

# 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 물리·역학적 특성에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Concrete with Fly Ash

성 찬 용\* · 리 신 호\*\* · 송 창 섭\*\*  
Sung, Chan Yong · Rhee, Shin Ho · Song, Chang Seob

### Abstract

This study is performed to examine the physical and mechanical properties of concrete with fly ash.

Test results show that the unit weights of concrete with fly ash are decreased 1~3% and the highest strength is achieved by 10% filled fly ash concrete which it is increased 7% than that of the normal cement concrete. The ultrasonic pulse velocity is in the range of 3,705~4,204m/s and the dynamic and static modulus of elasticity is in the range of  $271 \times 10^3 \sim 289 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$  and  $208 \times 10^3 \sim 262 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ , respectively. The acid-resistance is increased with increase of the content of fly ash. It is 1.2 times of the normal cement concrete by 10% filled fly ash concrete and 1.7 times by 30% filled fly ash concrete, respectively.

### I. 서 론

산업의 발달과 함께 각종 산업폐기물 및 부산물의 증가를 가져왔으며, 지금까지는 폐기물을 대부분 특별한 환경처리 없이 매립하였으나 환경문제가 심각한 사회문제로 대두되면서 활용에 대한 관심이 높아지고 있다.

이와 같은 산업폐기물과 부산물로는 고로슬래그, 플라이 애시 등이 있으며 콘크리트의 혼화재료나 골

재등으로 이용하려는 연구가 진행되고 있다.<sup>8)</sup>

특히, 플라이 애시는 화력발전소에서 석탄을 연소하는 과정에서 구형의 미세분말 형태로 생성되며, 국내탄은 원탄의 30~50%, 석탄인 경우는 10~15% 정도의 회분을 함유하고 있는데 이것이 보일러에서 연소되어 배연가스와 함께 배출되어 미세한 분말 형태로 집진기 하부에서 포집되는데 이를 플라이 애시라 한다.

현재 플라이 애시는 전세계적으로 매년 약 2억

\*충남대학교 농과대학  
\*\*충북대학교 농과대학

키워드 : 플라이 애시, 고성능 감수제, 단위중량, 강도, 탄성계수, 내산성

여튼이 부산물로 생산되며 이 중 약 20%만이 콘크리트제품과 골재 생산 등에 이용되고 있고, 우리나라에서도 연간 약 200여만톤이 생산되고 있으나 20% 미만이 사용되고 있을 뿐이다.<sup>1)</sup>

따라서, 본 연구는 플라이 애시를 시멘트량의 5, 10, 15, 20, 25, 30% 혼입하여 현재 사용하고 있는 레미콘 배합과 동일한 배합비로 제작하여 단위중량, 압축강도, 초음파진동속도, 동탄성계수, 정탄성계수, 내산성 등의 물리·역학적 특성을 실험적으로 구명하여 성능이 우수한 콘크리트를 활용하기 위한 기초자료를 얻는데 그 목적이 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용재료

#### 가. 시멘트

S회사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical compositions of normal portland cement (Unit : %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
21.09	4.84	63.85	3.32	3.09	1.13	0.29	2.39

#### 나. 플라이 애시

보령산 플라이 애시를 사용하였으며, 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 2와 같다.

Table 2. Physical properties and chemical compositions of fly ash

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Ig. loss (%)	Others (%)	Specific gravity (20°C)	Specific surface (cm <sup>2</sup> /g)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )
59.9	25.2	3.84	11.06	2.39	3,152	1,072

#### 다. 골재

잔골재 및 굵은골재는 금강유역에서 채취한 천연골재를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table

3과 같다.

Table 3. Physical properties of aggregate

Item	Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Fineness modulus	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )
Fine aggregate	0.15~4.75	2.63	2.96	1,520
Coarse aggregate	4.76~10	2.64	6.00	1,550

### 라. 고성능감수제

고성능감수제는 단위수량의 감소에 의한 콘크리트의 강도증진과 내부의 조직을 치밀하게 하기 위하여 음이온 계면 활성제인 나프탈렌 설폰산염을 주성분으로 하는 혼화제를 사용하였으며, 이의 일반적 성질은 Table 4와 같다.

