한국토목섬유학회논문집 제14권 4호 2015년 12월 pp. 105 ~ 115
J. Korean Geosynthetics Society Vol.14 No.4 December. 2015 pp. 105 ~ 115
DOI: http://dx.doi.org/10.12814/jkgss.2015.14.4.105
ISSN: 1975-2423(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

유기계 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트의 휨 거동 및 염분침투저항성

Chloride Penetration Resistance and Flexural Behavior of Hybrid Organic Fibers Reinforced Concrete

김승현[1], 강민범[2], 이동욱[3]*
Seung Hyun Kim[1], Min Bum Kang[2], Dong Wook Lee[3]*

[1]*Member, Doctor's Course, Department of Civil and Ocean Engineering, Jeju National Univ., 102 Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province, 690-756, Republic of Korea*
[2]*Non-Member, Master of Engineering, Department of Civil Engineering, Jeju National Univ., 102 Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province, 690-756, Republic of Korea*
[3]*Non-Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Jeju National Univ., 102 Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province, 690-756, Republic of Korea*

ABSTRACT

In this study, to understand mechanical characteristic of hybrid reinforced concrete by PVA-fiber 6 mm and PP-fiber 50 mm, which are organic fiber replaced macro-fiber with PP-fiber, four mixed Hybrid Organic Fibers Reinforced Concrete (HFRC) is compared with one mixed plain concrete without fiber reinforcement. Volume portion of the fibers are limited under one percent. The result presents that hybrid reinforcement of the organic fibers cannot maximize stiffness and ductility behavior of the steel fiber reinforcement. however, in comparison to plain concrete, it is confirmed that meaningful relation between toughness index and equivalent flexural strength with advanced ductility behavior. Also, in the case of concrete hybrid reinforced by organic fiber, when the volume portion of the fiber increases, ductility also increases. PP-fiber, which is macro fiber, has more effect on the flexural behavior of concrete than PVA-fiber, which is micro fiber, does. The result also shows that it decrease chloride penetration in chloride penetration test.

요 지

본 연구에서는 매크로섬유를 PP섬유로 대체하여 유기계 섬유들인 PVA섬유 6mm와 PP섬유 50mm로 하이브리드 보강된 콘크리트의 역학적 특성을 파악하기 위해 섬유의 체적비를 주요변수로 하이브리드 섬유 보강 콘크리트(HFRC) 4배합과 섬유가 없는 Plain콘크리트 1배합을 실험하여 비교하였다. 섬유의 체적비를 1%미만으로 제한하였다. 연구결과 유기계 섬유의 하이브리드 보강은 콘크리트의 강성 및 연성거동을 강섬유만큼 극대화시키지는 못하지만, Plain콘크리트와 비교시 매우 진전된 연성거동을 보이며 휨 인성지수와 등가휨강도 사이의 의미 있는 관계를 확인하였다. 그리고 유기계 섬유로 하이브리드 보강한 콘크리트에서도 섬유의 체적비가 증가할수록 연성이 증가하였고 섬유의 하이브리드를 위해 사용한 마이크로섬유인 PVA섬유보다 매크로섬유인 PP섬유가 콘크리트의 휨 거동에 미치는 영향이 크며, 염분침투시험에서도 섬유의 혼입이 염분침투를 억제하는 효과가 있는 것으로 확인되었다.

Keywords **:** Hybrid Fiber Reinforced Concrete, Organic fibers, Ductility behavior, Toughness index, Chloride Penetration

1. 서 론

콘크리트는 압축강도와 내구성이 우수하고 형태와 크기에 제약을 받지 않는 장점을 가지고 있지만 연성능력으

Received *21 Oct. 2015,* ***Revised*** *9 Dec. 2015,* ***Accepted*** *15 Dec. 2015*
****Corresponding author***
Tel: +82-64-754-3458; Fax: +82-64-725-2519
E-mail address: dwlee@jejunu.ac.kr (D. W. Lee)

로 대표되는 인장강도와 휨강도가 낮고 소성수축, 건조수축 등으로 인해 균열이 발생하여 성능이 저하되는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 일반적으로 철근이나 PS강재로 보강한 보강콘크리트를 사용하고 있다.

근래에는 콘크리트의 연성능력을 개선하고 균열을 제어하는 효과를 얻기 위해 섬유를 보강한 섬유보강콘크리트에 대한 관심과 연구가 진행되고 있다. 콘크리트의 취성적 거동을 연성적으로 유도하고 인장 저항능력의 증대, 국부적인 균열의 생성 및 성장을 억제하는 등 역학적 성질의 개선을 통해 기존 시멘트 복합체의 단점을 보완하기 위한 한 방법으로 불연속적이고 단상인 섬유재료를 시멘트 복합체 속에 불규칙하게 분산시켜 넣은 섬유보강콘크리트(Fiber Reinforced Concrete; FRC)에 대해 1960년대부터 연구되어 1970년대에는 현장에 적용되기 시작하였다(Betterman et al., 1995). 1990년대 후반부터는 물리·역학적 특성이 다른 두 가지 타입 이상의 섬유를 조합시키는 하이브리드섬유보강콘크리트(Hybrid Fiber Reinforced Concrete; 이하 HFRC)에 대한 연구가 발전하고 있으며, 이는 재료특성이 다른 섬유의 하이브리드는 콘크리트 강도와 연성을 증가시키기 위하여 효과적이며, 길이가 다른 섬유의 하이브리드는 미세균열(microcrack)과 거시균열(macrocrack)제어에 효과적이기 때문이다(Lawler, 2001).

하지만, 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 연구는 대부분 혼입된 섬유 체적비가 2%이상인 고인성 콘크리트에 집중되어 경제성 및 시공성을 고려하여 산업적으로 광범위하게 사용되고 있는 섬유 체적비가 1%미만인 일반 섬유보강 콘크리트에 대한 연구는 매우 부족하다(Yang, 2010). 또한 하이브리드 섬유로 사용되고 있는 섬유들은 무기계 섬유로 대표되는 강 섬유(steel fiber)와 유기계 섬유들(cellulose fiber, nylon fiber, polyvinyl alcohol fiber, polypropylene fiber 등)을 하이브리드한 연구가 주를 이루고 있다. 이는 기존 연구결과들로 확인된 신뢰성 있는 재료의 활용이라는 측면과 사용재료의 수급문제 및 실제 적용을 위한 경제성 등을 복합적으로 고려한 재료의 선택으로 보여 진다.

