

현무암 섬유 보강 콘크리트의 물리적 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete

김경원* 한만엽**
Kim, K. W. Han, M. Y.

Abstract

Fibers have been used to improve the tensile strength or toughness of concrete. Therefore many different kinds of fibers have been developed and tested to reinforcing concrete. Basalt fiber is one of the recently developed materials for this purpose. Basalt fibers have the advantage which is the fiber itself is a same kind of material as concrete. In this study, fiber length change, orientation of fiber, the strength properties of fiber reinforced concrete have been tested. The test results show that as the amount of fiber increases, 1) workability of concrete has been reduced significantly, 2) the length of fiber reduced down to less than 4mm, 3) orientation factors are between 0.248 and 0.350, 4) compressive strength and elastic modulus have been increased significantly, however, the other strength have not increased significantly.

1. 서 론

콘크리트는 건설재료로서 많은 장점을 지니고 있지만, 취성재료라는 점과 인장강도가 작은 재료라는 결정적 단점이 있기 때문에 이러한 성질을 개선하기 위한 노력이 오래 전부터 지속되어 왔다. 이런 단점을 보완하기 위해 인장축에 인장철근을 배치하는 구조적인 해결방안을 사용하기도 하지만, 이런 방법으로 해결하기 어려운 문제는 콘크리트에 섬유를 첨가함으로써 해결하기도 한다. 1960년대 중반부터 바닥슬래브와 도로 등의 콘크리트제품에 섬유가 사용되기 시작했으나, 섬유보강 콘크리트가 유

* 정회원, 아주대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원, 아주대학교 토목공학과 부교수

동성이 떨어지며, 기계화 시공을 어렵게 하고, 표면 마무리가 불량한 문제점과 일부재료는 우수한 특성을 보이거나 고가의 가격으로 인하여 널리 사용되지 않고 있다. 그러나, 현무암 섬유의 경우는 타 섬유에 비하여 생산비용이 저렴하고, 콘크리트에 기본적으로 사용되는 골재와 같은 종류의 재료이므로 이질성이 작다는 장점이 있다. 이러한 이질성이 작은 재료를 사용할 경우에는 반복하중이나 온도변화에 의한 피로강도가 증진되는 효과를 기대할 수 있다.

본 연구의 목적은 콘크리트에 현무암 섬유를 혼합함으로써 현무암 섬유보강 콘크리트(Basalt Fiber Reinforced Concrets, 이하 BFRC)의 유동성, 현무암 섬유의 길이 변화, 배향성 및 현무암 섬유보강 콘크리트의 압축, 인장, 휨 및 탄성계수의 특성을 조사하려는데 있다.

2. 사용재료 및 실험시편 제작

2.1 사용재료

(1) 사용 재료

본 실험에서는 국내 H사 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 굵은 골재의 최대치수가 25mm인 쇄석과 잔골재는 강모래를 사용하였다. 실험에 사용된 골재의 물성치는 다음 표1과 같다. 실험에 사용된 혼화제는 국내 S사의 고성능 유동화제 FF-86을 사용하였다.

표 1 골재의 기본 물성치

	조립율	비중	단위중량 (kg/m ³)	흡수율 (%)
잔골재	2.831	2.601	1567.9	0.8065
굵은골재	2.635	2.603	1646	0.4488

(2) 현무암 섬유(Basalt Fiber)

본 실험에 사용된 현무암질 섬유의 직경은 150 μ m 와 250 μ m 두 종류이며 현무암 섬유의 특성 및 물성은 표 2과 같다.

표 2 Basalt 섬유의 특성

색상	평균길이(cm)	비중	인장강도(ksi)	탄성계수(ksi)
검정,갈색	5 이상	2.7	29-50	11 \times 10 ⁴

2.2 실험시편의 제작

(1) 배합비 및 실험변수

저강도 배합(L)은 물-시멘트비 0.65인 배합강도 200kg/cm²의 배합으로 고유동화제를 투입하였으며, 섬유 혼입률 0%, 1%, 3%로 시료를 제작하였다.

중강도 배합(M)은 물-시멘트비가 0.57인 배합강도 250kg/cm²의 배합으로 섬유직경에 따른 특성을 측정하기위해 MN배합은 직경 150 μ m 의 섬유를 0%, 1%, 2%, 3%로 혼입률을 변화시키면서 시료를 제작하였다. MFN과 MK는 각각 직경 150 μ m , 250 μ m 섬유를 0%, 1%, 2%, 3%, 4%투입하여 배합을 실시하였으며, MFN배합은 고유동화제를 첨가하였다.

