

폴리프로필렌 섬유 보강 RHA콘크리트의 공학적 특성

Engineering Properties of Concrete Enhanced with Rice Husk Ash and Polypropylene Fiber

이윤*, 박기태**, 권성준***

대전대학교 토목공학과*, 한국건설기술연구원**, 한남대학교 건설시스템공학과***

Yun Lee(yunis@dju.ac.kr)*, Ki-Tae Park(ktpark@kict.re.kr)**,
Seung-Jun Kwon(jjuni98@hnu.ac.kr)***

요약

콘크리트는 인장거동에 취약하므로 적절한 보강재를 필요로 한다. 또한 시멘트 클링커 생산시 발생하는 CO₂로 인해 시멘트 사용량을 줄이려는 연구가 시도되고 있다. 본 연구에서는 폴리프로필렌 섬유와 왕겨재를 혼입한 콘크리트의 공학적 성능을 평가하였다. 섬유재는 0.125~0.375%의 수준을, 왕겨재는 0~20% 치환율을 고려하여 콘크리트 배합을 준비하였으며, 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도와 균열폭, 내충격성, 인발특성을 평가하였다. 또한 섬유재 혼입률, 섬유재 길이, 왕겨재의 혼입률을 고려하여 실험결과를 분석하였다. 인장특성에 대해서는 섬유재의 혼입량이, 강도특성에서는 왕겨재의 혼입률이 지배적이었으며, 0.125%의 섬유재 혼입과 10% 왕겨재 치환인 배합에서 가장 효과적인 공학적 특성이 발견되었다. 적절한 왕겨재 및 섬유재의 혼입은 다양한 공학적 특성을 강화시킬 뿐 아니라 친환경적인 측면에서도 유리하다고 판단된다.

■ 중심어 : | 왕겨재 | 폴리프로필렌 섬유 | 압축강도 | 인장강도 | 균열 |

Abstract

Concrete, as a construction material, needs suitable reinforcement for tensile region due to weak tensile strength. Many researches on cement reduction have been attempted for CO₂ emissions during cement clinker production. In this paper engineering properties of concrete enhanced with polypropylene fiber (PPF) and rice husk ash (RHA) are evaluated. Fiber volume ratios of 0.125~0.375 and RHA replacement ratio of 0~20% are considered for concrete mixture. Lots of test including compressive, split, flexural and the related crack width, impact energy, and pull out test are performed and the results are evaluated considering the fiber ratios, fiber length and RHA replacement. Fiber and RHA ratios have dominant effects on tensile and compressive characteristics respectively, and the concrete with 0.125% of PPF and 10% of RHA shows the most effective enhancement for engineering properties. Appropriate addition of RHA and PPF are very effective both for engineering property enhancement and clean technology.

■ keyword : | Rice Husk Ash | Polypropylene Fiber | Compressive Strength | Tensile Strength | Crack |

* 본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(FRP Hybrid Bar를 활용한 해양항만구조물 수명향상 기술 개발) 과제로 수행되었습니다.

접수일자 : 2014년 12월 02일

수정일자 : 2015년 01월 15일

심사완료일 : 2015년 02월 04일

교신저자 : 권성준, e-mail : jjuni98@hnu.ac.kr

I. 서론

콘크리트는 경제적인 건설재료이며 고내구성을 가지고 있으므로 다양한 환경에서 시공되지만 압축강도에 비해 인장강도가 취약한 것이 공학적 단점이다. 가장 일반적인 RC (Reinforced Concrete)는 인장부에 철근을 사용하여 인장부의 역학적 특성을 개선한 것이며, 최근 들어 섬유재 (Fiber)를 혼입하여 다양한 성능개선이 시도되고 있다. 일반적으로 섬유보강 콘크리트는 취성파괴의 단점을 개선하는데, 초기 균열유발 하중을 증가시키고 균열이 발생하더라도 미세균열을 넓게 분포시키는 브리징 효과 (Bridging effect)를 가지고 있다 [1-3]. 섬유보강 콘크리트의 균열저항성은 하중에 대한 저항성 이외에 수화열, 건조/소성 수축균열과 같은 재료적인 균열저항성에 더욱 효과적으로 알려져 있다[4][5]. 최근들어 ECC (Engineering Cementitious Composites)가 국내외에서 많이 연구되고 있는데, 기존의 균열저항성 개선 이외에 인장경화거동을 보이며 보수/보강에 효과적인 것으로 알려져 있다[6][7].

콘크리트는 재료의 수급성, 경제성, 내구성 등 오랫동안 공학적인 장점이 인정되어 온 건설재료지만, 클링커 생산이 발생하는 이산화탄소는 친환경성에 큰 문제가 되고 있다[8][9]. 시멘트 사용량을 줄이면서 기존의 성능을 개선하려는 연구는 오랫동안 시도되었는데, 대표적인 것으로 슬래그 및 플라이 애쉬 (FA: Fly Ash)가 있다. 이러한 재료는 콘크리트 내의 시멘트를 대체하고 추가적인 수화물 형성을 통해 공학적 특성을 개선시킨다. 최근들어 이러한 시도는 HVFAC (High Volume Fly Ash Concrete), HVSC (High Volume Slag Concrete)와 같이 대단위치환 콘크리트로 개발되고 있으며, 시멘트를 사용하지 않는 무시멘트 경화체에 대한 연구도 활발하게 진행 중이다[10-13]. 이러한 혼화재료중 국내에서는 크게 활용되지 않지만, RHA (Rice Husk Ash)를 사용하려는 연구가 최근 들어 수행되고 있다. RHA의 뛰어난 포졸란 반응은 다량의 비정형 실리카 성분과 높은 비표면적에 기인하는 것으로 알려져 있는데, 이미 많은 내구적 성능 개선 등이 보고되고 있다[14-16]. PPF를 혼입한 섬유보강 콘크리트는 꾸준히 진행되었는데, 섬유인성효과를

극대화하여 내충격성을 평가한 연구[17], 역학적 특성의 개선[18] 등이 주를 이루고 있으나 대부분 섬유재 특유의 인장성능 개선에 초점을 맞추고 있다. 최근 들어 산업 부산물과 PPF를 같이 사용하여 역학적/ 내구적 특성을 평가한 연구들이 발표되고 있다[19-21].

