하이브리드섬유보강 프리캐스트 콘크리트의 보강섬유 종류에 따른 역학적 특성 및 충격저항성

Mechanical Properties and Impact Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Type of Reinforcing Fibers for Precast Concrete

오리온* · 박찬기**,[†]

Oh, Ri-On · Park, Chan Gi

ABSTRACT

The objective of the current study is to evaluate the effects depending on the types of reinforcing fibers being influential in view of mechanical properties and impact resistance of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) for applications to precast concrete structure. Hybrid fibers applied therefor were three types such as PP/MSF (polypropylene fiber+macro synthetic fiber), PVA/MAF (polyvinyl alcohol fiber+MSF) and JUTE/MSF (natural jute fiber+MSF), where the volume fraction of PP, PVA and natural jute was applied with 0.2 %, respectively, while based on 0.05 % volume fraction of MSF. The HFRC was tested for slump, compressive strength, flexural strength and impact resistance. The test result demonstrated that mixture of such hybrid fibers improve compressive strength, flexural strength and impact resistance of concrete. Moreover, it was found that HFRCs to which hydrophilic fibers, i.e. PVA/MSF and JUTE/MSF, were mixed show more improved features than HFRC to which non-hydrophilic fiber, i.e. PP/MSF was mixed. Meanwhile, the finding that PVA/MSF HFRC exhibited better performance than JUTE/MSF HFRC was attributed from the former having higher aspect ratio than that of the latter.

Keywords: Abrasion; Durability; Hybrid fiber reinforced concrete (HFRC); Impact resistance; Mechanical properties

1. 서 론

물리·역학적 특성이 다른 2종 이상의 섬유를 혼합한 하이브리드섬유보강 콘크리트 (Hybrid Fiber Reinforced Concrete: HFRC)는 단일섬유보강 시 얻을 수 없는 효과를 발휘할 수 있다 (Lee et al., 2011; Sivakumar et al., 2007). 일반적으로 콘크리트에서 균열이 확장되어가는 과정은 처음에는 마이크로균열이 발생하고 점차적으로 그 수가 증가된다. 이 과정에서 응력은 지속적으로 증가한다. 뒤이어 복합적인 크기의 균열들이 발생하며, 마이크로 균열이 이러한 균열들을 따라 크게 확산되어간다 (Lee et al., 2012; Jung et al., 2013a, 2013b). 하이브리드섬유보강 콘크리트에서는 이와 같은 균열의 발생 및 성장과정을 물리

·역학적 특성이 다른 2종 이상의 섬유가 그 특성에 맞게 조절함으로써 콘크리트의 성능을 향상시킨다 (Mustafa et al., 2005; Park et al., 2012). 이와 같은 특성을 가지는 하이브리드섬유보강 콘크리트의 연구는 다양한 방법으로 진행되어 왔다 (Mustafa et al., 2005; Madhkhan et al., 2012; Song et al., 2005; Machine et al., 2008).

현재 이와 같은 특성을 가지고 있는 하이브리드콘크리트는 다양한 분야에 적용에 대한 검토가 이루어지고 있으며 그중 압거, 수로, 포장 등 프리캐스트 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 연구도 진행되고 있다 (Bull et al., 1997; Korkmaz, et al., 2005). 프리캐스트 콘크리트 구조물을 이용하는 방법은 품질관리가 쉽고 구조물의 안정성 확보 측면에서 효과적인 방법이다. 지금까지 프리캐스트 콘크리트에 대한 많은 연구의 대부분은 프리캐스트 콘크리트 포장 구조물의 설계, 설치 방법, 그리고 구조물에 재하 되는 응력에 대한 해석 및 설치공법에 대한 것이 주를 이루어 왔다 (Ackroyd et al., 1985; Madhkhan et al., 2012; Catallo, 2004). 이에 비하여 프리캐스트 콘크리트 구조물은 운반 및 설치 시 발생할 수 있는 충격에 의한 결함과 균열, 내구성에 대한 재료적 연구는 상대적으로 빈약한 실정이