Table 4. General properties of superplasticizer

Specific gravity (20°C)	Color	Freezing point (°C)	Principal ingredient	pH	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )
1.20	Dark brown liquid	-2	Naphthalene sulphonate	9±1	1,190

### 마. 공업용 시약

콘크리트의 내산성 시험을 위하여 순도 99%인 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 사용하였다.

## 2. 공시체제작

### 가. 콘크리트배합

플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 배합은 강도를 고려하여 플라이 애시의 첨가량에 역점을 두었으며, 폭넓게 사용되고 있는 재령 28일의 압축강도가 210kgf/cm<sup>2</sup>인 레미콘 배합비인 1 : 3 : 3.6으로 하였다. 이와 같은 방법에 의하여 시멘트, 잔골재, 굵은골재 및 플라이 애시의 배합비를 결정하였으며, 플라이 애시를 결합재(시멘트+플라이 애시) 중량의 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30% 혼입한 F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub>, F<sub>6</sub>, F<sub>7</sub> 등 7가지 종류의 배합비로

Table 5. Mix proportion of concrete with fly ash

Type	Slump (cm)	W/Binder (%)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )					Superplasticizer
			Water	Cement	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	
F <sub>1</sub>	12±1	71.4	200.0	280	0	840	1,008	2.80
F <sub>2</sub>		70.8	198.2	266	14	840	1,008	
F <sub>3</sub>		69.6	194.9	252	28	840	1,008	
F <sub>4</sub>		68.8	192.6	238	42	840	1,008	
F <sub>5</sub>		67.9	190.1	224	56	840	1,008	
F <sub>6</sub>		66.1	185.1	210	70	840	1,008	
F <sub>7</sub>		64.3	180.1	196	84	840	1,008	

하였다.

또한, 콘크리트의 강도증진과 유동성 확보를 위하여 고성능감수제를 결합재 중량의 1%를 사용하였으며, 이의 배합설계는 Table 5와 같다.

#### 나. 공시체 제작 및 양생

플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 제작은 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 잔골재와 굵은골재를 잘 혼합한 다음 시멘트와 플라이 애시를 투입하는 순서로 하였으며, 몰드에 타설된 콘크리트는 양생상자(21±1°C, 습도 96±2%)에서 24시간 정치 후 탈형하여 소정의 재령까지 수중양생(21±1°C)을 하였다.

### 3. 시험방법

시험은 다음과 같은 방법에 준하여 재령 28일에 측정하였으며, 3회 반복 시험한 것의 평균값을 실험 결과치로 하였다.

가. 단위중량시험은 경량성을 파악하기 위하여 실시하였으며, 각 배합비별로  $\phi 150 \times 300$ mm인 시험체의 기중중량과 체적을 측정하여 산출하였다.

나. 압축강도시험은  $\phi 150 \times 300$ mm의 시험체를 제작하여 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 규정된 방법에 준하여 강도를 측정하였다.

다. 초음파진동속도는  $\phi 150 \times 300$ mm인 시험체 아래와 위의 중앙에 직경 50mm의 변환기를 부착하여 BS 1881 Part 203 (콘크리트의 초음파진동속도 측정방법)에 규정된 방법에 따라 측정하였다.

라. 동탄성계수는  $\phi 150 \times 300$ mm인 시험체 길이 방향 양면 중앙에 종진동에 의한 공명진동기를 사용하여 BS 1881 Part 209 (콘크리트의 동탄성계수 측정방법)에 규정된 방법에 따라 측정하였다.

마. 정탄성계수는  $\phi 150 \times 300$ mm인 시험체에 스트레인게이지(67mm)를 부착하여 KS F 2438 (콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 푸아송 비 시험방법)에 규정된 방법에 따라 극한하중의 40%를 가해 얻은 응력과 종·횡 변형율이 0.00005일 때의 응력과 변형율을 측정하여 정탄성계수를 구하였다.

바. 내산성시험은 재령 28일된 표건상태의  $\phi 75 \times 150$ mm의 공시체를 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 5% 용액에 침적한 후 부식된 표면을 철솔로 닦아내어 표면건조 포화상태의 중량차이로 내산성을 측정하였다.

