

## 재생굵은골재를 사용한 고강도 콘크리트의 동결융해 특성

### Freezing and Thawing Properties of High Strength Concrete Using Recycled Coarse Aggregate

성 찬 용\* · 임 상 혁\*\*

Sung, Chan-Yong · Im, Sang-Hyuk

#### Abstract

This study was performed to evaluate the freezing and thawing properties of the high strength concrete using recycled coarse aggregate. The recycled coarse aggregate replaced natural crushed aggregate by 0%, 25%, 50%, 75% and 100%.

The compressive strength of the concrete using recycled coarse aggregate showed more than 300 kgf/cm<sup>2</sup> at the curing age 28 days. The mass loss ratio by freezing and thawing was less than 1% at all mix type. The relative dynamic modulus of elasticity was decreased with increasing the freezing and thawing cycles. Also, the durability factor by the freezing and thawing was decreased with increasing the content of recycled coarse aggregate. But, the recycled concrete except 100% recycled coarse aggregate showed 60 or more durability factor in the freezing and thawing 300 cycles.

Accordingly, these recycled coarse aggregate can be used for high strength concrete.

*Keywords* : Recycled coarse aggregate, Freezing and thawing, Mass loss ratio, Durability factor, Compressive strength

#### I. 서 론

국내 건설시장은 1980년대 말부터 대형 국가건설정책 및 민간건설의 활성화에 따라 콘크리트 산업의 막대한 양적 증가를 유발하였고, 콘크리트 구조물의 노후화와 성능저하 등으로 인하여 구조물의

해체에 의해 발생하는 폐콘크리트량이 급증하고 있는 실정이다. 지금까지 폐콘크리트는 도로포장의 보조재료와 매립용으로 주로 이용되어 왔으나, 날로 심각해지는 환경피해와 처리장의 부족 등으로 인하여 단순 매립은 불가한 것이 현실이다. 또한, 막대한 양의 건설폐기물을 그대로 폐기하거나 매립하는 것은 자원의 낭비이며, 국토 오염뿐만 아니라 환경파괴를 초래하고 있다. 따라서, 건설폐기물의 상당량을 차지하는 폐콘크리트를 부족한 콘크리트용 골재자원으로 재활용하는 것은 환경오염의 방지와 자원의 재창출이라는 측면에서 일거양득의 효과

\* 충남대학교 농업생명과학대학

\*\* 충남대학교 대학원 농공학과

\* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5798

fax: +82-42-823-8050

E-mail address: cysung@cnu.ac.kr

를 기대할 수 있다.<sup>1)</sup>

한편, 최근 급속한 산업기술의 발달로 산업부산물물이 대량 발생하고 있는데, 이러한 산업부산물을 단순히 매립하여 처리하기보다는 건설산업에 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 일례로 화력발전소에서 석탄을 연소할 때 부산되는 플라이 애시는 주로 매립용으로 사용되어 왔으나 근래에는 콘크리트의 품질개선과 시멘트 대체를 위한 혼화재료로 그 활용방안이 연구되고 있다.<sup>2),9)</sup>

따라서, 본 연구는 플라이 애시와 재생골재를 사용하여 재령 28일의 압축강도가 300 kgf/cm<sup>2</sup> 이상인 고강도 콘크리트의 압축강도와 동결융해 특성을 구명하는데 그 목적이 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용재료

#### 가. 시멘트

시멘트는 KS F 5201에 규정된 국내 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 이의 물리적 성질 및 화학성분은 Table 1 및 2와 같다.

Table 1 Physical properties of normal Portland cement

Specific gravity (20℃)	Setting time (h - min)		Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	Initial	Final	3days	7days	28days
3.15	5~7	7~20	194	216	323

Table 2 Chemical composition 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. 골재

잔골재는 금강유역에서 채취한 천연모래를, 굵은 골재는 충남 공주 지역에서 생산되는 쇠석과 경기

도 일산 I사에서 생산된 KS규격 1종 재생골재를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of aggregates

Item	Size (mm)	Specific gravity (20℃)	Absorption (%)	Fineness modulus	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )	
Fine aggregate	<4.75	2.62	0.87	2.66	1.675	
Coarse aggregate	Crushed	4.75~20	2.64	1.25	7.35	1.571
	Recycled	4.75~20	2.62	1.87	6.78	1.543

