉬의 화학적 성질은 Table 1에 나타낸바와 같이  $SiO_2$  량은 50%이상이며,  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  의 양도 80%이상을 나타냄으로 화학적 성분은 KS규정을 만족하고 있다. Table 1에 물리적인 성질을 보통포틀랜드시멘트와 플라이애쉬를 비교하였으며, KSF 4049의 규정을 만족하고 있다. 플라이애쉬 비중은 시멘트비중보다 높게 측정되었으며, KSL 5201규정에 따라 Blaines의 공기투과방법에 의해 측정된 비표면적으로 규정한 플라이애쉬의 분말도는  $3400\text{ cm}^2/\text{g}$  으로 측정되었다. 골재는 충청남도 금강하류에서 채취한 잔골재를 사용하였으며, 굵은골재는 최대크기가 19mm인 쇄석을 사용하였다. 잔골재 및 굵은골재의 특성을 Table 2에 나타내었다. 작업성을 고려하여 동일한 슬럼프 18±2.5cm를 유지하기 위해, 혼화제는 고성능감수제를 사용하였다.

**Table 1** Chemical properties of cement and fly ash

Class	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> (%)	Ig. Loss (%)	Density	Specific surface (cm <sup>2</sup> /g)
Cement	20.6	5.6	3.3	63.1	3.4	2.1	1.2	3.15	3,150
Fly Ash	52.1	25.4	12.9	2.6	1.4	0.1	3.7	2.12	3,400

**Table 2** Physical properties of aggregates

Class	Density	Absorption (%)	Fine modules	Bulk unit (kg/m <sup>3</sup> )
Fine aggregate	2.61	1.2	2.58	1,512
Coarse aggregate	2.24	0.3	7.42	1,552

**Table 3** Mix ratios of concrete

Design strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Mixtures	Mix proportions (kg/m <sup>3</sup> )						
		W/B	Water	Binder		Fine aggregate	Coarse aggregate	Admixture
				Cement	Fly Ash			
240	24FA0	0.542	201	371	0	628	1,077	3.71
	24FA10			333.9	37.1			
	24FA20			296.8	74.2			
	24FA30			259.7	111.2			
	N24FA10	0.542	201	333.9	37.1	628	1,077	3.71 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1.5%)
	N24FA20			296.8	74.2			
	N24FA30			259.7	111.2			
600	60FA0	0.315	164	520	0	728	937	10.4
	60FA10			468	52			
	60FA20			416	104			
	60FA30			364	156			

**2.2 콘크리트 실험**

시멘트와 플라이애쉬를 투입하여 건 비빔을 90초간 한후, 배합수를 첨가하여 120초간 배합을 실시하였다. 콘크리트의 재령별 강도를 측정하기 위해 재령별 원형공시체  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  를 3개씩 제작하였다. 콘크리트의 양생은 습윤양생을 실시하였으며, 양생후 재령에 따라 공시체 연마기로 연마후, KSF 2405의 규정에 따라 압축시험기를 사용하여 콘크리트의 압축

강도를 측정하였다

**2.3 콘크리트배합비**

플라이애쉬 첨가량에 따라 콘크리트의 강도증진을 분석하기 위해 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트의 기본배합으로 선택하였다. 플라이애쉬의 첨가에 따른 조기강도 감소를 고려하여 조기에 포졸란반응을 촉진시켜 강도발현 목적으로 촉진제

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 1.5% 첨가하여 보통강도콘크리트의 배합비에 첨가하였다. 플라이애쉬의 첨가량에 따른 강도특성을 분석하기 위해 단위시멘트량에 10%, 20%, 30%의 중량비로 플라이애쉬를 대체하여 플라이애쉬콘크리트를 제조하였으며, 플라이애쉬첨가량에 따른 콘크리트의 압축강도를 분석하기 위해 조기재령(3일, 7일)과 장기재령(28일, 90일)으로 구분하여 실험을 수행하였다. Table 3에 나타난 배합명의 첫 번째 기호 N은 플라이애쉬 첨가에 따른 조기강도를 높이기 위해 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1.5%첨가한 배합비를 의미하며, 두 번째 기호는 24와 60은 콘크리트의 압축강도가 240kgf/cm<sup>2</sup>과 600kgf/cm<sup>2</sup>를 나타낸다. 그리고 세 번째의 기호는 플라이애쉬의 첨가량을 의미한다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 공기량 및 슬럼프손실

