

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 특성 및 적용

Performance and Application of Hybrid Fiber Reinforced Concrete



원종필*
Jong-Pil Won



박찬기**
Gi-Chan Park

1. 머리말

콘크리트는 경제성과 압축강도, 내구성, 강성 등 우수한 물성을 가지고 있으나 인장, 휨 및 충격강도가 낮고 에너지 흡수 능력이 작아 매우 취성적이며 균열에 대한 저항성이 작은 단점을 가지고 있다^{2,5)}. 이러한 콘크리트의 취성적 거동을 연성적 거동으로 유도하고 인장 저항 능력의 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 섬유보강 콘크리트(fiber reinforced concrete : FRC)가 개발되었다. 이에 관한 연구는 1960년대부터 시작되어 1970년대에는 현장에 적용되기 시작하였다^{3,7)}. 섬유는 낮은 탄성계수를 가진 섬유와 높은 탄성계수를 가지고 있는 섬유로 나누어지고 이러한 섬유가 시멘트 복합체에 혼입되면서 시멘트 복합체의 단점인 취성적 파괴와 수축으로 인한 균열의 발생시 섬유는 에너지 흡수와 인성 향상, 균열 방지 등 콘크리트의 성능 향상을 가져왔다^{4,12,15)}.

일반적으로 섬유보강 콘크리트는 단일 섬유에 국한되어 사용되어 왔는데 1990년대 후반부터 2종 이상의 섬유를 혼입하여 단일 섬유보강 콘크리트가 발휘할 수 없는 효과를 기대할 수 있는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 연구가 점진적으로 이루어지고 있다.^{6,8)} 이러한 하이브리드 섬유의 사용은 서로 다른 섬유의 하이브리드 및 같은 종류의 섬유를 길이가 다르게 하이브리드하여 사용하는 방법으로 여러 연구가 진행되었다¹⁶⁾. 섬유 하이브리드 효과는 균열의 성장을 섬유의 길이 및 특성에 따라 콘크리트 내에서 효과적으로 제어하여 콘크리트의 성능을

향상시킬 수 있다. 국내에서도 2000년대에 들어 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 연구가 시작되어 이에 관한 연구가 진행되고 있다. 국내에서의 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 대부분의 연구는 섬유의 종류 및 길이가 다른 섬유를 혼합하여 휨 및 인장하중에 의해 발생한 균열의 성장을 효과적으로 제어하기 위한 연구와 콘크리트의 인장 및 휨 성능 등 역학적 성능의 향상에 중점을 두어 실시되어 왔다. 국내에서와 달리 해외에서의 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 연구는 다양하게 실시되고 있는데, 이와 같은 연구에는 국내에서와 같은 연구 방향과 더불어 휨 성능을 포함한 구조적 성능과 소성 및 건조수축 등 균열 제어를 위한 내구성능 향상의 2차 보강 효과를 동시에 달성하도록 2가지 종류의 섬유를 하이브리드 하는 연구가 진행되어 콘크리트에 적용하여 효과를 발휘할 수 있는 하이브리드 섬유 제품이 상용화되고 있다^{12,15)}. 본고에서는 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 국내외의 연구 방향과 하이브리드 섬유보강 콘크리트가 가지는 특성을 살펴보고자 한다.

2. 하이브리드 섬유보강 콘크리트

하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 연구는 크게 4가지로 나누어 설명할 수 있다. 첫 번째는 크기가 다른 섬유를 적용하여 콘크리트의 강도 및 연성을 증가시키기 위한 것이 있다. 직경 및 크기가 작은 마이크로(micro) 섬유를 사용하여 강도를 증가시키고 크기 및 직경이 큰 매크로(macro) 섬유를 사용하여 최고 응력 후 연성(post peak ductility)을 확보하기 위한 섬유의 조합과 두 번째로는 재료 특성이 다른 섬유를 조합시키는 것이다. 강도를 증가시키기 위하여 강성의 섬유를 사용하고 연성을 증가시키기 위하여 연성의 특성을 가지는 섬유를 사용하는 것이다. 세 번째로는 콘크리트의 공용연수 전반에 걸쳐 미칠 수 있는 섬유의 혼합이다. 콘크리트의 재령 초기에는 콘크리트에서 발생하는 소성수축균열을 제어하며 장기적으로는

