

SBR Latex를 이용한 폴리머 개질 경량콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Characteristics of Polymer-modified Lightweight Aggregate Concrete Using SBR Latex

안 남 식* 원 동 민** 박 노 현*** 김 희 철**** 김 관 수*****
Ahn, Nam-Shik Won, Dong-Min Park, Noh-Hyun Kim, Hee-Cheul Kim, Kwan-Soo

요 약

건축물이 고층화 및 대형화 되어감에 따라 구조물 및 빌딩의 자중을 줄이는 것은 반드시 필요하게 되는데, 이러한 구조물의 자중을 줄이기 위한 가장 효과적인 방법 중 하나는 경량콘크리트를 사용하는 것이다. 본 연구에서는 경량콘크리트의 단점인 강도를 보완하기 위하여 폴리머를 첨가하였으며, 폴리머 개질 경량콘크리트의 적절한 배합비율을 도출하기 위한 실험을 수행하였다. 또한 경화콘크리트 시험을 통하여 폴리머 개질 경량콘크리트의 물리적 특성을 고찰하였다. 그 결과 소량의 폴리머 첨가로도 휨강도가 증가하였으며, 실험결과를 바탕으로 회귀분석을 통한 압축강도 추정식을 제시하였다.

Abstract

As a trend of construction has become high-rise and larger, it is necessary to reduce the self-weight of structures and buildings. One of the most effective methods to reduce the self-weight of structures and buildings is to use the lightweight aggregate concrete. To complement the strength of the lightweight aggregate concrete, polymer was added to concrete's mixing. In this study, experiments to make the moderate mixing proportion of polymer modified lightweight concrete were performed. Also the hardened concrete tests were performed to investigate the physical characteristics of the polymer-modified lightweight aggregate concrete. As a result, the flexural strength was increased by a small quantity of SBR Latex. Based on the test results the estimating equation was proposed through the regression analysis.

키워드 : 폴리머 개질, SBR Latex, 경량골재, 경화콘크리트 시험

Keywords : Polymer-modified, SBR Latex, Lightweight aggregate, Hardened concrete test

1. 서론

가장 일반적으로 사용되는 건설재료인 콘크리트는 경제적이면서 내구성이 큰 장점을 가지고 있으나 자중이 큰 단점을 가지고 있다. 현대의 구조물은 대형화, 초고층화 되고 있으며 이에 따라 구조물의 자

중은 비례해서 늘어나 건축비의 향상 등 건축물의 기능성에 악영향을 미치게 되므로, 이러한 수직하중을 저감하기 위해서는 재료의 경량화가 반드시 필요하다. 구조재료의 경량화를 위한 대안 중의 하나가 콘크리트 배합 시 인공경량골재를 사용하는 것인데, 인공경량골재가 콘크리트의 자중을 줄일 수는 있으나 공극률이 높고 강도가 낮으며 탄성이 작은 단점을 가지고 있다. 국내외의 연구사례를 보면 폴리머 콘크리트의 물리적, 역학적인 특성에 대한 연구⁽¹⁻²⁾ 및 혼화제의 종류나 산업폐기물을 이용하여 경량골재를 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있으나⁽³⁻⁸⁾, 경량콘크리트의 단점을 보완시킬 수 있는 폴리머 개질 시멘트

* 세종대학교 건축공학과 부교수

** 교신저자, 경희대학교 건축공학과 석사과정
Tel: 031-201-2864 Fax: 031-204-3815
E-mail : dmwon@khu.ac.kr

*** 학생회원 · 경희대학교 건축공학과 석사과정

**** 경희대학교 건축공학과 교수

***** 경희대학교 건축학과 조교수

를 사용한 경량콘크리트에 대한 연구는 드문 실정이다. 따라서 본 연구에서는 폴리머 개질 경량콘크리트의 최적배합비율 도출을 위한 굳지 않은 콘크리트 시험과 경화콘크리트 시험을 실시하여 그 물리적 특성을 고찰하였다.

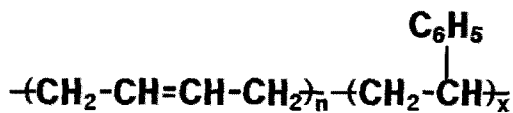
2. 실내실험

2.1 실험 재료

본 연구에서는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 경량콘크리트의 단점인 낮은 강도를 보완하기 위하여 폴리머를 첨가제로 사용하였다. 사용된 폴리머는 스티렌 부타디엔 고무(Styrene Butadiene Rubber, 이하 SBR Latex)로서 Styrene 과 Butadiene이 주원료이고 유화공중합에 의하여 제조되는 합성고무 emulsion이다. 물을 용매로 사용하여 물에 대한 분산성이 탁월하고 콘크리트 및 금속 등에 접착력이 좋으며 휨강도가 우수하므로 SBR Latex의 첨가는 부재의 휨강도 증가에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 화학적 및 시멘트 안정성 또한 우수하며 대부분의 폴리머가 고가인데 반해 비교적 저가이므로 경제적이다. SBR Latex의 기본 물성 및 구조식은 <표 1>과 <그림 1>에 나타내었다.

<표 1> SBR Latex의 기본 물성

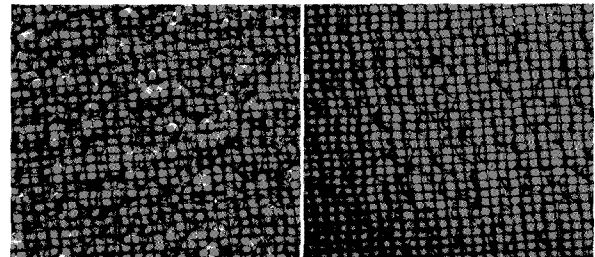
외관	고형분 (%, TSC)	pH (25°C)	점도 (20°C, cp)	표면장력 (dyne/cm)
유백색 현탁액	48%	9.5-11	300 이하	45 이하



<그림 1> SBR 고분자 구조식

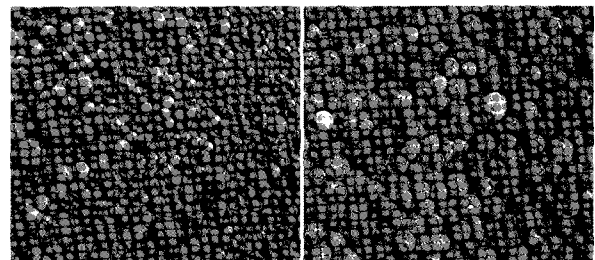
최적배합비율 도출을 위한 굳지 않은 콘크리트 시험 시 목표 슬럼프와 목표 공기량을 맞추기 위해 소량의 소포제와 AB제가 혼합된 폴리카복실 에테르 고성능 감수제를 사용하였다. 굵은 골재는 <그림 2>에서 보는 바와 같이 국산 한 종류(이하 세라그린), 중국산 두 종류(이하 한아A, 한아B), 독일산 한 종류(이하 리아포)의 네 가지 인공경량골재를 사용하였고, 이는 원

산지 분산을 통해 다양한 인공경량골재의 재료적 특성을 고찰하기 위함이었다. 또한 잔골재는 비중 2.56의 일반 해사가 실험에 사용되었다.