본 연구에서는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 적용을 다양한 해양시설물 중 대표적으로 테트라포드, 안벽블록, 상치 등과 같은 무근콘크리트 구조물에 적용하면 Fig. 1과 같은 최대 취약점인 전단파괴로 인한 성능저하를 최대한 보완할 수 있을 것으로 판단하였으며, 이를 위해서는 우선적으로 해양환경이라는 특수성과 콘크리트구조물의 가장 심각한 성능 저하 요인으로 지목되고 있는 염화물 이온의 침투에 기이한 강재의 부식현상 등을 고려하여 강섬유를 배제하고 유기계 섬유의 하이브리드를 적용하였다. 하이브리드를 위한 섬유 중 마이크로 섬유로는 본 연구를 위한 기초 연구로 Lee and Kim(2014)은 Polyvinyl alcohol (이하 PVA), Polypropylene(이하 PP), Nylon(이하 NY) 3종의 유기계섬유에 대해 섬유의 혼입률을 시멘트 체적비로 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%의 범위에서 인장강도를 확인한 결과 유기계섬유들 중 PVA섬유가 혼입률 0.3%에서 가장 우수한 결과를 보였다. 마이크로섬유로 PVA섬유를 활용하였으며, PVA섬유는 친수성 재료로서 강섬유에 비해 콘크리트 유동성 저하가 심하지 않으며, 강성이 낮아 콘크리트 배합 시 분산성이 좋고 미세균열 제어에 효과적이다(Arisoy and Wn, 2008). 매크로 섬유로는 시멘트계 복합재료로 널리 이용되고 있는 합성섬유들 중 고내구성 섬유인 PP섬유를 활용하였으며 특징은 표면에 기하학적 굴곡이 있어 콘크리트와의 부착 메트릭스를 좋게 하고, 내수성으로 부식발생이 없었다.

따라서, 본 연구에서는 동일계섬유인 PVA섬유와 PP섬유의 체적비 변화에 따른 유기계 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트의 역학적 특성을 파악하기 위해 HFRC의 압

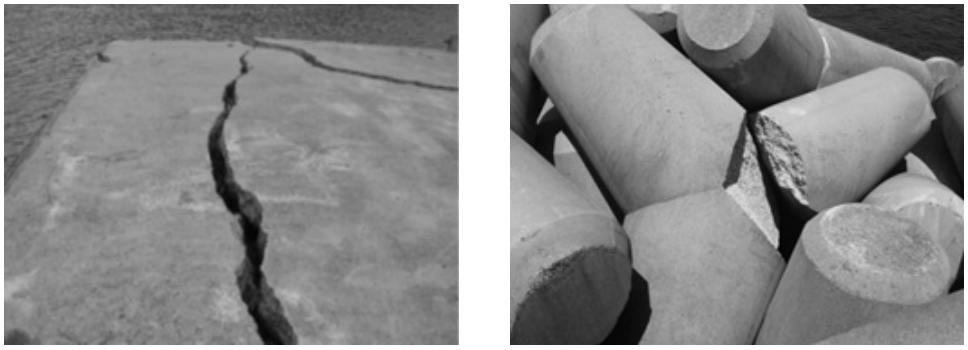


Fig. 1. Failures of Ocean Facility

축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도시험을 통한 하중-변위관계로부터 휨 인성지수를 평가하였고, 하이브리드 섬유의 체적비가 염분침투에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 합성섬유 중 친수성이며 분산성이 우수한 것으로 평가되고 있는 PVA섬유 6mm를 마이크로섬유로 합성섬유 중 고내구성이며 내수성인 PP섬유 50mm를 매크로섬유로 하이브리드하여 체적비가 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향과 염분침투저항성을 파악하고자 다음과 같은 방법으로 연구를 진행하였다.

첫째, 유기계 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트 4 배합과 섬유가 없는 Plain콘크리트 1 배합을 설계하였으며, 각 재료에 대한 기본물성을 파악하였다. 둘째, HFRC의 역학적 특성을 파악하기 위해 압축강도시험, 쪼갬인장강도시험, 휨강도시험을 수행하고, 휨강도시험에서 얻은 하중-변위 관계로부터 등가휨강도(equivalence flexural strength)와 휨 인성지수(toughness index)를 구하여 연성능력을 비교·분석하였다. 셋째, HFRC 4배합과 Plain 1배합에 대한 염분침투저항성을 평가하기 위해 전기영동시험방법에 의해 얻어진 비정상상태에서의 확산계수를 이용하여 염분침투저항성을 분석하였다.

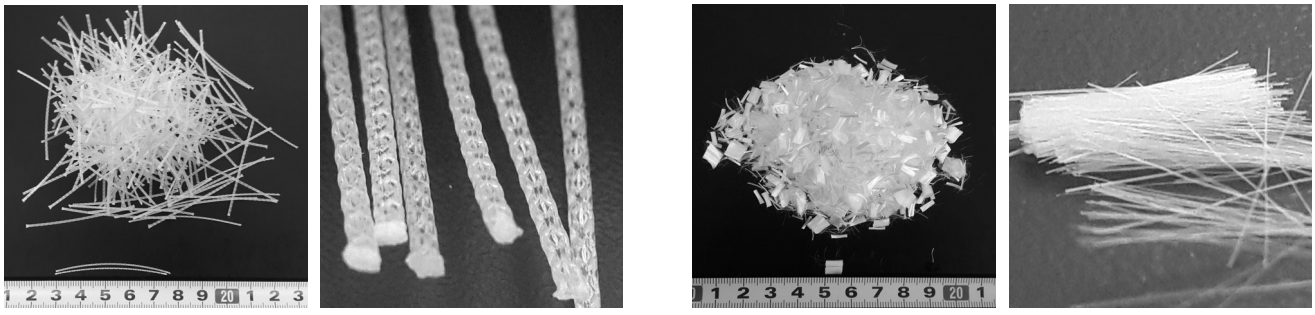
2.2 사용재료 및 배합

본 연구에서 사용된 재료는 다음과 같다. 시멘트는 국내 T사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 잔골재는 EEZ 지역에서 채취한 모래의 세척사이고, 굵은 골재는 제주서부지역에서 생산된 골재를 사용하였다. 물리적 성질은 Table 1과 같이 단위중량이 굵은 골재는 15.20KN/m^3, 잔골재는 15.51KN/m^3이다.

