

경량 폴리머 콘크리트의 난연성 및 동결융해 저항성

Incombustibility and Freezing-Thawing Resistance of Lightweight Polymer Concrete

채경희* · 최예환** · 연규석** · 이윤수*** · 주명기***

Chae, Kyung Hee · Choi, Ye Hwan · Yeon, Kyu Seok · Lee, Youn Su · Joo, Myung Ki

Abstract

The effects of binder content and silica sand content on the durability characteristics of lightweight polymer concretes are examined. As a result, the flame lingering times using unsaturated polyester resin and non-combustible polyester resin were 60~120 and 0~4 seconds respectively, and the combustion lengths were 9~11 mm and 0~3 mm, respectively. Thus it is believed that the lightweight polymer concrete was perfectly non-combustible and the light weight polymer concrete in which non-combustible material was added was perfectly non-combustible. The percent of original mass of lightweight polymer concrete, according to the freezing-thawing experiment, was below 0.3 %, which was much less than that of cement concrete. The pluse velocity, for the case of the binder content 28 %, showed the minimum decreasing rate for the lightweight polymer concrete with silica sand content of 50 %. The higher the binder content, the greater the durability. That is much higher than other material and believed that the freezing-thawing was suppressed by a low absorption.

Keywords : Lightweight polymer concrete, Binder content, Silica sand content, Incombustibility, Freezing-thawing resistance

I. 서 론

콘크리트의 내구성이란 동결융해, 건조수축 등이 반복하여 작용하는 기상 작용과 화학 물질에 의한 침식작용, 중성화, 철근의 부식 등에 저항하여 오랜 기간 동안 구조물이 견딜 수 있는 성질이라고 할 수 있으며, 콘크리트는 다른 건설재료에 비하여 내구성이 우수한 것으로 알려져 있다. 그렇지만, 시멘트 콘크리트는 다른 재료와 비교할 때 중량에 비해

* 정희원, 우송공업대학 건축설비과
** 정희원, 강원대학교 농업공학부
*** 정희원, 주성대학 토목공학과
* Corresponding author. Tel.: +82-42-629-6388
fax: +82-42-626-6390
E-mail address: cghee@webmail.woosongtech.ac.kr

비강도가 작다는 큰 결점을 가지고 있다. 따라서 구조물이 거대화, 고층화로 되어 감에 따라 경량이면서 고강도를 갖는 콘크리트를 개발할 필요성이 높아지고 있으며 이에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있는 실정이다.^{1),2),3),4),5)}

구조재료의 경량화에 따르는 기대효과로는 자중의 경감, 작업성, 경제성 및 높은 생산성 등 부가 가치를 창출 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.¹⁾

일반적으로 폴리머 콘크리트는 시멘트 콘크리트와 비교할 때 초기에 고강도를 발현할 뿐 아니라 접착성, 수밀성, 내약품성, 내동결융해성 등에 우수한 고성능 건설재료로서 그 용도가 확대되고 있다.^{6),7),8),9)} 그러나 폴리머 콘크리트의 결합재로 사용되는 불포화 폴리에스터 수지는 열이나 자외선에 약하다는 단점을 가지고 있기 때문에 이러한 단점을 보완하기 위한 연구가 지속적으로 전개되고 있으나 아직 결과는 미비한 상태에 있다.

따라서, 본 연구에서는 부재의 경량화와 폴리머 콘크리트의 단점의 하나인 내화성을 보완할 목적으로 인공 경량골재와 결합재로 난연성 불포화 폴리에스터 수지 및 불포화 폴리에스터 수지를 사용하여 경량 폴리머 콘크리트를 개발함에 있어서 결합재 및 잔골재로 사용된 규사와 경량골재의 량을 변화시켜 경량이면서 내구성이 우수한 폴리머 콘크리트의 최적 배합비를 도출하기 위하여 실험을 실시하였다.

