

## 폴리프로필렌 섬유보강 에코콘크리트의 동결융해 특성

### Freezing and Thawing Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Eco-concrete

성 찬 용\*

Sung, Chan Yong

#### Abstract

This study is performed to evaluate freezing and thawing properties of polypropylene fiber reinforced eco-concrete using soil, natural coarse aggregate, soil compound and polypropylene fiber.

The mass loss ratio is decreased with increasing the content of natural coarse aggregate and soil compound, but it is increased with increasing the content of polypropylene fiber.

The ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity and durability factor are increased with increasing the content of natural coarse aggregate and soil compound, but it is decreased with increasing the content of polypropylene fiber.

The mass loss ratio, ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity and durability factor are 1.49~3.32%, 1,870~2,465 m/s,  $77 \times 10^2 \sim 225 \times 10^2$  MPa and 84.6~92.8 after freezing and thawing 300 cycles, respectively.

These eco-concrete can be used for environment-friendly side walk and farm road.

*Keywords : Freezing and thawing, Polypropylene fiber, Eco-concrete, Durability factor, Mass loss ratio, Ultrasonic pulse velocity, Dynamic modulus of elasticity.*

#### I. 서 론

콘크리트는 사회기반시설인 도로, 철도, 항만, 상하수도 등의 토목구조물과 건축구조물에 사용되어 경제와 문화발전에 크게 공헌하여 왔다. 그러나 이

들 콘크리트는 기능을 추구하는데 그쳐 산림과 자연을 파괴하고, 동식물의 서식을 방해하여 환경문제에 있어 부정적으로 인식되고 있다.

우리나라 건설산업은 그동안 산업화와 경제성장에 크게 기여하여 왔으나 각종 건설공사를 수행하는 과정에서 막대한 양의 자원을 활용하였고, 자연에 큰 변화를 준 것도 사실이다. 최근 건설분야에서도 환경문제의 심각성을 인지하고 환경친화적인 사업에 많은 관심을 가지고 있으나 경제성 문제, 품질 문제, 부정적인 인식 등으로 인하여 크게 활

\* 충남대학교 농업생명과학대학  
\* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5798  
Fax: +82-42-821-8877  
E-mail address: cysung@cnu.ac.kr

성화하지 못하고 있다.

최근 일본에서는 콘크리트와 환경의 관계에 있어 환경의 중요성을 크게 강조하는 에코콘크리트라는 개념이 도입된 바, 에코콘크리트란 지구환경부하의 저감에 기여하는 동시에 인간을 포함하는 모든 생물과의 관계에 논리적인 배려가 이루어진 콘크리트로 정의된다. 즉, 에코콘크리트는 폐기물, 오염, 자원고갈 등 환경에 대한 부담을 경감시키는 환경부하 저감형 에코콘크리트와 생물계와의 조화 또는 공존을 꾀하는 생물대응형 에코콘크리트로 대별할 수 있다.<sup>1)</sup>

1992년 6월 리우의 지구환경회의에서 인류가 현재의 상태로 유한한 자원과 에너지를 낭비하고 지구환경을 파괴하는 것이 계속되면 가까운 장래에 인류의 생존을 위태롭게 할 수 있다는 인식에 따라 지구환경문제에 대한 각국의 공동노력을 약속하였다.

한편, 지구환경에 좋은 재료로는 자원과 에너지의 사용량이 적고 사용 후에 발생하는 문제가 적은 것이라고 할 수 있으며, 최근에는 에너지 다소비형의 고성능 재료만이 아니라 환경부하의 저감을 보다 중요시 하는 연구와 생산활동을 하려는 움직임이 일고 있다.

따라서, 본 연구는 공원과 농업시설물 등에 적용하기 위하여 흙과 흙의 단점을 보완할 수 있는 굵은골재, 결합재로 시멘트 대신 환경친화적인 고화

재, 균열을 억제 하기 위하여 폴리프로필렌 섬유를 혼합한 자연친화적인 에코콘크리트를 개발하고, 그 에코콘크리트의 동결융해시험 후의 중량감소율, 초음파진동속도, 동탄성계수, 내구성지수 등의 특성을 실험적으로 구명하여, 내구성이 우수한 에코콘크리트를 개발하기 위한 기초자료를 수립하는데 그 목적이 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용재료

#### 가. 흙

충북지역 경작로에서 채취한 점토질 세사이며, 그 물리적 성질은 Table 1과 같다.