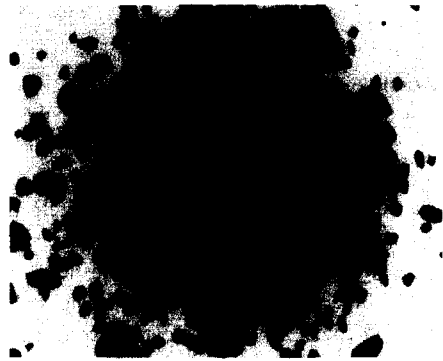


Fig. 1 Recycled coarse aggregate

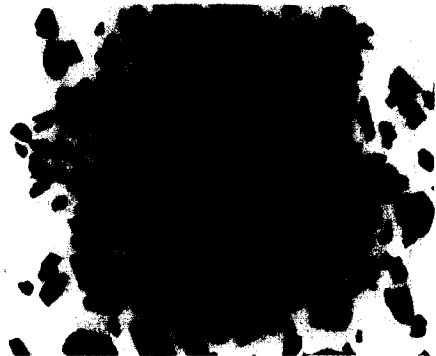


Fig. 2 Crushed coarse aggregate

#### 다. 플라이 애시

보령에 있는 K사 플라이 애시를 사용하였으며,

그 물리적 성질과 화학성분은 Table 4 및 5와 같다.

**Table 4 Physical properties of fly ash**

Specific gravity (20°C)	Specific surface (cm <sup>2</sup> /g)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )	Grain size (mm)	Color
2.39	3,152	1,072	<0.15	Gray

**Table 5 Chemical composition of fly ash**  
(Unit : %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ig. loss
59.9	25.2	7.50	0.59	0.09	0.41	6.04	5.09

라. 고성능감수제

단위수량을 감소하여 콘크리트의 강도를 증진시키고 공기량 확보를 위하여 S사의 나프탈렌 설폰산 포르말린 축합물을 주성분으로 한 고성능감수제를 사용하였으며, 이의 일반적 성질은 Table 6과 같다.

**Table 6 General properties of superplasticizer**

Specific gravity (20°C)	pH	Color	Ratio of water reducing (%)	Setting time		Bleeding quantity (%)
				Initial (h:min)	Final (h:min)	
1.191	6.61	Dark brown liquid	18.4	7:33	10:36	56.4

## 2. 시험체 제작

### 가. 배합설계

콘크리트 배합은 고강도 콘크리트영역에서 재생 골재 콘크리트의 강도와 동결융해작용에 미치는 영향을 구명하기 위하여 물/결합재비를 35%와 45%로, 재생골재 대체율을 일반쇄석골재의 0%, 25%, 50%, 75%, 100%로 하였으며, 산업부산물의 활용과 장기강도를 증진시키기 위하여 플라이 애시를 결합재 중량의 20%를 사용하였고, 슬럼프는 15±

**Table 7 Mix design of recycled concretes**

Mix type	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )							SP
			W	B	C	FA	S	G		
								C.A	R.A	
FRA1	35	39	170	486	389	97	650	1,024	-	1.0 × B%
FRA2	35	39	170	486	389	97	650	768	256	
FRA3	35	39	170	486	389	97	650	512	512	
FRA4	35	39	170	486	389	97	650	256	768	
FRA5	35	39	170	486	389	97	650	-	1,024	
FRB1	45	45	165	367	294	73	800	985	-	0.5 × B%
FRB2	45	45	165	367	294	73	800	739	246	
FRB3	45	45	165	367	294	73	800	493	493	
FRB4	45	45	165	367	294	73	800	246	739	
FRB5	45	45	165	367	294	73	800	-	985	

\*W/B : water/(cement + fly ash), S/a : ratio of fine aggregate, W : water, C : cement, FA : fly ash, S : fine aggregate, G : coarse aggregate, C.A : crushed coarse aggregate, R.A : recycled coarse aggregate, SP : superplasticizer, FRA : high strength concrete using fly ash and recycled coarse aggregate(W/B 35%)  
FRB : high strength concrete using fly ash and recycled coarse aggregate(W/B 45%)

2.5 cm, 공기량은  $4.5 \pm 1.5\%$ 가 되도록 고성능감수제를 결합재 중량의 1%와 0.5%를 첨가하였으며, 이의 배합설계는 Table 7과 같다.