II. 사용재료

1. 결합재

결합재로서는 액상 불포화 폴리에스터 수지 및 난연제가 포함된 난연용 액상 불포화 폴리에스터 수지(UP)에 희석제로 스틸렌 모노머(St)를, 촉진제로 옥탄산 코발트 8 % mineral turpentine 용액(CoOc), 촉매제로서 methyl ethyl peroxide (MEKPO)를 사용하였다. 사용된 액상수지의 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of unsaturated polyester resin and flame retarder

	Specific gravity (25°C)	Viscosity (25°C, poise)	Acid value	Styrene content
Unsaturated polyester resin	1.49	650~850	16.9	38.0
Unsaturated polyester resin with flame retarder	1.13	325	16.9	38.0

2. 충전재 및 경량골재

충전재는 중질탄산칼슘(CaCO₃), 골재는 규사 및 국내에서 생산되는 인공경량골재 2종류를 사용하였다. 충전재 및 경량골재의 함수율은 0.1 % 이하로 하였으며, 그 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Properties of filler and aggregates

Type of filler and aggregate		Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Water content (%)	Organic impurities
Filler	Heavy calcium carbonate (CaCO ₃)	<2.5×10 ⁻³	2.70	<0.1	Nil
Fine Agg.	Silica sand	0.23~0.27	2.61	<0.1	Nil
	Perlite type	<2.5	0.12	<0.1	Nil
Coarse Agg.	Expanded shale	< 8	1.30	<0.1	Nil

III. 시험방법

1. 시험체 제작

시험체는 KS F 2419 (폴리에스터 레진 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법)에 의하여 제작하였으며, 배합비는 Table 3과 같다. 또한 콘크리

Table 3 Mix proportions of lightweight polymer concretes
(Unit : vol%)

Binder		Filler	Type of aggregate		
UP	SRA		Expanded shale	Perlite	Silica sand
23.4	2.6	7.0	16.75	35.18	15.07
				25.13	25.12
				15.07	35.18
25.2	2.8	7.0	16.25	34.13	14.62
				24.38	24.37
				14.62	34.12
27.0	3.0	7.0	15.75	33.08	14.17
				23.63	23.62
				14.17	33.08

Notes, UP : Unsaturated polyester resin.
SRA : Shrinkage-reducing agent.

트의 양생은 항온항습실 [25 °C, 60 % (RH)]에서 7일간 양생시킨 후 시험에 사용하였으며, 난연성 시험용 공시체는 10×10×120 mm, 동결융해 시험용 공시체는 10×10×40 cm 크기의 공시체를 사용하였다. 또한 양생 후의 공시체는 질량을 공시체 용적으로 나누어 비중을 구하였다.

2. 난연성 시험

플라스틱의 난연성능을 평가하는 시험방법 및 기준으로는 UL (Underwriters' Laboratories Inc.), IEC (International Electrotechnical Commission) JIS, ASTM, KS 등이 있으나 수지를 결합재로 사용한 폴리머 콘크리트나 폴리머 모르타르에 대한 난연성능 평가 표준시험방법이나 난연등급의 판정조건은 제정되어 있지 않다. 본 실험에서는 Fig. 1과 같이 KS M 3015에 규정된 불꽃지연시간, 연소길이와 중량감소율을 난연성 평가의 주요 기준으로 변수별 시편의 난연성능을 상대 비교 분석하였다. KS M 3015에 의한 불꽃지연시간은 점화용 청색 불꽃의 끝을 연직방향과 30도 각을 갖

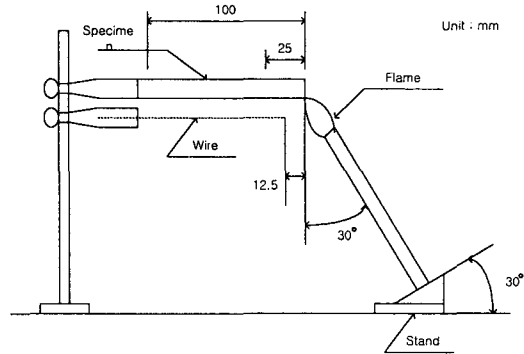


Fig. 1 Device for incombustibility test

도록 하고 30초 동안 접촉시켰다가 펜 다음 시편 자체가 자기소화하는 시간을 말한다. 이때 다만 자기 소화시간이 180초를 초과하면 불을 붙여서 11고 시편을 가연성으로 판정한다. 또한 연소길이는 불을 끈 후 자기소화하면서 불꽃이 닿는 끝부분으로부터 타들어 간 길이를 말한다. 연소길이가 25 mm 이하의 경우는 불연성 25 mm 이상 100 mm 이하의 경우는 자기소화성이라 한다.

3. 동결융해시험

시멘트 모르타르 및 콘크리트의 세공조직 중에서 직경이 10 nm 이하의 켈공극과 같은 미세한 세공은 그 중에 포함되어 있는 수분이 -78 °C 이하의 극저온에서도 동결의 문제가 없는 반면에 직경이 비교적 큰 모세관공극 중의 수분은 동결하여 시멘트 모르타르 및 콘크리트의 동결을 일으키는 하나의 원인이 된다.¹⁰⁾ 일반적으로 시멘트 모르타르 및 콘크리트의 내동결융해성은 불량하고 이것은 특히 동절기 사용에 있어서 중요한 문제가 된다. 따라서 시멘트 모르타르 및 콘크리트의 내동결융해성은 내구성 판정을 위한 중요한 지표가 된다.