* 정희원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
jpwon@konkuk.ac.kr

** 정희원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 전임연구원

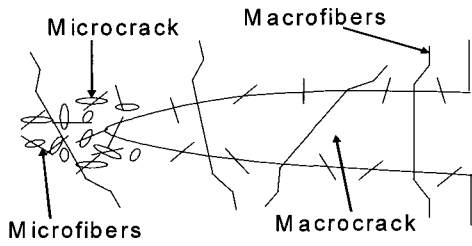


그림 1. 균열 크기에 따른 섬유유 작용^{7,8)}

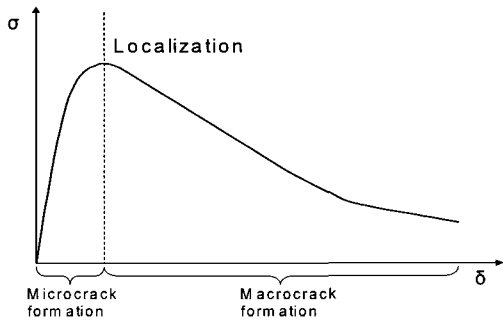


그림 2. 콘크리트 내에서 균열의 성장^{7,8)}

역학적 성능을 향상시킬 수 있는 섬유유를 조합하는 것이다. 네 번째로는 한 종류의 섬유유가 콘크리트의 성능을 증가시키고, 다른 종류의 섬유유가 증가된 성능의 효율성을 더욱더 증가시키도록 조합하는 것이다⁸⁾. 상기와 같은 하이브리드 섬유유의 특징은 콘크리트에서 발생하는 균열을 억제함으로써 달성할 수 있다는 것이다. 즉, 2종 이상의 섬유유를 혼합한 하이브리드 섬유유보강 콘크리트는 단일섬유 보강 시 얻을 수 없는 효과를 발휘할 수 있는데, 하이브리드 섬유유보강 콘크리트는 서로 물리·역학적 특성이 다른 섬유유를 사용하였을 때 각 특성에 맞게 콘크리트에 발생하는 균열을 효과적으로 제어하여 역학적 성능 및 내구성을 향상시키는 효과를 발휘할 수 있다. <그림 1>은 콘크리트에 발생하는 마이크로 균열과 매크로 균열을 제어하기 위한 하이브리드 섬유유의 균열제어 메커니즘을 나타낸다. 매크로 균열은 매크로 섬유유에 의하여 균열의 확장을 제어하고 있으며 마이크로 균열은 마이크로 섬유유에 의하여 제어되고 있다.

콘크리트가 휨하중을 받을 때 발생하는 균열과 응력-변형 상태와의 관계를 나타내면 <그림 2>와 같다^{7,8)}. 마이크로 균열이 발생하는 동안은 응력이 계속적으로 증가하다가 매크로 균열이 형성되면서 응력은 감소하면서 변형이 증가하는 것을 보여 준다. 하이브리드 섬유유보강 콘크리트의 경우 초기 마이크로 섬유유가 마이크로 균열이 형성되었을 때 이를 억제하는 효과를 가지게 되며, 마이크로 균열이 형성되면 매크로 섬유유가 균열에 대한 억제를 가지게 된다. <그림 3>은 마이크로섬유, 매크로섬유 그리고 하이브리드 섬유유보강 콘크리트에서 균열이 확장되어 지는 과정을 보여주고 있다^{7,8)}. <그림 3>에서와 같이

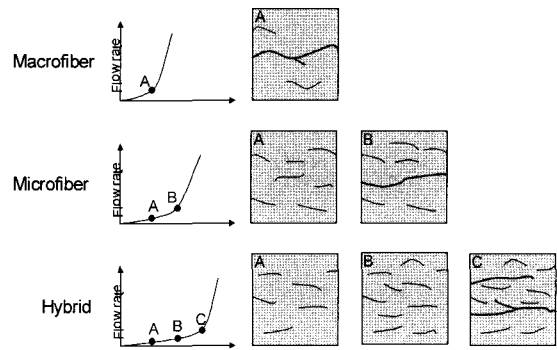


그림 3. Macro, micro 및 하이브리드 섬유유에 의한 균열 발생 단계^{7,8)}

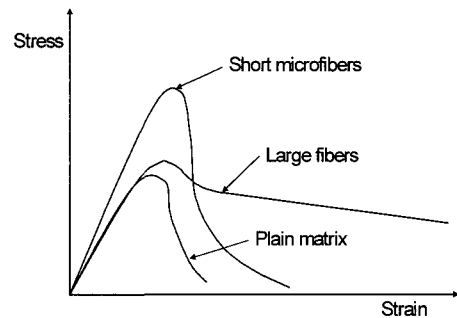


그림 4. 섬유유 크기에 따른 응력-변형을 관계³⁾

처음에 마이크로 균열들의 수가 증가되고 뒤이어 복합적인 크기의 균열들이 발생하고 큰 균열이 이러한 균열들을 따라 크게 확산되어간다. 하이브리드 섬유유로 보강된 것이 단일 섬유유로 보강되었을 때보다 마이크로 균열의 발생이 가장 늦게 나타나며 균열 제어 성능이 가장 큰 것을 보여주고 있다.