(a) 세라그린

(b) 한아A



(c) 한아B

(d) 리아포

<그림 2> 본 연구에 사용된 인공경량골재의 종류

2.2 실험계획

2.2.1 골재시험

폴리머 개질 경량콘크리트의 특성에 대한 실험을 하기에 앞서, 구조용 건설재료로서 인공경량골재의 적합성 판단을 위한 골재시험을 실시하였으며 체가름분석, 흡수율, 비중 및 단위용적중량 시험이 수행되었다.

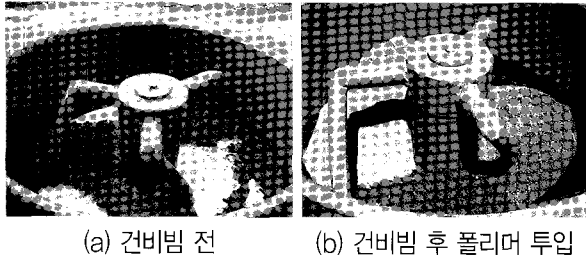
2.2.2 굳지 않은 콘크리트 시험 및 경화콘크리트 시험

최적배합비율 도출을 위한 굳지 않은 콘크리트 시험계획은 <표 2>와 같다.

<표 2> 최적배합비율 도출을 위한 배합 계획

골재	w/c (%)	p/c (%)	슬럼프 (mm)	공기량 (%)
세라그린	25	0	200~220	3~7
한아A	40	5		
한아B	50	10		

골재시험 결과 <그림 5>와 같이 리아포 골재의 흡수율이 약 40%에 달해 구조용 골재로 사용할 수 없는 것으로 판단되며 이에 따라 리아포 골재를 제외한 쎄라그린, 한아A 및 한아B 골재에 대하여 최적배합 비율 도출을 위한 시험배합을 실시하였다. 시험배합은 인공경량골재 세 수준, 물시멘트비 세 수준, 폴리머시멘트비 세 수준을 변수로 하여 총 27 배합에 대하여 수행되었다.



(a) 건비빔 전 (b) 건비빔 후 폴리머 투입

<그림 3> 폴리머 콘크리트 배합

콘크리트의 배합은 <그림 3>과 같이 인공경량골재, 모래, 시멘트의 건비빔 실시 후 물, 고성능 감수제와 함께 SBR Latex를 첨가하였고, 슬럼프와 공기량을 측정하여 목표 공기량과 목표 슬럼프를 만족시키는 배합을 최적배합으로 결정하였다. 경화콘크리트 시험으로는 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도 및 동결융해 시험을 KS 기준으로 수행하였는데 압축강도 시험은 KS F 2405, 쪼갬인장강도 시험은 KS F 2423, 휨강도 시험은 KS F 2408, 동결융해 시험은 KS F 2456의 시험방법에 의해 시험이 실시되었다.

2.2.3 쪼갬인장강도식의 유도

쪼갬인장강도 시험은 <그림 4>와 같이 수행되었으며, KS F 2423에서 정하는 쪼갬인장강도식은 식 (1)과 같다.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

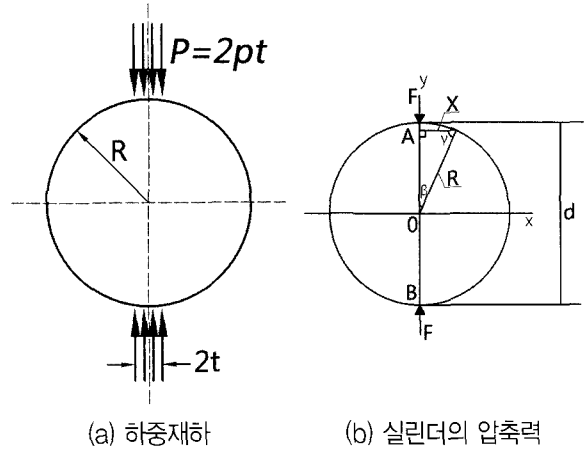
여기서, f_{sp} 는 쪼갬인장강도(MPa=N/mm²), P 는 최대하중(N), d 는 공시체의 지름(mm), l 은 공시체의 길이(mm)를 의미한다. 식 (1)은 실험에 사용하기 위한 약산식인데 정확한 쪼갬인장강도식을 유도해 보면 아래와 같다.

패킹스트립을 사용하여 측정하는 ISO 4108 시험

방법은 $t/R=1/6$ 의 패킹스트립을 사용하여 $2t$ 폭의 등분포하중을 재하하여 시험하며 식 (2)와 같다.

$$f_{sp} = \frac{2pt}{\pi R} \left[1 - \left(\frac{t}{R} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

여기서, p 는 단위길이 당 최대 등분포하중(kg/cm), t 는 패킹스트립의 폭(cm), R 은 공시체의 반지름(cm)이다.



(a) 하중재하 (b) 실린더의 압축력

<그림 4> 쪼갬인장강도 시험

ISO 4108이 정하는 쪼갬인장강도의 식은 탄성론을 근거로 $2t$ 폭을 고려하여 유도될 수 있는데 반지름이 r 인 실린더의 표면에 압축력 P 가 작용하면 임의의 한 점에 대한 수직응력 성분의 일반식은 식 (3)과 같다.