본 연구에서 동결융해시험은 KS F 2456 (급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)에 준하여 수중 급속 동결융해시험을 하였으며, 이때 공시체의 온도는 동결시 -18 °C, 융해시 4 °C가 되

게 하였고, 동결융해의 1사이클은 2시간 40분이 소요되었다. 시험동안 매 50 사이클 간격으로 측정하였으며, 동결융해의 반복이 300 사이클이 되었을 때 시험을 완료하였다. 이때의 중량감소, 초음파 진동속도, 상대 동탄성 계수 및 내구성 지수는 다음 식으로 산출하였다.

가. 중량감소시험

중량감소시험은 동결융해 매 50 사이클 간격으로 중량을 측정하여 다음 식으로 산출하였다.

$$W = \frac{(W_0 - W_n)}{W_0} \times 100$$

여기서, W = 동결융해 n 사이클 후의 중량감소율 (%)

W₀ = 동결융해 0 사이클에서의 중량 (g)

W_n = 동결융해 n 사이클에서의 중량 (g)

나. 초음파전파속도시험

초음파전파속도는 10×10×40 cm의 공시체에 PUNDIT를 사용하여 BS 4408 (콘크리트의 초음파전파속도 측정방법)에 준하여 측정한 후 다음 식으로 산출하였다.

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

여기서, P · V = 초음파전파속도(m/s),

D = 초음파 전파 측정치(s),

L = 공시체 길이(m)

다. 상대 동탄성 계수 시험

동탄성 계수는 10×10×40 cm인 공시체의 길이 방향 양면 중앙에 종진동에 의한 공명진동을 측정하여 BS 1881 (콘크리트의 동탄성 계수 측정방법)에 준하여 측정하였으며, 상대 동탄성 계수는 다음 식으로 산출하였다.

$$P_n = (n_1/n)^2 \times 100$$

여기서, P_n = 동결융해 n 사이클 후의 상대 동탄성 계수 (%)

n = 동결융해 0 사이클에서의 가로 1차 진동주파수

n₁ = 동결융해 n 사이클 후의 가로 1차 진동주파수

라. 내구성 지수

내구성 지수는 동결융해의 반복이 300 사이클 (KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)로 완료되었을 때 다음 식으로 산출하였다.

$$DF = PN / M$$

여기서, DF = 내구성 지수

P = N 사이클에서의 상대 동탄성 계수 (%)

N = P값이 60%에 달했을 때의 사이클 수 또는 P값이 60%가 되지 않았을 때는 최종 사이클 수 (300 사이클)

M = 동결융해시험을 정지했을 때의 사이클 수 (300 사이클)

IV. 결과 및 고찰

1. 난연성

가. 불꽃잔존시간

Fig. 2 및 Fig. 3에는 경량 폴리머 콘크리트의 불꽃잔존시간과 결합재 첨가량 및 규사 치환율과의 관계를 나타내었다. 경량 폴리머 콘크리트의 불꽃잔존시간은 결합재 첨가량의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며 그 값은 0~4초로 크지 않았다. 이것은 난연제를 첨가하지 않은 폴리머 모르타르의

60~120초보다 매우 작은 값이다.⁹⁾ 또한, 모든 결합재 첨가량에 대해 관계없이 경량 폴리머 콘크리트의 불꽃잔존시간은 규사 치환율의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 경량 폴리머 콘크리트에서 규사 치환율이 증가함에 따라 결합재로 사용된 불포화 폴리에스터 수지의 양이 감소하기 때문이라 판단된다. 일반적으로 불포화 폴리에스터 수지의 연소는 분해 생성물과 산소의 연쇄반응이고 이 반응은 연소시에 발생하는 H 라디칼이나 OH 라디칼의 증가에 의해서 촉진된다.¹¹⁾

나. 연소길이

Fig. 4 및 Fig. 5에는 경량 폴리머 콘크리트의 연소길이에 대해 결합재 첨가량 및 규사 치환율과의 관계를 나타내었다. 경량 폴리머 콘크리트의 연소길이는 결합재 첨가량의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 그 값은 0~3 mm로 크지 않았다. 이것은 난연제를 첨가하지 않은 폴리머 모르타르의 9~11 mm보다 매우 작은 값이다.⁹⁾ 또한, 모든 결합재 첨가량에 대해 경량 폴리머 콘크리트의 연소길이는 규사 치환율의 증가에 따라 감소하는 경향