* 공주대학교 일반대학원 농공학과

** 공주대학교 지역건설공학과

[†] Corresponding author Tel.: +82-41-330-1266

Fax: +82-41-330-1269

E-mail: cgpark@kongju.ac.kr

2013년 2월 20일 투고

2013년 5월 22일 심사완료

2013년 6월 4일 게재확정

다. 특히 최근에는 농업용 수로관, 암거 등은 장비를 이용하여 운반차량에서 하차하고 운반 및 이동하여 설치하게 되는데 이때 부주의로 충격에 의한 파괴 등이 발생할 가능성이 높다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 구조물의 운반, 설치시 부주의로 인한 파괴와 내구성을 향상시키기 위하여 재료적 접근방법으로 내구성이 우수한 콘크리트 배합을 결정하고자 하였다. 충격 및 내구성을 향상시키기 위한 방법으로는 섬유보강재를 적용하였다. 섬유보강재의 효과를 향상시키기 위하여 하이브리드섬유를 적용하였으며 섬유보강재를 제외하고는 배합에서 모든 조건을 동일하게 적용하여 다른 재료가 콘크리트에 미치는 영향을 제외하였다. 본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트에 적용하기 위하여 3가지 종류의 하이브리드섬유가 콘크리트의 역학적 특성 및 충격저항성에 미치는 효과를 평가하였다.

II. 사용재료 및 시험방법

1. 재료

시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 굵은골재는 최대크기 25 mm의 부순돌을 사용하였으며, 잔골재는 밀도 2.62 g/cm³을 적용하였다. 보강섬유로는 길이 30 mm, 직경 1 mm의

Table 1 Properties of fiber

Properties	PVA fiber	Jute fiber	PP fiber	Macro synthetic fiber
Elastic modulus (GPa)	45	61	4	10
Density (g/mm ³)	1.26	1.26	0.91	0.91
Fiber length (mm)	6	3	6	30
Fiber diameter (mm)	0.015	0.015	0.1	1
Aspect ratio	400	200	60	30
Tensile strength (MPa)	1600	510	600	550

(a) PP fiber

(b) PVA fiber

(c) Jute fiber

(d) Macro synthetic fiber

Fig. 1 Shape of reinforcing fibers

Table 2. Mix proportion of HFRC

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)								
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Admixture*	PP fiber	PVA fiber	Jute fiber	Macro synthetic fiber
35	38.28	171	488	620	1015	3.22	0	0	0	0
35	38.28	171	488	620	1015	3.22	0	2.52	0	4.5
35	38.28	171	488	620	1015	3.22	0	0	2.52	4.5
35	38.28	171	488	620	1015	3.22	1.8	0	0	4.5

* Polycarbonate type superplasticizer

절곡형 매크로 합성섬유, 길이 6 mm, 직경 0.1 mm의 PP섬유, 길이 6 mm, 직경 0.015 mm의 PVA 섬유, 길이 3 mm, 직경 0.015 mm의 천연마섬유를 적용하였다. 섬유의 형상비 (fiber length/fiber diameter)는 섬유보강 콘크리트의 성능에 주요 영향을 미친다. 섬유의 형상비가 증가하면 인장성능이 크게 향상된다. 그러나 형상비가 너무 크면 섬유 뭉침 현상이 발생할 수 있어 인장성능이 감소할 수 있다. 따라서 보강섬유의 형상비는 한계형상비를 적용하여야 한다. 본 연구에서는 형상비가 각각 30, 60 및 400인 절곡형 매크로 합성섬유, PVA섬유 및 PP섬유를 사용하였다. 보강섬유의 형상과 특성은 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

2. 배합설계

프리캐스트 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 HFRC의 하이브리드섬유 종류에 따른 역학적 특성 및 충격저항성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 절곡형 매크로 합성섬유 (0.5 %, Vol.) + PVA섬유 (0.2 %, Vol.)와 절곡형 매크로 합성섬유 (0.5 %, Vol.) + PP 섬유 (0.2 %, Vol.) 및 절곡형 매크로 합성섬유 (0.5 %, Vol.) + 천연마섬유 (0.2 %, Vol.)를 적용하였다. 섬유보강재 이외의 다른 재료가 HFRC에 미치는 영향을 배제하기 위하여 본 연구에서는 섬유보강재를 제외한 다른 배합조건은 동일하게 적용하였다. 하이브리드섬유 종류에 따른 HFRC 배합비는 Table 2와 같다.

3. 실험방법

가. 슬럼프

프리캐스트 콘크리트에 적용하기 위한 HFRC의 작업성을 평가하기 위하여 KS F 2402에 따른 슬럼프 실험을 실시하였다.