#### 나. 시험체 제작 및 양생

시험체 제작은 KS F 2403(실험실에서 콘크리트 압축강도 시험용 시험체를 제작하고 양생하는 방법)에 준하여 강제식 팬믹서를 사용하여 잔골재와 굵은골재를 잘 혼합한 다음 시멘트와 혼화재를 투입하고 건비율을 30초간 실시한 후 물을 1차 투입하여 1분간 믹싱하고, 물과 고성능감수제를 2차 투입하여 90 r.p.m으로 혼합하였다. 강도시험용 시험체는  $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ , 동결융해 시험용 시험체는  $7.6 \text{ cm} \times 7.6 \text{ cm} \times 41.2 \text{ cm}$ 로 하였으며, 모든 시험체는 소정의 재령까지  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 수중양생 하였다.

### 3. 시험방법

시험은 KS에 규정된 방법에 준하여 실시하였으며, 3회 반복 시험한 것의 평균값을 실험 결과치로 하였다.

#### 가. 압축강도시험

콘크리트의 압축강도시험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 재령 7일, 28일, 91일에 측정하였다.

#### 나. 동결융해시험

동결융해시험은 시험체를 28일 동안 수중양생한 후 KS F 2456(급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)에 준하여 수중 급속 동결융해시험을 실시하였다. 이 때 시험체 중심에서의 온도를 동결시  $-18^\circ\text{C}$ , 융해시  $4^\circ\text{C}$ 로 상승시키는 것을 1사이클로 하여 4시간이 소요되었다. 각 시험체는 300 사이클이 될 때까지 또는 초기의 최초 시험시에 측정된 탄성계수의 60%가 될 때까지 시험을 계속하였다. 동결융해의 반복에 따른 중량 감소율,

상대동탄성계수 및 내구성 지수는 다음 식으로 산출하였다.

$$W = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100$$

여기서, W = 동결융해 C 사이클 후의 중량 감소율 (%)

$W_0$  = 동결융해 0 사이클에서의 중량 (g)

$W_1$  = 동결융해 C 사이클에서의 중량 (g)

$$P_c = \left( \frac{n_1}{n} \right)^2 \times 100$$

여기서,  $P_c$  = 동결융해 C 사이클 후의 상대동탄성계수 (%)

n = 동결융해 C 사이클에서의 가로 1차 진동주파수

$n_1$  = 동결융해 C 사이클 후의 가로 1차 진동주파수

$$DF = PN / M$$

여기서, DF = 내구성 지수

P = N 사이클에서의 상대동탄성계수 (%)

N = P가 시험을 단속시킬 수 있는 최소값이 된 순간의 사이클 수

또는, 동결융해에의 노출이 끝나게 되는 순간의 사이클 수

M = 동결융해에의 노출이 끝날 때의 사이클 수

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 압축강도

압축강도는 잔골재율, W/C, 시멘트 강도 및 골재 사용량에 따라 좌우되며, 배합설계의 기준이 될 뿐만 아니라 인장강도, 휨강도, 탄성계수, 내구성 등 경화한 콘크리트의 성질을 나타내는 요소로서 물/결합재비(W/B)와 재생골재 대체율에 따른 압축

강도의 시험결과는 Table 8 및 Fig. 3와 같다.

Table 8과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 재생골재 대체율에 따른 압축강도는 재령 7일에서 물/결합재비 35%와 45%에서 각각 339~352 kgf/cm<sup>2</sup>와 232~256 kgf/cm<sup>2</sup>로 재생골재를 사용하지 않은 보통콘크리트의 354 kgf/cm<sup>2</sup>과 261 kgf/cm<sup>2</sup>에 비하여 각각 1~4%와 2~11% 감소하는 것으로 나타났고 재생골재의 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 물/결합재비 35%의 경우 45%에 비해 단위시멘트량이 상대적으로 많고, 재생굼은골재의 대체에 따른 혼합입도의 차이에 의해 초기강도발현에 차이가 나타나는 것으로 판단된다.<sup>5)</sup>

재령 28일에서는 424~445 kgf/cm<sup>2</sup>과 325~354 kgf/cm<sup>2</sup>으로 나타나 일반콘크리트의 452 kgf/cm<sup>2</sup>와 361 kgf/cm<sup>2</sup>에 비하여 각각 2~6%와 2~10% 감소하는 경향을 나타내었으며 물/결합재비 35%의 경우 재생골재의 대체율에 관계없이 400 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 높은 강도를 나타내었다.