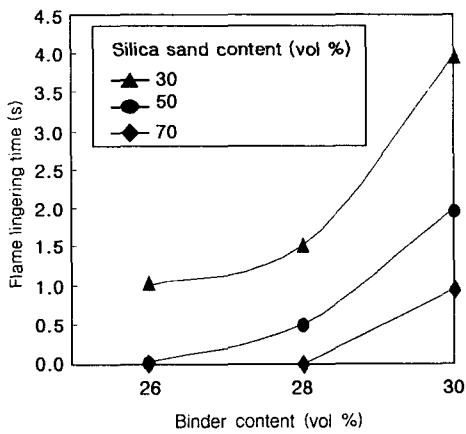


Fig. 2 Relationship between binder content and flame lingering time

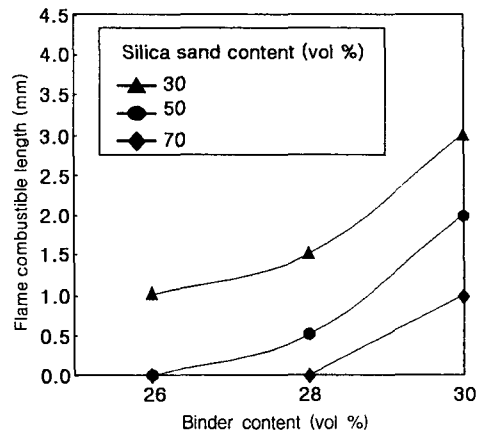


Fig. 4 Relationship between binder content and flame combustible length

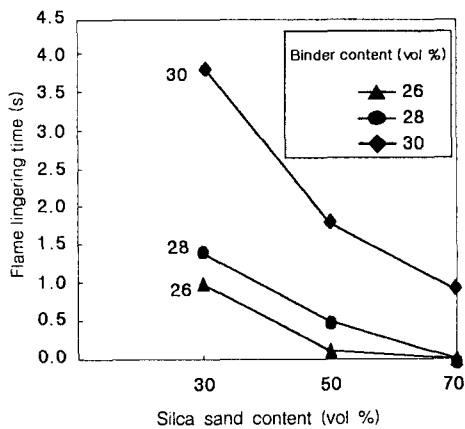


Fig. 3 Relationship between silica sand content and flame lingering time

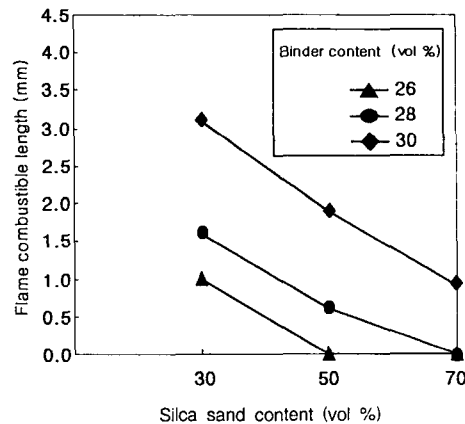


Fig. 5 Relationship between silica sand content and flame combustible length

을 나타내었다. 이상과 같은 고찰을 통하여 KS M 3015에 의한 불꽃지연시간 및 연소시간에 의한 난연성 판정기준을 종합적으로 고려하면 일반 불포화 폴리에스터 수지를 사용한 경량 폴리머 콘크리트의 경우에는 준불연으로 볼 수 있으며, 난연제가 포함된 경량 폴리머 콘크리트는 완전 불연소하였다.

이상의 결과로 볼 때 일반 불포화 폴리에스터 수지를 사용한 경량 폴리머 콘크리트의 경우에 있어서도 난연제의 사용에 의해 난연성의 개선이 가능하다고 판단된다.