나. 압축강도

프리캐스트 콘크리트에 적용하기 위한 HFRC의 압축강도 특성을 알아보기 위하여 KS F 2405에 준하여 시험을 실시하였다. $\varnothing 100 \times 200$ mm의 실린더 공시체를 6개 제작하여 재령 28일

에 압축강도를 측정하였다. 공시체는 20 ± 2 °C, 상대습도 50 %에서 1일 초기양생 후 20 ± 2 °C의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

다. 휨강도

프리캐스트 콘크리트에 적용하기 위한 HFRC의 휨강도 특성을 알아보기 위하여 KS F 2408에 준하여 시험을 실시하였다. $10 \times 10 \times 40$ mm의 각주형 공시체를 6개 제작하여 재령 28일에 휨강도를 측정하였다. 공시체는 20 ± 2 °C, 상대습도 50 %에서 1일 초기양생 후 20 ± 2 °C의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

라. 충격시험

충격저항성 실험은 ACI Committee 544의 실험방법에 의해 6개의 $\Phi 150 \times 50$ mm의 공시체에 중량 4.54 kg의 강체를 45 cm 높이에서 자유 낙하시켜 충격저항성 실험을 실시하였으며 실험은 재령 28일에 초기균열 및 완전파괴 되었을 때의 타격횟수를 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 슬럼프

보강섬유의 종류에 따른 HFRC의 슬럼프 시험결과는 Fig. 2와 같다. 시험결과 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트의 경우 슬럼프 값이 130 mm의 값을 나타내었다. 그러나 하이브리드섬유를 혼입하면 슬럼프 값은 크게 감소하였다. 섬유보강재를 적용하면 슬럼프 값이 감소하는 것으로 알려져 있다 (Noh and Sung, 2004). 하이브리드 PP/MSF (65 mm)를 적용한 HFRC의 슬럼프 값이 하이브리드 PVA/MSF (45 mm) 및 JUTE/MSF (40 mm)의 슬럼프 값보다 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 친수성 섬유인 PVA 및 천연마섬유는 배합수를 흡수하는 특성을 가지고 있다. 따라서 배합수를 흡수함으로써 비친수성 재료인 PP섬유 보다 슬럼프가 작은 값을 나타냈다. 또한 PVA/MSF 보다 JUTE/MSF의 슬럼프 값이 작게 나타났는데 이와 같은 결과는 PVA섬유는 표면에 수분을 약 15 % 정도 함유하고 있어 표면에 수분이 전혀 없는 천

Fig. 2 Slump test results of HFRC with hybrid fiber types

연마섬유보다 흡수하는 배합수가 적기 때문에 슬럼프 값이 약간 크게 나타났다. 그러나 하이브리드섬유를 적용한 콘크리트 모두 슬럼프 값이 섬유를 적용하지 않은 배합보다 크게 감소하여 프리캐스트 콘크리트 구조물을 제작하기 위해서는 작업성을 확보하기 위해서 유동화제, 광물질 혼화제 및 초기 유동성 확보와 수밀성이 우수한 라텍스와 같은 혼화제를 적용할 필요가 있다. 기존 연구결과를 살펴보면 하이브리드섬유를 적용할 경우 슬럼프의 감소가 크기 때문에 이를 해결하기 위하여 유동화제를 적용하거나 작업성을 향상시키는 방법과 라텍스를 적용하여 작업성 및 하이브리드보강섬유와 콘크리트의 부착성능 및 내구성능 등을 향상시키는 방법이 적용되었다 (Jung et al., 2013a, b; Yang, 2010).

2. 압축강도

보강섬유의 종류에 따른 HFRC의 압축강도 시험결과는 Fig. 3과 같다. 압축강도시험결과 섬유를 혼입한 배합의 압축강도가 섬유를 혼입하지 않은 배합과 비교하여 약간 크거나 작은 결과를 나타냈다. 그러나 매크로 합성섬유를 적용하면 압축강도가 증가한다는 결과가 있는데, 압축강도는 보강섬유의 분산성과 콘크리트의 부착특성에 영향을 받는다 (Kim et al., 2012). 친수성섬유인 천연마섬유와 PVA섬유를 혼입한 JUTE/MSF (40.8 MPa) 및 PVA/MSF (41.9 MPa)는 친수성섬유로서 콘크리트 내에서 섬유와 콘크리트의 접촉계면에서 공극의 발생을 억제하기 때문에 강도가 거의 유사하거나 약간 증가가 발생하였다. 그러나 비친수성섬유인 PP섬유를 혼입한 PP/MSF (39.4 MPa)는 섬유와 콘크리트의 접촉계면에서 공극이 발생하여 섬유를 혼입하지 않은 기준콘크리트와 비교하여 압축강도가 거의 유사하지만 약간 감소하는 결과를 나타냈다. 또한 콘크리트의 압축강도는 섬유의 분산성에 영향을 받을 수 있다. 섬유의 분산성이 나쁘면 콘크리