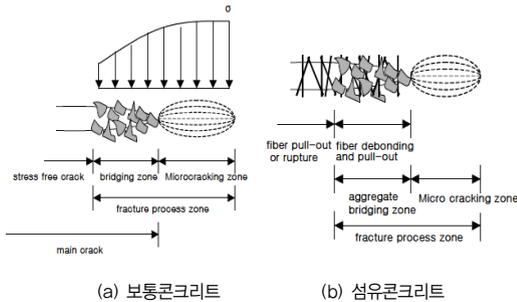
본 연구에서는 OPC (Ordinary Portland Cement) 및 RHA를 혼입한 콘크리트를 제조하고 폴리프로필렌 섬유 (PPF: Polypropylene fiber)를 0.125~0.375% 체적비로 혼입하여 다양한 역학적 특성을 시험하였다. FA (Fly Ash)와 PPF를 동시에 사용한 연구는 상당수 있으나, RHA와 같이 비교적 최근에 시도되는 혼화재료에 PPF를 적용한 연구는 매우 제한적이다. 이를 위해 압축강도, 휨강도, 쪼갬 인장강도, 내충격성, 부착성이 평가되었으며, 섬유재의 길이를 20mm 및 40mm로 구분하여 섬유길이에 대한 효과를 추가적으로 분석하였다.

II. 섬유보강 콘크리트 및 RHA 콘크리트 특성

1. 섬유보강 콘크리트 특성

일반적으로 인장 콘크리트의 선단에서의 균열진행영역은 [그림 1(a)]과 같이 미소균열 부분(Micro-cracking region)과 [그림 1(b)]의 브리징부분(Bridging region)으로 나눌 수 있다. 미소균열 부분은 손상부분이나 공극의 확대, 골재와 시멘트 사이의 경계면에서 접착의 손실 등 미소 현상의 조합으로 파악할 수 있다. 그러나 브리징 부분은 균열면에서 골재나 섬유 보강재로 인하여 응력의 전달이 이루어지는 영역이므로 파괴가 진행되는 동안 일반적으로 연화 상태에 있으며, 콘크리트의 파괴거동을 지배하게 된다[22][23].

보통 섬유 보강 콘크리트의 경우 임계 균열 열림 폭 (Critical cracking opening width)은 사용된 섬유 길이의 절반 정도에서 형성된다고 알려져 있다. 또한 이러한 연결 기구는 섬유재의 길이, 형상, 조도 등에 영향을 받는다[22][23]. [그림 2]에서는 사용된 PPF (Polypropylene fiber) 사진을 나타낸다.



(a) 보통콘크리트 (b) 섬유콘크리트

그림 1. 콘크리트 내에서의 파괴진행



그림 2. 사용된 PPF의 사진

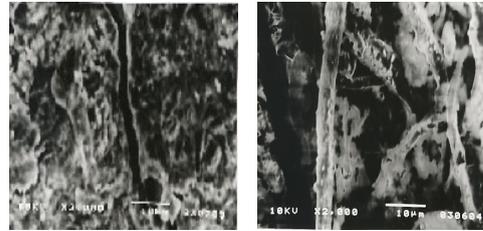
2. RHA 콘크리트 특성

RHA를 혼화재료로 사용할 경우, 소성과정과 Ca(OH)₂과의 반응을 통해 CSH (Calcium Silicate Hydrates)를 형성하므로 인도 및 동남아 등지에서 많이 연구되고 있다[14-16]. RHA의 뛰어난 포졸란 반응은 다량의 비정형 실리카 성분과 높은 비표면적에 기인하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 RHA를 사용한 콘크리트의 장점은 다음과 같다.

- [1] RHA의 작은 평균공극크기
- [2] 80Å 정도의 평균공극분포와 다량의 meso-pore에 흡수되는 자유수의 증가에 따른 실질적인 w/c 비의 감소
- [3] 시멘트 수화반응의 활성화
- [4] RHA내의 실리카 성분과 시멘트 내의 Ca²⁺, OH⁻, Ca(OH)₂의 수화반응에 따른 다량의 CSH의 형성

[그림 3(a)]에서는 OPC 콘크리트의 SEM 사진을, [그림 3(b)]에서는 RHA 콘크리트의 SEM 사진을 나타내고 있는데, [그림 3(b)]에서는 RHA의 포졸란 반응을

통한 실리카 단섬유(Silica fiber)의 형성을 볼 수 있다[24].



(a) OPC concrete (b) RHA concrete

그림 3. OPC 및 RHA 콘크리트의 SEM 사진[24]

III. 실험 프로그램 및 관련 규격

1. 배합특성

실험을 위해 결합재로 OPC 및 RHA가 준비되었으며, 0.125~0.375% 체적비로 PPF가 준비되었다. [표 1]에서는 RHA 및 OPC의 화학적 성분을, [표 2]에서는 잔골재 및 굵은골재의 물리적 특성을, [표 3]에서는 PPF의 역학적 특성을 나타내었다.

