

# 플라이애쉬 콘크리트의 동결융해저항성에 관한 연구

배 성 용  
(주)미산건설

## An Experimental Study on Freezing and Thawing Resistance of Fly Ash Concrete

SUNG-YONG BAE

Construction of Mi-San, Taegu, 705-039, Korea

**KEY WORDS:** Fly ash 플라이애쉬, Freezing and thawing action 동결융해작용, Air-entrained admixtures 공기연행제, Freezing and thawing resistance 동결융해저항성

**ABSTRACT:** It is generally known that the concrete structure subjected to severe environment is much affected by the corrosion of reinforcement, the freezing and thawing action of concrete structure. The main objective of this study is to investigate the freezing and thawing resistance of concrete including fly ash. The effect of the air content in concrete using fly ash is investigated. The experimental study is conducted for 10 mix-ratio cases of concrete of which variables are content of fly ash, concrete compressive strength and containment of air-entrained admixtures. Test results show that the freezing and thawing resistance improves as the amounts of fly ash increase, and concrete with air-entrained admixtures has good freezing and thawing resistance. The concrete with fly ash is to be included air-entrained admixture according to content of fly ash in order to increase the freezing and thawing resistance.

### 1. 서 론

해수환경 및 하수처리장과 같은 열악한 환경에 노출된 콘크리트 구조물은 철근부식(steel corrosion), 황산염에 의한 피해, 동결융해(freezing and thawing)의 작용 등에 의해 콘크리트구조물의 성능저하(deterioration)현상이 발생되고 있다. 특히, 콘크리트구조물 내부에 존재하고 있는 수분이 동결융해작용을 받아 팽창압력이 발생하여 콘크리트 표면의 균열과 층분리가 발생되어 콘크리트 내부로 진전되는 얼음층에 의해 콘크리트 구조물에 국부적인 응력집중에 의한 영향으로 콘크리트 구조물의 파괴까지 진행이 시작된다. 따라서 열악한 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 동결융해 저항성을 향상시키기 위해서는 혼화재(플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카흄등)를 첨가하여 지속적인 포졸란반응에 의해 콘크리트 내부에 수분침투를 억제시켜야 한다(최세규 등, 1997; 정용 등, 1992; Popovics, 1986). 이들 혼화재들은 산업부산물로서 콘크리트재료로 사용시 자원을 재활용측면과 경제적인 측면에서 이점이 있다. 플라이애쉬를 첨가한 콘크리트에 관한 우수성은 기존의 연구결과에 의해 입증된바 있으며(이진용 등, 1999; 오병환 등, 1991), 내구성측면에서는 일부 연구를 수행하고 있으나 연구실적이 부족한 실정이다. 최근 들어 콘크리트구조물의 기능을 유지하기 위해서는 콘크리트 구조물의 수명기간동안에 노출되는 환경에 적절히 잘 견디어야 하며, 콘크리트의 내구성(durability)에 대한 체계적인 관리가 필요한 실정이므로 이에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(구봉근, 1999; 한상목 등,

1998; 윤영수 등, 1999; Detwiller 등, 1989). 따라서, 본 연구에서는 콘크리트구조물의 내구성평가 항목중, 포졸란계 혼화재인 플라이애쉬를 첨가하여 콘크리트의 동결융해 저항성에 미치는 영향을 분석하고, 산업부산물인 플라이애쉬를 시멘트 대체재료로 사용할 수 있는 적정치환율을 파악하여 플라이애쉬를 시멘트 대체재료로 사용함으로써 소비량을 증진하는데 기여하고자 한다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1 재료