#### 나. 굵은골재

물리·역학적 성질과 내구성 증진을 위해 사용한 굵은골재는 금강유역에서 채취한 천연굵은골재로서, 표면건조포화상태의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

#### 다. 폴리프로필렌 섬유

에코콘크리트의 균열방지와 휨강도 증진을 위해 사용된 망사형 프로필렌 섬유의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

Table 1 Physical properties of soil

USCS	Specific gravity (20°C)	Atterberg limits (%)		Grain size distribution (%)					OMC (%)	$\gamma_d$ max (tf/m <sup>3</sup> )
		LL	PI	NO. 4	NO. 10	NO. 40	NO. 200	0.005 mm		
ML	2.66	36.8	12.9	97.6	91.7	82.1	45.9	10.0	18.2	1.677

Table 2 Physical properties of coarse aggregate

Classification	Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Absorption ratio (%)	F.M	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )
Natural gravel	4.76~10	2.64	2.62	7.28	1.502

Table 3 Physical properties of polypropylene fiber

Item	Length (mm)	Absorption ratio (%)	Specific gravity	Melt point	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Acid and alkali resistance
Homopolymer polypropylene	19	0	0.91	162 over	350~770	$35 \times 10^2$ over	Very high (inactivity)

Table 4 Chemical composition of soil compound (Unit: %)

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
23.9	8.4	2.2	54.6	2.5	6.6	1.8

라. 고화재

우리나라 S산업에서 생산한 제품으로 주원료인 시멘트에 수종의 혼합물을 첨가한 환경친화적인 재료로, 점성토, 개펄 및 산업부산물 등을 유효하게 고화시키며, 동·식물에 피해가 없는 분상의 결합 재료로서, 그 화학성분은 Table 4와 같다.

Table 5 Mix design of polypropylene fiber reinforced eco-concrete (Unit: wt. %)

Mix type	Soil	Natural coarse aggregate	Soil compound	Polypropylene fiber
PS1	100.0	-	-	-
PS2	79.9	10	10	0.1
PS3	69.9	10	20	0.1
PS4	79.7	10	10	0.3
PS5	69.7	10	20	0.3
PS6	69.9	20	10	0.1
PS7	59.9	20	20	0.1
PS8	69.7	20	10	0.3
PS9	59.7	20	20	0.3

2. 시험체 제작

가. 배합설계

흙의 최적함수비와 다짐의 편의성 및 강도를 고려한 최적의 배합을 위하여 흙은 노건조상태의 것을, 굵은골재는 표면건조상태의 것을 사용하였고 적절한 강도와 내구성 및 경제성을 가지도록 흙, 굵은골재, 고화재와 폴리프로필렌 섬유를 변화시킨 9종류의 배합으로 하였으며, 흙, 굵은골재, 고화재를 잘 섞은 후 물을 첨가하여 혼합한 후 망사형 폴리프로필렌 섬유를 혼합하였으며, 그 배합 설계는 Table 5와 같다.

나. 시험체 제작 및 양생

시험체는 7.6 × 7.6 × 41.2 cm로 KS F 2312 (흙의 다짐시험 방법) 중 D-2 Type 방법에 준하여 3층으로 나누어 각층 사이의 분리가 생기지 않고 충분한 다짐이 되도록 제작하였고, 제작 즉시 탈형하여 7일동안 온도 20±3℃, 습도 70%의 실

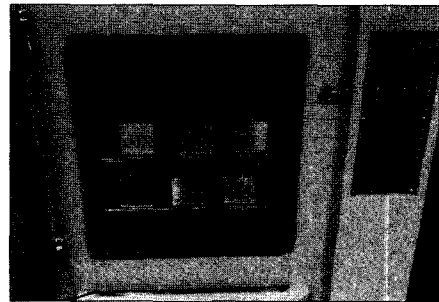


Fig. 1 Test apparatus of freezing and thawing



Fig. 2 Manufacture of testpiece

험실에서 기건양생하였으며, Fig. 1은 동결융해시험 장치이고, Fig. 2는 시험체 제작전경이다.