표 1. RHA와 OPC의 화학성분

화학조성(%)	Rice Husk Ash	OPC
SiO ₂	85.49	20~21
Al ₂ O ₃	0.13	5.2~5.6
Fe ₂ O ₃	0.45	4.4~4.8
CaO	3.68	62~63
MgO	1.55	0.5~0.7
SO ₃	0.05	2.4~2.8
강열감량	3.02	1.5~2.5
Na ₂ O	0.23	-
K ₂ O	0.19	-

표 2. 잔골재 및 굵은골재의 특성

분류	조립률	밀도 (g/cm ³)	흡수율 (%)
잔골재	2.2	2.41	1.2
굵은골재	6.4	2.78	0.8

표 3. PPF의 물리적 특성

	밀도 (g/cm ³)	탄성계수 (10 ³ MPa)	인장강도 (MPa)	인장 파단률 (%)
PPF	0.91	3.5~3.8	260~710	5~21

본 연구에서 사용된 RHA는 인도산으로 650℃에서 소성된 일반 RHA를 사용하였다. 섬유재의 길이는 20 mm, 40 mm를 각각 고려하였으며, 섬유재의 혼입비는 0.125 %, 0.250 %, 0.375 %로 각각 고려하였다. 또한 OPC 콘크리트 이외에 RHA 치환률에 대해 0 %, 10 %, 20 %의 세 가지 수준을 고려하였다. w/c를 0.52로 고정하였으며 물: 잔골재: 굵은 골재의 비율 1: 1.8: 3.69로 혼입한 콘크리트를 제조하였다.

시멘트, 섬유, RHA를 투입하고 이후 골재를 투입하여 건비율을 90초동안 수행하고 정해진 배합수가 투입된 후 콘크리트 믹싱을 수행하였다. 24시간 기건 양생 후 몰드를 해체하였으며 28일 수중양생을 거친 뒤 관련 시험을 수행하였다. [표 4]에서는 본 연구를 위한 배합을 나타내고 있다.

표 4. PPF를 혼입한 OPC 및 RHA 배합

배합	OPC (%)	RHA (%)	PPF 체적비(%)	물-결합재비
OPC	100	-		0.52
OPC+10 RHA	90	10		
OPC+20 RHA	80	20		
OPC+0.125%	100	-	0.125	
OPC+10 RHA+0.125%	90	10	0.125	
OPC+20 RHA+0.125%	80	20	0.125	
OPC+0.250%	100	-	0.250	
OPC+10 RHA+0.250%	90	10	0.250	
OPC+20 RHA+0.250%	80	20	0.250	
OPC+0.375%	100	-	0.375	
OPC+10 RHA+0.375%	90	10	0.375	
OPC+20 RHA+0.375%	80	20	0.375	

2. 실험계획

2.1 압축강도 시험

100×100×100mm 정육면체 몰드가 압축강도 시험을 위해 사용되었으며, 세 개의 시편을 제조하여 평균값을 사용하였다. 하중인가속도는 140kN/min 을 준수하였으며, ASTM C109에 따라 강도평가를 수행하였다.

2.2 쪼갬 인장강도 시험

지름 60mm, 높이 100mm 실린더 시편을 사용하여

쪼갬 인장강도 시험을 수행하였다. 시편은 세 개를 제조하여 평균값을 사용하였으며, ASTM C 496에 따라 시험을 수행하였다.

2.3 휨강도 시험

500×100×100 mm의 보 몰드가 휨 시험을 위해 제조되었으며, 최종 파괴후의 하중 및 변위를 측정하였다. 또한 파괴된 시편에 대하여 균열 폭이 측정되었는데, ASTM C 78-09에 따라 시험이 수행되었다.

2.4 내충격성 시험

내충격성 시험중에서 정적낙하시험 (Drop weight impact)은 가장 간단하게 시편의 내충격성을 평가할 수 있는 방법이다. 정해진 높이에서 560 g의 무게추를 300×230×10 mm의 크기를 가진 시편 중앙에 떨어뜨려 균열 및 파괴양상을 평가하였다.

2.5 인발시험 (Pull out test)

Pull out test을 위해 100×100×100 mm 시편이 준비되었으며 몰드 바닥면으로부터 10 mm의 거리를 두어 중앙에 철근을 매립하였다. 시험을 위하여 60 톤급의 UTM이 사용되었는데 최종 인발길이가 0.25 mm일 때의 하중을 부착응력으로 평가하였다. 열처리된 직경 12 mm, 길이 70 mm의 철근 (TMTS: Thermo mechanically treated steel)이 부착성능평가를 위해 사용되었으며, IS 2770-67에 따라 시험이 수행되었다.