국내에서 발생하는 플라이애쉬의 화학적 성질은  $SiO_2$  량이 50%이상이며,  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  의 양도 80%이상을 나타내고 있으므로 KSF 4049와 KSL 5405에 각각  $SiO_2$  가 45%이상,  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  는 70%이상으로 요구되고 있어 화학적 성분은 KS규정을 만족하고 있다. 플라이애쉬 비중은 시멘트비중보다 낮게 측정되었으며, KSL 5201규정에 따라 Blaines의 공기투과방법에 의해 측정된 비표면적으로 규정한 플라이애쉬의 분말도는  $3,400\text{ cm}^2/\text{g}$  으로 측정되었다. 골재는 충남 금강하류에서 채취한 잔골재를 사용하였으며, 비중은 2.61과 조립률(fine modules)은 2.58로 측정되었다. 굵은골재는 최대크기가 19mm인 쇄석을 사용하였으며, 비중은 2.24와 조립률은 7.42로 측정되었다. 콘크리트의 유동성을 고려하여 동일한 슬럼프 18±2.5cm를 유지하기 위해 혼화제는 고성능감수제를 사용하였다.

**2.2 콘크리트배합비**

플라이애쉬 첨가량에 따라 콘크리트의 내투수성과 동결융해 저항성의 능력을 분석하기 위해 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트의 기본배합으로 선택하였다. 플라이애쉬의 첨가량에 따른 내투수성과 동결융해저항성을 분석하기 위해 단위시멘트량에 10%, 20%, 30%의 중량비로 플라이애쉬를 대체하여 플라이애쉬콘크리트를 제조하여 실험을 수행하였다. Table 1에 나타낸 배합비의 첫 번째 기호 24와 60은 콘크리트의 압축강도가 240kgf/cm<sup>2</sup>와 600kgf/cm<sup>2</sup>를 나타내고 있으며, 두 번째의 기호는 플라이애쉬의 첨가량을 의미한다. 그리고 세 번째의 기호 A는 공기연행제(Air-entrained admixtures)의 첨가를 나타낸다. 적당한 공기연행제를 첨가하면 미세한 연행 기포로 수분의 동결에 의한 팽창압을 완화시켜 억제할 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Pigeon 등, 1981; 김생빈, 1992).

**2.3 콘크리트 압축강도실험**

시멘트와 플라이애쉬를 투입하여 건 비빔을 90초간 한 후, 배합수를 첨가하여 120초간 배합을 실시하였으며, 콘크리트 공시체를 3개씩 제작하였다. 콘크리트의 양생은 15 ~ 25 ℃ 에서 습윤양생을 실시하였으며, 양생후 공시체는 연마기로 연마후, KSF 2405별 강도를 측정하기 위해 원형공시체  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  를 규정에 따라 압축시험기를 사용하여 콘크리트의 압축강도(재령 28일)를 측정하였다.

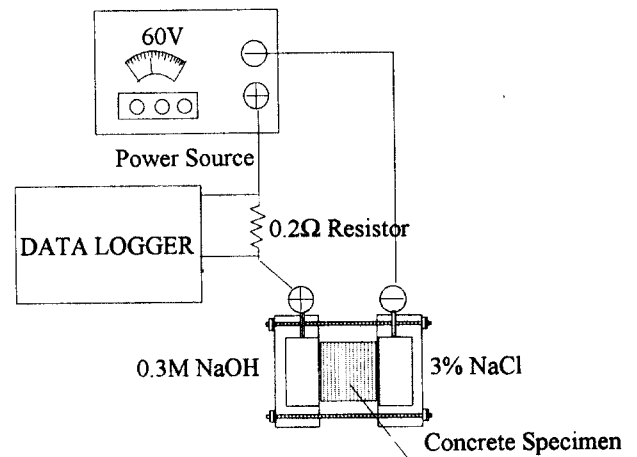
**2.4 콘크리트의 투수실험**

콘크리트의 투수성(Permeability)은 경화된 콘크리트에 대한 자연상태의 수압 또는 기압에 의하여 실험해야 하지만 이러한 방법은 콘크리트의 투수성 측정에 많은 시간과 경비가 소요되고 실제 투수되는 수량이 극히 적으므로 장시간의 시험으로 인하여 많은 문제점이 나타나고 있다. 이에 반하여 Fig. 2에서 나타낸 것처럼 전위차에 의한 염소이온의 침투를 이용한 방법은 각 시편들간의 명확한 특성이 나타나고 있다. 또한 빠른 시간안에 콘