3. 적용 목적에 따른 하이브리드 섬유유보강 콘크리트의 성능

3.1 크기가 서로 다른 섬유유의 하이브리드

기존 연구 결과를 살펴보면 크기가 서로 다른 섬유유를 하이브리드하여 얻을 수 있는 가장 큰 효과는 강도와 연성의 증가를 동시에 획득할 수 있다는 것이다. 즉 짧은(short) 섬유유가 콘크리트의 강도를 증가시키고 큰(large) 섬유유가 콘크리트의 연성을 증가시킨다<그림 4>³⁾. 이와 같은 연구에는 길이가 다른 2종의 강섬유를 하이브리드시켜 콘크리트의 성능을 향상시키는 것이다. <그림 5>는 강섬유 30 mm(SF30) 및 60 mm(SF60) 그리고 하이브리드된 섬유(SF36)를 사용하여 휨인성지수를 평가하였다. 총 섬유 혼입량은 0.5%로 하였다. 하이브리드된 강섬유를 사용한 콘크리트의 휨인성지수는 처음 I5, I10에서는 거의 차이가 없으나 I20, I30, I50에서 하이브리드된 것이 단일 섬유유로 보강된 것보다 더욱 증가되는 인성 값을 보여주고 있다.

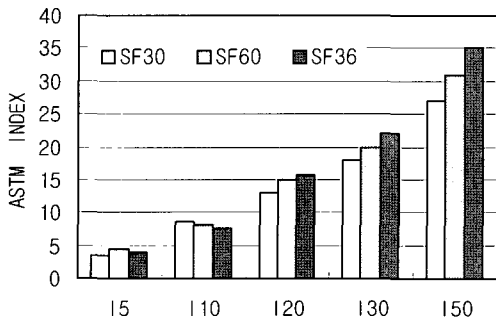


그림 5. 하이브리드섬유 종류에 따른 ASTM 인성지수¹⁾

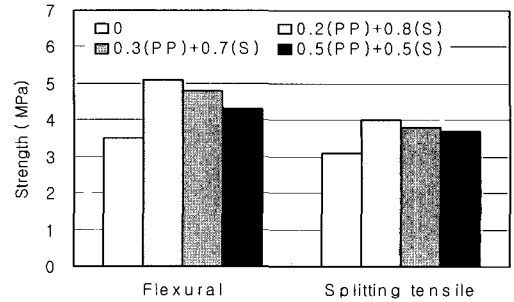


그림 7. 하이브리드 PP-강섬유보강 콘크리트의 휨 및 쪼개짐 인장 강도⁷⁾

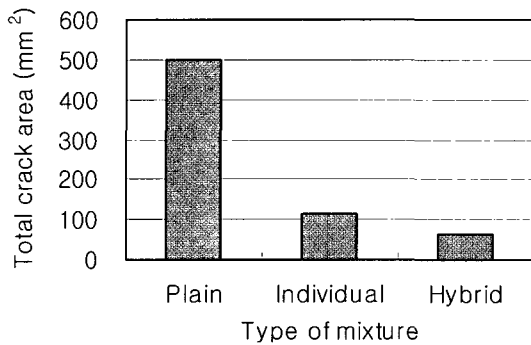


그림 6. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 총 균열 면적¹⁾

최근 들어 크기가 서로 다른 섬유를 하이브리드하여 콘크리트의 초기균열 제어 효과를 극대화하여 장기 내구 성능을 향상시키기 위한 연구가 시작되고 있다. 이와 같은 연구에는 콘크리트의 균열 제어에 효과가 있다고 알려진 PVA 섬유 길이를 각각 다르게 하여 콘크리트에 혼입함으로써 균열 제어 성능을 극대화시키기 위한 것도 있다. PVA 섬유 4mm, 6mm, 8mm 및 12mm 섬유를 하이브리드 하여 콘크리트에 적용하면 기존에 콘크리트의 초기균열 제어용으로 사용되는 6mm PVA 섬유보다 우수한 균열 제어 능력을 가지게 된다. <그림 6>은 하이브리드 섬유로 보강된 콘크리트의 균열 제어 성능을 나타낸다. 6mm의 단일 섬유 혼입 시 약 76.6%의 균열 제어 효과를 나타낸 반면, 하이브리드 섬유 혼입 시 약 87.5%의 균열 제어 효과를 발휘함으로써 하이브리드 섬유가 더 우수한 결과를 나타냈다¹⁾.