이는 기존의 일반재생골재에서 문제시 되었던 재생굼은골재 표면의 잔여 모르타르를 현저히 분리시킴으로써 흡수율을 저하시켜 양생 후 공극을 줄이고 콘크리트 내부를 치밀하게 할 수 있었기 때문이라 생각된다.<sup>1)</sup>

재령 91일에서는 555~579 kgf/cm<sup>2</sup>와 460~491 kgf/cm<sup>2</sup>으로 나타나 재생골재를 사용하지 않은 일반 콘크리트의 585 kgf/cm<sup>2</sup>와 502 kgf/cm<sup>2</sup>에 비하여 각각 1~5%와 2~8% 감소하는 경향을 나타내어 재령 28일에 비해 감소폭이 다소 줄어드는 경향을 나타내었으며, 물/결합재비와 재생골재의 대체율에 상관없이 모두 450 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 높은 강도를 나타내었다.

따라서, 물/결합재비 35%의 경우 단위수량이 적고 단위시멘트량이 많아 400 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 강도를 요구하는 고강도 콘크리트에서는 골재의 형상과 표면조직의 영향이 강도에 미치는 영향이 적으므로 재생콘크리트를 현장구조물에 적용시 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.<sup>7)</sup>

Table 8 Compressive strength test results of recycled concretes

Mix type	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	7 days	28 days	91 days
FRA1	354	452	585
FRA2	352	445	579
FRA3	350	440	574
FRA4	347	436	568
FRA5	339	424	555
FRB1	261	361	502
FRB2	256	354	491
FRB3	249	347	479
FRB4	241	334	468
FRB5	232	325	460

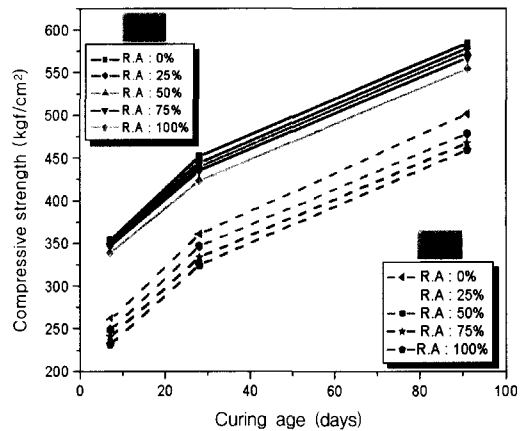


Fig. 3 Compressive strength versus curing age of recycled concrete

## 2. 동결융해저항성

동결융해 작용은 매년 겨울이 되면 반복되기 때문에 장기간에 걸쳐 콘크리트의 내구성능을 저하시킨다. 콘크리트의 동결융해 작용에 의한 내구성능 저하는 콘크리트 내부의 수분이 동결융해 작용을 반복적으로 받아 균열이 발생하거나 표층부가 박리되면서 콘크리트 구조물의 내구성이 저하하는 현상

을 말한다. 우리나라는 겨울철에 전국 대부분의 기온이 영하로 떨어지는 횟수가 많기 때문에 콘크리트 구조물은 매년 동결융해의 반복 작용을 받는다.

재생골은골재의 대체율에 따른 동결융해시험의 결과는 Table 9 및 Fig. 4, 5, 6과 같다.

가. 중량감소율

Table 9와 Fig. 4와 5에서 보는 바와 같이 재생골은골재의 대체율에 따른 중량감소율은 물/결합재 비 35%와 45%에서 각각 0.69~0.84%와 0.76~0.93%로서 골재구성에 상관없이 모든 배합에서 1% 미만으로 나타났으며, 재생골은골재의 대체율이 증가할수록 감소율이 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 동결융해시험전과 동결융해시험 300 사이클 후의 시험체의 표면을 나타낸 것이며, Fig. 5에서 보는 바와 같이 210 사이클이후 중량감소폭이 증가하였다.

나. 상대동탄성계수

상대동탄성계수는 Table 9 및 Fig. 6에서 보는 바와 같이 동결융해가 진행되는 동안 모든 배합에서 감소하는 경향을 보였으며, 동결융해 300 사이클에서 물/결합재 비 35%와 45%에서 각각 약 61~73%와 60~73%로 재생골은골재를 사용하지 않은 보통콘크리트의 77%와 75%에 비하여 4~16%와 2~15% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 동결융해가 반복적으로 진행되면서 초기 30 사이클 이전에 급격히 감소하여 이후에는 완만하게 진행되다 다시 120 사이클 이후 급격히 떨어지는 경향을 나타내었다.