2. 동결융해 저항성

가. 중량감소

Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8은 결합재 첨가량과 규사 치환율에 따른 경량 폴리머 콘크리트의 중량 감소율과 동결융해 사이클과의 관계를 나타낸 것이다. 경량 폴리머 콘크리트의 중량 감소율은 결합재 첨가량 및 규사 치환율의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타냈으나 결합재 첨가량 및 규사 치환율의 차이에 따른 변화는 0.3 % 정도로 매우 작았다. 이것은 불포화 폴리에스터 수지의 접착성이 우수하기 때문에 골재와 결합재의 사이에 균열이 일어나지 않아 동결융해 진행 동안 물의 침투를 억제하는 것

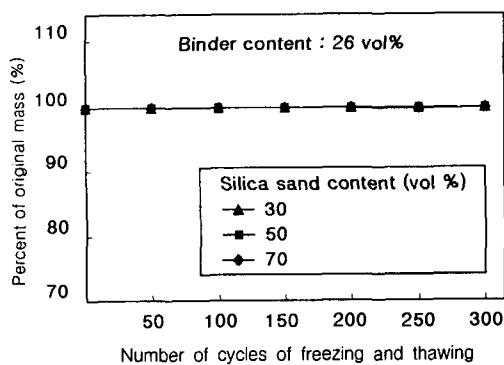


Fig. 6 Number of cycles of freezing and thawing versus mass change of lightweight polymer concretes with binder content of 26 %

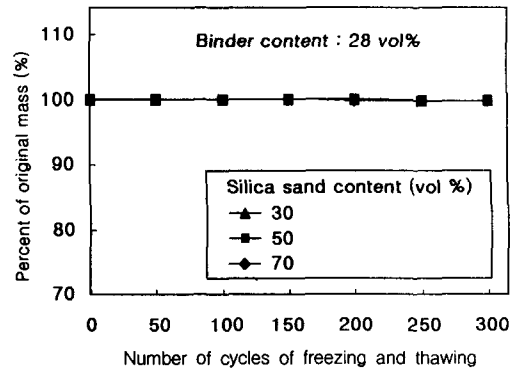


Fig. 7 Number of cycles of freezing and thawing versus mass change of lightweight polymer concretes with binder content of 28 %

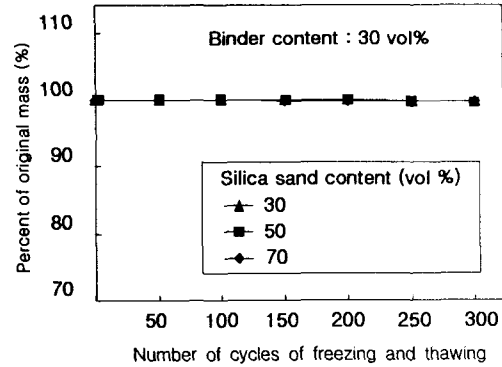


Fig. 8 Number of cycles of freezing and thawing versus mass change of lightweight polymer concretes with binder content of 30 %

에 기인된다고 판단된다. 또한 동결융해 시험 진행 동안 공시체의 표면 탈락 현상은 나타나지 않았다.

나. 초음파전파속도

Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11은 결합재 첨가량과 규사 치환율에 따른 경량 폴리머 콘크리트의 초음파전파속도와 동결융해 사이클의 관계를 나타낸 것이다. 결합재 첨가량 및 규사 치환율에 관계없이 경량 폴리머 콘크리트의 초음파 전파속도는 동결융해 사이클이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 모든 결합재 첨가량에 대해 경량 폴리머 콘크리트의 초음파 전파속도는 규사 치환율의 증가에

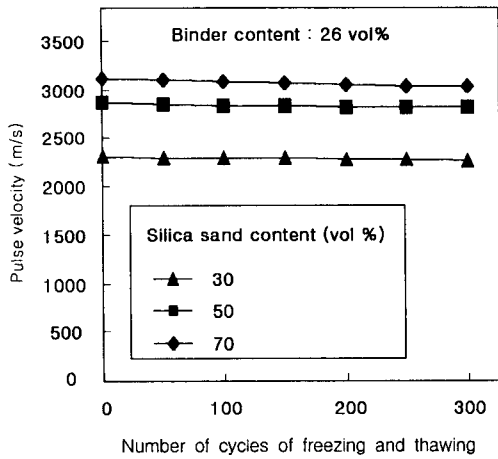


Fig. 9 Number of cycles of freezing and thawing versus pulse velocity of lightweight polymer concretes with binder content of 26 %

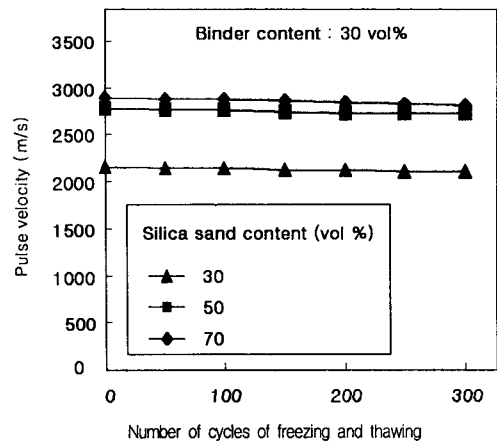


Fig. 11 Number of cycles of freezing and thawing versus pulse velocity of lightweight polymer concretes with binder content of 30 %