IV. PPF를 혼입한 RHA 콘크리트의 공학적 특성 평가

1. 압축강도 평가 및 섬유보강 효과 분석

[그림 4]에서는 RHA 치환률 및 섬유재 혼입에 따른 강도특성을 나타내고 있다. 섬유재가 혼입되지 않은 경우, OPC에서는 25.0 MPa이 측정되었으나 10 % RHA 혼입시 40.3 MPa, 20% RHA 혼입시 35.0 MPa이 측정되었다. 이는 RHA의 포졸란 반응을 극대화시킬 OPC 양이 문제가 되는 것으로 RHA 10 % 수준일 경

우 161.2 %의 강도증가를 나타내었다. 전반적으로 섬유재 혼입에 따른 압축강도는 크게 발현되지 않았다. 또한 섬유재 길이가 40 mm 인 경우, 강도감소가 크게 나타났는데, 이는 길이가 긴 섬유재를 다량 혼입할 경우 엉킴이 발생하여 강도감소가 발생하기 때문이다. 섬유재 효과는 압축영역보다 인장영역에서 더욱 효과적으로 알려져 있다[1][4][5]. [그림 5]에서는 OPC, 10RHA, 20RHA를 하나의 그룹으로 하여 섬유 혼입량에 따른 평균값을 도시하였다. 섬유재 길이가 20 mm 인 경우, 혼입률에 따른 큰 강도감소가 발생하지 않았으나, 40 mm 인 경우 0.375% 혼입률 경우 58.3% 수준으로 강도가 감소하였다. 또한 [그림 6]에서는 섬유재를 혼입한 경우를 평균하여 RHA 치환률에 따라 강도를 도시한 것이다. RHA 혼입률이 증가함에 따라서 l=20 mm 인 경우 강도증가가 평가되었으나, l=40 mm 인 경우는 강도감소가 발생하였다. 이는 전술한대로 섬유재의 엉킴 현상으로 콘크리트 비빔이 완벽하지 않았기 때문이다. 일반적으로 골재와 시멘트를 믹싱한 후 섬유재를 넣고 다시 비비고 배합수를 넣는 것이 엉킴을 최대한 방지할 수 있다. 최근 들어서는 섬유간의 반발력을 유도하여 에스테르를 모재로 한 분산제 섬유 코팅 기술도 적용되고 있으나 본 연구에서는 분산제를 혼입하지 않고 일반적인 비빔을 수행하였다.

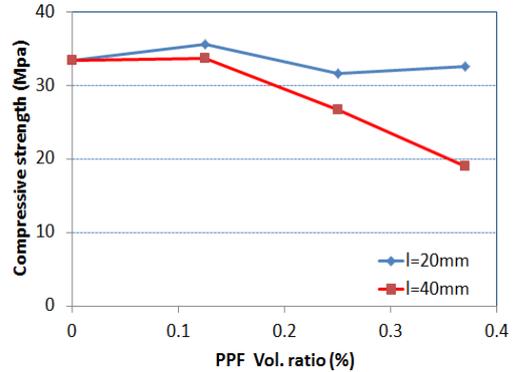


그림 5. PPF 혼입률에 따른 압축강도

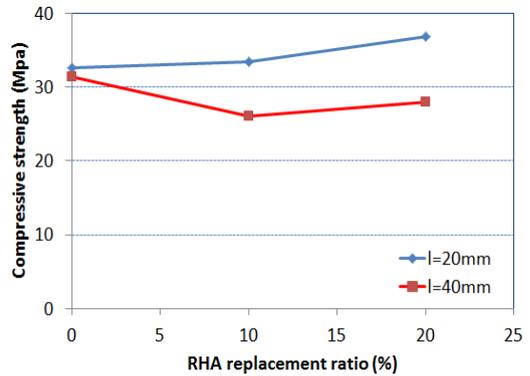


그림 6. RHA 치환률에 따른 압축강도

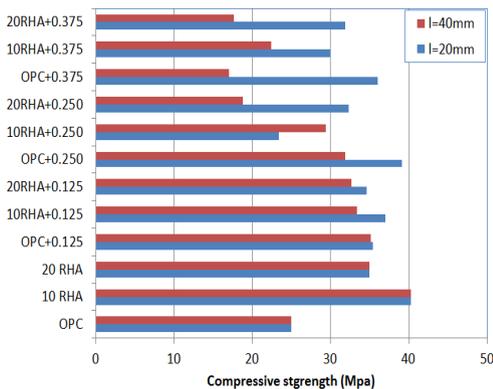


그림 4. RHA 치환률 및 섬유재에 따른 압축강도

2. 쪼갬 인장강도 평가 및 섬유보강 효과 분석

[그림 7]에서는 각 배합에 따른 쪼갬 인장강도를 나타내고 있다. 최대값은 40 mm 섬유 0.375 %를 혼입한 경우로 OPC 대비 196 %의 증가를 나타내었다. 전체적으로 압축강도에 비하여 높은 증가가 발생하였는데, 이는 섬유재의 브리징 효과가 주된 원인이다[2][3]. 섬유재를 혼입하지 않은 경우에서는 RHA 10 % 혼입시 가장 높은 강도(2.15 MPa)가 평가되었다. 압축강도 평가와는 다르게 섬유재 길이 효과는 뚜렷하지 않았으며, 혼입률이 증가할수록 인장강도가 크게 발현되었다. 또한 이런 효과는 섬유재가 긴 경우(l=40mm)에서 안정적인 결과를 보이고 있다. [그림 8]에서는 섬유재 혼입률에 따른 쪼갬인장강도 평균변화를 나타낸 것이다. [그림 9]에서는 RHA 치환률에 따른 쪼갬 인장강도의 변화를

나타내었는데, RHA 치환률에 대해서는 뚜렷한 상관성이 관측되지 않았다.