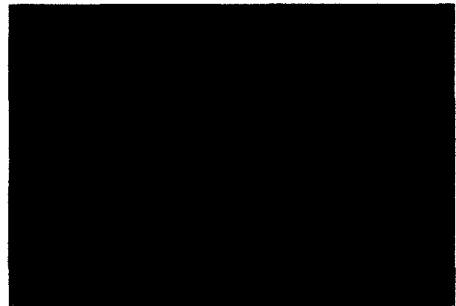
이는 동결융해시험 중에 내구성능 저하에 의한 동탄성계수의 감소가 재생골은골재에 부착된 모르타르량 및 모르타르의 공극구조에 의하여 크게 영향을 받았기 때문이라 판단된다.<sup>8)</sup>

다. 내구성 지수

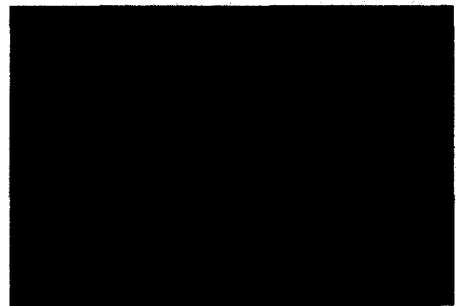
동결융해저항성을 나타내는 내구성 지수는 Table

Table 9 Freezing and thawing test results of recycled concretes

Mix type	Freezing and thawing cycle (number)	Mass loss ratio (%)	Relative dynamic modulus of elasticity (%)	Durability factor
FRA1	300	0.69	76.6	76.6
FRA2	300	0.71	72.5	72.5
FRA3	300	0.73	69.7	69.7
FRA4	300	0.76	69.2	69.2
FRA5	300	0.84	60.8	60.8
FRB1	300	0.76	74.6	74.6
FRB2	300	0.79	72.9	72.9
FRB3	300	0.85	69.3	69.3
FRB4	300	0.90	66.8	66.8
FRB5	300	0.93	60.1	60.1



(a) 0 cycle



(b) 300 cycle

Fig. 4 Surface condition of test specimen

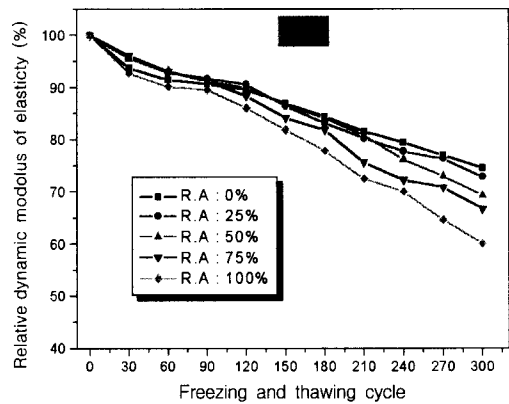
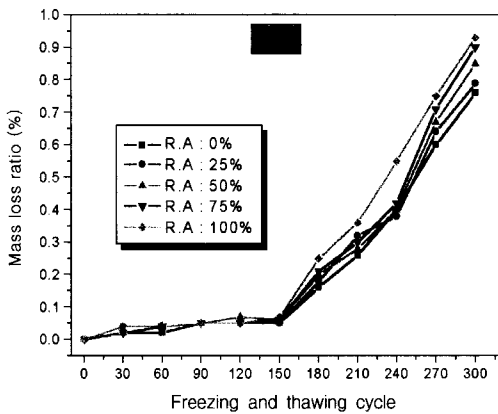
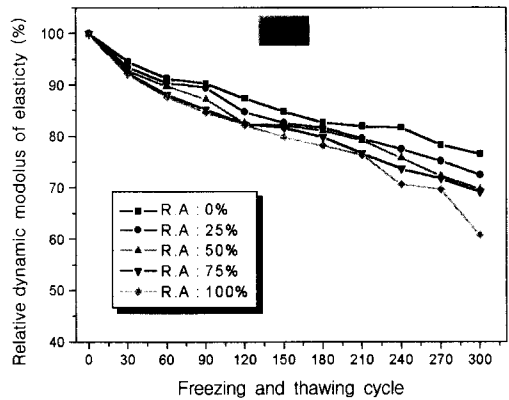
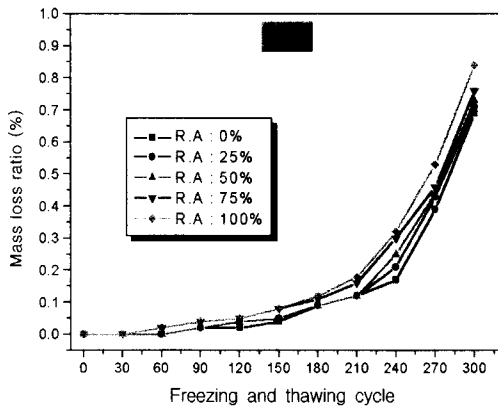