그리고, 실험에 사용된 섬유들은 Fig. 2(a), (b)와 같고, 제조사에서 제공하고 있는 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. PVA섬유는 국내 N사에서 제조한 것으로 직경 11㎛, 길이 6mm로 형상비가 545이고, OH-Group을 가지고 있는 친수성 물질로 내알칼리성이며, 인장강도는 890MPa이다. PP섬유도 국내 N사에서 제조된 것으로 직경 1mm, 길이 50mm로 형상비가 50이고, 내수성으로 강섬유의 최대 단점인 부식의 우려가 없으며 시멘트 메트릭스와의 부착과 정착성능을 향상시키기 위하여 표면에 기하학적 굴

Table 1. Physical properties of aggregates

Type	Density (KN/m^3)	Absorption (%)	Unit weight (KN/m^3)	Fineness modulus
Fine aggregate	25.38	0.83	15.51	1.87
Coarse aggregate	25.97	2.66	15.20	6.82



(a) Polypropylene(PP) fiber (b) Polyvinvl alchohol(PVA) fiber

Fig. 2. The Organic Fibers

Table 2. Mechanical properties for fibers

Fibers	Length (mm)	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
PP	50	1	450 and over	5.6 and over
PVA	6	0.011	890	14.7

Table 3. Mixtures of the concrete

Specimen	Fiber(%, Vol)		Mixture (kg)					Remark
	PVA	PP	Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super plasticizer	
Plain	–	–	175	350	876	835	0.70	
A	0.07	0.33	175	350	876	835	0.84	
B		0.55	175	350	876	835	0.97	
C	0.30	0.33	175	350	876	835	0.97	
D		0.55	175	350	876	835	1.10	

곡을 갖는 형상으로 인장강도는 450Mpa이상, 탄성계수는 5.6GPa이상이다.

섬유의 혼입률은 앞서 언급한대로 체적비의 1%미만이 되도록 하였으며, PVA섬유의 혼입률은 제조사에서 제시하는 혼입량 0.9kg/m^3, 체적비 0.07%와 기초 연구를 통해 확인한 혼입량 3.86kg/m^3 체적비 0.30%로 두 가지와 PP섬유는 제조사에서 제시하는 범위 내에서 PVA섬유와의 혼합률을 고려해 0.33%와 0.55%로 두 가지를 결정하여 네 가지 배합의 PVA섬유+PP섬유 혼입률을 고려하였다. 섬유가 없는 콘크리트 배합 Plain과 섬유가 하이브리드 보강된 콘크리트 배합 A-type: PVA(0.07%)+PP(0.33%), B-type: PVA(0.07%)+PP(0.55%), C-type: PVA(0.30%)+PP(0.33%), D-type: PVA(0.30%)+PP(0.55%)로 섬유의 하이브리드 혼입률 및 체적비 변화에 따른 영향을 섬유가 없는 Plain 배합과 비교하여 분석하였다.

그리고, 본 연구에서 콘크리트 배합은 기존 연구들에 대한 고찰과 기초 연구(Lee and Kim, 2014)를 통한 충분한 예비실험을 통해 섬유의 혼입으로 인한 콘크리트의 유동성과 섬유의 분산성을 확인하였으며, 콘크리트 배합은 섬유 혼입율의 변화가 HFRC의 역학적 특성 및 염분침투저항성에 미치는 영향을 분석하기 위해 물시멘트비(W/C=50%), 잔골재율(s/a=52%)을 고정하고, 섬유의 혼입에 따른 공기량 증가 및 슬럼프 저하를 고려하여 고성능감수제(super-plasticizer; SP)를 첨가하는 방법으로 공기량과 슬럼프를 조절하였다. HFRC 배합은 Table 3과 같다.

2.3 시험체 제작 및 측정방법

압축강도시험(KS F 2405)과 쪼갬인장강도시험(KS F 2423)은 시험용 공시체 Φ100mm×200mm의 원주형공시체를 이용하여 재령 28일에 실시하였으며, 휨강도시험(KS F 2566)은 150mm×150mm×550mm의 각주형공시체를 제작하여 재령 28일에 Fig. 3과 같이 3등분점 하중재하시험 방법으로 가력하면서 중앙점의 처짐을 측정하여 하중-처짐 관계로부터 휨 인성을 평가하고, 휨강도는 최대 하중에서 식 (1)과 같이 구한다.

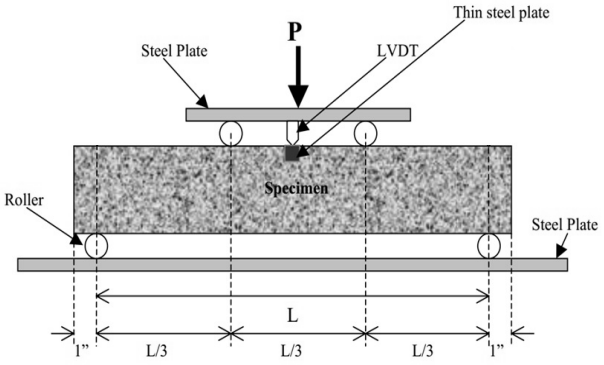


Fig. 3. Flexural strength test setup

$$f_r = \frac{Pl}{bh^2} \tag{1}$$

여기서, f_r : 휨강도(MPa)

P : 최대 하중(N), l : 지간(mm)

b : 파괴 단면의 폭(mm),

h : 파괴 단면의 높이(mm)

휨 인성을 평가하기 위한 방법으로 첫째, ASTM C1018 (2006)에서 제시하고 있는 휨 인성지수(I_5, I_{10}, I_{20})를 구하여 Fig. 4와 같이 평가하였다. 즉, 초기 하중-처짐 곡선을 직선화한 뒤 초기 균열하중(A점)의 접선이 X축과 만나는 O′점을 처짐 원점으로 잡아 O′AB에 의한 삼각형 면적을 초기 균열처짐 δ_{LOP}의 면적으로 간주하였다. 이때 O′B를 δ로 하여 3δ, 5.5δ, 10.5δ인 D, F, H점을 잡아 각각의 면적을 δ_{LOP}의 면적으로 나누어 준 값을 식 (2)과 같이 인성지수로 평가한다. 둘째, KS F 2566(2014)에 제시한 등가휨

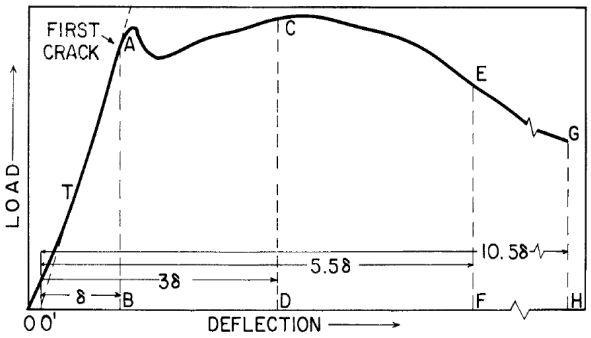


Fig. 4. Flexural toughness index

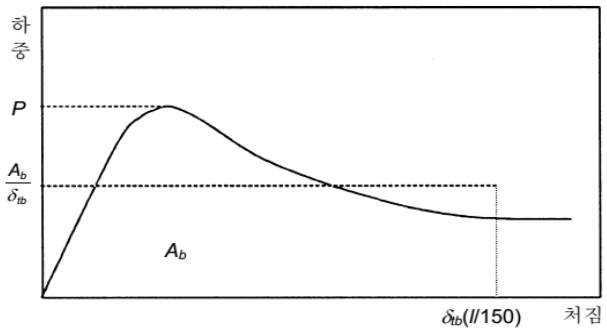


Fig. 5. Equivalent flexural strength

강도를 구하여 평가하였는데 등가휨강도는 휨성능 시험을 통해 얻은 하중-처짐 곡선에서 주어진 처짐(지간의 1/150)에서의 평균 휨강도로 정의하고 있으며, 계산은 식 (3)와 같고 Fig. 5는 등가휨강도 산출개념이다.