Fig. 3 Compressive strength test results of HFRC with hybrid fiber types

트 내에서 공극을 유도하여 공극의 증가로 인한 강도의 감소가 발생할 수 있다 (Lee and Park, 2011; Yang, 2010). 본 연구에서는 하이브리드섬유의 종류에 따른 영향을 평가하기 위하여 배합의 모든 조건은 동일하게 하였다. 따라서 하이브리드섬유가 혼입되어 유동성이 악화되면서 분산성 또한 나빠졌다. 또한 분산성에서는 친수성 섬유를 적용하는 경우 증가할 수 있다 (Lee and Park, 2011). 본 연구에서도 매크로 섬유에 특히 친수성섬유를 혼입하면 상대적으로 콘크리트내에서 분산성이 우수하다. 따라서 친수성섬유인 PVA 및 천연마섬유를 적용한 HFRC가 비친수성섬유인 PP섬유를 적용한 HFRC보다 압축강도가 약간 크게 나타났다. 친수성섬유를 적용한 PVA/MSF와 JUTE/MSF의 압축강도를 비교해 보면 압축강도가 PVA/MSF가 약간 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 유동성이 PVA/MSF가 JUTE/MSF보다 약간 우수하여 섬유의 분산성이 향상되었고 섬유보강 콘크리트 내에서 섬유의 성능에 중요한 영향을 미치는 형상비 (aspect ratio)가 PVA섬유는 4,000이고, 천연마섬유는 2,000으로 PVA섬유가 크기 때문에 나타난 결과이다.

3. 휨강도

보강섬유 종류에 따른 HFRC의 휨강도 시험결과는 Fig. 4와 같다. 실험결과 하이브리드섬유를 혼입한 콘크리트가 혼입하지 않은 콘크리트 (5.2 MPa)와 비교하여 휨강도는 유사하거나 약간 증가한 결과를 보여주고 있다. 또한 비친수성 섬유인 PP섬유를 혼입한 PP/MSF (5.4 MPa)보다 친수성섬유인 천연마섬유 및 PVA섬유를 JUTE/MSF (5.5 MPa) 및 PVA/MSF (5.6 MPa)를 적용한 경우보다 거의 유사하지만 휨강도가 약간 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 친수성섬유는 콘크리트 매트릭스와 부착성능이 비친수성 섬유보다 우수하기 때문이다. 또한 PVA/MSF를 적

Fig. 4 Flexural strength test results of HFRC with hybrid fiber types

용한 경우가 JUTE/MSF를 적용한 경우보다 휨강도가 약간 증가하였는데 이와 같은 결과는 형상비와 유동성이 PVA/MSF가 상대적으로 우수하기 때문이다. 일반적으로 보강섬유의 첨가는 콘크리트의 휨성능 특히 휨인성을 증가시킨다고 알려져 있다. 또한 매크로섬유를 적용한 경우 휨강도의 증가도 기대된다 (Park and Won, 2008). 그러나 본 연구에서는 매크로섬유의 첨가율이 크지 않고 0.5 %이고 콘크리트 배합시 유동성이 크게 감소하여 분산성을 악화시켜 휨강도의 증가가 거의 나타나지 않았다.

4. 충격저항성

보강섬유의 종류에 따른 HFRC의 충격저항성 시험결과는 Fig. 5와 같다. 초기균열 발생 타격 회수 및 파괴 타격 회수는 하이브리드섬유를 혼입한 배합이 증가하는 결과를 보였다. 일반적으로 보강섬유는 콘크리트의 강도 증가보다는 인성 즉 파괴인성을