또한, 콘크리트의 중량이 25% 이상 감소하면 콘크리트의 성능을 제대로 발휘할 수 없기 때문에<sup>5)</sup> 이때를 기준으로 하여 각각의 콘크리트에 대한 내산성을 비교하였으며, 용액의 균질성을 위하여 1주마다 용액을 교체하여 사용하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 단위중량

플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 단위중량 시험결과를 비교하면 Table 6과 같다.

Table 6에서 보는 바와 같이 플라이 애시를 혼입한 콘크리트는 보통 시멘트 콘크리트의 단위중

량 2,264kgf/m<sup>3</sup>의 97~99% 정도로 1~3% 정도 감소하였는데, 이와같은 단위중량 감소의 주요원인은 시멘트량의 일부로 단위중량이 가벼운 플라이 애시를 사용하였기 때문이며, 플라이 애시의 사용량이 많을수록 단위중량은 감소하였다.

Table 6. Test results of concrete with fly ash

Mix type	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ultrasonic pulse velocity (m/s)
F <sub>1</sub>	2,264	224	3,972
F <sub>2</sub>	2,251	237	4,008
F <sub>3</sub>	2,248	241	4,024
F <sub>4</sub>	2,232	238	4,018
F <sub>5</sub>	2,223	230	3,984
F <sub>6</sub>	2,219	213	3,970
F <sub>7</sub>	2,209	180	3,705

## 2. 압축강도

보통 시멘트 콘크리트와 역학적 성질이 다소 다른 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 압축강도는 플라이 애시의 혼입량에 따라 다르며, 각 배합비에 따른 압축강도를 비교하면 Table 6과 같다.

Table 6에서 보는 바와 같이 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 압축강도는 180~241kgf/cm<sup>2</sup>의 범위로서, 플라이 애시의 혼입량에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

또한, 플라이 애시를 혼입한 콘크리트는 보통 시멘트 콘크리트의 압축강도 224kgf/cm<sup>2</sup>에 비해 F<sub>2</sub>~F<sub>5</sub>까지는 크게 나타났고, 시멘트 대응으로 플라이 애시를 25% 이상 혼입한 F<sub>6</sub>과 F<sub>7</sub>은 감소되었는데, 이는 플라이 애시를 시멘트 대응으로 혼입할 때 배합비를 결정하는데 매우 중요한 결과라 할 수 있다.

한편, 시멘트 대응으로 플라이 애시를 10% 첨가한 F<sub>3</sub>에서 압축강도가 가장 크게 나타났으며 보통 시멘트 콘크리트보다 7% 정도 크게 나타났는데, 이는 플라이 애시의 주성분이 강도의 증진 목적으로 사용되는 실리카흙과 같은 SiO<sub>2</sub>로서 이것

이 콘크리트중의 Ca(OH)<sub>2</sub>와 결합하여 C-S-H의 결합물을 형성하고, 미세립의 플라이 애시가 콘크리트 내부의 공극을 적절히 채워 충전에 의한 강도증진의 효과가 나타난 것으로 생각된다.<sup>6)</sup>

또한, 보통 시멘트 콘크리트보다 압축강도가 작게 나타난 F<sub>6</sub>과 F<sub>7</sub>은 결합재로 사용되는 시멘트의 양은 감소되고 결합력이 작은 플라이 애시의 양이 증가되어 콘크리트 내부 조직의 결합력 감소에 따른 결과라고 생각된다.

## 3. 초음파진동속도

초음파진동속도시험은 초음파를 부재나 구조물에 방사해서 그 전파시간으로부터 얻어지는 전파속도에 의해 콘크리트의 성능을 평가하는 방법으로서 수cm에서 수m에 이르기까지 적용할 수 있는 비파괴 시험방법이며, 고체재료의 밀도나 탄성특성에 크게 의존하고, 특히 콘크리트 구조물의 밀도, 공극, 균열 등의 분석과 음향기기를 만드는 목재의 재질을 분석하는 데에도 사용된다.<sup>9)</sup>

한편, 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 초음파진동속도에 대한 시험결과를 비교하면 Table 6과 같다.