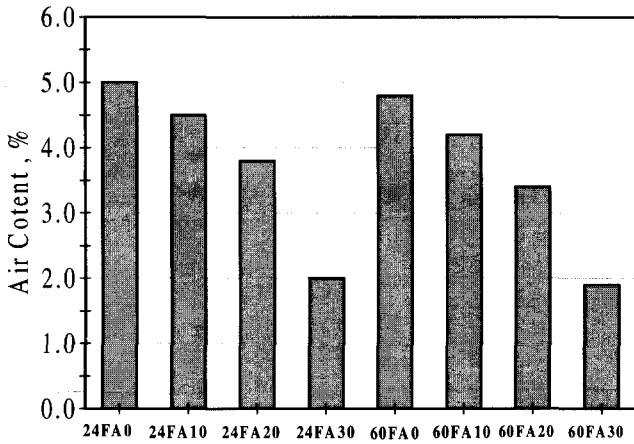


Fig. 1 Air content of Fly Ash concrete

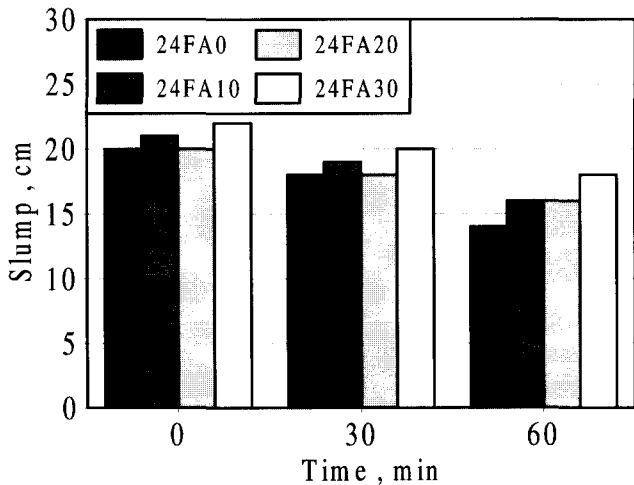


Fig. 2 Slump variation of fly ash concrete (240kgf/cm<sup>2</sup>)

Fig. 1은 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트에 플라이애쉬 첨가량에 따라 공기량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이 원인은 플라이애쉬내의 미연탄소분이 많아 공기량을 감소시키는 것으로 분석된다.(Ravina, 1986) Fig. 2와 Fig 3에 나타낸바와 같이 플라이애쉬 대체량이 증가할수록 시간경과에 따른 슬럼프손실은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 고강도콘크리트는 보통강도콘크리트보다 단위시멘트량이 많아 슬럼프손실이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 앞으로, 양질의 플라이애쉬를 생산할 경우, 공기량 및 시간경과에 따른 슬럼프손실을 감소함으로써 현장 작업성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

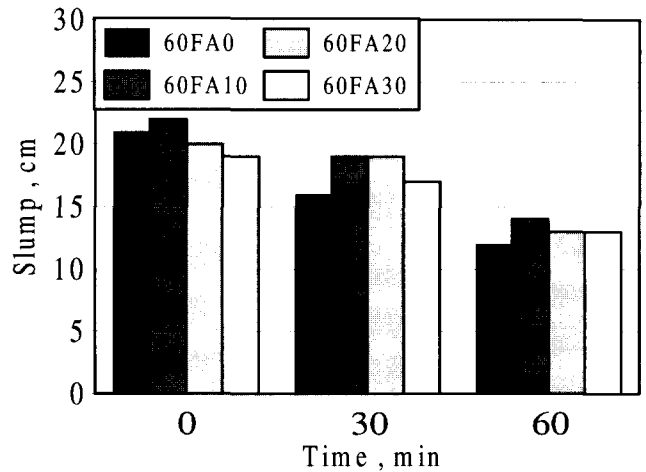


Fig. 3 Slump variation of fly ash concrete (600kgf/cm<sup>2</sup>)