크리트시편의 투수성에 대한 상대적인 지표를 Table 2와 같이 평가할 수 있다는 것이 장점이라 할 수 있다. 보통콘크리트는 4,000 Coulombs 이상의 값을 유지하며, 내구성이 우수한 콘크리트는 2,000 Coulombs 이하의 값을 나타내고 있다. 본 실험에서의 시편은 콘크리트 공시체를 재령 28일 동안 15 ~ 25 ℃ 에서 습윤양생을 실시한 후, 5cm 두께로 절단하여 염소이온 투과시험을 ASTM C 1202-97과 AASHTO T 259의 방법에 의해 수행하였다.

**Table 2** Permeability of chloride ion in concrete

Coulombs	Permeability
4,000 or more	High
2,000 ~ 4,000	Medium
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1000	Very low
100 or less	Ignoring



**Fig. 2** Permeability test of chloride ion

**Table 1** Mix ratios of concrete

Design strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Mixtures	Mix proportions (kg/m <sup>3</sup> )						
		W/B	Water	Binder		Fine aggregate	Coarse aggregate	AE admixture
				Cement	Fly ash			
240	24FA0	0.542	201	371	0	628	1,077	-
	24FA10			333.9	37.1			
	24FA20			296.8	74.2			
	24FA30			259.7	111.2			
	24FA10A			333.9	37.1			
600	60FA0	0.315	164	520	0	728	937	-
	60FA10			468	52			
	60FA20			416	104			
	60FA30			364	156			
	60FA10A			468	52			

2.5 콘크리트의 동결융해실험

본 연구에서는 KSF 2456(1993)에 따라 수중 급속융해 시험법을 사용하였으며, 콘크리트 채령 28일째에서 실험을 수행하였다. 상대 동탄성계수(Relative dynamic modulus of elasticity)는 동결융해시험을 시작 전에 초기 동탄성계수에 대한 동결융해에 영향을 받은 사이클에서 측정된 동탄성계수의 비를 의미하며, 동결융해의 영향을 많이 받을 경우에는 상대 동탄성계수가 감소하는 경향을 나타낸다. 본 연구에서는 동결융해의 사이클 횟수가 300, 또는 상대 동탄성계수가 60%이하이면 실험을 종료하였다. 시험에서 사용된 시험기기는 일본 M사의 제품인 전자동 동결융해시험기를 사용하였으며, 공시체의 온도는 동결시 -18℃이며, 융해시 +4℃가 유지되도록 1사이클을 설정하였으며, 동결융해 1 사이클을 수행하는데 소요되는 시간은 평균 150분 정도이다. 본 실험의 시편은 8 × 10 × 40 cm 각주형이고 28일간 15 ~ 25 ℃ 에서 습윤양생을 실시한 후에 동결융해실험을 수행하였다. 콘크리트의 동탄성계수는 초음파 속도에 의한 동탄성계수의 시험법에 의해서 전파시간을 측정하여 전파속도를 식 (1) 과 같이 계산한 후, 전파속도를 이용하여 동탄성계수는 식 (2)와 같이 측정하였다.

$$V_l = \frac{l}{t} \tag{1}$$

여기서,  $V_l$ : 전파속도(cm/sec)  $l$ : 공시체 길이 (cm)  
 $t$ : 전파시간(sec)

$$E_D = \frac{V_l^2 \times \rho \times 10^7}{g} \tag{2}$$

여기서,  $E_D$ : 동탄성계수(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\rho$ : 시험체의 밀도(kgf/cm<sup>3</sup>)  $g$ : 중력가속도(cm/sec<sup>2</sup>)

콘크리트의 동결융해에 대한 내구성지수(durability factor, D.F)는 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$D.F = \frac{C \times N}{M} \tag{3}$$