이 결과에서 보는 바와 같이 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 초음파진동속도는 3,705~4,024m/s의 범위로서, 보통 시멘트 콘크리트의 초음파진동속도 3,972m/s의 93~101% 정도이다.

또한, F<sub>2</sub>~F<sub>5</sub>의 초음파진동속도는 보통 시멘트 콘크리트보다 크게 나타났고, F<sub>6</sub>과 F<sub>7</sub>은 작게 나타났으며, 플라이 애시를 10% 혼입한 콘크리트에서 가장 크게 나타났는데, 이러한 결과는 플라이 애시 그 자체에는 수경성이 없지만 그것에 함유되어 있는 가용성 규산 등이 시멘트 수화반응시 생성되는 수산화칼슘과 상온에서 서서히 반응하여 불용성의 안정한 규산화칼슘 수화물을 생성하여 경화 시멘트 페이스트가 내부 조직을 치밀하게 할 뿐만 아니라<sup>2)</sup> 플라이 애시가 콘크리트 내부의 공극을 적절히 채워 초음파진동속도를 저해하는 요인이 감소되었기 때문이며, 플라이 애시를 20%

이상 혼입한 콘크리트에서 초음파진동속도가 작게 나타난 것은 결합력이 없는 플라이 애시가 적정량 이상 혼입되어 콘크리트 내부 조직의 치밀성이 감소되었기 때문이라 생각된다.

한편, 플라이 애시를 혼입한 콘크리트는 F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>5</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>6</sub>, F<sub>7</sub> 순으로 초음파진동속도가 크게 나타났는데, 이는 플라이 애시의 사용량 선택시 중요한 요소라고 할 수 있다.

#### 4. 동탄성계수

동탄성계수시험은 콘크리트의 성능 시험 방법 중의 하나로 전혀 하중을 가하지 않고 전파를 공시체의 상대편에 방사하여 측정된 주파수로 동탄성계수를 구하는 것이며, 동결융해저항성을 나타내는 내구성지수의 계산 및 산, 알칼리 등의 화학약품에 의한 저항성, 화재에 의한 콘크리트의 열화 상황 등 콘크리트 성능시험에 사용되며, 일반적으로 탄성계수가 작으면 재료의 변형량이 크고 탄성계수가 크면 대체적으로 강도가 크게 나타난다는 것을 의미한다.<sup>3)</sup>

플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 동탄성계수에 대한 시험결과를 비교하면 Table 7과 같다. 이 결과에서 보는 바와 같이 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 동탄성계수는  $271 \times 10^3 \sim 289 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 으로 나타났는데, 이것은 보통 시멘트 콘크리트의 동탄성계수  $281 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 의 96~102% 정도이다.

또한, F<sub>2</sub>~F<sub>5</sub>의 동탄성계수는 보통 시멘트 콘크리트보다 크게 나타났고, F<sub>6</sub>과 F<sub>7</sub>은 작게 나타났으며, 플라이 애시를 10% 혼입한 콘크리트에서 가장 크게 나타났는데, 이러한 결과는 플라이 애시 성분중의 가용성 SiO<sub>2</sub>가 콘크리트의 수화반응시 발생하는 수산화칼슘과 반응하여 규산화칼슘 수화물을 형성하여 콘크리트의 조직을 치밀하게 하였을 뿐만 아니라 포졸란 반응에 의해 생성된 칼슘실리케이트 수화물과 칼슘알루미네이트 수화물이 콘크리트 내부의 모세 공극을 감소시켜 콘크리트의 밀도를 증가시켰기 때문으로 생각되며,<sup>7)</sup> 또

한, 플라이 애시를 20% 이상 혼입한 콘크리트에서 동탄성계수가 작게 나타난 것은 결합력이 없는 플라이 애시가 적정량 이상 혼입되어 콘크리트 내부 조직의 치밀성이 감소되었기 때문이라 생각된다.

한편, 동탄성계수는 압축강도와 초음파진동속도가 클수록 크게 나타났으며, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>5</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>6</sub>, F<sub>7</sub> 순으로 크게 나타났다.

#### 5. 정탄성계수

플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 정탄성계수와 정탄성계수에 대한 동탄성계수의 비를 나타내면 Table 7과 같다.