### 3. 시험방법

동결융해시험은 재령 7일에 시험체를 KS F 2456(급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법) 중 A방법(수중 급속 동결융해 시험방법)에 준하여 1사이클을 4시간으로 300사이클 동안 실시 하였으며, 50사이클마다 중량, 초음파진동속도, 동탄성계수를 3회 반복 측정된 것의 평균값을 실험 결과치로 하였다.

가. 중량감소율시험은 동결융해 매 50사이클 간격으로 중량을 측정하여, 다음 식으로 산출하였다.

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

여기서, W = 동결융해 C 사이클에서의 중량감소율 (%)

$W_0$  = 동결융해 0 사이클에서의 중량 (g)

$W_1$  = 동결융해 C 사이클에서의 중량 (g)

나. 초음파진동속도시험은 영국 C.N.S사의 PUNDIT 를 사용하여 BS 4408. (콘크리트의 초음파진동속도 측정방법)에 준하여 측정된 후, 다음 식으로 산출하였다.

$$P.V = \frac{L}{D \times 10^{-6}}$$

여기서, P.V = 초음파 진동속도 (m/s)

D = 측정치 (s)

L = 시험체의 길이 (m)

다. 동탄성계수시험은 시험체 길이방향 양면 중앙에 종진동에 의한 공명진동측정기를 부착하여 BS 1881 part 209 (콘크리트의 동탄성계수 측정 방법)에 준하여 측정된 후, 다음 식으로 산출하였다.

$$E.M = D W m^2 / 10.19716$$

여기서, E.M = 동탄성계수(MPa)

$$D = 408 \times 10^{-6} L/b \cdot t \text{ (s}^2/\text{cm}^2\text{)}$$

W = 시험체의 중량 (kgf)

n = 측정치 ( $\frac{1}{s}$ )

L = 시험체 길이 (cm)

b = 시험체 폭 (cm)

t = 시험체 높이 (cm)

라. 내구성지수시험은 동결융해 300사이클에서 KS F 2456(급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법) 중 A방법(수중급속동결융해 시험방법)에 준하여 실시하였으며, 다음 식으로 산출하였다.

$$D.F = \frac{PN}{M}$$

여기서, D.F = 내구성지수

P = N 사이클에서 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. 중량감소율

폴리프로필렌 섬유보강 에코콘크리트의 동결융해 사이클별, 배합별 중량감소율을 나타내면 Table 6 및 Fig. 1과 같다.

Table 6과 Fig. 1에서 보는 바와 같이 에코콘크리트의 중량감소율은 굵은골재와 고화재의 혼입량이 많을수록 작게 나타났고, 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 증가할수록 크게 나타났으며, 각 동결융해 사이클에서 다같이 PS7에서 중량감소율이 가장

Table 6 Mass loss ratio by mix type after freezing and thawing (%)

Mix type	Number of freezing and thawing cycle						
	0	50	100	150	200	250	300
PS1	0	2.36	2.56	2.63	2.71	2.78	3.32
PS2	0	0.43	0.76	1.14	1.54	2.19	2.88
PS3	0	0.18	0.56	0.90	1.28	1.54	1.77
PS4	0	0.46	0.81	1.17	1.91	2.53	2.91
PS5	0	0.36	0.67	1.04	1.30	1.59	1.87
PS6	0	0.40	0.70	1.06	1.33	1.61	1.89
PS7	0	0.14	0.25	0.79	1.10	1.31	1.49
PS8	0	0.41	0.73	1.10	1.34	1.70	1.94
PS9	0	0.16	0.36	0.81	1.27	1.43	1.75

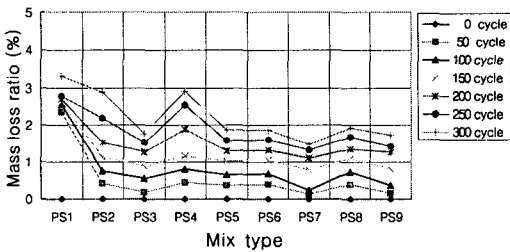


Fig. 1 Change of mass loss ratio by mix type after freezing and thawing

작게 나타났는데, 이러한 이유는 굵은골재의 혼입량이 증가되면 상대적으로 수분을 증발시키는 부분이 줄어들고, 고화재의 혼입량이 증가되면 수분이 수화반응에 사용되어 증발되는 수분의 양이 적게 되기 때문이며, 폴리프로필렌 섬유는 수분을 흡수하지 않기 때문에 섬유의 혼입량이 과도하게 증가되면 증발되는 수분의 양이 많기 때문이라 생각된다.<sup>5),7)</sup>