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi} \frac{\cos\theta}{r}, \quad \sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0 \quad (3)$$

여기서, θ 는 압축력의 작용선과 임의의 점과 임의의 작용점을 연결한 선의 각도를 의미하며 <그림 4>의 (b)와 같이 압축력 F 를 받고 있는 상태에서의 최대인장력은 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. AB 에 동등한 힘 F 가 작용할 경우 내부에서 작용하는 전체의 수직응력은 압축력에 의한 수직응력과 실린더의 표면에 작용하는 인장력을 중첩의 원리를 이용해 표현할 수 있으며 식 (4)와 같다.

$$\sigma_{xx}' = -\frac{4F}{\pi R} \cos\beta \cos^2\gamma + \frac{F}{\pi R} \sin\gamma \quad (4)$$

또한 실린더의 중심에서 기하학적인 관계로부터 식 (5), 식 (6)과 같이 표현이 가능하다.

$$\sin\beta = \cos\gamma = \frac{x}{R} \quad (5)$$

$$\sin\gamma = \cos\beta = \sqrt[3]{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 식 (4)에 대입하면 식 (7)과 같다.

$$\sigma_{xx}' = \frac{F}{\pi R} \sqrt[3]{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} \left[1 - 4\left(\frac{x}{R}\right)^2\right] \quad (7)$$

<그림 4>의 (b)에서 힘 F 가 집중하중이 아닌 dx 의 폭을 갖는 P 의 등분포하중이 작용한다고 가정하면 원의 중심 O 점에서 x 방향의 수직응력은 식 (7)에서 F 를 Pdx 로, σ 를 $d\sigma$ 로 바꾸어 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$d\sigma_{xx}' = \frac{P}{\pi R} \sqrt[3]{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} \left[1 - 4\left(\frac{x}{R}\right)^2\right] dx \quad (8)$$

dx 는 $-t$ 에서 t 까지 변화하며 식 (8)을 $-t$ 에서 t 까지 적분하면 식 (9)를 얻을 수 있으며, 이는 식 (2)와 같이 ISO 4108에서 정하는 쪼갬인장강도식과 같게 된다.

$$\sigma_{xx}' = F_{sp} = \frac{2pt}{\pi R} \left[1 - \left(\frac{t}{R}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

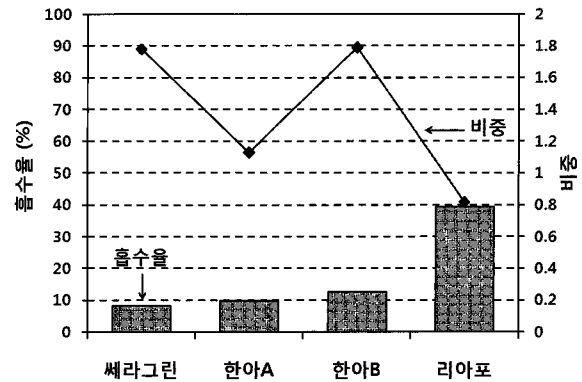
3. 실험결과

3.1 골재시험

3.1.1 비중 및 흡수율

경량골재별 비중 및 흡수율 시험 결과는 <그림 5>와 같다. 골재별 비중 시험 결과, 절건비중이 0.82~1.79의 범위로 측정되었으며 일반 골재의 비중이 약 2.5~3.5임을 볼 때 일반 골재에 비해 상대적으로 훨씬 가벼움을 알 수 있으며 리아포, 한아A, 쉘라그린 및 한아B 골재의 순서로 비중이 증가하였다. 흡수율 시험 결과, 쉘라그린, 한아A 및 한아B 골재는 약 8~12%의 흡수율이 측정된 반면 리아포 골재는 약 40%의 흡수율이 측정되었다. 굵은 골재로 사용되는 인공경량골재의 흡수율은 일반적으로 약 6~10% 정도인데, 리아포 골재는 매우 가벼운 장점을 가지고 있으나 경량골재의 최대 단점이라 할 수 있는 흡수율이 나머지 세 골재의 약 3~5배에 달하므로 구조용 경량골재로서 사용하기 부적합한 것으로 판단된다. 그러므로 최적배합비율 도출을 위한 굳지 않은 콘크리

트 시험 및 경화콘크리트 시험대상에서 리아포 골재를 제외하였다.

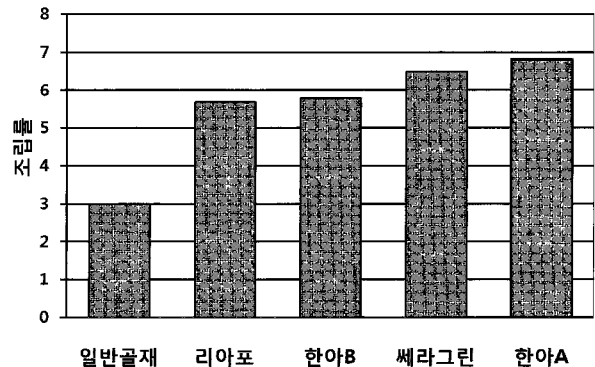


<그림 5> 인공경량골재의 절건 비중 및 흡수율

3.1.2 조립률 및 체가름분석

인공경량골재의 물성시험으로서 조립률 및 체가름분석 시험의 결과는 각각 <그림 6>과 <그림 7>에서 보는 바와 같다.

본 연구에 사용된 인공경량골재의 조립률은 5.7~6.8의 분포를 이루었으며, 굵은 골재의 조립률은 약 6~8이 적당하므로 굵은 골재로서 사용하기에 적합한 것으로 판단된다.

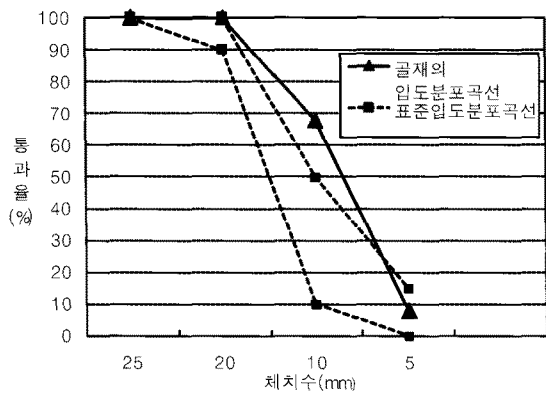


<그림 6> 인공경량골재의 조립률

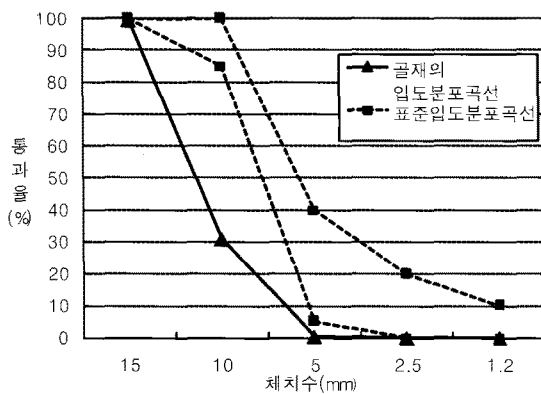
또한 체가름분석 시험 결과, 리아포 골재만 KS의 표준입도분포곡선을 만족시키는 고른 입도 분포를 이루고 있었으며 쉘라그린, 한아A 및 한아B 골재는 표준입도분포곡선을 일부 벗어났으므로 최적배합비율 도출을 위한 시험배합 및 경화콘크리트 시험 시 표준입도분포곡선을 만족시키도록 입도를 조절하여 배합을 실시하였다.