$$I_5 = \frac{OACD}{OAB},\ I_{10} = \frac{OAEF}{OAB},\ I_{20} = \frac{OAGH}{OAB} \tag{2}$$

$$f'_r = \frac{A_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2} \tag{3}$$

여기서, f'_r : 등가휨강도(MPa),

δ_{tb} : 지간의 1/150의 처짐(mm)

A_b : Fig. 5의 δ_{tb}까지의 면적, l : 지간(mm)

b : 파괴 단면의 폭(mm),

h : 파괴 단면의 높이(mm)

2.4 염분침투시험

본 연구에서는 섬유의 하이브리드가 콘크리트의 염분침투성에 미치는 영향을 분석하기 위해 NT BUILD 492 (1999) 전기영동시험방법으로 염분침투시험을 실시하였다. 이 시험법은 콘크리트 양단에 10V~60V의 직류전압을 24시간이상 가하여 염소이온의 이동을 촉진시키는 방법으로 평가항목이 염소이온 침투깊이를 측정하여 이를 반경험적인 관계식으로부터 전기적 이동계수를 산정한다. 이 방법은 비정상상태의 전기이동실험에 의한 콘크리트, 모르타르 또는 시멘트계 보수재료의 염소이온 전기이동계수의 결정을 위한 것이다(KITECH, 2011).

시험을 위한 전처리는 Φ100mm×200mm의 원주형공시체 위아래를 제거한 공시체를 Φ100mm×50mm로 3등분 절단하여 3개/조로 준비하고 침투면 이외의 염분침투를 방지하기 위해 공시체 측면을 에폭시계 접착제로 표면처리를 한 후 위아래양면이 노출된 상태에서 데시케이터(desiccator)를 이용하여 3시간 진공처리(1kPa~5kPa)를 실시한 후 진공펌프를 가동한 상태에서 $Ca(OH)_2$ 수용액을 데시케이터 내에 주입하여 공시체가 완전히 잠길 때까지 채우고 추가로 1시간동안 진공을 유지한 후 대기압상태로 만들어 18±2시간정도 $Ca(OH)_2$ 수용액에 추가로 침지하는데, 이 과정은 공시체 중의 공기를 제거하고 콘크리트의 염분침투를 촉진시키기 위해 실시하는 것이다.

전기영동시험의 개요는 Fig. 6과 같고, 전처리 후 시험은 음극용액 수돗물 질량비로 10% NaCl(약 2N NaCl)수용액과 양극용액 0.3N NaOH수용액을 준비한 후, 초기가압전압 30V에 대응하는 초기전류에 의해 가압전압과 가압시간이 결정되는데, 본 연구에서는 모든 공시체가 초기전류 190mA를 넘어 가압전압 10V에 24시간으로 고정하여 염분침투시험을 실시하였다. 시험이 완료된 후 공시체의 정중앙을 할렬하여 할렬면에 0.1M $AgNO_3$ 수용액을 적당량 분사한 후 백색으로 변색된 침투영역으로부터 침투깊이를 산정하는데 침투깊이는 Fig. 7에서와 같이 양단 10mm를 제외하고 임의로 15곳 이상을 측정한 평균값을 사용한다. 염분침투저항성을 평가하기 위한 지표로 식 (4)에 의한 확산계수(D_{nssm})를 사용하였는데, 이는 NT BUILD 492의 전기영동시험방법에 의한 비정상(非正常)상태에서의 확산계수이다(Kim et al., 2013).

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t}\left(x_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273+T)L\,x_d}{U-2}}\right) \tag{4}$$

여기서, D_{nssm} : 확산계수(비정상상태, $\times 10^{-12} m^2/s$)

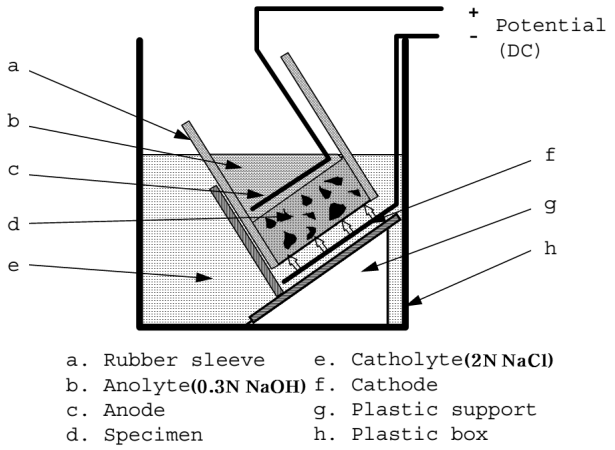


Fig. 6. Arrangement of migration set up

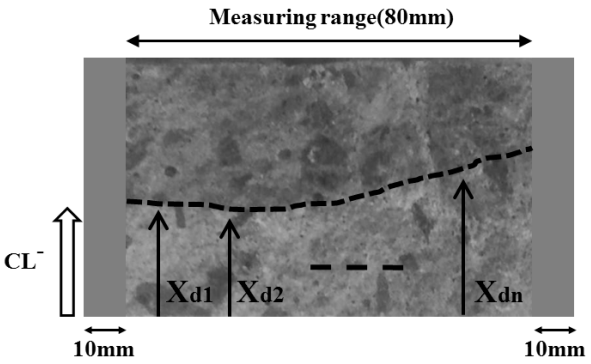


Fig. 7. Measurement for chloride penetration depths

T : 용액의 평균온도(℃),
U : 전압(V), L : 공시체두께(mm)
x_d : 염분침투깊이의 평균치(mm),
t : 시험시간(hour)

3. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 유기계 섬유의 하이브리드 혼입률에 따른 콘크리트의 역학적 특성을 검토하기 위해 유기계 섬유가 하이브리드 보강된 콘크리트 4배합 A-type: 0.40%, B-type: 0.62%, C-type: 0.63%, D-type: 0.85%과 섬유가 없는 콘크리트 1배합 Plain: 0%에 대해 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도에 대한 강도특성을 분석하였고, 휨강도시험으로 얻은 하중-변위 관계를 이용해 하이브리드 보강으로 인한 콘크리트의 인성능력을 분석하였으며, 염분침투저항성을 분석하였다.