#### 3.2 플라이애쉬 혼입량 및 재령에 따른 강도발현

플라이애쉬가 첨가된 콘크리트의 압축강도는 조기재령에서는 첨가되지 않은 콘크리트보다 강도발현이 지연되지만, 지속적인 포졸란반응으로 인하여 플라이애쉬가 첨가된 콘크리트는 장기강도가 높아지게 된다고 보고되고 있다.(오병환, 1991; Popovis, 1986) 콘크리트의 강도발현은 플라이애쉬의 품질, 첨가량 및 양생방법등에 따라 차이가 있다. Fig. 4와 Fig. 5는 플라이애쉬첨가량 및 양생재령에 따라 콘크리트의 압축강도발현을 나타내었다. 보통강도 및 고강도콘크리트는 플라이애쉬가 첨가량이 많을수록 조기강도발현이 낮은 것으로 측정되었다. 플라이애쉬의 첨가량이 10%일 때, 보통콘크리트의 3일 강도 및 7일 강도비는 0.88과 0.92로 약간 낮게 측정되었으나, 장기강도(90일)인 경우, 플라이애쉬의 첨가량이 10%인 콘크리트가 강도발현비 1.03배정도 높게 측정되었다. 그러나 플라이애쉬의 첨가량이 30%일 때는 보통콘크리트강도와 고강도콘크리트의 둘 다 조기강도 및 장기강도가 낮게 측정되었다. 보통콘크리트와 고강도콘크리트의 강도발현비는 Fig. 6과 Fig 7에 비교 분석하였다. 플라이애쉬를 소비 촉진시키기 위해서는 강도발현을 위한 촉진제개발이 시급한 실정이다. 플라이애쉬를 첨가한 보통콘크리트강도와 고강도콘크리트의 인장강도는 28일 압축강도의 약  $\frac{1}{9}$  ~  $\frac{1}{11}$  정도로 Fig. 8과 같이 측정되어 보통콘크리트와 유사하게 측정되었다.

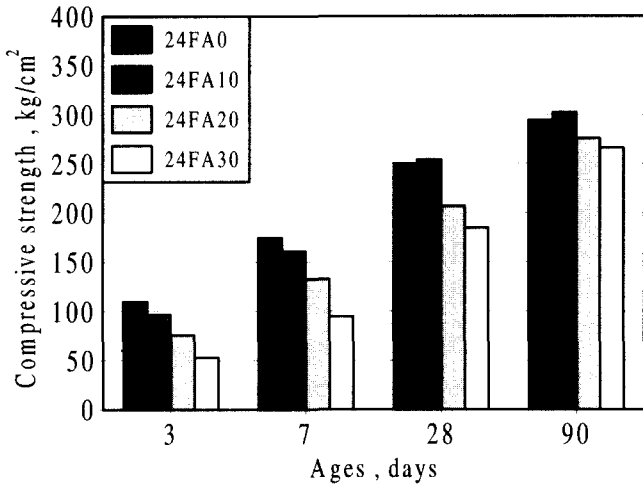


Fig. 4 Strength development of fly ash concrete (240kgf/cm<sup>2</sup>)