여기서,  $C$ : N번째 사이클의 상대동탄성계수  $N$ : 동결융해 시험을 종료한 사이클 수  $M$ : 동결융해시험의 목표 사이클수 (300cycles)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 플라이애쉬 혼입에 따른 공기량

Fig. 3은 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트에 플라이애쉬 첨가량에 따라 공기량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이 원인은 플라이애쉬내의 미연탄소분이 존재하여 공기량을 감소시키는 것으로 분석된다(Ravina, 1986). 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트에 플라이애쉬를 10% 첨가하고 공기연행제를 첨가하지 않은 콘크리트의 공기량은 4.5%와 4.2%로 측정되었으며, 공기연행제를 0.03% 첨가한 콘크리트의 공기량은 6.0%와 5.5%로 측정되었다.

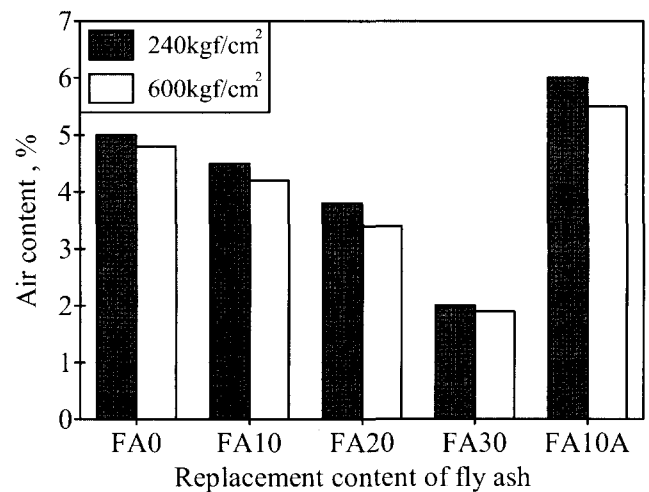


Fig. 3 Air content of concrete including fly Ash

Table 3 Test results of concrete strength

Mixtures	Concrete compressive strength(28 days), kgf/cm <sup>2</sup>				Std. D	C. V
	Specimen I	Specimen II	Specimen III	Average		
24FA0	243.0	262.0	246.0	250.0	10.2	4.1
24FA10	251.0	244.0	268.0	254.0	12.3	4.9
24FA20	221.0	197.0	203.0	207.0	12.3	5.9
24FA30	171.0	202.0	182.0	185.0	15.7	8.5
24FA10A	250.0	262.0	267.0	260.0	8.7	3.4
60FA0	614.0	635.0	615.0	621.0	11.8	1.9
60FA10	605.0	634.0	512.0	617.0	15.1	10.9
60FA20	580.0	574.0	605.0	586.0	16.4	2.8
60FA30	462.0	440.0	425.0	442.0	18.6	4.2
60FA10A	602.0	595.0	634.0	610.0	20.8	3.4

### 3.2 플라이애쉬 첨가량에 따른 압축강도

플라이애쉬가 첨가된 콘크리트의 압축강도는 조기재령에서는 첨가되지 않은 콘크리트보다 강도발현이 지연되지만, 지속적인 포졸란반응으로 인하여 플라이애쉬가 첨가된 콘크리트는 장기 강도는 높아지게 된다고 보고되고 있다(오병환 등, 1991; Popovis, 1986). 본 연구에서는 재령 28일째 압축강도를 측정하여 비교하였으며, Table 3에 콘크리트압축강도의 결과를 나타내었다. Fig. 4는 플라이애쉬첨가량 및 콘크리트압축강도에 따른 콘크리트의 강도발현을 비교하였다. 플라이애쉬의 첨가량이 20%와 30%일 때, 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트의 강도발현이 늦어 콘크리트압축강도는 상대적으로 낮게 측정되었다.