Fig. 5 Change of mass loss ratio by freezing and thawing cycle

Fig. 6 Change of relative dynamic modulus of elasticity by freezing and thawing cycle

9에서 보는 바와 같이 300 사이클에서 물/결합재 비 35%와 45%에 따라 60~76과 60~74로 골재 구성에 상관없이 모든 배합에서 60 이상을 나타내었으며, 재생골재의 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

재생콘크리트의 내구성 지수가 감소하는 이유는 재생골재에 부착된 모르타르에 연행공기가 적은데 기인되었을뿐만 아니라, 파쇄공정의 단계에서 재생골재에 부착된 모르타르에 미세한 균열이 동결융해의 반복작용으로 인하여 품질을 저하시켰기 때문이라 생각된다.<sup>6)</sup>

재생굵은골재를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성을 확보하기 위해서는 콘크리트의 적정공기량

(4~6%)만으로는 만족할 수 없으며, 적정 연행공기를 확보하기 위하여 AE제를 첨가하여야 하는데, 이는 콘크리트내의 자유수의 동결로 인한 체적증가에 따른 압력의 발생을 공극이 완화시키고 자유수의 이동을 원활히 하여 동결융해의 저항성을 증대시키기 때문이다.<sup>3)</sup>

#### IV. 결 론

이 연구는 플라이 애시를 결합재 중량의 20%, 재생굵은골재를 천연쇄석굵은골재의 0%, 25%, 50%, 75%, 100%를 치환하여 압축강도와 동결융해 특성을 구명하였으며, 이 연구를 통해 얻어진

결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압축강도는 재령 28일에 모든 배합에서 300 kgf/cm<sup>2</sup> 이상으로 나타나 고강도 콘크리트에 이용될 수 있을 것으로 생각된다.
2. 중량감소율은 동결융해 300 사이클 모든 배합에서 1% 미만으로 나타났고, 표면박리 현상은 나타나지 않았으며, 재생골재의 대체율이 증가할수록 감소율은 증가하였다.
3. 상대동탄성계수는 모든 배합과 W/B 35%와 45%에서 각각 60~76%와 60~74% 범위로 나타났으며, 재생골재 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.
4. 내구성 지수는 모든 배합에서 60 이상을 나타내었으나, 재생골재 대체율이 100%일 때는 급격히 떨어지는 경향을 나타내었다.
5. 재생골재를 사용한 콘크리트의 압축강도, 동결융해에 따른 중량감소율, 상대동탄성계수, 내구성 지수 시험결과를 볼 때, 이 시험에 사용한 재생골재는 고강도 콘크리트에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

본 논문은 2002년도 농림기술개발사업에 의하여 수행된 연구결과의 일부임

## References

1. Andrzej Ajdukiewicz and Alina Kliszczewicz, 2002, Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, *Cement & Concrete Composites* 24 : 269~279.
2. Buck, A. D., 1977, Recycled concrete as a source of aggregate, *ACI Journal* 74(5) : 212~219.
3. Hasaba, S., M. Kawamura and K. Toriil, 1981, Drying shrinkage and durability of concrete made of recycled concrete aggregate, *Translation of the Japan Concrete Institute* 3 : 55~60.
4. Kim, M. H. and J. M. Kim, 2003, Properties of recycled aggregate concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute* 15(2) : 60~67. (in Korean)
5. Lee, S. H. and C. H. Seo, 2001, Properties of high strength recycled aggregate concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute* 13(6) : 575~583. (in Korean)
6. Moon, D. J., W. S. Paeng and H. Y. Moon, 2002, Freeze and thaw durability of concrete using recycled aggregates, *Journal of the Korea Concrete Institute* 14(3) : 307~314. (in Korean)
7. Penttala, V., 1990, Possibilities of increasing the workability time of high strength concrete, properties of fresh concrete, *Chapman and Hall* : 92~100.
8. 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.
9. Sung, C. Y. and H. J. Jung, 1996, Engineering properties of permeable polymer concrete with stone dust and fly ash, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 38(4) : 147~154. (in Korean)