증가시켜 에너지 흡수능력을 증가시키는데 보다 효과가 있다 (Song et al., 2005). 따라서 하이브리드섬유는 충격하중을 받을 때 충격에너지를 흡수하여 균열의 발생 및 성장을 억제하고 파괴인성을 증가시키는데 효과가 있다 (Park and Won, 2008; Lee and Park, 2010). 초기 균열 발생 타격 회수 및 최종 파괴 타격회수는 하이브리드섬유의 물리, 역학적 성능에 영향을 받으며, 동일한 종류의 섬유에서는 섬유의 분산성이 HFRC의 충격저항성에 영향을 미친다. 분석결과 친수성섬유인 PVA/MSF가 초기균열 및 파괴균열 타격회수가 각각 22회 및 63회로 가장 우수한 결과를 나타냈으며, 그 다음으로 JUTE/MSF가 초기균열 및 파괴균열 타격회수가 각각 15회 및 57회를 보여주었다. 비친수성섬유인 PP섬유를 혼합한 PP/MSF를 적용한 경우는 초기균열 및 파괴균열 타격회수가 각각 9회 및 25회를 나타냈다. 또한 형상비가 우수한 PVA/MSF를 적용한 배합이 JUTE/MSF를 적용한 배합보다 우수하였다. 따라서 친수성섬유를 사용한 배합을 적용하는 경우 프리캐스트 콘크리트 구조물의 운반 및 설치시 발생할 수 있는 충격균열의 발생 및 성장을 억제하는데 보다 효과적이다. 또한 친수성섬유를 적용한 경우에도 형상비가 큰 섬유를 적용하는 것이 보다 효과적이라는 것을 알 수 있다.

4. 강도와 충격저항성의 관계

하이브리드섬유의 종류에 따른 HFRC의 충격저항성과 강도와 관계는 Fig. 6과 같다. 압축강도 및 휨강도는 크게 하이브리드섬유의 종류에 따른 영향은 크지 않았지만 충격저항성에 명확한 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 결과로 볼 때 모든 배합조건이 동일할 때 하이브리드보강섬유는 콘크리트의 강도에 큰 영향을 미치지 않을 수 있지만 파괴인성 즉 에너지 흡수능력은 향상시켜 콘크리트의 충격저항성은 크게 향상시킨다는 것을 알 수

(a) No. of initial crack

(b) No. of fracture

Fig. 5 Impact test results of HFRC with hybrid fiber types

Fig. 6 Relationship between strength and number of impact

있다. 또한 큰 차이는 아니지만 압축강도의 휨강도의 강도 경향과 충격저항성 결과의 경향도 유사하다는 것을 알 수 있다. 따라서 프리캐스트 콘크리트 구조물의 운반, 하차 및 설치시 발생할 수 있는 충격으로 인한 파괴 억제에는 효과적일 수 있다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 프리캐스트 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 HFRC의 성능에 미치는 하이브리드섬유 종류의 영향을 평가하였다. 섬유종류에 따른 영향을 평가하기 위하여 보강섬유종류이외의 모든 배합조건은 동일하게 적용하였다. HFRC에서 하이브리드섬유는 PVA/MSF, JUTE/MSF 및 PP/MSF 3가지 종류를 적용하였다. 시험은 슬럼프, 압축강도, 휨강도 및 충격시험을 실시하였으며, 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 슬럼프 시험결과 친수성인 PVA/MSF 및 JUTE/MSF가 비친수성인 PP/MSF를 적용한 콘크리트보다 배합수를 흡착하기 때문에 감소하였다. 또한 PVA/MSF 보다는 JUTE/MSF의 슬럼프 값이 수분 흡착량이 크기 때문에 슬럼프 값이 작게 나타났다.
2. 하이브리드섬유보강 콘크리트의 압축강도 및 휨강도는 친수성섬유 (PVA/MSF 및 JUTE/MSF)를 혼입한 경우에는 약간 증가하지만 비친수성 섬유(PP/MSF)를 적용한 경우에는 약간 감소하는 결과를 나타냈다.
3. 하이브리드섬유의 혼입은 콘크리트의 충격저항성을 향상시켰다. 또한 친수성섬유인 PVA섬유 및 천연마섬유를 혼입한 PVA/

MSF, JUTE/MSF HFRC가 비친수성인 PP섬유를 혼입한 PP/MSF 보다 부착강도가 우수하기 때문에 충격저항성이 모두 우수하게 나타났다. 또한 형상비가 큰 PVA/MSF를 적용한 경우 우수한 충격저항성을 보여주었다.

4. 하이브리드섬유 종류에 따른 강도 및 충격저항성의 관계는 하이브리드섬유 종류를 제외한 다른 조건이 동일할 때 강도발현 경향과 유사하며, 강도 보다는 파괴인성과 관계가 있는 충격저항성 향상에 보다 효과적으로 나타났다.