그러나, 플라이애쉬 첨가량이 10%일 때는 강도측면에서 거의 유사하게 측정되어 콘크리트대체량으로 사용해도 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 그러나 플라이애쉬를 첨가한 콘크리트의 강도발현은 플라이애쉬의 품질, 첨가량 및 양생방법 등에 따라 다소 차이가 있다(오성원, 1996).

### 3.3 플라이애쉬콘크리트의 내투수성

Fig 5는 플라이애쉬 첨가량에 따른 콘크리트의 내투수성 결과를 나타내고 있다. 플라이애쉬를 첨가한 콘크리트는 보통콘크리트보다 투수저항성이 증가하였으나, 플라이애쉬의 첨가량의 증가에 따른 투수저항성의 증가되는 경향은 관찰되지는 않았다. 보통강도콘크리트로 배합된 단위시멘트량  $371\text{kg/m}^3$ 의 N배합보다 고강도콘크리트로 배합된 단위시멘트량  $520\text{kg/m}^3$ 의 H배합이 물·시멘트비의 감소와 단위시멘트량이 증가함에 따라 투수저항성이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 공기연행제를 첨가한 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트인 경우, 내투수성 저항성은 약간 감소하는 경향은 있으나, 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았다.

### 3.4 플라이애쉬 첨가량에 따른 동결융해저항성

국내 겨울철의 평균기온은  $-10.0 \sim 10.0$  °C 정도로 기온차이가 많이 발생하므로 동결융해의 영향으로 인하여 콘크리트에 손상(damage)을 받기 쉽다. 본 연구에서는 일반적으로 동결기에는 콘크리트를 타설하지 않으므로 조기강도의 동결융해에 대한 영향은 고려하지 않았으며, 재령 28일째 강도를 기준으로 동결융해실험을 수행하여 실험결과를 Table 4에서 상대동탄성계수와 내구성지수를 나타내었다.

Fig. 6 과 Fig. 7에서 나타난 것처럼 플라이애쉬가 첨가된 Non AE보통강도콘크리트와 Non AE고강도콘크리트인 경우, 상대동탄성계수가 60%이상 측정되어 동결융해저항성이 유지하고 있으나, 플라이애쉬 첨가량에 따른 경향은 뚜렷하지 않았다. 그러나 플라이애쉬를 첨가되지 않은 경우, 보통강도콘크리트는 270사이클에서 종료되어 상대동탄성계수가 54%로 측정되어 동결융해저항성이 저하되는 것을 관찰할 수 있다. 그러나, 상대적으로 콘크리트강도가 높은 고강도콘크리트는 보통강도콘크리트보다 동결융해저항성이 1.1 ~ 1.3 배정도 향상되는 것으로 측정되었으며, 동결융해저항성은 콘크리트의 압축강도가 높을수록 콘크리트 내부의 조적이 치밀하여 투수성저항성이 증가했기 때문인 것으로 분석된다(한상목 등, 1998).

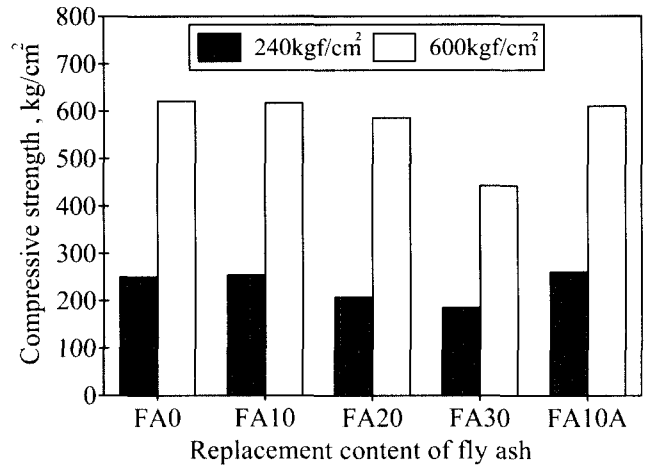


Fig. 4 Strength development of concrete including Fly Ash (28 days)