3.1.3 단위용적중량

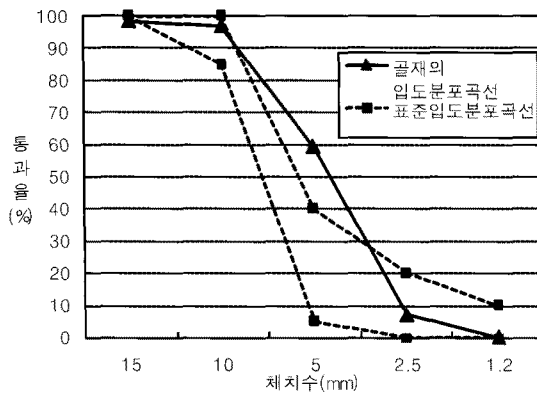
인공경량골재의 물성시험으로서 단위용적중량 시



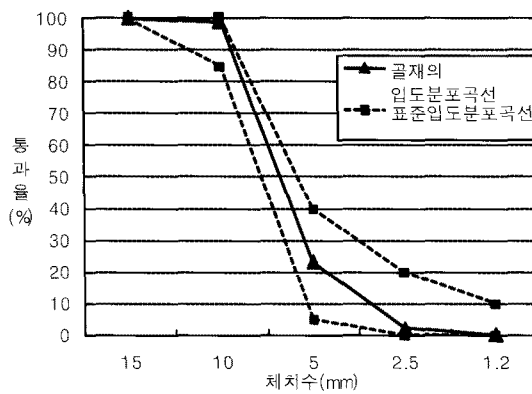
(a) 세라그린(한국)



(b) 한야A(중국)



(c) 한야B(중국)



(d) 리아포(독일)

〈그림 7〉 체가름분석 시험 결과

험의 결과는 <표 3>에서 보는 바와 같다. 세라그린 골재는 1060 kg/m³, 한야B 골재는 1176 kg/m³의 단위용적중량이 측정되어 경량골재로서 비교적 큰 단위용적중량을 갖는 반면 한야A 골재와 리아포 골재는 각각 698 kg/m³, 510 kg/m³으로서 세라그린 골재와 한야B 골재에 비해 약 1/2~2/3 정도 수준의 가벼운 장점을 가지고 있었다.

〈표 3〉 골재별 단위용적중량

골재	방향	무게 (kg)	단위용적중량 (kg/m ³)
세라그린		10.6	1060
한야A		7.0	698
한야B		11.8	1176
리아포		5.1	510

3.2 굳지 않은 콘크리트 시험

3.2.1 경량콘크리트의 최적배합비율(세라그린 골재)

배합의 표시형식은 "CN1/PN2"와 같으며 여기서 C는 인공경량골재로서 세라그린 골재를 S, 한야A 골재를 A, 한야B 골재를 B로 표기하였으며 N1은 물시멘트비, P는 폴리머(SBR Latex), N2는 폴리머시멘트비를 의미한다.

세라그린 골재를 사용한 인공경량콘크리트의 최적배합비율 시험 결과는 <표 4>에서 보는 바와 같으며 S40/P10, S50/P0, S50/P10의 경우 고성능 감수제를 전혀 사용하지 않았음에도 불구하고 목표 슬럼프를 초과하여 경화콘크리트 시험에 사용할 수 없는 배합임을 알 수 있었다. 이는 물시멘트비와 폴리머시멘트비가 커짐에 따라 SBR Latex에 포함된 수분에 의하여 배합에 사용된 물의 양이 증가되었기 때문으로 사료된다. 경화콘크리트 시험은 사용불가로 결정된 세 배합을 제외한 나머지 배합에 대해 수행하였다.

3.2.2 경량콘크리트의 최적배합비율(한야A 골재)

한야A 골재를 사용한 인공경량콘크리트의 최적배합비율 시험 결과는 <표 5>에 나타내었다.

〈표 4〉 최적배합비율(세라그린 골재)

구분 배합	S/a(%)	고성능 감수제 (%)	단위 수량 (kg)	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	비고
S25/P0	42	1.30	165	210	5.8	
S25/P5	42	1.20	165	210	3.0	
S25/P10	42	1.00	165	215	3.2	
S40/P0	40	0.90	170	215	7.0	
S40/P5	40	0.85	170	215	4.7	
S40/P10	40	0	170	265	5.3	사용불가
S50/P0	44	0	170	265	10.0	사용불가
S50/P5	44	0.75	170	205	5.5	
S50/P10	44	0	170	280	5.3	사용불가

〈표 5〉 최적배합비율(한아A 골재)

구분 배합	S/a(%)	고성능 감수제 (%)	단위 수량 (kg)	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	비고
A25/P0	42	1.00	165	215	6.2	
A25/P5	42	1.00	165	220	3.2	
A25/P10	42	0	165	260	3.4	사용불가
A40/P0	43	0.70	165	220	10.0	사용불가
A40/P5	43	0.30	165	200	7.0	
A40/P10	43	0	165	250	7.5	사용불가
A50/P0	42	1.10	165	200	7.0	
A50/P5	44	0	165	250	10.0	사용불가
A50/P10	44	0	165	260	4.5	사용불가

세라그린 골재의 경우 총 아홉 배합 중 여섯 배합에 대하여 최적배합비율을 얻을 수 있었던 반면, 한아A 골재는 총 아홉 배합 중 네 배합만이 사용할 수 있는 배합이었다. A25/P10, A40/P10, A50/P5, A50/P10의 경우 감수제를 전혀 사용하지 않았음에도 불구하고 목표 슬럼프를 상회하였으며, 이는 그림 2에서 보는 바와 같이 세라그린 골재에 비해 골재의 입형이 구형이고 표면이 매끄러워 콘크리트의 워커빌리티가 높아졌기 때문이다. 또한 A40/P0는 목표 공기량이 10%이상 측정됨으로서 사용할 수 없는 배합이며 나머지 네 배합에 대해서만 경화콘크리트 시험을 수행하였다.

3.2.3 경량콘크리트의 최적배합비율(한아B 골재)

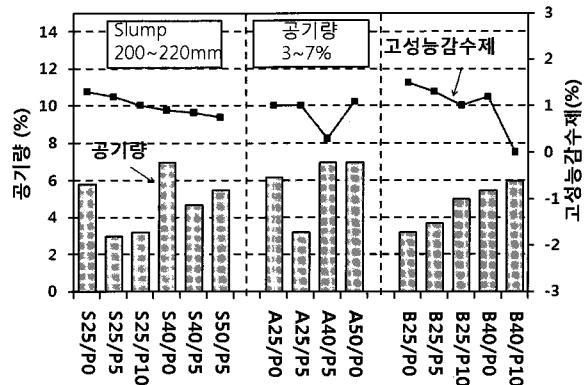
한아B 골재를 사용한 인공경량콘크리트의 최적배합비율 시험 결과는 〈표 6〉과 같다.