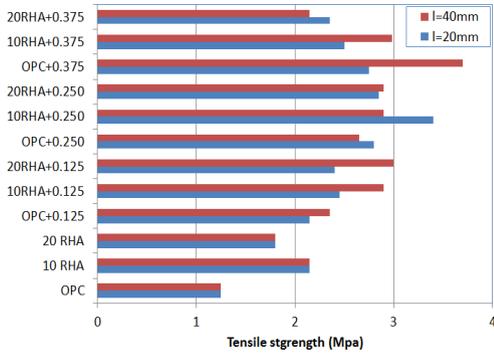


그림 7. RHA 치환률 및 섬유재에 따른 쪼갬인장강도

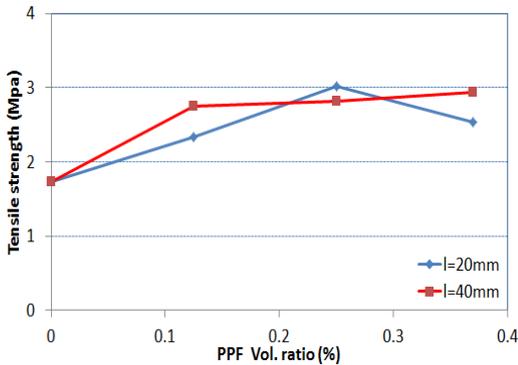


그림 8. PPF 혼입률에 따른 쪼갬인장강도

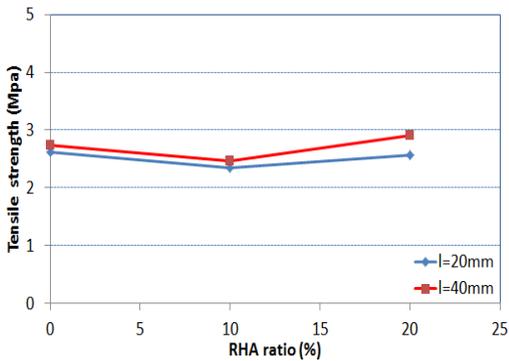


그림 9. RHA 치환률에 따른 쪼갬인장강도

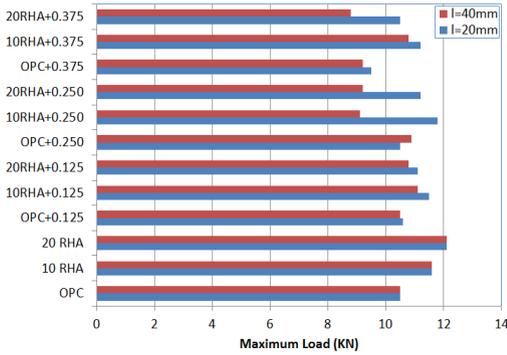
3. 휨강도 평가 및 섬유보강효과 분석

3.1 휨강도 및 변위

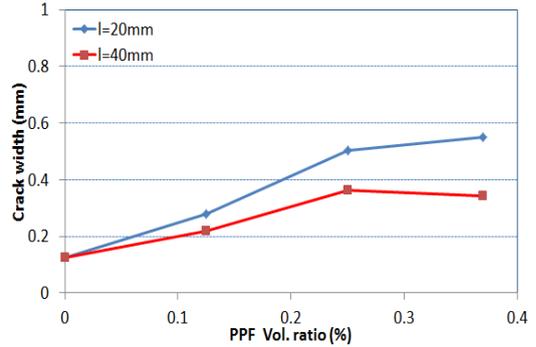
본 절에서는 휨시험을 통하여 PPF 섬유보강 RHA 및 OPC 콘크리트의 거동을 분석하였으며, 균열폭의 변화도 함께 평가하였다. [그림 10]에서는 휨강도 시험사진을 나타내고 있으며, [그림 11]에서는 배합에 따른 다른 최대하중을 나타내었다. 또한 [그림 12]에서는 최대하중에 따른 균열폭을 나타내었다. [그림 11]에서 알 수 있듯이 길이 20 mm, 0.250 % 혼입시 약간 휨강도의 증가를 나타내었으나 큰 수준은 아니었다. RHA 혼입에 따라 휨강도가 증가하였는데, 이는 압축강도 증가와 같이 RHA의 포졸란 반응에 따른 강도개선이 주된 원인이다. 길이 40 mm를 혼입할 경우 혼입률의 증가에 따라 휨강도의 저하가 발생하였는데, 이는 압축강도 감소와 마찬가지로 결합재와의 혼입에 섬유 엮임 현상이 영향을 주었으리라 판단된다. 그러나 [그림 12]에서처럼 균열폭은 크게 증가하였는데, 이는 섬유재 혼입에 따라 취성파괴가 연성파괴로 바뀌면서 안정적인 파괴로 유도된 것이다. 섬유재 길이 20 mm, 40 mm 모두 0.250 % 이상 혼입률에서는 큰 영향이 없었으나 혼입률에 따라 최대 균열폭이 꾸준히 증가하였다. 균열폭은 40 mm 보다 20 mm에서 더 크게 진행되었는데, 이는 휨저항 능력이 유지되고 균열이 증가하면서 안정적인 파괴가 발생한 것이다. 섬유재를 혼입하지 않는 경우의 균열폭은 매우 작으므로 이에 대한 결과 (OPC, 10RHA, 20RHA)들은 [그림 12]에서 생략하였다.