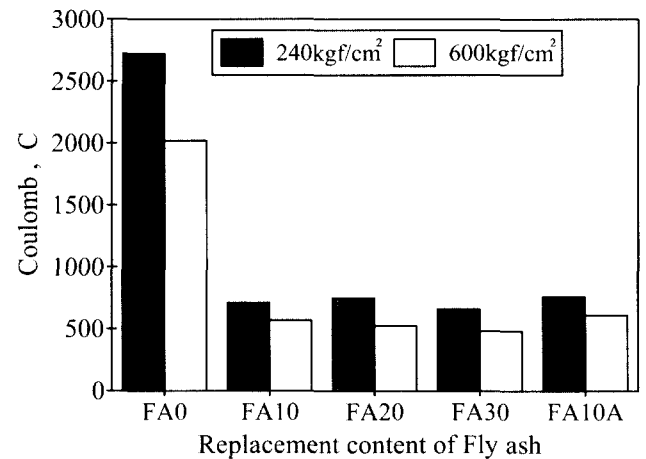


Fig. 5 Permeability of concrete including Fly Ash

Table 4 Test results of the Freezing and thawing

Mixtures	Relative dynamic modulus of elasticity, %	Durability factor, %
24FA0	55.0	54.0
24FA10	68.0	68.0
24FA20	65.0	65.0
24FA30	70.0	70.0
24FA10A	75.0	75.0
60FA0	61.0	61.0
60FA10	75.0	75.0
60FA20	82.0	82.0
60FA30	85.0	85.0
60FA10A	84.0	84.0

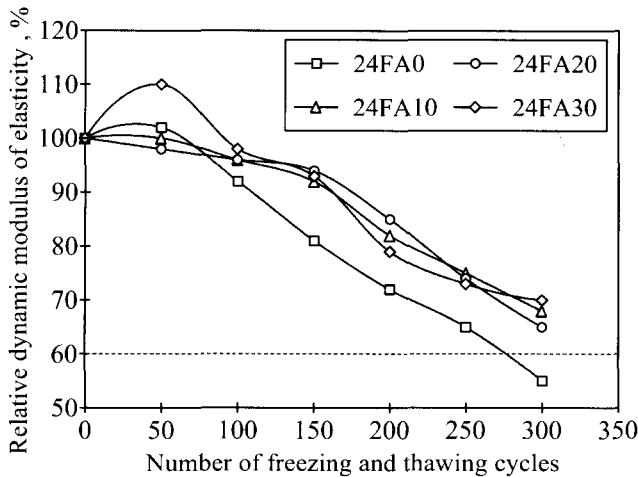


Fig. 6 Resistance to freezing and thawing (240kgf/cm<sup>2</sup>)