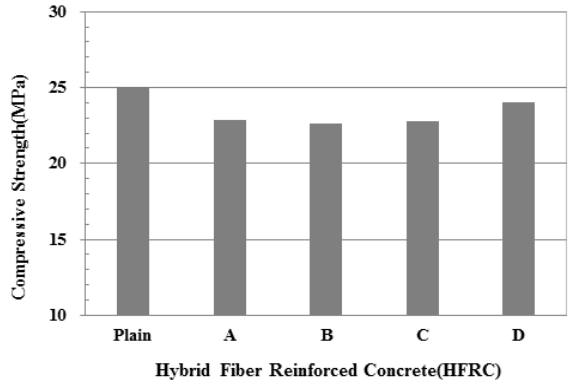
3.1 강도특성

섬유의 혼입률이 다른 하이브리드 섬유보강 콘크리트와 섬유가 없는 Plain 콘크리트의 강도시험 결과들은 Table 4와 같다. 압축강도 및 쪼갬인장강도 시험 결과는 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에서와 같다. 유기계 섬유의 하이브리드 혼입량의 변화는 콘크리트의 압축강도 증진에는 크게 영향을 미치지 못하지만, 인장강도에서는 하이브리드 섬유의 혼입률이 PVA섬유(0.30%)+PP섬유(0.55%)=0.85%, Vol.에서 Plain 콘크리트 대비 약 4% 증가하였다.

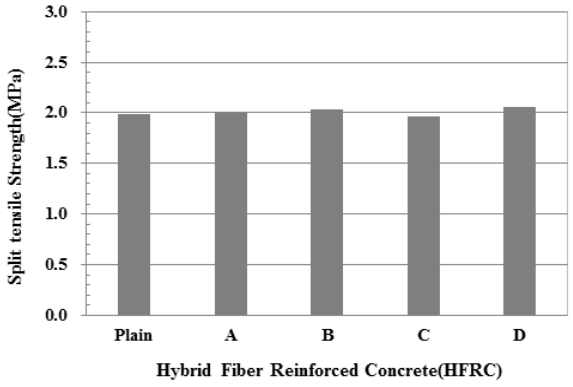
PVA섬유 및 각종 유기계섬유를 강섬유와 체적비 0.3%+0.3%=0.6%으로 고정하여 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성을 분석한 Kim et al.,(2013)의 연구결과에서도 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도는 섬유가 없는 Plain 콘크리트 보다 작은 특성을 보였으며, 인장강도 역시 전반적으로 Plain콘크리트와 동등 또는 그 이하로 분석되어 본 연구결과와 유사하다. 이와 반대로 Yang(2010)은 PVA섬유와 강섬유를 Quan and Stroeven(2000)의 연구에서는 PP섬유와 직경이 다른 강섬유를 하이브리드 보강한 콘크리트에서 섬유가 없는 Plain콘크리트 보다 압축강도는 둘 다 약 31%까지 인장강도는 각각 약 90%, 36%까지 증가한 결과를 도출하였으나, 이 연구들에서는 강성을 높이기 위해 강섬유의 혼입량을 높여 유기계섬유와 무기

Table 4. Test results of strength

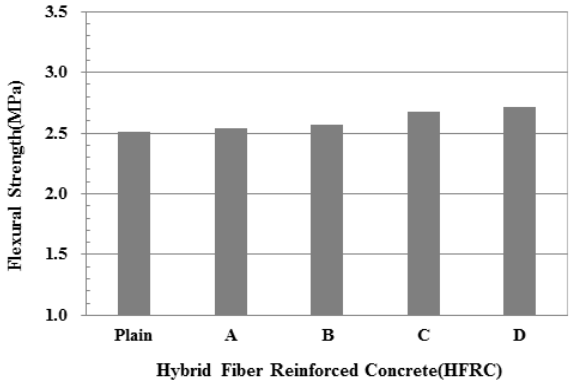
Specimen	Percent of fiber (%)		Compressive strength (MPa)	Split tensile strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Remark
	PVA	PP				
Plain	–	–	25.1	1.99	2.51	
A	0.07	0.33	22.9	2.00	2.54	
B		0.55	22.6	2.03	2.56	
C	0.30	0.33	22.8	1.96	2.67	
D		0.55	24.0	2.06	2.71	



(a) Compressive strength



(b) Split tensile strength



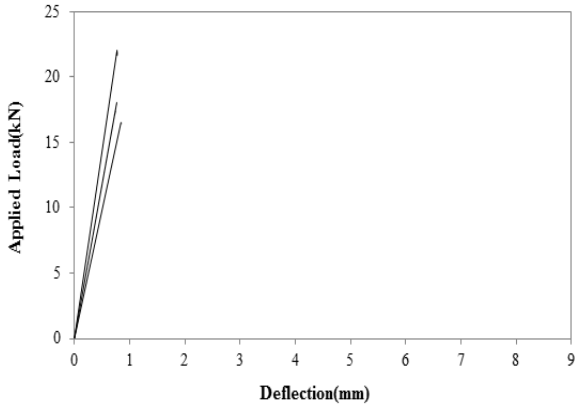
(c) Flexural strength

Fig. 8. Test results of strength

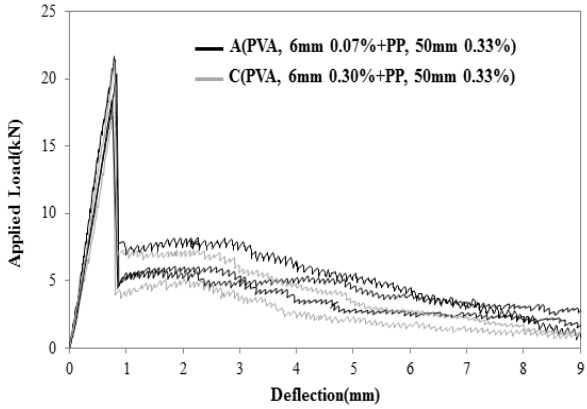
계섬유로 대표되는 강섬유의 비가 1 : 2~5 사이로 유기계 섬유인 PVA섬유와 무기계 섬유인 강섬유의 혼입비가 1 : 1인 Kim et al.,(2013)의 설계 혼입률과 달라 하이브리드 섬유비를 환산하지 않은 동일한 비교는 적절하지 않은 것으로 판단된다. 연구결과들로부터 하이브리드 보강 콘크리트에서 강섬유의 혼입률이 콘크리트의 강성에 미치는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서와 같이 특수 환경에 활용하기 위해 유기계 섬유로 하이브리드 보강한 콘크리트라는 조건과 혼입률을 전체 체적비의 1% 미만으로 제한한 배합설계의 사례는 거의 전무하여 실험결과에 대한 설득력 있는 특징을 찾기에는 무리가 있으나 수행한 연구 범위내에서 PVA섬유 보다 PP섬유의 혼입량이 인장강도에 유효한 영향을 주는 것으로 판단된다.