그림 10. 휨강도 시험 전경

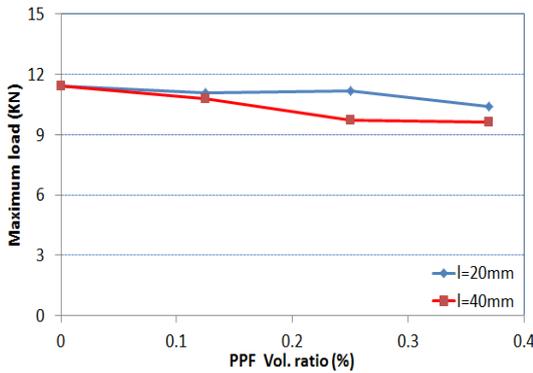


(a) 각 배합에서의 휨강도 특성



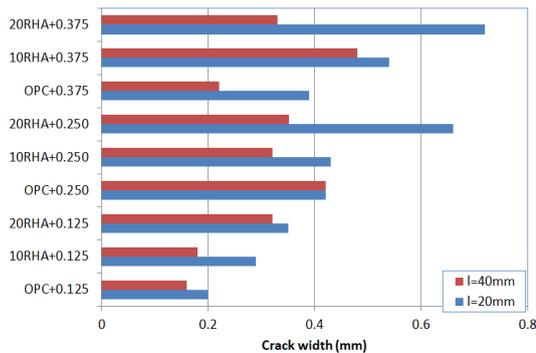
(b) PPF에 따른 균열폭 특성

그림 12. 배합 및 PPF 혼입량에 따른 균열폭 변화



(b) PPF에 따른 휨강도 특성

그림 11. 배합 및 PPF 혼입량에 따른 휨강도 변화



(a) 각 배합에서의 균열폭 측정

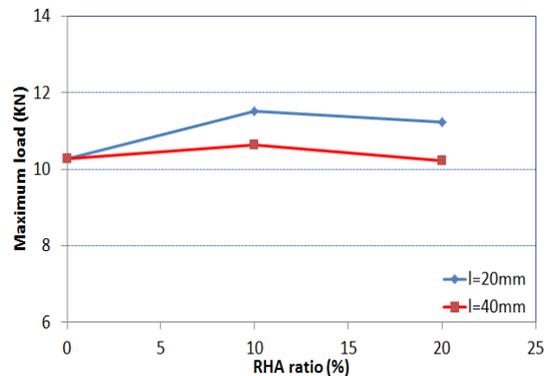


그림 13. RHA 치환률에 따른 휨강도 평가

4. 내충격성 평가 및 섬유보강효과 분석

본 절에서는 자유낙하에 따른 내충격성 평가를 정리 하였는데, l=20 mm 인 결과가 전반적으로 양호하게 평가되었으므로 이 조건에서 시험을 수행하였다. [그림 14]에서는 배합조건에 따른 충격에너지 (Impact energy)를 나타내었으며, [그림 15]에서는 RHA 혼입률에 따른 충격에너지를 도시하였다. 실험결과 내충격성에서는 RHA의 치환률 보다는 섬유제의 혼입이 지배적으로 나타났다. 이는 충격에서 대해 방향이 일정하지

않는 균열이 발생하므로 섬유재가 많을수록 무방향성 균열에 대해 내충격성이 증가하는 것으로 판단된다.

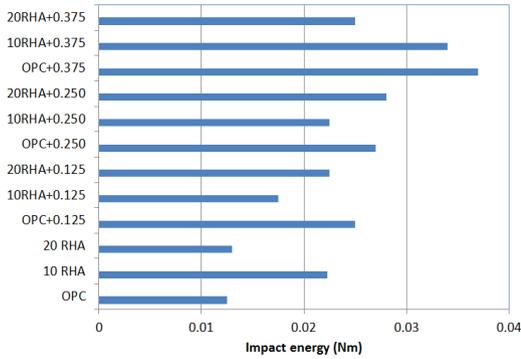


그림 14. 배합 및 섬유 혼입에 따른 내충격성

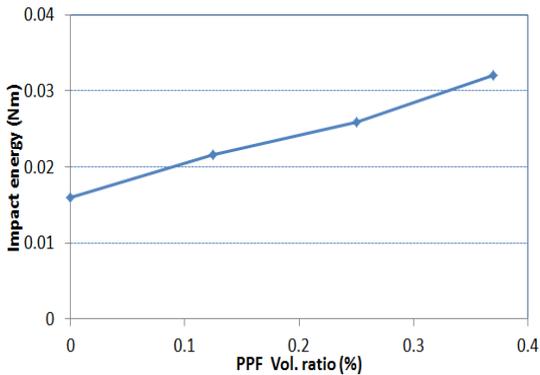


그림 15. PPF 혼입량에 따른 내충격성의 변화

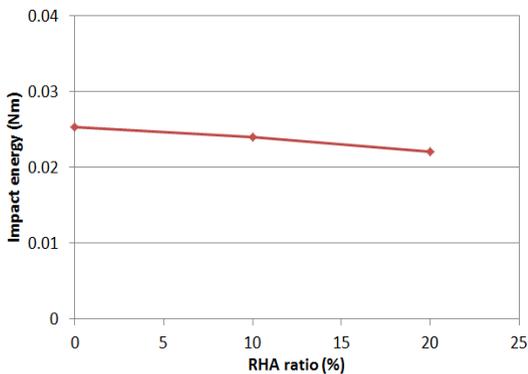


그림 16. RHA 치환률에 따른 내충격성 변화

[그림 16]에서는 RHA 치환률에 따라 변화하는 내충격성을 나타내었는데, 치환률이 높아질수록 내충격성은 일부 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 강도는 높아지지만 취성이 증가하여 내충격성이 낮아지는 것으로 섬유재의 혼입을 통하여 전체적으로 내충격성이 크게 개선되고 있음을 알 수 있다.

5. 인발특성 평가 및 섬유보강효과 분석

본 절에서는 RHA 혼입률 및 PPF 치환률에 따른 인발강도 결과를 정리하였다. [그림 17]에서는 인발강도용 시편 제조에 대해 나타내고 있으며, 그 결과를 [그림 18]에 나타내었다. [그림 17]에서처럼 IS 2700 code에서는 국부파괴 방지를 위해 시편 내부에 코일을 설치하도록 되어 있다. 내충격성 시험과 마찬가지로 l=20mm인 섬유재만 사용하여 시험을 수행하였다.