3.2 재료 특성이 다른 섬유의 하이브리드

재료 특성이 다른 섬유의 하이브리드는 강도를 증가시키기 위하여 강성의 섬유를 사용하고 연성을 증가시키기 위하여 연성의 특성을 가지는 섬유를 사용하여 콘크리트의 효과를 극대화하는 것으로 국내외적으로 대부분의 연구가 이 부분에 집중되어 왔다. 재료 특성이 다른 폴리프로필렌섬유(PP)와 강섬유(SF)의 하이브리드에서 혼입비를 0.2(PP) + 0.8(SF)%,

표 1. 배합에 따른 섬유 혼입률¹²⁾

Group	PP*(%)	SF1**(%)	SF2***(%)	SF3****(%)	Total
C1	0	0.2	0.2	0	0.4
C2	0	0.2	0.4	0	0.6
C3	0	0.4	0.2	0	0.6
C4	0	0.4	0.4	0	0.8
C5	0.15	0.2	0.2	0	0.55
C6	0.15	0.2	0.4	0	0.75
C7	0.15	0.4	0.2	0	0.75
C8	0.15	0.4	0.4	0	0.95
C9	0	0	0	0	0
C10	0	0	0	0.6	0.6

*PP : PP 섬유, 직경(18 μm), 길이(12 mm)
 **SF1 : 강섬유, 직경(0.3 mm), 길이(40 mm)
 ***SF2 : 강섬유, 직경(0.3 mm), 길이(30 mm)
 ****SF3 : 강섬유, 직경(0.1 mm), 길이(6 mm)

0.3(PP) + 0.7(SF)%, 0.5(PP) + 0.5(SF)%로 변화시킨 콘크리트의 휨강도 및 쪼개짐인장강도는 <그림 7>과 같다⁷⁾.

<그림 7>의 결과에서 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 섬유가 혼입되지 않은 콘크리트에 비하여 휨강도와 쪼개짐인장강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 하이브리드된 섬유의 혼입비에 따라 휨강도와 쪼개짐인장강도의 값은 변화를 보였는데 이는 콘크리트 내부에서 섬유가 작용하는 성능의 차이로 평가할 수 있다. 또한, 재료 특성과 크기를 다르게 하이브리드 하여 콘크리트의 성능을 향상시킬 수 있다. 지름이 0.3mm이고 길이가 다른 후크형 강섬유 40mm 및 30mm 2종과 지름이 0.1mm이고 길이가 6mm인 1종의 후크형 강섬유 그리고 지름이 18 μm이고 길이가 12mm인 폴리프로필렌섬유 4가지의 섬유를 사용 하이브리드하여 콘크리트의 압축강도 및 쪼개짐 인장강도를 평가하였다¹²⁾. <표 1>은 시험에 사용된 섬유의 혼입량을 보여주고 있으며, <그림 8 과 9>는 압축강도 및 쪼개짐 인장강도의 결과들을 보여주고 있다. 결과에서 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 하이브리드 한 것은 보통 콘크리트와 비교해서 쪼개짐인장강도 및 압축강도가 증가되었다.