그리고, 휨강도시험 결과는 Fig. 8(c)에서와 같이 하이브리드 섬유의 체적비가 증가할수록 연구범위내에서 비례적으로 증가하여 약 8%까지 증가하였다. 일반적으로 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 크기가 다른 섬유를 적용하여 콘크리트의 강도 및 연성을 증가시키기 위한 것이다. 직경과 크기가 작은 마이크로섬유를 사용하여 강도를 증가시키고 크기와 직경이 큰 매크로섬유를 사용하여 최고응력 후 연성(post peak ductility)을 확보하기 위한 섬유의 조합과 재료특성이 다른 섬유를 조합하여 강도를 증가시키기 위하여 강성의 섬유를 사용하고, 연성을 증가시키기 위하여 연성의 특성을 가지는 섬유를 사용하는 것이다 (Lawer et al., 2000). 이처럼 강성과 연성을 동시에 개선하기에는 강섬유의 사용이 보다 효과적이기 때문에 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 연구에서 강섬유의 사용이 주를 이루고 있지만, 본 연구에서 활용한 PVA섬유와 PP섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트에서는 비교적 큰 강성의 개선효과는 발현되지 않았으나 유기계 섬유들의 하이브리드 효과도 콘크리트의 전단파괴를 억제하는데 어느 정도 유효하였다.

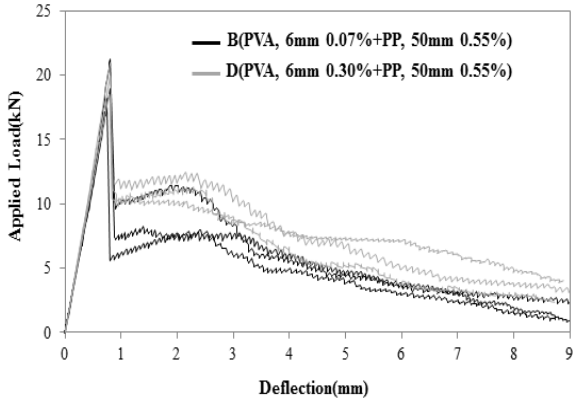
이러한 결과들로부터, 인장강도와 휨강도는 섬유의 혼입량이 증가할수록 전반적으로 증가하는 양상을 보이고 있다. 비록 증가 폭은 미미한 차이를 보이지만 유기계 섬유의 하이브리드 보강이 콘크리트의 강도 개선에 영향을 미치고 있다. 강도특성을 종합적으로 평가하기 위해서는 혼입률의 범위와 실험 배합수가 부족한 것으로 판단되어



(a) Flexural behaviors of plain concrete



(b) Flexural behaviors of PP fiber 0.33 (%, Vol)



(c) Flexural behaviors of PP fiber 0.55 (%, Vol)

Fig. 9. Relation of load-displacement

추가적인 연구가 필요하고, 본 연구의 범위에서는 PP섬유를 0.55%, Vol.로 혼입한 경우에 강도 개선에 가장 효과적이다.

3.2 휨 거동

Plain 콘크리트와 유기계 섬유로 하이브리도 보강된 콘크리트의 휨강도시험에 의한 하중-변위 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 섬유가 없는 Plain 콘크리트는 Fig. 9(a)에서처럼 하중 가력이후 휨균열 발생과 동시에 급격한 취성파괴를 보여 최대내력 이후 변위가 없다. PP섬유의 체적비가 0.33%인 A, C-type의 경우 Fig. 9(b)에서와 같이 휨 균열발생 이후 급격한 내력저하가 발생하여 최대내력의 약 30%까지 저하된 상태에서 일정변위까지 내력을 유지하다가 떨어져 변위가 증가되는 양상을 보여주고 있다. 이때 최대내력 이후의 거동에서는 PVA섬유의 체적비에 대한 영향이 거의 없는 것으로 판단된다. 한편 PP섬유의 체적비가 0.55%인 B-type, D-type의 경우 Fig. 9(c)에서와 같이 휨 균열발생 이후 최대내력의 40~60%까지 하중을 유지하거나 소폭 증가되는 양상을 보이다가 일정변위 이후에 급격히 내력이 저하되어 PP섬유의 체적비가 0.33%인 A-type, C-type의 거동과 유사한 진행을 보였다.

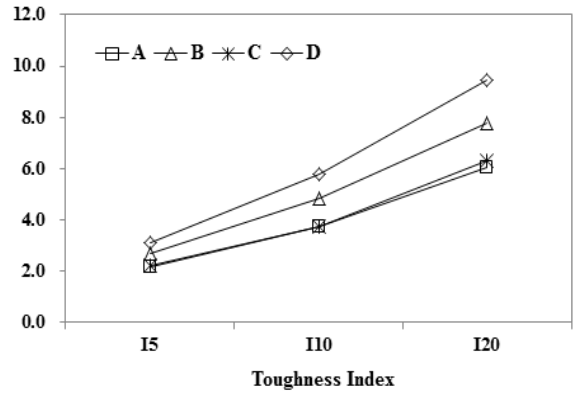
PP섬유의 체적비가 0.33%인 경우보다 0.55%에서 보다 큰 휨 거동을 보여주고 있으며, 최대내력 이후 일부구간에서 보이는 내력은 PP섬유의 내력으로 보여 지며, 일부 내력 증진은 휨 균열발생 이후 보이는 경화현상으로 PVA섬유와 PP섬유의 하이브리드 효과로 판단된다.

3.3 연성 평가

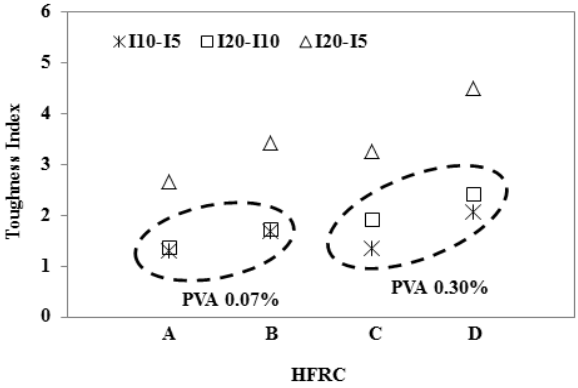
섬유가 없는 Plain 콘크리트와 유기계 섬유로 하이브리드 보강한 콘크리트의 휨 연성을 분석한 결과는 Table 5와 같고, Lee et al.,(2015)의 연구를 보완하였다. ASTM C1018 (2006)의 휨 인성지수(I_5, I_{10}, I_{20})를 이용하여 유기계 섬유로 하이브리드 보강한 콘크리트의 휨 연성을 확인한 결과 Fig. 10(a)와 같이 섬유의 체적비가 증가할수록 즉, 섬