〈표 6〉 최적배합비율(한아B 골재)

구분 배합	S/a(%)	고성능 감수제 (%)	단위 수량 (kg)	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	비고
B25/P0	42	1.50	165	220	3.2	
B25/P5	42	1.30	165	220	3.7	
B25/P10	42	1.00	165	220	5.0	
B40/P0	43	1.20	165	220	5.5	
B40/P5	43	0.70	165	240	10.0	사용불가
B40/P10	43	0	165	200	6.0	
B50/P0	44	-	165	-	-	사용불가
B50/P5	44	0.50	170	220	10.0	사용불가
B50/P10	44	0	170	240	8.0	사용불가

B40/P5, B50/P5는 목표 공기량을 훨씬 상회하였으며, B50/P10은 고성능 감수제를 전혀 사용하지 않았음에도 불구하고 목표 슬럼프와 목표 공기량을 모두 만족시킬 수 없었다. 또한 B50/P0의 경우 시멘트 페이스트의 양이 부족한 빈배합으로서 사용 불가능한 배합이므로 나머지 다섯 배합에 대하여 경화콘크리트 시험을 수행하도록 하였다.

〈그림 8〉은 굳지 않은 콘크리트 시험에 의하여 최적배합비율을 얻은 배합의 공기량 및 고성능감수제의 첨가량을 나타낸 것이며, 물시멘트비 및 폴리머시멘트비가 증가함에 따라 고성능 감수제의 첨가량이 소폭 감소하는 경향을 보였다.



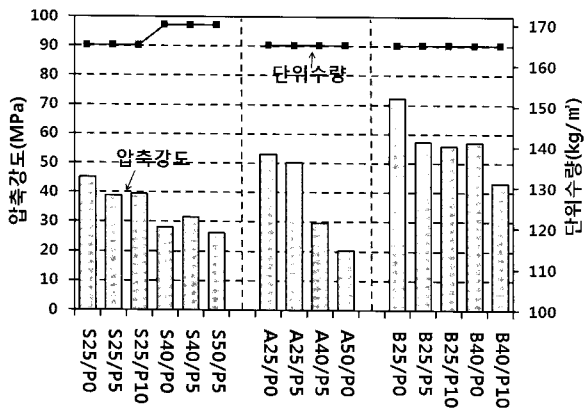
〈그림 8〉 공기량 및 고성능 감수제량의 변화

3.3 경화콘크리트 시험

굳지 않은 콘크리트 시험을 통한 최적배합비율 시험 결과를 바탕으로 사용이 불가능한 배합을 제외시킨 총 15배합에 대하여 경화콘크리트 시험을 실시하였으며, 압축강도, 쪼갬인장강도 및 휨강도의 강도시험과 국내산 쉘라그린 골재에 대한 동결융해 시험을 수행하였다.

3.3.1 압축강도 시험

최적배합비율을 도출한 배합에 대한 인공경량콘크리트의 28일 압축강도 시험 결과는 <그림 9>에 나타내었다.



<그림 9> 28일 압축강도 시험결과

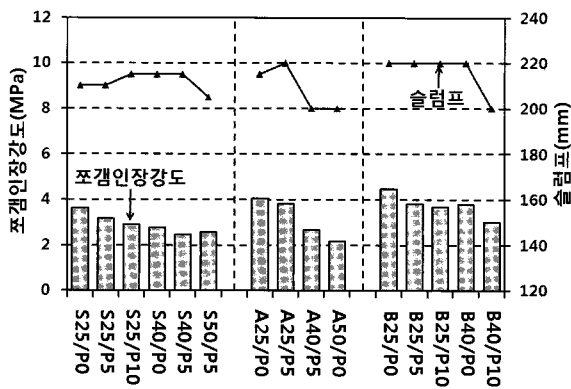
쉘라그린 골재를 사용한 인공경량콘크리트의 압축강도 결과를 살펴보면 물시멘트비 25%의 경우, 폴리머 첨가량이 증가할수록 강도는 감소하는 경향을 보였다. 반면 물시멘트비 40%의 배합은 폴리머시멘트비가 증가함에 따라 강도가 소폭 증가하였으나 큰 차이는 없으며, 물시멘트비가 증가함에 따라 강도는 크게 감소함으로써 폴리머의 첨가량보다는 물시멘트비가 압축강도를 결정짓는 주요한 요소이며 이는 일반 콘크리트와 같은 결과임을 알 수 있고, 전체 평균 약 35 MPa의 압축강도를 보였다. 한아A 골재를 사용한 인공경량콘크리트의 28일 압축강도시험 결과 평균 약 38 MPa의 압축강도를 보였으며 보통 강도인 28 MPa 이상으로서 구조용 경량콘크리트로 사용하기에 적절한 것으로 판단된다. 물시멘트비 25%의 경우 약 52 MPa의 고강도 콘크리트였으며, 물시멘트비 40%의 경우 약 30 MPa를 나타내어 구조용 경

량콘크리트로 사용되기에 문제가 없으나 물시멘트비 50%의 경우는 약 20 MPa에 불과함으로써 구조용 콘크리트로 사용하기에는 부적합하다고 판단된다. 폴리머시멘트비의 증가와 관계없이 물시멘트비가 증가함에 따라 강도는 크게 감소하였으며, 최소 16.7 MPa에서 최대 56.5 MPa까지 강도가 분포하여 물시멘트비에 따라 강도의 변화가 큼을 알 수 있다. 이는 한아A의 골재의 무게가 쉘라그린 골재의 약 66% 수준의 경량으로서 물시멘트비에 비교적 큰 영향을 받았기 때문이다. A25/P0와 A25/P5를 살펴보면 폴리머의 사용에 따른 압축강도의 변화는 거의 없었으며, 쉘라그린 골재와 마찬가지로 시멘트 중량의 10%에 해당하는 폴리머의 첨가로는 압축강도를 증가시키기 어려우며 일반 콘크리트와 동일하게 압축강도에 큰 영향을 미치는 것은 물시멘트비라는 결론을 얻을 수 있다. 일반적인 폴리머 콘크리트의 연구에 의하면 폴리머가 콘크리트 내부의 공극을 메워 압축강도를 증가시키는 것으로 알려져 있으나 이는 콘크리트 중량의 약 7~8% (체적 약 14~16%) 정도의 폴리머를 사용하였을 경우이며⁽⁴⁾, 본 연구에 사용된 폴리머는 첨가물로서 소량 사용되었기 때문에 압축강도에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 한아B 골재를 사용한 경량콘크리트는 평균 약 57 MPa의 압축강도를 나타내었으며 본 연구에 사용된 세 종류의 골재 중 가장 큰 강도로서 고강도 콘크리트로도 사용이 가능함을 알 수 있다. 물시멘트비 25%의 경우, 최대 75.8 MPa까지 측정되었다. B25P/P0, B25/P5, B25/P10을 비교 결과, 폴리머 첨가량이 증가하여도 압축강도는 증가하지 않고 감소하는 경향을 보였고, B40/P0와 B40/P10을 비교한 경우도 마찬가지로 폴리머의 증가와 관계없이 압축강도는 감소하였다.