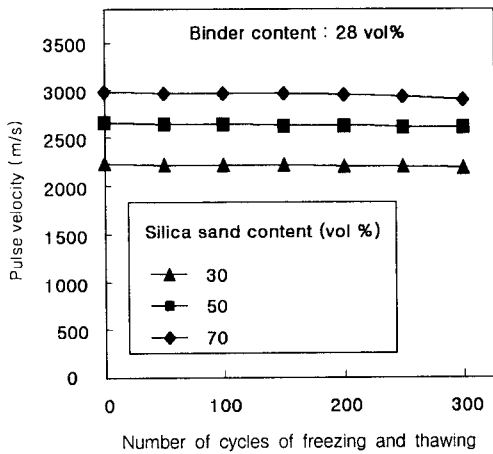


Fig. 10 Number of cycles of freezing and thawing versus pulse velocity of lightweight polymer concretes with binder content of 28 %

따라 감소하였다. 규사 치환율이 30, 50 및 70 % 인 경량 폴리머 콘크리트의 초음파전파속도 감소율은 각각 2.6, 1.7 및 3.1 %로서 보통 시멘트 콘크리트의 감소율 11.3 %¹²⁾보다 낮았고, 규사를 50 % 치환한 경량 폴리머 콘크리트에서 가장 낮은 감소율을 나타냈다. 한편 경량 폴리머 콘크리트의 초음파 전파속도는 결합재 첨가량의 증가에 따라 감

소하는 경향을 나타내었고 결합재 첨가량 28 %에서 가장 낮은 감소율을 나타내었다. 이것은 불포화 폴리에스터 수지의 접착성에 의해 경량 폴리머 콘크리트의 내부조직이 치밀하게 되어 공시체에 물의 침투를 억제하여 내부에서의 동결과 융해의 반복작용을 감소시켰기 때문이라 판단된다.

다. 상대동탄성 계수

Fig. 12, Fig. 13 및 Fig. 14는 결합재 첨가량과 규사 치환율에 따른 경량 폴리머 콘크리트의 동탄성 계수와 동결융해 사이클과의 관계를 나타낸 것이다. 결합재 첨가량 및 규사 치환율에 관계없이 경량 폴리머 콘크리트의 상대 동탄성계수는 동결융해 사이클이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 결합재 첨가량에 관계없이 규사 치환율이 30, 50 및 70 %인 경량 폴리머 콘크리트의 상대 동탄성 계수는 300 사이클에서 90~95 %로 Fig. 15¹²⁾에 나타낸 보통 시멘트 콘크리트의 상대 동탄성 계수 150 사이클에서 60 % 이하로 되는 경향보다 대단히 높게 나타났으며, 규사를 50 % 치환한 경량 폴리머 콘크리트에서 가장 높은 상대 동탄성 계수를 나타냈다. 이것은 규사가 경량 폴리머 콘크리트 내부의 공극을 채워 충전에 의한 강도 증

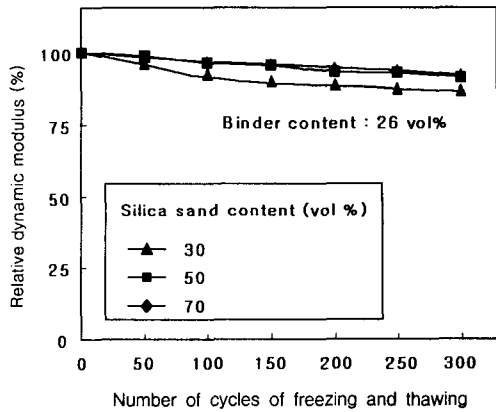


Fig. 12 Number of cycles of freezing and thawing versus relative dynamic modulus of elasticity of lightweight polymer concretes with binder content of 26 %

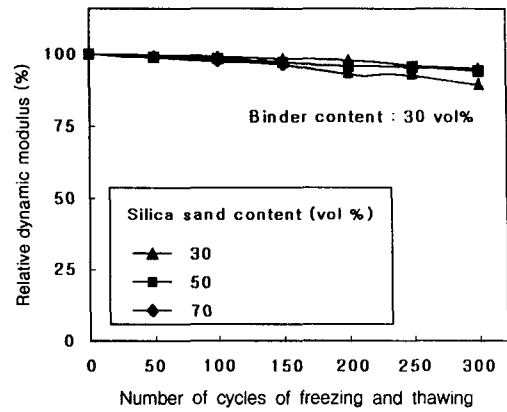


Fig. 14 Number of cycles of freezing and thawing versus relative dynamic modulus of elasticity of lightweight polymer concretes with binder content of 30 %