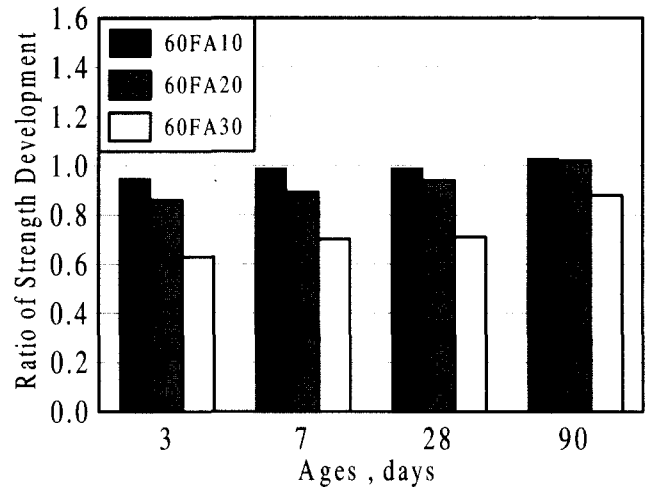


Fig. 7 Ratio of strength development of fly ash concrete (600kgf/cm<sup>2</sup>)

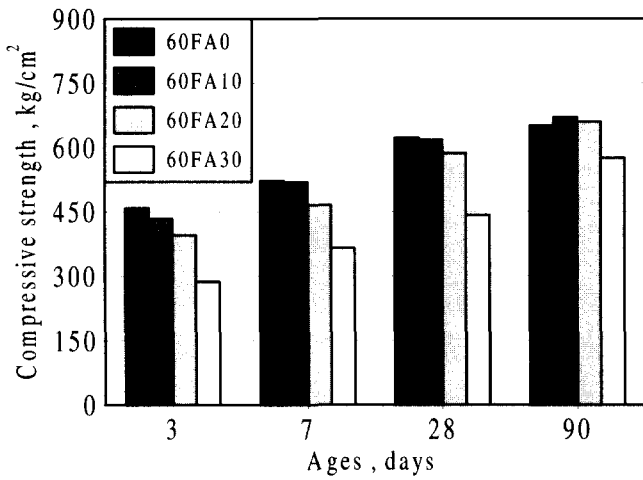


Fig. 5 Strength development of fly ash concrete (600kgf/cm<sup>2</sup>)

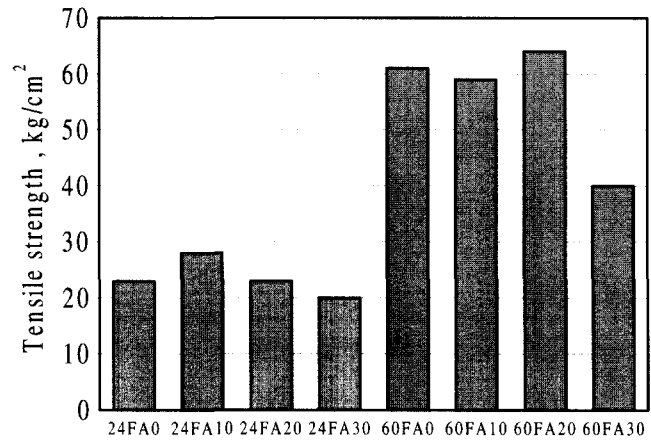


Fig. 8 Tensile strength of fly ash concrete

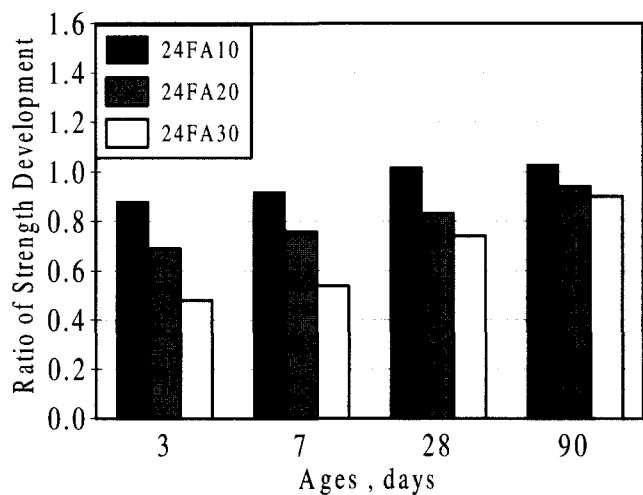


Fig. 6 Ratio of strength development of fly ash concrete (240kgf/cm<sup>2</sup>)