Table 5. The results of Toughness index & Equivalent flexural strength

Specimen	Percent of fiber (%)		Toughness Index			Equivalent flexural strength		Remark
	PVA	PP	I5	I10	I20	Strength (MPa)	Indexation	
Plain	–	–	1.00	1.00	1.00	0.33	1.00	
A	0.07	0.33	2.22	3.51	4.88	0.90	2.73	
B		0.55	2.72	4.40	6.14	1.15	3.48	
C	0.30	0.33	2.23	3.58	5.49	0.96	2.91	
D		0.55	3.14	5.21	7.64	1.42	4.30	



(a) Toughness index according to fiber volume fraction



(b) Comparisons between toughness index

Fig. 10. Flexural toughness index

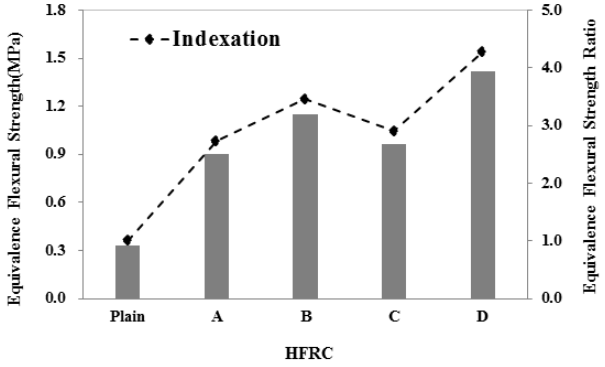


Fig. 11. Equivalent flexural strength and Indexation

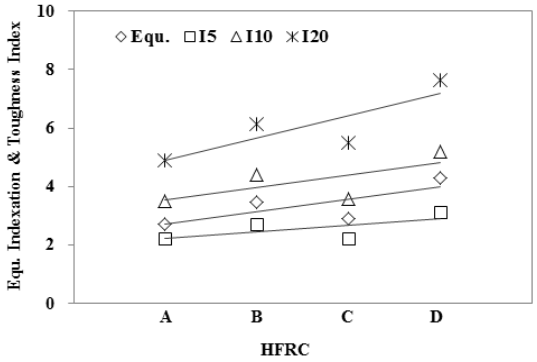
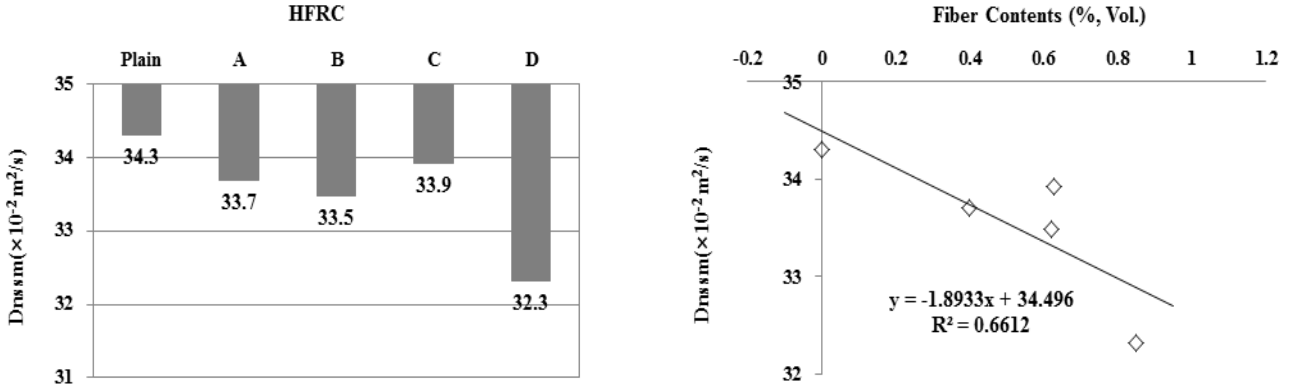


Fig. 12. Comparison of ductility index

유보강지수가 커질수록 휨 인성지수가 증가하였고 PP섬유 체적비 0.55%인 B-type, D-type은 변위가 커질수록 I_{20} 인성지수에서와 같이 연성이 증가하였다. 또한 Fig. 10(b)에서는 휨 인성지수사이의 차이를 확인한 결과 PP섬유가 각각 0.33%, 0.55%, Vol.이고 PVA섬유가 0.07%, Vol. 혼입된 A-type, B-type은 $I_{20}-I_{10}$, $I_{10}-I_5$의 차이가 거의 동일한 수준으로 분석되어 마이크로섬유의 함량이 0.1%이하인 경우 휨 인성지수의 단계별 증가분을 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 PVA섬유가 0.33%, Vol. 혼입된 C-type, D-type의 경우는 $I_5 \sim I_{10}$보다 $I_{10} \sim I_{20}$사이의 인성지수가 큰 것으로 분석되는데 이는 마이크로섬유의 혼입률이 5.5δ이후의 연성거동에 어느 정도 영향을 주는 것으로 사료된다.

그리고, KS F 2566(2014)에서 제시하고 있는 등가휨강도를 Fig. 11에서와 같이 섬유혼입 타입별로 비교하였고, 휨 인성지수와 비교하기 위해 Plain콘크리트의 등가휨강도를 전단파괴가 일어난 최대내력까지의 면적(A_b)으로 계산하여 Plain콘크리트의 등가휨강도로 다시 나누어서 무차원 지수화 시켜 Fig. 12와 같이 휨 인성지수와 비교하였다. 등가휨강도는 주어진 처짐(지간 l의 1/150)에서의 평균 휨강도로 정의되어 있어 Plain 콘크리트와 같이 최대내력이후 취성거동을 보이는 경우 상대비교가 어려웠으나



(a) Chloride penetration resistance (b) Relation between Fiber contents and Diffusivity coefficient

Fig. 13. Results of chloride penetration test

본 연구에서 무차원 지수화를 통해 연성에 대한 비교가 가능하도록 하였다.