콘크리트의 구조물은 콘크리트 중의 수분이 동결되면 체적이 팽창하고, 균열이 발생하여 강도저하는 물론, 심한 경우에는 표면에 박리현상(剝離現象)이 나타난다. 그러나 모든 배합에서 중량감소율은 300사이클에서 1.49~3.32%이하로 나타났으며, 시험체 표면의 박리현상은 중량감소율이 2%이상인 PS1과 PS2 및 PS4에서 매우 미미하게 나타났다.

한편, 300사이클에서 중량감소율이 1.5 % 이하인 배합비는 굵은골재와 고화재 및 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 각각 20%, 20%, 0.1%인 PS7에서 나타났으며, 굵은골재와 고화재 및 폴리프로필렌 섬유를 혼입하지 않은 PS1 중량감소율의 44 % 정도로 작게 나타났다.

따라서, PS7 배합은 고화재의 함량이 많아 건조수축에 따른 팽창률이 작고 중량감소율이 작아 환경친화형 콘크리트 시설물에 적합할 것으로 판단된다.

## 2. 초음파진동속도

폴리프로필렌 섬유보강 예코콘크리트의 동결융해 사이클별, 배합별 초음파진동속도 시험결과를 나타내면 Table 7 및 Fig. 2와 같다.

Table 7 Ultrasonic pulse velocity by mix type after freezing and thawing (m/s)

Mix type	Number of freezing and thawing cycle						
	0	50	100	150	200	250	300
PS1	1,970	1,959	1,951	1,935	1,921	1,898	1,870
PS2	2,038	2,020	2,005	1,995	1,975	1,968	1,941
PS3	2,382	2,377	2,358	2,345	2,333	2,297	2,287
PS4	2,004	1,989	1,978	1,965	1,948	1,933	1,905
PS5	2,291	2,252	2,244	2,227	2,201	2,173	2,152
PS6	2,129	2,103	2,086	2,063	2,054	2,033	2,010
PS7	2,581	2,565	2,554	2,532	2,516	2,498	2,465
PS8	2,110	2,086	2,077	2,052	2,030	2,018	2,008
PS9	2,440	2,425	2,402	2,372	2,361	2,340	2,315

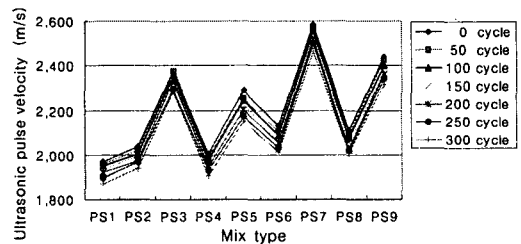


Fig. 2 Change of ultrasonic pulse velocity by mix type after freezing and thawing

초음파진동속도는 종파를 시험체에 방사해서 그 전파시간으로부터 얻어지는 전파속도에 의해 시험체의 성능을 평가하는 방법으로서, 수cm에서 수m의 규모에 이르기 까지 적용할 수 있다. 또한 오래된 구조물이나 화재를 입은 구조물의 내구성을 측정할 수도 있으며, 음향기기를 만드는 목재의 재질을 분석하는 데에도 사용되고, 충격하중, 지진하중에 구속받는 구조물의 응력해석시 활용되는 등 광범위하게 이용할 수 있는 비파괴시험방법이다.<sup>3)</sup>

동결융해시험 후의 초음파진동속도는 시험체의 열화현상으로 Table 7에서 보는 바와 같이 동결융해 사이클이 증가함에 따라 모든 배합에서 다같이 감소하는 경향을 보였고, 굵은골재와 고화재 및 폴리프로필렌 섬유의 혼입량에 크게 의존 되었으며, 동결융해 300사이클에서 PS2~PS9의 1,905~2,465 m/s에 비해 굵은골재와 고화재 및 폴리프로필렌 섬유를 혼입하지 않은 PS1의 1,870 m/s에 비하여 1.01~1.31배 크게 나타났다.