본 연구는 국토교통부 건설기술혁신 사업인 비접촉 전력전 달방식 친환경 대중교통 시스템 개발: 무선 충전 급전도로 시공 및 유지관리 최적화 기술 (과제번호: 11PTSI-B061420-01)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

REFERENCES

1. Ackroyd, R. F. and J. W. Bull. 1985. The design of precast concrete pavements on low bearing capacity subgrades. *Computers and Geotechnics* 1(4): 279-291.
2. Bull, J. W. and C. H. Woodford. 1997. Design of precast concrete pavement units for rapid maintenance of runways. *Computers & Structures* 64(1-4): 857-864.
3. Catallo, L. 2004. Genetic anti-optimization for reliability structural assessment of precast concrete structures.

- Computers and Structures* 82(13-14): 1053-1065.
4. Jung, J. Y., C. G. Park, and J. S. Park. 2013a. Bond properties of structural polypropylene fiber in hybrid nonstructural polypropylene and structural polypropylene fiber-reinforced latex-modified cement-based composites. *Journal of Applied Polymer Science* 127(2): 1221-1227 (in Korean).
 5. Jung, J. Y., J. H. Lee, and C. G. Park. 2013b. Effect of styrene-butadiene latex on the bond performance of macro synthetic fiber in micro jute/macro synthetic hybrid fiber-reinforced latex-modified cement-based composites. *Journal of Applied Polymer Science* 127(5): 3522-3529 (in Korean).
 6. Kim, D. H., J. W. Lee, and C. G. Park. 2012. Effect of mineral admixture on bond between structural synthetic fiber and latex modified cement mortar under sulfate environments. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 25-34 (in Korean).
 7. Korkmaz, H. H., and T. Tankut. 2005. Performance of a precast concrete beam-to-beam connection subject to reversed cyclic loading. *Engineering Structures* 27(9): 1392-1407.
 8. Lee, J. W., and C. G. Park. 2012. Bond properties of structural polyvinyl Alcohol fiber in cement based composites with metakaolin and silica fume contents. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 9-16 (in Korean).
 9. Lee, J. H., and C. G. Park. 2011. Effect of polyvinyl alcohol fiber volume fraction on pullout behavior of structural synthetic fiber in hybrid fiber reinforced cement composites. *Journal of Korea Concrete Institute* 23(4): 461-469 (in Korean).
 10. Lee, J. H., and C. G. Park. 2010. Effect of blast furnace slag, hwang-toh and reinforcing fibers on the physical and mechanical properties of porous concrete using blast furnace slag coarse aggregate. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 52(5): 53-60 (in Korean).
 11. Machine, H., T. Chijen, and P. S. Song. 2008. Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering* 494(1-2): 153-157.
 12. Madhkhan, M., R. Azizkhani, and Torkiharchegani M. E. 2012. Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. *Construction and Building Materials* 26(1): 102-112.
 13. Mustafa, S., Y. Alperen, and Yaman I. O. 2005. Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. *Building and Environment* 40(12): 1672-1677.
 14. Madhkhan, M., M. Entezam, and M. E. Torki. 2012. Mechanical properties of precast reinforced concrete slab tracks on non-ballasted foundations. *Scientia Iranica* 19(1): 20-26.
 15. Noh, K. H., and C. Y. Sung. 2004. Mechanical and drying shrinkage properties of polypropylene fiber reinforced high flow concrete. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 46(5): 79-85 (in Korean).
 16. Park, C. G., and J. H. Lee. 2012. Effect of styrene butadiene latex polymer contents on the bond properties of macro polypropylene fiber in polymer-modified cement-based composites. *Journal of Applied Polymer Science* 126(S2): E330-337.
 17. Park, C. G., and J. P. Won. 2008. Flexural performance and fire resistance of polyolefin based structural synthetic fiber reinforced concrete. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 49-57 (in Korean).
 18. Sivakumar. A., and S. Manu. 2007. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 29(7): 575-581.
 19. Song, P. S., J. C. Wu, S. Hwang, and B. C. Sheu. 2005. Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 19(1): 1-9.
 20. Yang, K. H. 2010. Slump and mechanical properties of hybrid steel-PVA fiber reinforced concrete. *Journal of Korea Concrete Institute* 22(5): 651-658 (in Korean).