3.3.2 쪼갬인장강도 및 휨강도 시험

골재에 따른 세 종류의 경량콘크리트에 대한 28일 쪼갬인장강도 시험 결과는 <그림 10>과 같다.

쉘라그린 골재를 사용한 인공경량콘크리트의 경우, 물시멘트비 및 폴리머시멘트비가 증가함에 따라 쪼갬인장강도는 감소하는 경향을 보였다. 압축강도 시험 결과와 같이 폴리머시멘트비보다 물시멘트비가

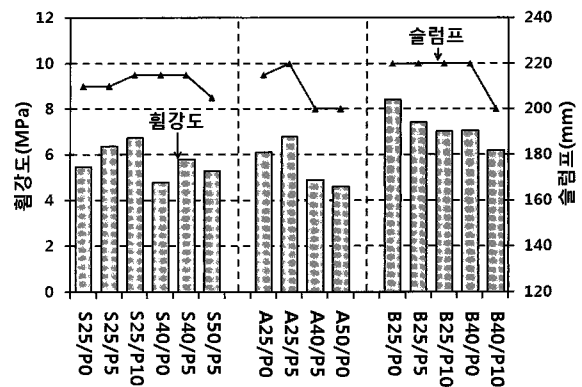


〈그림 10〉 쪼갬인장강도 시험 결과

콘크리트의 부착력에 주요한 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 물시멘트비 25%의 경우 약 3.3 MPa, 40%는 약 2.6 MPa, 50%는 약 2.6 MPa, 전체적으로 약 2.9 MPa의 쪼갬인장강도를 보였다. 반면 한아 A 골재의 경량콘크리트는 전체 평균 약 3.2 MPa의 쪼갬인장강도를 보임으로서 쉐라그린 골재의 경량콘크리트보다 다소 높게 측정되었다. 압축강도에 대한 쪼갬인장강도의 비를 살펴보면, 쉐라그린 골재의 경량콘크리트는 약 1/12, 한아A 골재의 경량콘크리트도 압축강도의 약 1/12의 수준으로 일반적인 경량콘크리트의 압축강도 대비 쪼갬인장강도의 비율 범위인 1/9~1/15 내에 존재하였다. 두 골재 모두 압축강도와 쪼갬인장강도가 적정한 비율의 관계를 갖고 있으나, 폴리머시멘트비의 증가는 쪼갬인장강도에 영향을 미치지 못하였으며 물시멘트비의 영향을 받음을 알 수 있다. 한아B 골재를 사용한 인공경량콘크리트는 약 3.8 MPa의 쪼갬인장강도를 보였으며 압축강도의 약 1/15 수준으로 쉐라그린 및 한아A 골재와 같이 일반적인 범위 내에 존재하나, 한아B의 경량콘크리트 역시 쪼갬인장강도의 증감은 폴리머시멘트비보다 물시멘트비가 주된 요인임을 알 수 있다.

휨강도 시험결과는 〈그림 11〉과 같으며 쉐라그린 골재를 사용한 인공경량콘크리트의 28일 휨강도는 평균 약 5.7 MPa 이었으며, 폴리머시멘트비의 증가에 따라 휨강도 역시 증가하였다. 이는 앞서 압축강도 및 쪼갬인장강도 시험 결과와 대조적인 결과로서 소량의 폴리머 첨가로도 휨강도를 증가시킬 수 있음을 의미한다. S25/P10은 S25/P0 대비 약 23% 증가하였으며, S40/P5는 S40/P0 대비 약 21% 증가하였으며, 한아A 골재를 사용한 인공경량콘크리트의 경

우도 폴리머 5% 첨가 시 약 11%의 휨강도의 증가를 보였다.

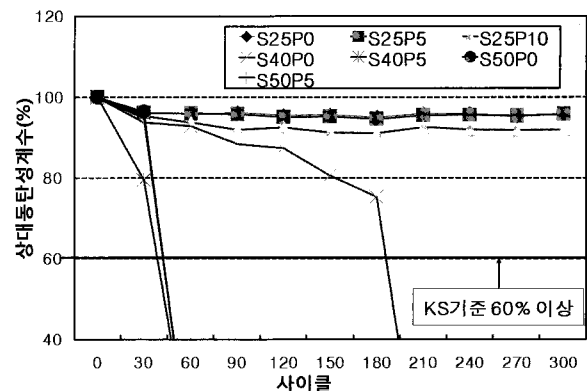


〈그림 11〉 휨강도 시험 결과

그러나 한아B 골재를 사용한 인공경량콘크리트의 경우 폴리머의 증가에도 불구하고 강도는 일정하게 감소하는 추세를 보였는데 이는 한아B 골재가 본 연구에 사용된 골재 중 가장 무거운 단위용적중량을 갖고 있기 때문에 본 연구에 사용된 폴리머의 양으로는 휨강도를 증가시키기에 다소 부족함을 알 수 있다. 그러나 한아B 골재는 경량골재 중에서도 가장 무거운 골재 중 하나이며 일반적인 경량골재에서는 소량의 폴리머 첨가로도 강도 증가의 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 즉 폴리머의 첨가가 인공경량골재를 사용한 경량콘크리트를 구조용 휨부재로 사용하는데 일조할 수 있을 것으로 기대되며, 추가적인 많은 연구 및 실험을 통한 구조성능 평가가 필요하겠다.

3.3.3 콘크리트의 동결융해(쉐라그린 골재)

쉐라그린 골재를 사용한 경량콘크리트의 동결융해 시험 결과는 〈그림 12〉와 같다.



〈그림 12〉 쉐라그린 동결융해 시험 결과

〈그림 12〉에서 보는 바와 같이 S25/P0, S25/P5 및 S25/P10 모두 300cycle까지 파괴되지 않았다. 또한 300cycle이 지난 후에도 상대동탄성계수가 90% 이상으로 KS 기준인 60%를 훨씬 상회하였다. 반면 S40/P5와 S50/P5는 60cycle도 버티지 못하고 파괴되었는데 물시멘트비가 작은 25%의 시편이 동결융해에 가장 잘 견디는 것은 예상한 결과이며 S25/P0, S25/P5 및 S25/P10을 비교하였을 때 폴리머 첨가량에 관계없이 세 종류 모두 거의 비슷한 수치를 보였다.