Table 7. Test results of dynamic and static modulus of elasticity of concrete with fly ash

Mix type	Dynamic modulus of elasticity ( $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ )	Static modulus of elasticity ( $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ )	Dynamic/Static (%)
F <sub>1</sub>	281	223	126
F <sub>2</sub>	284	238	119
F <sub>3</sub>	289	262	110
F <sub>4</sub>	286	248	115
F <sub>5</sub>	282	227	124
F <sub>6</sub>	279	216	129
F <sub>7</sub>	271	208	130

Table 7에서 알 수 있듯이 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 정탄성계수는 F<sub>2</sub>~F<sub>5</sub>의 경우,  $227 \times 10^3 \sim 262 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 으로서 보통 시멘트 콘크리트의 정탄성계수  $223 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 의 101~117% 수준에 이르고 있어 변형성이 작다는 것을 알 수 있으며, F<sub>6</sub>~F<sub>7</sub>의 경우는  $208 \times 10^3 \sim 216 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 으로 보통 시멘트 콘크리트의 93~96% 정도로서 보통 시멘트 콘크리트의 변형성보다 비교적 크다는 것을 알 수 있다.

또한, 정탄성계수는 압축강도와 초음파진동속도 및 동탄성계수가 클수록 크게 나타났으며, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>5</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>6</sub>, F<sub>7</sub> 순으로 크게 나타났다.

한편, Table 7의 정탄성계수에 대한 동탄성계수의 비를 보면 각 배합설계에 따라 동탄성계수가 정탄성계수보다 10~30% 정도 더 크게 나타났는데, 이는 동탄성계수는 정탄성계수에 비하여 약 20~40% 정도 크며, 정탄성계수가 커질수록 정탄성계수와 동탄성계수의 값이 거의 동일하게 된다는 연구와 유사한 결과라 하겠다.<sup>3)</sup>

### 6. 내산성

콘크리트 구조물의 성능저하 현상의 원인 중 하나가 황산염 반응에 의한 것으로서 지하수 및 흙에는 자연발생적인 황산염들이 존재하며 특히, 점토질 흙에는 많은 황산염들이 함유되어 있어 콘크리트 구조물이 이런 환경에 접하여 황산염에 노출될 경우 반복된 건조과정을 통하여 많은 양의 황산염이 구조물에 축적되어 콘크리트의 성능저하가 발생하게 된다.<sup>10)</sup>

한편, 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 내산성 시험은 3주 후 매일 측정하였으며, 각 배합비별로 중량 감소가 25% 이상인 때의 시험결과를 나타내면 Table 8과 같다. Table 8에서 보는 바와 같이 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 내산성은 플라이 애시의 혼입량이 많을수록 증가되었으며, 플라이 애시를 혼입하지 않은 보통 시멘트 콘크리트는 황산 5% 용액에 침적한 후 34일만에 최초중량의 25% 이상이 감소한 반면, 플라이 애시를 10% 혼입한 콘크리트는 43일, 20%를 혼입한 콘크리트는 50일, 30% 혼입한 콘크리트는 58일만에 최초중량의 25% 이상이 감소하였다.

한편, 황산침적에 의한 콘크리트의 중량감소 원인은 콘크리트 성분중의 알루미늄산화물과 황산염과의 반응으로 반응물보다 더 큰 칼슘·셀포·알루미늄이네이트를 생성시켜 콘크리트가 팽창을 일으켜 콘크리트의 표면이 탈락함으로써 중량이 감소되며,<sup>4)</sup> 플라이 애시를 10%, 20%, 30% 혼입한 콘크리트의 내산성이 보통 시멘트 콘크리트보다 각각 1.2배, 1.5배, 1.7배 크게 나타난 것은 플라이 애시 성분 중의 반응성 실리카가 시멘트 수화반응 동안

Table 8. Mass loss of concrete cylinders immersed in 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution

(Unit : %)