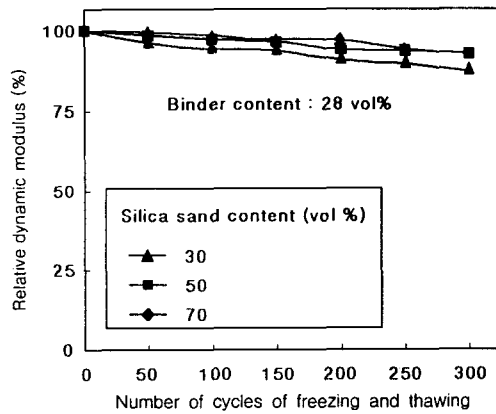


Fig. 13 Number of cycles of freezing and thawing versus relative dynamic modulus of elasticity of lightweight polymer concretes with binder content of 28 %

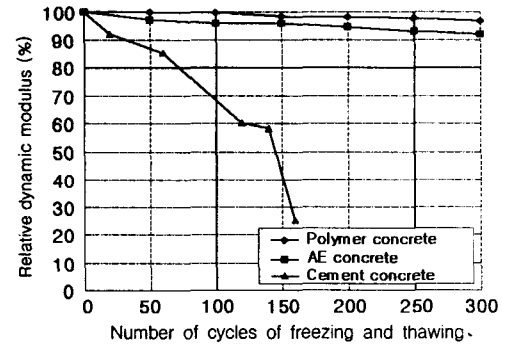


Fig. 15 Number of cycles of freezing and thawing versus relative dynamic modulus of elasticity of various concretes

진과 조직이 치밀하게 되었기 때문이라 판단된다. 또한, 규사 치환율에 관계없이 경량 폴리머 콘크리트의 상대 동탄성 계수는 결합재 첨가량의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 결합재 첨가량의 증가에 따라 유동성이 향상되어 보다 치밀한 조직이 형성되었기 때문이라 생각된다.

라. 내구성 지수

Fig. 16 및 Fig. 17은 경량 폴리머 콘크리트의 내구성 지수와 결합재 첨가량 및 규사 치환율과의 관계를 나타낸 것이다. 규사 치환율에 관계없이 경량 폴리머 콘크리트의 내구성 지수는 결합재 첨가량의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 한편 결합재량에 관계없이 경량 폴리머 콘크리트의 내구성 지수는 규사 치환율 50 %에서 가장 높은 내구성 지수 값을 보였다.

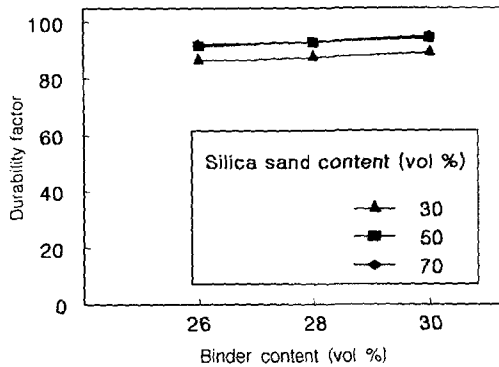


Fig. 16 Binder content versus durability factor of lightweight polymer concretes

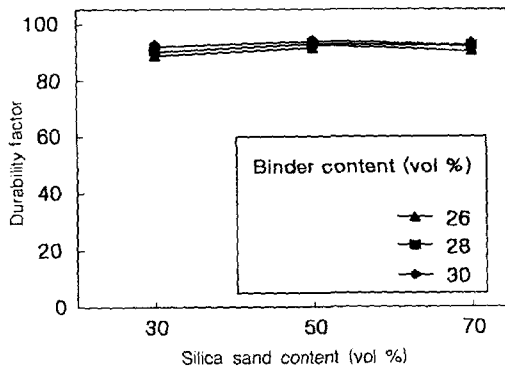


Fig. 17 Silica sand content versus durability factor of lightweight polymer concretes

V. 결 론

1. 경량 폴리머 콘크리트의 불꽃잔존시간은 결합재 첨가량의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며 그 값은 0~4초로서 난연제를 첨가하지 않은 폴리머 모르타르의 60~120초보다 매우 작은 값을 나타냈다. 또 모든 결합재 첨가량에 대해 경량 폴리머 콘크리트의 불꽃잔존시간은 규사 치환율의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다.