분석결과 연성을 평가하기 위한 지수들의 증가기울기는 I_{20}이 가장 크고 I_5가 가장 작으며, I_{10}과 등가휨강도지수가 중간으로 유사한 증가기울기를 보인다. 인성지수 I_{20}의 기울기는 섬유 체적비가 증가할수록 더욱 커질 것으로 예상되며 섬유 체적비에 의한 인성지수의 기울기를 정의하기 위해서는 섬유 체적비를 확장한 보다 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3.4 염분침투저항성

유기계 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트의 NT BUILD 492(1999) 전기영동시험방법에 의한 염분침투시험 결과는 Fig. 13(a)와 같다. 섬유가 하이브리드 혼입된 경우 섬유가 없는 Plain콘크리트 대비 섬유의 혼입률 즉, 체적비가 커질수록 염분침투 지표인 확산계수(D_{nssm})가 전반적으로 낮아져 콘크리트에 유기계 섬유의 하이브리드 보강이 염분침투를 억제하는 효과가 있는 것으로 보인다. 이는 우선적으로 Plain 콘크리트와 동일한 배합에서 친수성 섬유인 PVA가 추가적으로 더 혼입되어 콘크리트의 수밀성을 높이고, 표면에 기하구조를 갖는 PP섬유가 시멘트 메트릭스와의 부착성능을 향상시킨 결과로 보여 진다. 결과를 정리해 보면 Plain콘크리트의 확산계수는 $34.3\times10^{-2}m^2/s$이고 PVA섬유와 PP섬유의 체적비가 0.40%, 0.62%, 0.63%, Vol.인 A-type, B-type, C-type은 약 2%내외로 확산계수가 감소하여 감소폭이 미미한 수준이나 체적비가 PVA섬유(0.30%)+PP섬유(0.55%)=0.85%, Vol.인 D-type은 약 6%수준으로 감소하여 유효한 효과가 있다. 그리고 Fig. 13(b)에서는 비록 실험 개체수가 부족하여 섬유 체적비와 확산계수의 관계를 설명하기에는 부족하지만 연구범위 내에서 둘의 관계를 선형적으로 추정해본 일차방적식의 $R^2=0.66\%$이다.

본 연구에서는 기존 연구(Kim et al., 2013)의 유기계+무기계 섬유를 하이브리드 보강한 결과에서 보여주는 만큼의 확산계수 저감 효과는 부족하지만, 유기계+유기계 섬유의 하이브리드 보강도 콘크리트의 염분침투를 억제하는 효과가 있었다. 추가적으로 다양한 유기계 섬유의 하이브리드와 섬유 체적비 변화에 대한 연구를 진행하여 유기계 섬유로 하이브리드 보강된 콘트리트의 체적비 변화에 따른 확산계수와의 관계를 보다 명확히 정리할 필요가 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해양시설물에 활용하기 위한 유기계섬유인 PVA섬유와 PP섬유를 체적비 1%미만으로 혼입하여 하이브리드 보강한 콘크리트의 역학적 휨 거동 및 염분침투저항성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유기계 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트의 압축강도는 섬유가 없는 Plain 콘크리트 보다 낮게 나타나 유기계 섬유의 하이브리드 보강으로 인한 영향이 압축강도 증진에는 효과적이지 않았다. 그리고 쪼갬인장강도는 섬유의 하이브리드 보강으로 인해 PVA섬유와 PP섬유의 혼입률 0.30%+0.55%=0.85%, Vol.에서 약

4% 증가하였다.

(2) 유기계 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트의 휨강도는 섬유의 체적비가 증가할수록 선형적으로 증가하여 하이브리드 체적비 0.85%에서 Plain 콘크리트 약 8%까지 증가하였다.

(3) 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨 거동은 매크로섬유인 PP섬유의 체적비가 0.33%인 경우보다 0.55%에서 보다 큰 휨 거동을 보여주며, 최대내력이후 일부구간에서 보이는 내력은 PP섬유의 내력으로 보여 지며, 연성거동의 일부구간에서 보이는 내력 증진은 휨 균열발생 이후 보이는 경화현상으로 PVA섬유와 PP섬유의 하이브리드 효과로 판단된다.

(4) 연성능력을 분석한 결과, 섬유의 체적비가 증가할수록 연성지수도 증가하고 변위가 커질수록 PVA섬유의 영향보다는 PP섬유의 혼입률 증가에 의해 인성지수가 커진다. 등가휨강도를 무차원 지수화하여 비교한 휨 인성지수 증가기울기는 I_{10}과 유사하다.

(5) 염분침투시험에 의해 유기계 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트의 염분침투 억제 효과가 확인되었다. 친수성 섬유인 PVA가 콘크리트의 수밀성을 높이고 표면에 기하구조를 갖는 PP섬유가 시멘트 메트릭스와의 부착성을 높인 것으로 보여 지며, 하이브리드 섬유의 체적비 증가에 따른 확산계수의 감소폭은 크지 않지만 체적비가 가장 큰 PVA섬유와 PP섬유의 혼입률 0.30%+0.55%=0.85%, Vol.에서 약 6%정도 감소하였다.

Acknowledgement

This research was a part of the project titled '2015 Jeju Sea Grant', funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korean.

References

1. Arisoy, B. and Wu, H. C. (2008), "Material Characteristics of High Performance Lightweight Concrete Reinforced with PVA", *Construction and Building Materials*, Vol.22, No.4, pp.635-645.
2. ASTM C 1018 (2006), *Standard Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (using beam with third-point loading)*, American Society for Testing and Materials.
3. Betterman, L. R., Ouyang, C. and Shah, S. P. (1995), "Fiber matrix interaction in microfiber-reinforced mortar", *Advanced Cement based Materials*, Vol.2, No.2, pp.53-61.
4. Kim, B. S., Kim, D. H., Lee, Y. D. and Lim, N. G. (2013), "The Mechanical and Chloride Penetration Properties of Concrete Mixed with Various Fiber PVA", *Journal of the Architectural Institute of Korea : Structure & construction*, Vol.29, No.11, pp.45-52.
5. Korea Institute of Industrial Technology (2011), *Study On The Hydraulic Sulfur Modified Cement Concrete*, Seoul in Korea, pp.60-62.
6. KS F 2566 (2014), *Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete*, Korean Agency for Technology and Standards.
7. Lawer, J. S., Zampini D. and Shah S. P. (2000), "Permeability of cracked hybrid fiber-reinforcedunder load", *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.4, pp.379-385.
8. Lawler, J. S. (2001), *Hybrid Fiber Reinforcement in Mortar and Concrete*, Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, Northwestern University, USA.
9. Lee, D. W. and Kim, S. H. (2014), "A Study of Fiber Reinforced Concrete with Fiber Volume Fraction and Fiber Length", *Proc. of KSCE*, Daegu, pp.1533-1534.
10. Lee, D. W., Kang, M. B. and Kim, S. H. (2015), "Ductility Behavior of Hybrid Concrete Reinforced with Organic Fibers", *Proc. of KSCE,* Gunsan, pp.69-70.
11. NT BUILD 492 (1999), *Chloride Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiment*, Nordtest, Finland.
12. Yang, K. H. (2010), "Slump and Mechanical Properties of Hybrid Steel-PVA Fiber Reinforced Concrete", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol.22, No.5, pp.651-658.
13. Quan, C. X. and Stroeven, P. (2000), "Fracture Properties Concrete Reinforced with Steel-Polypropylene Hybrid Fibres," *Cement Concrete Composites*, Vol.22, No.4, pp.343-353.