### 3.3 촉진제의 첨가에 따른 강도발현

플라이애쉬가 첨가량(10%, 20% 및 30%)에 따라 조기강도가 낮아지는 단점을 해결하기 위해 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 촉진제를 1.5% 첨가하여 이에 따른 조기강도 및 장기강도를 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 촉진제를 1.5% 첨가한 플라이애쉬 콘크리트는 조기에 포졸란반응을 촉진시켜 조기강도증진효과가 있었으며, 장기강도는 오히려 낮아지는 것이 측정되었으며, Fig. 10에 촉진제를 첨가한 플라이애쉬콘크리트의 강도발현비를 나타내었다. 이는 조기에 C<sub>3</sub>S의 급격한 수화작용과 시멘트 주위의 기포에 팽창현상이 가속화되어 내부균열이 증가한 것으로 분석된다. 황산염성분을 가진 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 촉진제는 Etringite를 생성함으로써 플라이애쉬가 첨가된 콘크리트의 조기강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.(Caijun, 1995; Swamy, 1983) 특히, 장기강도 발현은 저하되는 것을 Fig. 10에서 알 수 있다. 플라이애쉬 첨가량에 따른 최적의 촉진제첨가량을 결정되어야 할 것으로 판단된다.

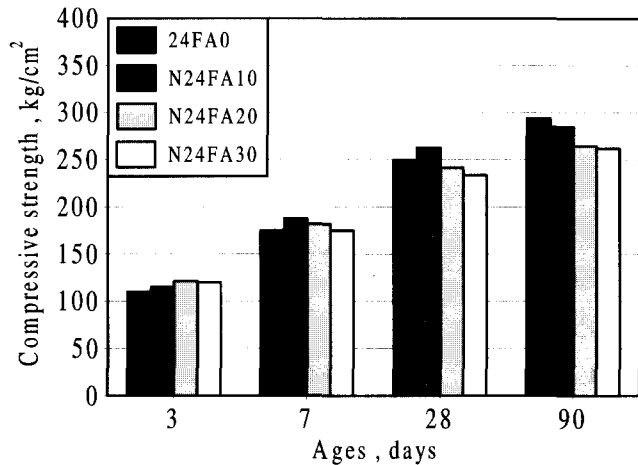


Fig. 9 Strength development of fly ash concrete including Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

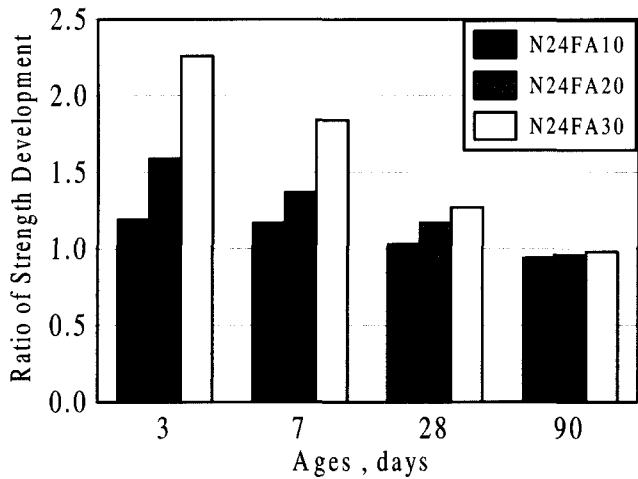


Fig. 10 Ratio of strength development of fly ash concrete including Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

#### 4. 결 론

보통강도콘크리트와 고강도콘크리트에 플라이애쉬 및 촉진제를 첨가한 콘크리트의 실험결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 플라이애쉬의 첨가량이 증가할수록 공기량이 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 플라이애쉬내에 포함된 미탄소연소분이 영향을 미치는 것으로 판단되며, 공기연행제를 적절하게 첨가해야 할 것으로 분석된다.
- (2) 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트에 플라이애쉬의 첨가량이 증가할수록 초기강도의 발현은 낮게 측정되었으며, 플라이애쉬가 첨가된 콘크리트는 장기강도의 발현이 향상되었다.
- (3) 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트인 경우, 플라이애쉬의 첨가량을 10%로 대체하면 초기강도 및 장기강도에는 콘크리트 특성의 영향에 문제가 없을 것으로 분석되며, 시멘트량을 플라이애쉬 10%정도 대체하면 경제적인 콘크리트제품을 생산할 수

있을 것으로 판단된다.