그림 17. 인발시험을 위한 시편 제조

인발강도 평가에서 OPC에서는 6.91 MPa이 평가되었으나, OPC+0.125%의 경우에는 최대 11.54 MPa이 평가되었고 167%의 강도 개선효과를 나타내고 있다. [그림 19]에서는 PPF 혼입률의 영향을 나타내었는데, 0.125%까지는 증가하였으며 이후 약간 감소하는 특성을 보이고 있다. [그림 20]에서는 RHA 혼입률의 영향을 나타내고 있다. 인발강도는 혼입률 10%에서 최대 값을 보이고 있으며 이후 감소하였다. 인장강도에서는 섬유재의 혼입률이, 압축강도에서는 RHA 치환률이 지배적이었으나, 인발강도에서는 두가지 영향이 복합적으로 작용하였다.

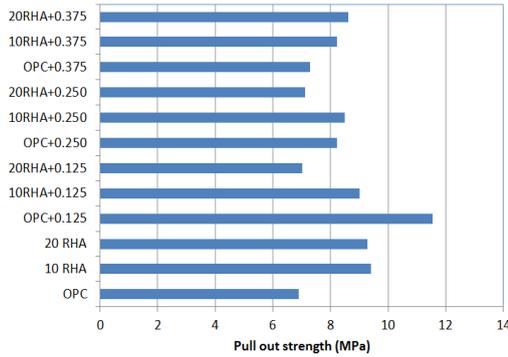


그림 18. RHA 및 PPF 혼입률에 따른 인발강도 변화

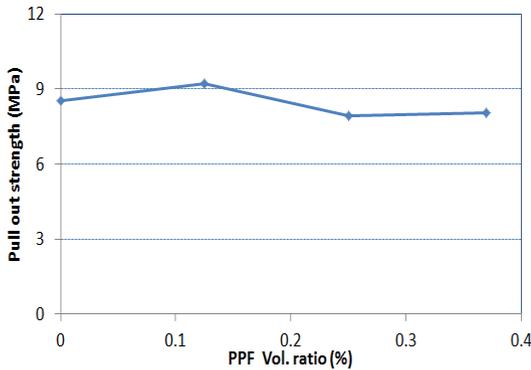


그림 19. PPF 혼입률에 따른 인발강도 변화

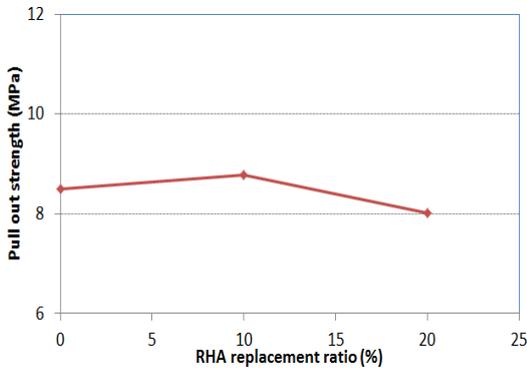


그림 20. RHA 치환률에 따른 인발강도 변화

성 평가를 통해 본 연구내에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) RHA의 혼입을 통해 압축강도 개선은 크게 향상되었는데, RHA 10 % 수준일 경우 161 %의 강도증가를 나타내었다. RHA가 20 % 이상 혼입될 경우 시멘트량이 줄어들어 충분한 알칼리가 공급되지 않으므로 10 % 전후의 치환률이 적절하다고 판단된다. 또한 섬유재의 길이가 40 mm 인 경우는 섬유의 영김으로 인해 강도개선효과를 기대하기 어려우며 섬유재 혼입에 따른 압축강도개선은 고려하지 않는 것이 바람직하다.
- 2) 쪼갬인장강도 평가에서는 PPF의 섬유길이에 대한 영향은 크지 않았다. 최대값은 40 mm 섬유재를 0.375 % 혼입한 경우로 196 %의 증가비를 나타내었다. 휨강도 평가에서는 내력개선효과는 크지 않았으나 섬유재를 혼입한 콘크리트의 경우 균열폭이 증가하여 취성파괴를 방지할 수 있었으며, 섬유재가 0.250 % 수준까지 균열폭이 꾸준히 증가하였다. 또한 RHA 10 % 혼입한 경우에 휨강도 개선 및 균열폭 증가를 가장 효과적으로 유도할 수 있었다.
- 3) 내충격성 평가에서는 섬유재 혼입량이 주된 영향인자로 평가되었는데, 이는 방향성이 없는 균열의 진전에 섬유 혼입량이 지배적인 영향을 미치기 때문이다. 인발시험에서는 인발시의 극한강도만이 평가되므로 섬유재의 영향과 RHA 혼입률이 동시에 지배적으로 작용하였다.
- 4) RHA는 10 % 정도의 치환률과 20 mm 섬유재 0.125 % 첨가하였을 때, 가장 효과적인 공학적 거동을 나타내었다. 10 % 이상 RHA를 혼입시 포졸란 반응을 극대화시킬 수 있는 단위 시멘트량이 초기재령에서 부족할 수 있으며, 섬유 혼입재가 길이 40 mm 섬유재가 0.125 %가 넘을 경우 배합시 영김에 따라 강도 저하가 발생할 수 있다.