Mix type	Immersed time (days)						
	34	40	43	46	50	54	58
F <sub>1</sub>	25.23	28.41	29.51	30.94	31.98	34.09	36.16
F <sub>2</sub>	22.87	26.73	27.98	29.71	29.90	30.12	33.21
F <sub>3</sub>	19.97	22.94	25.16	26.34	28.00	29.95	31.41
F <sub>4</sub>	19.05	21.77	23.11	25.24	26.55	28.16	29.55
F <sub>5</sub>	18.48	20.89	22.27	23.58	25.55	27.53	29.35
F <sub>6</sub>	16.23	19.45	20.99	22.54	24.22	25.92	27.70
F <sub>7</sub>	16.19	19.30	20.88	21.87	23.39	24.19	25.28

에 생성되는 수산화칼슘과 반응하므로써 황산염과 반응하는 알루미늄산화물의 생성량을 감소시키고, 플라이 애시의 주성분이 SiO<sub>2</sub>로서 산 및 알칼리에 침식되지 않는 화학적 특성으로 황산이온의 침투를 억제하였기 때문이라 생각된다.<sup>4)</sup>

### IV. 결 론

이 연구는 플라이 애시, 보통 포틀랜드 시멘트, 천연골재 및 고유동화제를 사용한 콘크리트의 물리·역학적 특성을 실험적으로 구명한 것으로서, 이 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 단위중량은 배합설계에 따라 2,209~2,251kgf/m<sup>3</sup>으로서 보통 시멘트 콘크리트보다 1~3% 정도 감소되었다.
2. 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 압축강도는 플라이 애시를 시멘트 대응으로 10% 혼입한 콘크리트에서 가장 크게 나타났으며, 보통 시멘트 콘크리트의 강도보다 7% 정도 증가하였다.
3. 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 초음파진동속도와 동탄성계수는 배합설계에 따라 각각 3,705~4,024m/s와 271×10<sup>3</sup>~289×10<sup>3</sup>kgf/cm<sup>2</sup>정도로 보통 시멘트 콘크리트와 유사하게 나타났으며, 플라이 애시를 10% 혼입한 콘크리트에서 가장 큰 값을 보였다.

4. 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 정탄성계수는 배합설계에 따라  $208 \times 10^3 \sim 262 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$  정도로 나타났으며, 플라이 애시를 10% 혼입한 콘크리트에서 가장 큰 값을 나타냈고, 동탄성계수는 정탄성계수보다 10~30% 정도 크게 나타났다.

5. 플라이 애시를 혼입한 콘크리트의 내산성은 플라이 애시의 혼입량이 많을수록 증가되었으며, 플라이 애시를 10%, 20%, 30% 혼입한 콘크리트의 내산성은 보통 시멘트 콘크리트보다 각각 1.2배, 1.5배, 1.7배 정도 크게 나타났다.

본 논문은 1998년도 농림수산기술개발 사업에 의하여 수행된 연구결과의 일부임

### 참 고 문 헌

1. 김영근, 1997, 플라이 애시의 전자재 활용화 방안, 전자재 가을호, 통권11호 : 255~269.
2. Brandt, A. M., 1995, Cement-based composites : materials, mechanical properties and performance, E & FN Spon : 66.
3. Malhotra, V. M. and N. J. Carino., 1991, Handbook on nondestructive testing of testing of concrete, CRC Press : 50~83.
4. Menashi, D. C. and Amon Bentur, 1988, Durability of portland cement-silica fume

- pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions, Journal of ACI, 88(5) : 130~157.
5. Neville., 1981, Properties of concrete, Pitman Publishing Limited, London : 605~635.
6. Saad, M., G. B. Hanna and M. F. Kotkata., 1996, Effect of silica fume on the phase composition and microstructure of the termally treated concrete, An International Journal of Cement and Concrete Research, 26(10) : 1479~1484.
7. Shi, C. and R. L. Day, 1995, Acceleration of the reactivity of fly ash by chemical activation, An International Journal of Cement and Concrete Research, 25(1) : 15~21.
8. Swamy, R. N., 1986, Cement replacement materials (concrete technology and design), Surrey University Press, 3 : 171~196.
9. Swamy, R. N. and A.H. Al-Hamed., 1984, The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-dried cubes and hence in situ strength of concrete, Journal of the ACI, 81(2) : 247~276.
10. Wolfgang Czernin., 1980, Cement chemistry and physics for civil engineers, Wiesbadener Graphische Betriebe GmbH : 10~17.