또한, 동결융해 300사이클의 경우, 굵은골재량이 10%에서 20%로 증가함에 따라 3~7%정도의 초음파진동속도 증가를 나타내었고, 고화재가 10%에서 20%로 증가함에 따라 13~22%정도 크게 나타났으나, 폴리프로필렌 섬유가 0.1%에서 0.3%로 증가함에 따라 0.1~6%정도 작게 나타났다.

한편, 초음파진동속도는 굵은골재와 고화재의 혼입량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며,<sup>6)</sup> 고화재가 굵은골재보다 더 크게 영향을 미쳤는데, 이러한 이유는 흙보다 입자가 작은 고화재의 미세공극 충전효과와 굵은골재가 전파의 흐름을 방해하는 요인이 감소되었기 때문이며, 이로 인하여 고화재의 혼입량이 많을수록 내구성은 향상된다고 할 수 있다.

또한, 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 초음파진동속도가 작게 나타난 원인은 섬유가 초음파의 속도를 저해하였기 때문이라 생각된다.

### 3. 동탄성계수

폴리프로필렌 섬유보강 에코콘크리트의 동결융해 사이클별, 배합별 동탄성계수 시험결과를 나타내면 Table 8 및 Fig. 3과 같다.

동탄성계수는 하중을 가하지 않고 전파를 시험체의 상대면에 방사하여 측정된 주파수로 동탄성계수를 구하는 방법으로, 콘크리트 구조물의 열화상황 등 콘크리트의 성능시험에도 사용되며, 대체적으로 탄성계수가 크면 강도가 크게 나타난다는 것을 의미한다.<sup>2)</sup>

따라서, 동탄성계수는 물체가 치밀하거나 강도가 크면 크게 나타나므로, 시험체의 내구성을 파악하기 위하여 동탄성계수를 측정하였다.

동결융해시험 후의 동탄성계수는 Table 8에서

Table 8 Dynamic modulus of elasticity by mix type after freezing and thawing ( $\times 10^2$  MPa)

Mix type	Number of freezing and thawing cycle						
	0	50	100	150	200	250	300
PS1	84	82	81	80	79	78	77
PS2	112	111	110	109	108	107	106
PS3	191	189	187	186	184	183	181
PS4	107	106	105	104	102	101	100
PS5	161	159	157	156	155	153	151
PS6	143	142	141	140	139	138	137
PS7	235	234	232	230	229	227	225
PS8	120	119	118	117	116	115	114
PS9	210	208	207	205	203	202	200

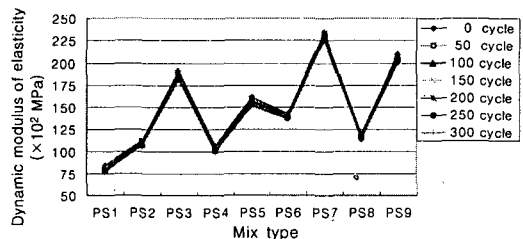


Fig. 3 Change of dynamic modulus of elasticity by mix type after freezing and thawing

보는 바와 같이 동결융해 사이클이 증가함에 따라 모든 배합에서 감소하는 경향을 보였고, 굵은골재와 고화재 및 폴리프로필렌 섬유 혼입량에 크게 의존되었으며, 동결융해 300사이클에서 PS2~PS9의  $100 \times 10^2 \sim 225 \times 10^2$  MPa에 비하여 굵은골재와 고화재 및 폴리프로필렌 섬유를 혼입하지 않은 PS1의  $77 \times 10^2$  MPa에 비해 1.29~2.92배 크게 나타났다.

또한, 동결융해 300사이클의 경우, 굵은골재량이 10%에서 20%로 증가함에 따라 14~32% 정도의 동탄성계수 증가를 나타내었고, 고화재가 10%에서 20%로 증가함에 따라 51~75%정도 크게 나타났으나, 폴리프로필렌 섬유가 0.1%에서 0.3%로 증가함에 따라 5~16%정도 작게 나타났다.

한편, 동탄성계수는 굵은골재와 고화재의 혼입량이 증가할수록 증가하였고, 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 증가할수록 감소되었으며, 초음파진동속도와 유사한 경향을 나타내었다.