V. 결론

폴리프로필렌 섬유 보강 RHA 콘크리트의 공학적 특

참고 문헌

- [1] ACI Committee 544, Design Consideration for Steel

- Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.4R, pp.12-24, 1999.
- [2] P. Adebar, S. Mindess, D. St. Pierre, and B. Olund, "Shear tests of fiber concrete beams without stirrups," *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.1, pp.68-76, 1997.
- [3] 조창근, 한성진, 권민호, 임청권, "소성현저부 강섬유 혼입 모르타르 적용 철근콘크리트 기둥의 내진성능 평가", *콘크리트학회 논문집*, 제24권, 제3호, pp.241-248, 2012.
- [4] 최세진, 안중길, 박기태, 권성준, "CSA 팽창재를 혼입한 철근보강 모르타르의 인장 경화-연화 특성에 관한 실험적 연구", *한국구조물진단유지관리공학회지*, 제18권, 제1호, pp.101-110, 2014.
- [5] 최세진, 박기태, 권성준, "CSA 팽창재를 혼입한 강섬유 보강 콘크리트의 역학적 성능 및 균열 저항성능 평가", *한국구조물진단유지관리공학회지*, 제18권, 제1호, pp.75-83, 2014.
- [6] 강수태, 류금성, "UHPCC의 압축응력-변형률 관계에 대한 강섬유 혼입물의 영향", *콘크리트학회 논문집*, 제23권, 제1호, pp.67-75, 2011.
- [7] 김윤일, 이양근, 김명성, "강섬유 혼입율이 강섬유보강 고강도 콘크리트의 작업성과 강도특성에 미치는 영향", *한국건축시공학회지*, 제8권, 제3호, pp.75-83, 2008.
- [8] S. H. Lee, W. J. Park, and H. S. Lee, "Lifecycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South-Korean apartment," *Energy and Buildings*, Vol.58, pp.93-102, 2013.
- [9] K. H. Yang, E. A. Seo, and S. H. Tae, "Carbonation and CO₂ uptake of Concrete," *Environmental Impact Assessment Review*, Vol.46, No.4, pp.43-52, 2014.
- [10] S. J. Kwon and H. W. Song, "Analysis of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation modeling," *Cement and Concrete Research*, Vol.40, No.1, pp.119-127, 2010.
- [11] 유성원, 이형집, "하이볼륨 플라이애쉬 철근 콘크리트 보의 휨거동 실험", *한국콘크리트학회 논문집*, 제26권, 제3호, pp.323-329, 2014.
- [12] 원종필, 신유길, "다량의 플라이애쉬를 사용한 저강도 고유동 충전재의 내구특성에 관한 연구", *한국콘크리트학회 논문집*, 제12권, 제1호, pp.113-122, 2000.
- [13] 이진우, 이상수, "3성분계 무시멘트 경화체의 양생 방법에 따른 강도특성", *한국콘텐츠학회 논문집*, 제14권, 제4호, pp.389-396, 2014.
- [14] P. Chindaprasirt and S. Rukzon, "Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar," *Construction and Building Materials*, Vol.22, No.8, pp.1601-1606, 2008.
- [15] S. Rukzon, P. Chindaprasirt, and R. Mahachai, "Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol.16, No.2, pp.242-247, 2009.
- [16] A. Ramznianpour, M. Mahdikhani, and G. Ahmadibeni, "The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes," *International Journal of Civil Engineering*, Vol.7, No.2, pp.83-91, 2009.
- [17] S. Hwang, P. S. Song, and B. C. Sheu, "Impact resistance of polypropylene fibre reinforced concrete," *Journal of C.C.I.T.*, Vol.32, No.1, pp.1-14, 2003.
- [18] P. S. Song, S. Hwang, and B. C. Sheu, "Strength properties of nylon and polypropylene fibre reinforced concretes," *Cement and Concrete Research*, Vol.35, No.8, pp.1546-1550, 2005.
- [19] M. S. Meddah and M. Bencheikh, "Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials," *Construction and Building Materials*, Vol.23, No.10, pp.3196-3205, 2009.

[20] O. Karahan and C. D. Atis, "The durability properties of polypropylene fibre reinforced fly ash concrete," *Materials and Design*, Vol.32, No.2, pp.1044-1049, 2011.

[21] P. Ramadoss, and K. Nagamani, "Tensile strength and durability characteristics of high performance fibre reinforced concrete," *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol.33, No.2B, pp.307-319, 2008.

[22] H. Okamura and K. Maekawa, "Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete," Tokyo(Japan), Gihodo-Shuppan, pp.102-181, 1991.

[23] A. A. Shawky, "Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete," Ph.D. Dissertation, Tokyo(Japan), University of Tokyo, pp.22-36, 1994.

[24] R. N. Krishna, "Rice Husk Ash-An Ideal Admixture for Concrete in aggressive environment," 37th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 29-31 August, Singapore, 2012.

박 기 태(Ki-Tae Park)

정회원



- 2006년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구위원

<관심분야> : 모니터링, 성능평가, 건설-IT 융합

권 성 준(Seung-Jun Kwon)

정회원



- 2006년 9월 : 연세대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 한남대학교 건설시스템 공학과 교수

<관심분야> : 염해, 탄산화, 마이크로 모델링, 투수

저 자 소 개

이 윤(Yun Lee)

정회원



- 2006년 2월 : KAIST 건설 및 환경공학과(공학박사)
- 2010년 9월 ~ 현재 : 대전대학교 토목공학과 교수

<관심분야> : 균열, 구조해석, 충돌 및 폭발, 섬유보강 콘크리트, 유지 및 보수