4. 폴리머 개질 경량콘크리트의 압축강도 추정

4.1 연구방법

콘크리트의 압축강도는 콘크리트에 요구되는 가장 중요한 요소이며, 배합 시 목표 강도를 먼저 설정하고 배합설계를 하는 것이 순서이다. 그러나 국내외적으로 폴리머 개질 경량콘크리트에 대한 연구는 매우 미비하며, 강도 추정에 대한 연구 역시 이루어지지 않은 상황이므로 본 연구에서 수행한 폴리머 개질 경량콘크리트의 압축강도 시험결과를 바탕으로 회귀분석을 통하여 28일 압축강도 추정식을 제안하였다. 추정식 제안을 위해 SPSS 프로그램을 사용하여 통계 분석, 상관관계 분석 및 회귀분석을 수행하였다.

4.2 강도 데이터 분석

〈표 7〉에 나타난 바와 같이 45개의 압축강도 시험 결과에 대한 기술통계량 분석 결과, 전체 평균 43.3 MPa로서 보통 강도 이상의 압축강도를 보였으며 그 표준편차는 14.4로 측정되었다. 또한 단위수량, 단위시멘트량 및 단위잔골재량은 각각 전체 평균 166.0 kg/m³, 535.9 kg/m³ 및 646.2 kg/m³으로 나타났으며 표준편차는 2.0, 136.7, 66.2로서 배합에 따라 단위시멘트량의 변화가 컸음을 알 수 있다.

4.3 압축강도의 추정

일반 콘크리트의 압축강도 추정식으로 Abrams의 식 (1919) 및 Lyse의 식(1932)이 가장 일반적으

로 사용되고 있으며 이중에서도 Lyse의 식은 압축강도와 물시멘트비 사이에 직선관계가 성립한다고 제안한 것으로서 그 간편함으로 인해 가장 많이 쓰이고 있다.

Abrams 및 Lyse의 식은 각각 다음과 같다.

- Abrams 식

$$f_{ck} = \frac{A}{B^{w/c}} \quad (10)$$

- Lyse 식

$$f_{ck} = A + B(c/w) \quad (11)$$

여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도, w 는 시멘트 품질에 따른 실험 상수, w/c 는 물시멘트비를 의미한다. 위의 식에서 알 수 있듯이 Abrams와 Lyse의 식 모두 압축강도에 영향을 주는 변수로서 물시멘트비 혹은 시멘트물비만을 사용하였는데 물시멘트비(혹은 시멘트물비)가 콘크리트의 강도에 가장 지대한 영향을 끼치는 것은 자명한 사실이지만, 현장에서의 콘크리트는 여러 조건에 따라 강도가 변화할 수 있으므로 본 연구에서는 실험결과를 바탕으로 상관계수 분석을 통하여 물시멘트비(혹은 시멘트물비) 외에 강도에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 선별된 요인을 독립변수로 추가하여 중회귀분석을 통한 압축강도 추정식을 유도하였다. 〈표 8〉에 나타난 바와 같이 골재, 물시멘트비, 폴리머시멘트비, 단위수량, 단위시멘트량, 단위잔골재량, 단위굵은골재량 및 잔골재율과 28일 압축강도와의 상관관계 분석을 실시한 결과, 예상대로 물시멘트비가 -0.703으로 28일 압축강도와 가장 관계가 높은 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 상관계수 분석 결과를 바탕으로 독립변수를 선정하였는데, 비교적 상관계수가 높다고 할 수 있는 상관계수 10.51 이상의 변수를 독립변수로 하였으며 그 결과 골재의 종류, 물시멘트, 단위수량, 단위시멘트량 및 단위잔골재량이 회귀분석을 위한 독립변수로 사용되었다.

단, 폴리머시멘트비는 상관계수가 -0.042로서 압축강도와는 거의 무관함을 알 수 있으며, 이는 〈그림 9〉에서와 같이 폴리머시멘트비가 증가하여도 압축강도의 변화는 거의 없다는 결과와 같음을 알 수 있다. 상관관계 분석을 통해 설정한 독립변수와 종속변수

〈표 7〉 배합설계 및 28일 압축강도

No.	골재	w/c(%)	S/a(%)	p/c(%)	고성능 감수제	단위용적총량 (kg/m ³)				압축강도 (MPa)
						W	C	S	G	
1	세라그린	25	42	0	1.3	165	660	635	610	48.15
2	세라그린	25	42	0	1.3	165	660	635	610	45.91
3	세라그린	25	42	0	1.3	165	660	635	610	41.78
4	세라그린	25	42	5	1.2	165	660	599	576	40.84
5	세라그린	25	42	5	1.2	165	660	599	576	38.05
6	세라그린	25	42	5	1.2	165	660	599	576	37.90
7	세라그린	25	42	10	1	165	660	564	541	38.99
8	세라그린	25	42	10	1	165	660	564	541	38.51
9	세라그린	25	42	10	1	165	660	564	541	41.41
10	세라그린	40	40	0	0.9	170	425	676	705	28.08
11	세라그린	40	40	0	0.9	170	425	676	705	29.10
12	세라그린	40	40	0	0.9	170	425	676	705	27.43
13	세라그린	40	40	5	0.85	170	425	654	682	33.88
14	세라그린	40	40	5	0.85	170	425	654	682	30.89
15	세라그린	40	40	5	0.85	170	425	654	682	30.27
16	세라그린	50	44	5	0.75	170	340	755	668	27.17
17	세라그린	50	44	5	0.75	170	340	755	668	24.31
18	세라그린	50	44	5	0.75	170	340	755	668	27.69
19	한아A	25	42	0	1	165	660	619	394	52.03
20	한아A	25	42	0	1	165	660	619	394	50.94
21	한아A	25	42	0	1	165	660	619	394	56.48
22	한아A	25	42	5	1	165	660	583	371	50.82
23	한아A	25	42	5	1	165	660	583	371	49.66
24	한아A	25	42	5	1	165	660	583	371	50.77
25	한아A	40	43	5	0.3	165	413	697	426	30.75
26	한아A	40	43	5	0.3	165	413	697	426	30.00
27	한아A	40	43	5	0.3	165	413	697	426	29.05
28	한아A	50	42	0	1.1	165	330	766	450	20.36
29	한아A	50	42	0	1.1	165	330	766	450	20.82
30	한아A	50	42	0	1.1	165	330	766	450	16.71
31	한아B	25	42	0	1.5	165	660	619	607	71.49
32	한아B	25	42	0	1.5	165	660	619	607	69.92
33	한아B	25	42	0	1.5	165	660	619	607	75.82
34	한아B	25	42	5	1.3	165	660	583	573	60.49
35	한아B	25	42	5	1.3	165	660	583	573	58.75
36	한아B	25	42	5	1.3	165	660	583	573	53.40
37	한아B	25	42	10	1	165	660	548	538	56.11
38	한아B	25	42	10	1	165	660	548	538	56.25
39	한아B	25	42	10	1	165	660	548	538	56.00
40	한아B	40	43	0	1.2	165	413	720	679	58.06
41	한아B	40	43	0	1.2	165	413	720	679	56.17
42	한아B	40	43	0	1.2	165	413	720	679	57.62
43	한아B	40	43	10	0	165	413	675	636	41.69
44	한아B	40	43	10	0	165	413	675	636	44.88
45	한아B	40	43	10	0	165	413	675	636	43.28