3가지 종류의 보강섬유를 하이브리드한 연구에는 탄소섬유, 강섬유 그리고 폴리프로필렌섬유를 섬유 혼입량 0.5%를 기준

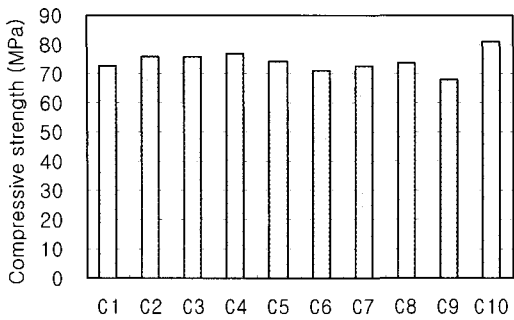


그림 8. 섬유 혼입률에 따른 압축강도¹²⁾

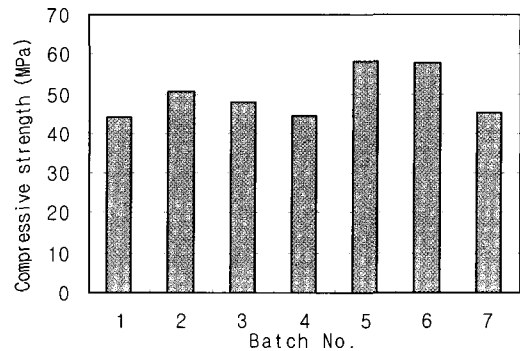


그림 10. 탄소, 강 및 PP섬유 혼입률에 따른 압축강도^{1b)}

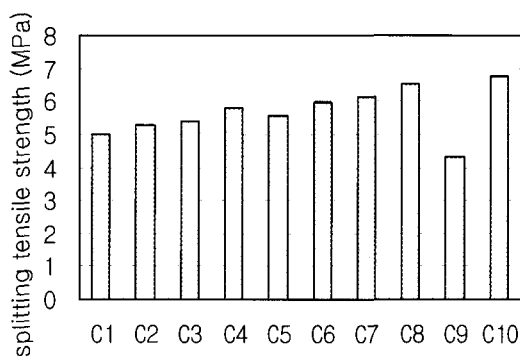


그림 9. 섬유 혼입률에 따른 쪼개짐 인장강도¹²⁾

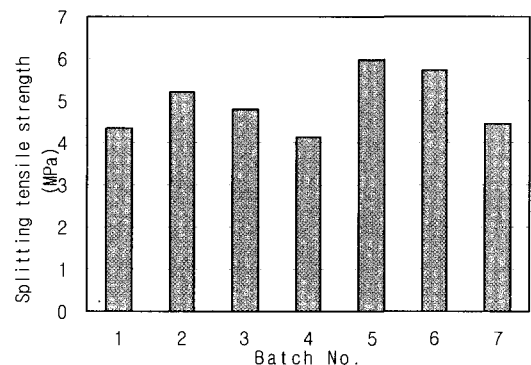


그림 11. 탄소, 강 및 PP섬유 혼입률에 따른 쪼개짐 인장강도^{1b)}

표 2. 탄소섬유, 강섬유 및 PP섬유의 체적비^{b)}

배치번호	체적비 (%)		
	탄소섬유	강섬유	PP 섬유
1	-	-	-
2	0.5	-	-
3	-	0.5	-
4	-	-	0.5
5	0.2	0.3	-
6	0.2	-	0.3
7	-	0.2	0.3

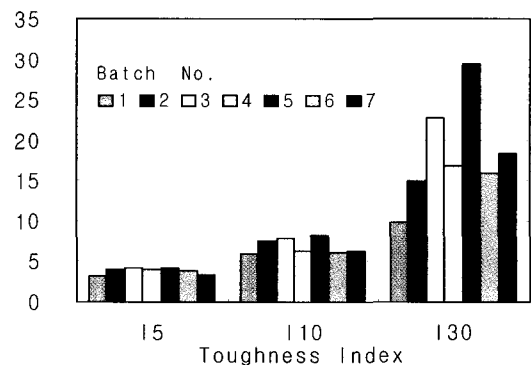


그림 12. 탄소, 강 및 PP섬유 혼입률에 따른 휨인성 지수^{1b)}

으로 하여 단일 섬유 혼입 또는 하이브리드하여 섬유가 콘크리트에 미치는 영향을 압축강도, 휨강도 및 인성지수를 시험을 통하여 평가 분석하였다.¹⁶⁾ <표 2>는 3가지 종류의 섬유 혼합 비이며 평가 결과는 <그림 10, 11 및 12>와 같다.

연구 결과 탄소섬유의 혼입은 높은 압축강도와 쪼갬 인장강도의 결과를 나타낸 반면 강섬유의 혼입은 높은 휨인성 값을 나타내었다. 따라서 탄소섬유와 강섬유를 하이브리드한 것이 강도 및 휨인성의 향상에 가장 유리하다는 것을 나타내고 있다. 탄소섬유와 강섬유를 하이브리드한 것은 보강이 없는 보통 콘크리트와 비교해서 압축강도 31.4%, 쪼갬 인장강도 36.5% 그리고 휨인성은 32.9% 향상을 나타내었다. 재료 특성이 다른 섬유를 하이브리드하여 얻을 수 있는 효과는 역학적 특성의 향상뿐만 아니라 콘크리트의 공극 구조를 치밀하게 하여 투

수저항성 등을 증가시킬 수 있다. 이와 같은 연구에는 강섬유와 폴리프로필렌섬유 및 PVA섬유를 하이브리드시켜 콘크리트에 혼입한 하이브리드 섬유보강 고성능콘크리트의 투수성을 평가한 연구가 있다¹³⁾. 섬유의 특성과 하이브리드 섬유의 혼입비는 <표 3>과 같다.