#### 4. 내구성지수

동결융해저항성을 나타내는 내구성지수는 Table 9에서 보는 바와 같이 300사이클의 모든 배합에서 80이상을 나타내었고, PS7에서 가장 크게 나타났으며, PS2~PS9의 88.4~92.8에 비해 굵은골재와 고화재 및 폴리프로필렌 섬유를 혼입하지 않은 PS1의 84.6에 비하여 4~10%정도 크게 나타났는데, 이는 고화재 성능이 우수하고, 환경친화적인  $Al_2O_3$ 의 함량이 고화재가 보통포틀랜드시멘트보다 2배정도 많은 8.4%나 함유되어 있어 내구성지수가 높게 나타난 것으로 판단된다.

또한, 내구성지수는 골재량이 10%에서 20%로 증가함에 따라 1~2%정도 증가하였고, 고화재가 10%에서 20%로 증가함에 따라 2~3%정도 크게 나타났으나, 폴리프로필렌 섬유가 0.1%에서 0.3%로 증가함에 따라 1%정도 작게 나타났다.

한편, 동결융해에 대한 저항성은 굵은골재와 고

Table 9 Durability factor by mix type after freezing and thawing 300 cycles

Mix type	Durability factor
PS1	84.6
PS2	89.2
PS3	91.0
PS4	88.4
PS5	90.8
PS6	90.7
PS7	92.8
PS8	89.8
PS9	91.9

화재의 혼입량이 증가함에 따라 크게 나타났고, 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 작게 나타났는데, 이러한 이유는 굵은골재와 고화재의 혼입량이 증가하면 투수계수가 작게 나타나고 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 증가하면 투수계수가 크게 나타났다는 연구와 유사한 결과라 하겠다.<sup>4)</sup>

#### IV. 결 론

이 연구는 흙, 천연굵은골재, 고화재 및 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 에코콘크리트를 개발하여, 동결융해시험후의 특성을 구명한 것으로서, 이 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 중량감소율은 굵은골재와 고화재의 혼입량이 증가할수록 작게 나타났으며, 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 증가할수록 크게 나타났고, 고화재가 굵은골재보다 중량감소에 더 크게 영향을 미쳤으며, 동결융해 300사이클에서 흙 59.9%, 굵은골재 20%, 고화재 20%, 섬유 0.1% 배합에서 중량감소율이 가장 작게 나타났다.

2. 초음파진동속도는 동결융해 300사이클에서 1,870~2,465 m/s, 동탄성계수는  $77 \times 10^2 \sim 225 \times 10^2$  MPa의 범위로 나타났으며, 굵은골재와 고화재의 혼입량이 증가할수록 증가하였고, 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 증가할수록 감소하였으며, 고화재

의 영향이 굵은골재의 영향보다 더 크게 나타났다.

3. 내구성지수는 84.6~92.8로 굵은골재와 고화재의 혼입량이 증가할수록 크게 나타났고, 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 다소 작게 나타났으며, PS7의 배합에서 동결융해에 대한 내구성지수가 가장 크게 나타났다.

4. 굵은골재와 고화재 혼입량의 증가는 동결융해시 중량감소율을 저하시키고 내구성 증진효과를 얻을 수 있으나, 폴리프로필렌 섬유는 배합시 뭉침현상이 나타나기 쉬우므로 세심한 주의가 요망되며, PS7의 배합을 환경친화형이 요구되는 곳에 사용하면 주변환경과 조화를 잘 이룰수 있는 에코콘크리트 시설물이 될 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 2003년도 농림기술개발 사업에 의하여 수행된 연구결과의 일부임.

### References

1. KCI, 2000, Environment conscious concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute* 12(5): 17-28. (in Korean)
2. Malhotra, V. H and N. J. Carino, 1991, Hand book on nondestructive testing of concrete, CRC Press: 50-83.
3. 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* 82(2): 247-276
4. Sung, C.Y, S.H. Rhee, and C.S. Song, 2001, Physical and mechanical properties of eco-concrete with polypropylene fiber, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(1): 116-121. (in Korean)
5. Sung, C.Y and Y.I. Kim, 2004, Development of polypropylene fiber reinforced environmental friendly pavement material for farm road, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(1): 35-40. (in Korean)
6. Sung, C.Y, 2004, Permeability of polypropylene fiber reinforced soil concrete pavement material, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(6): 13-19. (in Korean)
7. Sung, C.Y and Y.I. Kim, 2004, Development of surface pavement materials for environment-friendly farm road, *Jour. Agri. Sci. Chungnam Nat'l Univ.* 31(2): 105-114. (in Korean)