(4) 플라이애쉬 첨가량이 증가할수록 콘크리트의 초기강도는 낮아지므로 황산염성분을 가진 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 촉진제를 첨가하면, 포졸란 반응을 촉진시켜 낮은 초기강도를 발현할 수 있을 것으로 판단된다.

(5) 황산염성분을 가진 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 촉진제첨가에 따른 내약품성 및 황산염등의 열화실험이 추가적으로 필요하며, 플라이애쉬의 품질개선 및 품질의 규격화가 이루어져야 할 것이다.

향후, 항만콘크리트구조물에 플라이애쉬를 적절하게 첨가하면 열악한 환경조건도 우수한 품질의 콘크리트를 생산할 수 있을 것으로 판단되며, 촉진제를 첨가한 플라이애쉬콘크리트는 강도면에서는 안전측이나 철근부식, 내황산염 및 동결융해작용에 의한 콘크리트의 내구성실험이 선행되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

김진근, 박연동, 성근열(1991). "고강도 플라이애쉬콘크리트의 장기강도특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회지. 제3권 4호, pp 107~115.

권중현, 배기성(1998). "Fly Ash를 사용한 수중불부리 콘크리트의 유동성에 관한 연구" 한국해양공학회지, 제12권, 제1호, pp 153~161.

서정우(1998). "플라이애쉬를 혼화재로 사용한 콘크리트의 실용화를 위한 연구" 석사학위논문, 한양대학교 토목공학과.

이진용, 배성용(1998). "증기양생이 플라이애쉬콘크리트 강도발현에 미치는 영향", 한국콘크리트학회지. 제10권 1호, pp 101~108.

오병환, 고재균(1991). "플라이애쉬콘크리트의 강도 및 역학적 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회지. 제3권 2호, pp 87~95.

오성원(1996). "석탄회(Fly ash)처리 현황과 대책", 석탄회 활용 국제워크숍, pp 8~9.

한국전력공사 환경관리처(1994). "석탄회 및 탈황석고활용국제 워크숍".

ACI Committee 226(1985). "Use of Fly ash in Concrete", Committee Report.

Caijun Shi and Robert L. DAY.(1995). "Acceleration of the Reactivity of Fly Ash as Chemical Activation", Cement and Concrete research, Vol. 25, pp 15~21.

Fraaya L. A.(1989). "The Reaction of Fly Ash in Concrete", Cement and Concrete research, Vol. 19, pp 235~246.

Hague. M. N.(1984). High Strength Fly Ash Concrete", ACI Journal, Jan-Feb.

Hague. M. N. and Goplan. M. K.(1986). "Strength Development of inadequately cured high Fly Ash Cement and Structural Concrete", Cement and Concrete Research. Vol. 16, pp 281~298.

Mukherjee, P. K., Loughborough, M. T., and Malhotra, V. M.(1983). "Development of High-Strength Concrete

- incorporating a large Percentage of fly Ash Concrete and Superplasticizers”, Cement, Concrete and Aggregates, 4; pp 81~86.
- Popovics, S.(1986). “What Do We Know about the Contribution of Fly Ash to the Strength of Concrete ?”, ACI SP-91.
- Ravina. D. and Methta. P. K.(1986). “Properties of Fresh Concrete Containing Large Amount of Fly Ash”, Cement and Concrete research, Vol. 16, pp 227~238.
- Swamy, R. N.(1983). “Early Strength fly Ash Concrete for structural Application”, ACI Journal, Sep-Oct.
- 
- 2000년 5월 25일 원고 접수  
2000년 7월 7일 수정본 채택