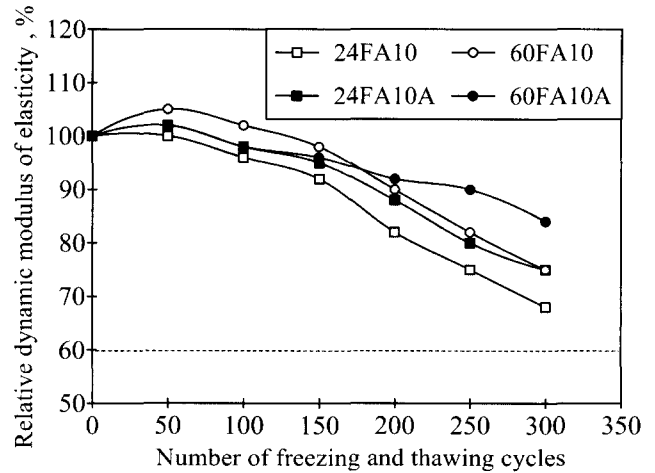


Fig. 8 Resistance to freezing and thawing of concrete including AE admixture

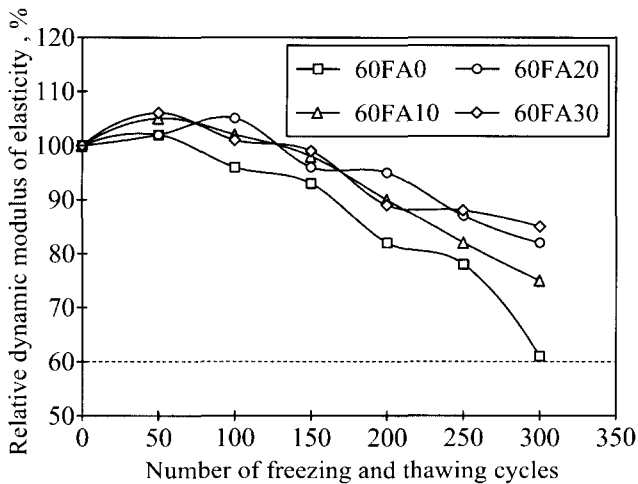


Fig. 7 Resistance to freezing and thawing (600kgf/cm<sup>2</sup>)

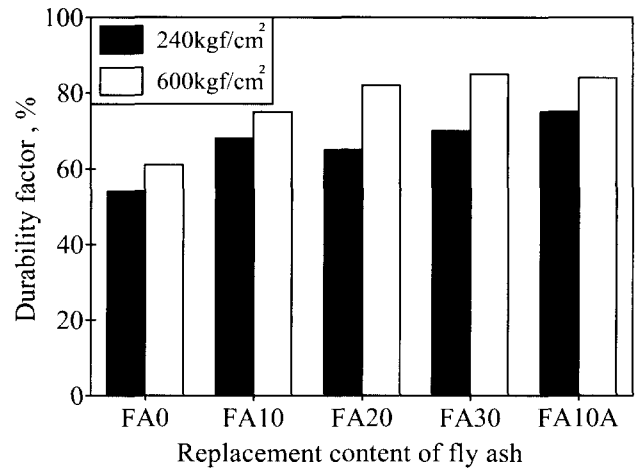


Fig. 9 Durability factor of concrete including Fly Ash

3.5 AE제 첨가에 따른 동결융해저항성

기존의 연구에서 언급하고 있는 것처럼 콘크리트의 동결융해 저항성은 콘크리트의 공기량에 영향을 미치는 것으로 언급하고 있으며(김생빈, 1992; Pigeon 등, 1981), 본 연구에서는 플라이애쉬내의 미연탄소분의 영향으로 공기량이 감소하므로 공기연행제를 투입하여 플라이애쉬 첨가에 따른 동결융해저항성을 Fig. 8에서 비교하였다. 플라이애쉬를 10% 첨가한 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트의 경우, Fig. 1에서 나타낸 것처럼 콘크리트의 공기량이 각각 4.5%와 4.2%로 측정되었으나, 동일한 콘크리트의 배합비에서 공기연행제를 첨가한 경우에는 콘크리트의 공기량이 각각 6.0%와 5.5%로 측정되었다. 상대적으로 콘크리트의 공기량이 많을수록 동결융해저항성은 증가하는 경향을 나타내었다. 플라이애쉬를 첨가한 콘크리트는 플라이애쉬의 품질(미연탄소분)에 따라 공기연행제를 적절히 투입하여 동결융해저항성을 향상시켜야 한다. Fig. 9에서는 콘크리트의 내구성지수를 나타내고 있으며, 플라이애쉬 첨가량이 많을수록 또는 콘크리트의 압축강도가 높을수록 콘크리트의 내구성지수가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