연구 결과 콘크리트의 상대투수계수는 <그림 13>과 같다. 동일한 섬유 혼입량을 가진 콘크리트에서 상대투수계수는 하이브리드한 강섬유보강 콘크리트(S32, S33, S34 그리고 S35)가 단일 강섬유보강 콘크리트(S31)보다 16 ~ 56% 더 낮은 것을 볼 수 있으며 또한 섬유가 혼입되지 않은 콘크리트보다 42 ~ 70%가 더 낮은 것을 보여주고 있다. 상대투수계수의 순서는 S35<S34<S33<S32<S31<M 순서로

표 3. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 시험설계⁴⁾

배치	V _f ^a (%)	섬유 체적비(%)				
		SF ₁	SF ₂	SF ₃	PVA 섬유	PP 섬유
M	0	0	0	0	0	0
S31	1.5	0	0	1.5	0	0
S32	1.5	0	0.5	1.0	0	0
S33	1.5	0.5	0	1.0	0	0
S34	1.5	0.25	0.25	1.0	0	0
S35	1.5	0.5	0.5	0.5	0	0
SA3	1.5	0	0	0.5	1.0	0
SA4	1.5	0	0	1.0	0.5	0
SAP1	1.5	0	0	1.0	0.25	0.25

V_f^a : 섬유 체적비

나타났다. 세 가지 크기의 강섬유로 보강된 콘크리트(S33, S32)는 두 가지 크기의 강섬유로 보강된 콘크리트(S33, S32)와 단일 강섬유로 보강된 콘크리트(S31)의 것과 비교해서 향상된 불투수 성능을 보여주었다. <그림 13>에서 보여주는 것처럼 세 종류 또는 두 종류의 섬유(강섬유, PVA 섬유 그리고 PP 섬유)로 보강된 콘크리트는 단일 강섬유로(S31) 보강된 콘크리트와 비교해서 56 ~ 70%의 투수계수를 감소시켰다.

<그림 14 와 15>는 다른 종류의 섬유와 다른 길이의 섬유를 하이브리드시켜 콘크리트에 혼입하여 콘크리트 매트릭스의 공극 구조를 향상시킨 결과를 보여주고 있다. 향상된 정도는 섬유의 길이, 섬유의 종류 그리고 섬유의 혼합 방법에 의하여 변화되었다. 하이브리드 강섬유보강(S35) 콘크리트와 단일 강섬유보강(S31) 콘크리트를 비교하면 콘크리트 매트릭스에서 하이브리드 강섬유보강 콘크리트가 단일 강섬유 보강 콘크리트에 비해 공극의 크기가 50 nm보다 작은 공극을 더 많이 가지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 단일 강섬유보강 콘크리트보다 하이브리드 섬유보강(SAP1) 콘크리트가 작은 공극을 많이 가지고 있는 것으로 나타났다¹³⁾.

3.3 초기균열 제어 및 장기 역학적 성능의 향상을 위한 하이브리드 섬유보강 콘크리트

초기균열 제어 및 장기 역학적 성능을 향상시키기 위한 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 현재 해외에서는 제품화되어 있어 현장에 적용되고 있다. 이와 같은 성능을 만족시키기 위한 하이브리드 섬유 제품은 강섬유와 합성섬유를 혼합하여 사용하게 되는데 강섬유는 콘크리트의 휨성능 향상에 주요 목적이 있으며, 합성섬유는 콘크리트의 초기 소성수축균열과 장기 건조수축균열을 제어함으로써 내구성 향상에 주요 목적을 두고 있다. 또한 고성능 폴리머 섬유(high performance polymer fiber)와 폴리프로필렌섬유의 하이브리드는 고성능 폴리머 섬유가 휨성능을 향상시키고, 폴리프로필렌섬유는 균열 제어 성능을 향상시키기 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 현재 해외에서 적용되고 있