및 28일 압축강도 추정형식은 〈표 9〉와 같으며, 추정 형식은 가장 일반적으로 사용되는 Lyse의 식에 골재

의 종류, 단위수량, 단위시멘트량 및 단위골재량의 인자를 추가한 형식이다.

〈표 8〉 압축강도 시험 결과에 따른 상관계수

	골재	w/c	p/c	W	C	S	G	S/a	압축강도
골재	1	-0.138	0.083	-0.547	0.099	-0.110	-0.137	0.296	0.657
w/c		1	-0.142	0.530	-0.989	0.927	0.295	0.383	-0.703
p/c			1	-0.089	0.127	-0.421	-0.033	0.048	-0.042
W				1	-0.515	0.373	0.575	-0.391	-0.511
C					1	-0.913	-0.324	-0.325	0.675
S						1	0.240	0.493	-0.579
G							1	-0.279	-0.042
S/a								1	-0.118
압축강도									1

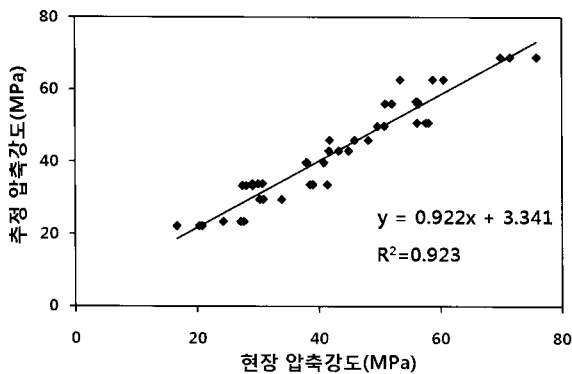
〈표 9〉 회귀분석을 통한 28일 압축강도 추정형식

독립변수	종속변수	추정형식
골재 물시멘트비 단위수량 단위시멘트량 단위골재량	28일 압축강도	$f_p = b_0 + b_1(a) + b_2(w/c) + b_3(W) + b_4(C) + b_5(S)$

회귀분석을 통한 28일 압축강도 추정식은 다음과 같다.

$$f_p = -547.139 + 12.898(a) - 2.351(w/c) + 3.196(W) + 0.002(C) + 0.174(S)$$

여기서, f_p 는 추정 28일 압축강도, a 는 골재의 종류, w/c 는 물시멘트비, W 는 단위수량, C 는 단위시멘트량, S 는 단위잔골재량이다. 회귀분석결과 결정계수 R^2 은 0.923, 추정값의 표준오차는 4.2 MPa로서 실험결과와 매우 근접한 결과를 얻을 수 있었다.



〈그림 13〉 현장시험결과와 추정압축강도의 비교

〈그림 13〉은 재령 28일에서의 현장시험결과에 대한 추정압축강도의 관계를 나타내고 있다.

5. 결론

폴리머 개질 경량콘크리트의 골재시험, 굳지 않은 콘크리트 시험 및 경화콘크리트 시험 결과는 다음과 같다.

- (1) 골재의 비중은 약 0.82~1.79의 분포를 이루었으며, 대부분의 골재는 약 8~12%의 흡수율을 보인 반면, 리아포 골재는 흡수율이 약 40%에 달해 구조용 경량골재로서 사용할 수 없었다.
- (2) 28일 압축강도의 측정 결과, 각각 약 35MPa, 38MPa 및 57MPa의 압축강도를 보였고, 쪼갬인장강도는 압축강도 대비 약 1/12~1/15의 강도를 보였다.
- (3) 휨강도 시험에 있어서는 소량의 폴리머 첨가로 휨강도가 증가되었으며 세라그린 골재의 경우 약 22%, 한아A 골재는 약 11% 증가됨을 알 수 있었다.
- (4) 동결융해 시험 결과, 세라그린 골재는 물시멘트비가 25%를 넘어가면 현장적용이 불가능하였으며 압축강도, 쪼갬인장강도 및 휨강도에 대한 추가적인 연구를 통해 시공성에 대한 검토가 필요하다.
- (5) 인공경량골재를 사용한 압축강도 시험 결과를 바탕으로 회귀분석을 통한 추정 압축강도를 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사

업 (07도시재생B03)과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2009-0087819)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Joao A Rossignolo, Marcos V.C. Agnesini, (2004), "Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete", *Cement & Concrete Composites*, No.21, 7-11.
2. 김화중, 김태섭, 전명훈, 안상건(1991), 인공경량골재 콘크리트의 배합과 역학적 성상에 관한 실험적 연구, *한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집*, 7권, 1호, 99-104.
3. 장철인, 유덕룡, 염환석(2004), "혼화제 종류에 따른 폴리머 시멘트 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구", *한국구조물진단학회*, 8권, 1호, 121-128.
4. 변근주(1987), "폴리머 콘크리트", *대한토목학회지*, 35권, 1호, 37-41.
5. J. L. Valentín, I. Mora-Barrantes, A. Rodríguez, L. Ibarra, L. Gonzalez(2007), "Effect of oleyl amine on SBR compounds filled with silane modified silica", *J. of Applied Polymer Science*, Vol 103, Issue 4, 1806-1807.
6. S. Choi, G. Cho(2006), "Influence of 1,2-unit contents on retraction behaviors of SBR vulcanizates", *J. of Applied Polymer Science*, Vol 102, Issue 5, 4707-4708.
7. S. Zhao, X. Zhang(2003), G. Jin, "Influence of molecular structure of star S-SBR on its properties", *J. of Applied Polymer Science*, Vol 89, Issue 9, 2311-2312.
8. Y. Cha, S. Choe(1995), "Characterization of crosslinked polystyrene beads and their composite in SBR matrix", *J. of Applied Polymer Science*, Vol 58, Issue 1, 147-148.

접수일자 : 2009년 10월 4일

심사완료일자 : 2009년 11월 19일

게재확정일자 : 2009년 12월 11일