4. 결 론

플라이애쉬 첨가에 따른 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트의 동결융해 실험결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 보통강도콘크리트와 고강도콘크리트인 경우, 플라이애쉬의 첨가량을 10%로 대체하면 재령 28일 강도측면에서는 큰 영향이 없을 것으로 분석된다.
- (2) 플라이애쉬를 첨가한 콘크리트는 플라이애쉬의 미세한 조직 때문에 플라이애쉬를 첨가하지 않은 콘크리트보다 내투수성의 증진효과가 있는 것으로 측정되었으나, 플라이애쉬의 첨가량에 따른 경향은 뚜렷하게 관찰되지 않았다.
- (3) 플라이애쉬를 첨가되지 않은 보통강도콘크리트에는 270사이클에서 종료되어 상대동탄성계수가 54%로 측정되어 동결융해저항성이 저하되는 것을 알 수 있다. 그러나 상대적으로 콘크리트 강도가 높은 고강도콘크리트의 상대동탄성계수가 61%로 측정되어 동결융해저항성이 높게 측정되었다.
- (4) 플라이애쉬를 10% 첨가한 콘크리트에 공기연행제를 투입한

AE 콘크리트는 Non AE콘크리트보다 공기량의 증가로 인하여 동결융해저항성이 향상되는 경향을 나타내었다.

(5) 플라이애쉬의 첨가와 콘크리트의 압축강도가 높아짐에 따라 콘크리트의 내구성지수가 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 플라이애쉬를 10% 정도의 첨가량과 적절한 공기연행제를 투입하면 동결융해저항성이 우수한 콘크리트를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 실험일부를 지원해 주신 동우레미콘에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 김생빈(1992). "고강도콘크리트의 동결융해에 미치는 기포조직의 영향", 한국콘크리트학회지, 제4권, 제1호, pp 89~96.
- 구봉근(1999). "플라이애쉬를 혼합한 재생골재 콘크리트의 강도 및 동결융해 특성", 학회창립 10주년기념 가을학술발표회 논문집, pp 241~244.
- 권중현, 배기성(1998). "Fly Ash를 사용한 수중불분리 콘크리트의 유동성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제12권, 제1호, pp 153~161.
- 이진용, 최수홍, 강석화, 이광명(1999). "플라이애쉬 함유량이 굳기전 성질과 역학적 특성에 미치는 영향", 한국콘크리트논문집, 제11권 6호, pp 25~33.
- 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
- 윤영수, 손유신, 원종필, 송여열, 이상균(1999). "플라이애쉬 첨가에 따른 내구성향상에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제19권 제 1-5호, pp 707~714.
- 정용, 김원기, 정재동, 한기성, 최상훈(1992). "해수환경하 콘크리트경화제의 동결융해저항성에 관한 연구", 한국콘크리트학회지, 제4권, 제3호, pp 157~166.
- 최세규, 김생빈(1997). "고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 동결융해 저항성에 대한 연구", 한국콘크리트학회지, 제9권, 제5호, pp 149~155.
- 한국공업표준협회(1993). "급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험방법", KS F 2456.
- 한상목, 최세규, 김생빈(1998). "고강도 경량골재콘크리트의 동결융해 저항성에 대한 실험적 연구", 한국콘크리트학회지, 제10권, 제1호, pp 125~132.
- ACI Committee 226(1985). "Use of Fly ash in Concrete", Committee Report.
- Annual Book of ASTM Standard(1997). "Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", ASTM C 1202.
- Annual Book of ASTM Standard(1997). "Resistance of concrete to freezing and thawing", ASTM C 666.
- Cordon, William, A(1966). "Freezing and Thawing of Concrete-Mechanism and Control", Monograph No. 3, ACI/Iowa State University Press, Detroit.
- Detwiller, R.J., Dalglish, B.J., and Williamson, R.B(1989). "Assessing the Durability of Concrete in Freezing and Thawing," ACI Material Journal, Jan. pp 29~35.
- Pigeon, M., Lachance, M.(1981), "Critical Air Void Spacing Factors for Concrete Submitted to Slow Freeze-Thaw Cycles", ACI Journal, pp 282~291.
- 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.

2001년 4월 10일 원고 접수

2001년 7월 31일 수정본 채택