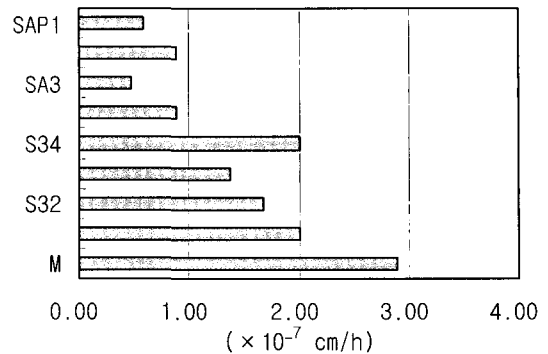


그림 13. 상대 투수계수¹³⁾

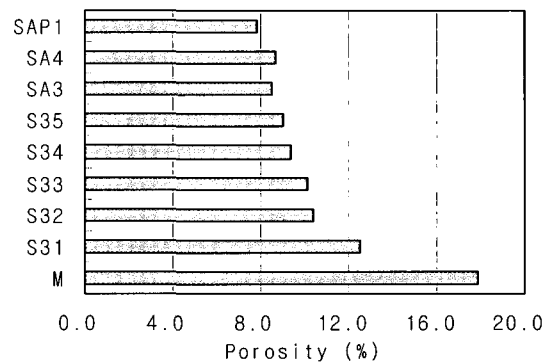


그림 14. 콘크리트 내의 공극에 하이브리드 섬유보강의 효과¹³⁾

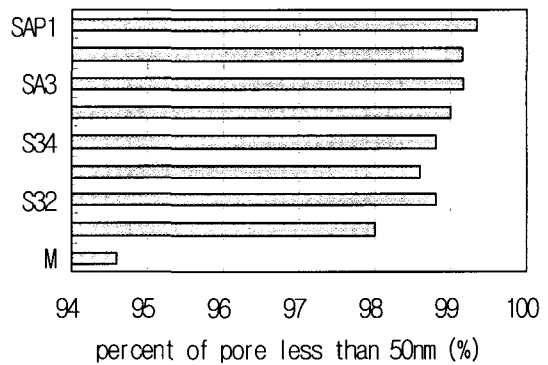


그림 15. 콘크리트 내에서 50 nm보다 작은 공극에 하이브리드 섬유보강의 효과¹³⁾

는 제품으로는 S사의 Novomesh, N사의 NyconB, F사의 W2.9 Hybrid blend 등이 있다. 이때 적용되는 합성섬유의 대부분은 폴리프로필렌섬유가 사용된다. 초기균열 제어 및 장기 역학적 특성의 향상을 위하여 하이브리드된 섬유를 적용한 콘크리트의 충격저항성 시험 결과와 균열 제어 시험 결과는 <그림 16 및 17>과 같다¹⁴⁾. 시험 결과를 살펴보면 재령 7일과 28일에서 충격저항성이 향상되었으며, 균열 제어 능력도 상당히 향상되었음을 알 수 있다. 또한 평균잔류강도(average residual strength, ARS)를 측정하였을 때 역시 하이브리드된 섬유를 사용하였을 때 상당한 효과가 발생하며, 섬유의 혼입률이 증가할수록 그 효과는 크게 증가함을 알 수 있다(그림. 18)¹⁴⁾