2. 경량 폴리머 콘크리트의 연소길이는 결합재 첨가량의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 그 값은 0~3 mm로서 난연제를 첨가하지 않

은 폴리머 모르타르의 9~11 mm보다 매우 작은 값을 나타냈다. 또한, 모든 결합재 첨가량에 대해 경량 폴리머 콘크리트의 연소길이는 규사 치환율의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다.

3. 동결융해 저항성 시험에서 경량 폴리머 콘크리트의 중량 감소율은 결합재 첨가량 및 규사 치환율의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타냈으나 결합재 첨가량 및 규사 치환율의 차이에 따른 변화는 0.3 % 정도로 매우 작았다.

4. 경량 폴리머 콘크리트의 초음파 진동속도는 동결융해 사이클이 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 보였다. 모든 결합재 첨가량에 대해 경량 폴리머 콘크리트의 초음파 진동속도는 규사 치환율의 증가에 따라 감소하였다. 규사 치환율이 30, 50 및 70 %인 경량 폴리머 콘크리트의 초음파진동속도 감소율은 1.7~3.1 %로 보통 시멘트 콘크리트의 감소율 11.3 %보다 낮았고, 규사로 50 % 치환한 경량 폴리머 콘크리트에서 가장 낮은 감소율을 보였다.

5. 경량 폴리머 콘크리트의 상대 동탄성계수는 동결융해 사이클이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 결합재 첨가량에 대해 규사 치환율이 30, 50 및 70 %인 경량 폴리머 콘크리트의 상대 동탄성 계수는 300 사이클에서 90~95 %로 보통 시멘트 콘크리트의 상대 동탄성 계수 150 사이클에서 60 % 이하로 되는 경향보다 대단히 높게 나타났으며, 규사로 50 % 치환한 경량 폴리머 콘크리트에서 가장 높은 상대 동탄성 계수를 나타냈다.

6. 경량 폴리머 콘크리트의 내구성 지수는 결합재 첨가량의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 결합재첨가량에 대해 경량 폴리머 콘크리트의 내구성 지수는 규사 치환율 50 %에서 가장 높은 내구성 지수 값을 나타내었다.

References

1. Wilson, H. S. & Malhotra, V. M., 1988,

- Development of High Strength Lightweight Concrete for Structural Applications, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol 10, No 2, pp. 79-90
2. Malhotra, V. M., 1990, Properties of High-Strength Lightweight Concrete Incorporation Fly Ash and Silica Fume, *High-Strength Concrete Second International Symposium*, pp. 645-660
 3. Berra, M., & Ferrara, G., 1990, Normal-weight and Total-Lightweight High-Strength Concretes: A Comparative Experimental Study, *High-Strength Concrete Second International Symposium*, pp. 701-733
 4. Mor, A., 1992, Steel-Concrete Bond in High-Strength Lightweight Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 1, pp. 82
 5. Hiuchi, K., Huroka, K. and Nakusu, K., 1990, "Properties of Ultra Lightweight Concrete", *CAJ Proceedings of Cement & Concrete*, No. 44, pp. 680-685
 6. Demura, K., Ohama, Y., & Shimizu, A., 1984, Proposed Mix Proportioning of Polyester Resin Concrete, *Polymer in Concrete, Proceedings of the Fourth International Congress on Polymers in Concrete, Institute für Spanende Technologie und Werkzeugmaschinen, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, West Germany*, pp. 265-269
 7. Kobayashi, T., & Ohama, Y., 1984, Low-Temperature Curing of Polymethyl Methacrylate Polymer Concrete, *International Symposium on Mechanical Properties of Special Concrete, Transportation Research Record 1003*, pp. 15-18
 8. Okada, K., Kobayashi, K., & Tokunaga, M., 1981, Fundamental Studies on Structural Use of Resin Concrete, *Proceedings of the Third ICPIC*, pp. 538-552
 9. Demura, K., 1982, "Study of Development of Resin Concrete for Architecture", *Nihon University*, pp. 18-38
 10. Helmuth, R. A., 1960, "Capillary Size Restrictions on Ice Formation in Hardened Portland Cement Pastes", *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Vol. 1, pp. 855-869
 11. Takiyama, I., 1978, "Polyester Resin", *Nichan Industry Co.*, pp. 146-157
 12. Ohama, Y. and Demura, K., 1984, "Polymer Concrete", *CMC*, p. 98