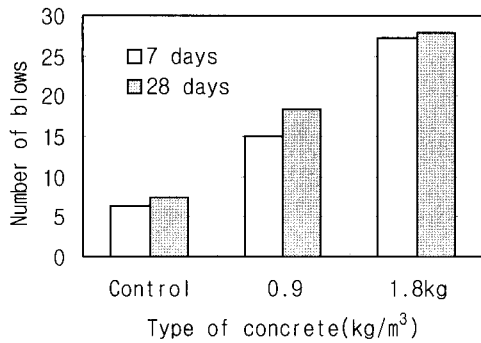


그림 16. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 충격저항성¹⁴⁾

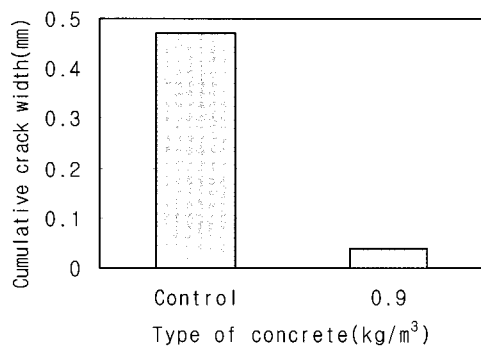


그림 17. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 균열저항성¹⁴⁾

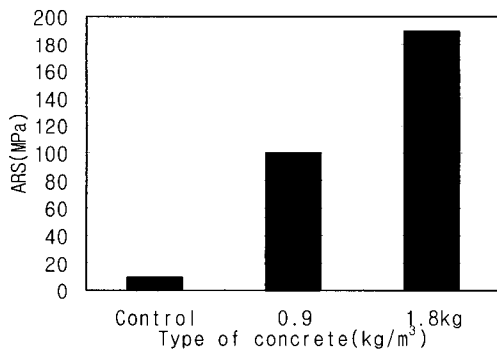


그림 18. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 평균 잔류강도¹⁴⁾

4. 맺음말

본고에서는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 연구 방향 및 개략적인 특성에 대하여 기술하였다. 이상과 같이 하이브리드 섬유 보강 콘크리트는 일반 단일 섬유보강 콘크리트에 비하여 다양한 목적을 달성할 수 있는 용도로 사용될 수 있으며, 적용시 상당한 효과를 달성할 수 있다. 해외의 경우 하이브리드 섬유 제품이 이미 생산되어 다양하게 적용되고 있는 사례도 있다. 그러나 국내의 경우 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 연구는 초기 단계로 대부분의 연구가 휨 및 인장 하중 작용시 발생하는 마이크로 균열 및 매크로 균열의 제어를 통한 성능 향상에 초점을 맞추어 진행되고 있다. 따라서 하이브리드 섬유보강 콘크리트

연구의 다양성의 확보가 필요한 실정이다. 즉 섬유보강 콘크리트의 적용 목적에 따라 상기에서 살펴본 다양한 방법으로 섬유를 하이브리드 하게 되면 콘크리트에 적용시 효과를 극대화할 수 있다. 또한, 다양한 목적을 만족하는 하이브리드 섬유의 개발 및 적용은 콘크리트의 성능의 향상뿐만 아니라 다양한 기능 및 성능을 요구하는 콘크리트 구조물의 시대 상황에 맞게 고성능 신소재로 자리매김할 수 있을 것으로 전망한다. □

참고문헌

1. 원종필, 김명균, 박찬기, "하이브리드 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 소성수축균열제어 특성", 대한토목학회논문집 2005, 25권, 4A호, 2005. 7, pp.621~626.
2. Benter A. and Mindess S., *Fiber reinforced cementitious composites*, Elsevier Science, London, 1990.
3. Betterman L.R., Ouyang C., and Shah S.P., "Fiber matrix interaction in microfiber-reinforced mortar", *Advanced Cement Based Materials*, 1995, Vol.2, No.2, pp.53~61.
4. Banthia N. and Nandakumar N., "Crack growth resistance hybrid fiber reinforced cement composites", *Cement and Concrete Composites*, 2003, Vol.25, No.1, pp.3~9.
5. Balaguru P. and Shah S., *Fiber Reinforced Cement Composites*, McGraw Hill, 1992.
6. Govaert L.E. and Peijs T., "Influence of applied and temperature on the deformation of high-strength polyvinyl alcohol polymer", Vol.36, No.18, 1995, pp.3589~3592.
7. Komlos K., Babai B., and Nurnbergerova T., "Hybrid fiber concrete under repeated loading", *Nuclear Engineering and Design*, 1995, No.156, pp.195~200.
8. Lawer J. S., Zampini D., and Shah S. P., "Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced under load", *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.4, 2000, pp.379~385.
9. Lawler, J.S., *Hybrid fiber reinforcement in mortar and concrete*, Ph.D thesis, Dept. of Civil engineering, Northwestern Univ. Evanston, Illinois, USA, 2001.
10. Naaman, A.E., and Homrich J.R. Tensile stress-strain properties of SIFCON, *ACI materials Journal*, 1989, Vol.86, No.3, pp.244~251.
11. Qian C. X. and Stroeven P., "Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, 2000, pp.63~60.
12. Quan C. X. and Stroeven P., "Fracture properties concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres", *Cement and Concrete Composites*, Vol.22, No.4, 2000, pp.343~353.
13. Sun W., Chen H., Luo X., and Qian H., "The effect of hybrid fibers and agent on the shrinkage and permeability of high performance concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.4, 2001, pp.595~601.
14. SI Concrete system, Novomesh brochure.
15. Xu G., Magnani S., and Hannant D. J., "behavior of fiber-cement hybrid composites polyvinyl alcohol fiber yarns", *ACI Materials Journal*, Vol.95, No.6, 1998, pp.667~674.
16. Yao U., Li J., and Wu K., "Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber fraction", *Cement and Concrete Research*, 2003, Vol.33, No.1, pp.27~30.