고강도 배합(H)는 물-시멘트비 0.5인 배합강도 300kg/cm²의 배합이며 HN과 HK배합은 각각 직경 150 μ m, 250 μ m 섬유를 0%, 1%, 2%, 3%, 4%로 혼입률을 변화시키며 시료를 제작하였다. HFN 배합은 직경 150 μ m 섬유와 고유동화제를 첨가한 배합으로 슬럼프 8-12cm로 유지하여 섬유혼입률을 1%, 3%로 변화하여 시편을 제작하였다. 각 배합별 배합 설계표는 표 3과 같다.

표 3 배합 설계표

시료명	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/cm ³)			
			물	시멘트	잔골재	굵은골재
저강도 (L)	65	41.4	207	318.5	725.1	1041
중강도 (M)	57	39.8	207	363.2	687.6	1041
고강도 (H)	50	38.3	207	414.0	745.1	1041

(2) 시편의 제작 및 양생

본 실험의 배합은 강제형 믹서를 사용하였으며, 자갈, 모래, 시멘트를 골고루 섞은 후, 배합수를 첨가하여 1분간 배합한 뒤 마지막으로 섬유를 첨가하며 배합하였으며, 섬유의 첨가가 끝난 후 1분간 배합을 지속하였다.

시편의 제작은 압축강도 및 인장강도 실험을 위하여 ϕ 10×20cm 실린더형 몰드를 각각 3개씩 6개를 제작하였으며, 휨강도 시험용 각주형 15×15×55cm 몰드를 2개를 제작하였으며, 탄성계수 측정을 위해 ϕ 15×30cm 공시체 1개를 제작하여 24시간 후 탈형하여 20±5°C로 조절된 항온항습실내의 양생조에서 27일간 수중 양생하였다.

3. 실험 및 분석 방법

3.1 유동성 측정

본 실험에서는 BFRC의 유동성의 변화를 일반 슬럼프시험과 K-슬럼프로 표시하였다. K 슬럼프 실험은 배합이 완료된 상태에서 K 슬럼프 시험기를 배합된 시료 내에 1분간 삽입하여 K 슬럼프 시험기 내에 흘러 들어온 몰탈의 양으로 유동성을 측정하였다.

3.2 섬유의 길이변화 측정

본 실험에 사용한 현무암섬유는 인장강도는 크지만 전단강도가 작아 배합시 잘 부러지는 취성 재료이므로 섬유의 배합시간에 따른 길이변화를 측정하였다. 굳기전 시료 안에 포함되어 절단된 섬유를 채취하여 섬유의 길이를 배합시간에 따라 각각 200개를 측정하여 측정값을 평균하였다.

3.3 배향계수(α)

배향계수의 측정은 휨시험으로 파괴된 시료의 면에 시편의 타설 방향을 위로하여 단면의 상, 중, 하 3개소를 선정하여 섬유직경 150 μ m 를 사용한 시료는 2cm×2cm=4cm²의 면적당 섬유의 개수를 측정하여 다음 식 (1)에 의하여 배향계수를 나타내었다.

$$\alpha = p \frac{a}{P} \left(p = \frac{V_f}{V_c} \right) \quad \begin{matrix} p : \text{섬유의 밀도} \\ \alpha : \text{단면적} \\ P : \text{섬유혼입률} \end{matrix} \quad (1)$$

3.4 강도 및 탄성계수의 측정

BFRC의 압축강도 실험은 KS F 2405, 인장강도는 KS F 2408, 휨강도는 KS F 2408의 단순보 3 등분점 하중법에 의하여 수행하였다. 탄성계수는 콤프레소 미터를 이용하여 KS F 2438의 콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아슨비 시험방법에 의하여 실험을 실시 하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 슬럼프 실험

슬럼프와 K 슬럼프 실험에 의한 현무암 섬유 보강 콘크리트의 유동성 측정결과는 다음 표 3과 같다. (괄호안은 K슬럼프 시험결과를 나타낸다.)

표 3 BFRC의 슬럼프와 K슬럼프 변화 (cm)

섬유 혼입률 (%)	L		M		H		
	LFN (150 μm)	MN (150 μm)	MFN (150 μm)	MK (250 μm)	HN (150 μm)	HFN (150 μm)	HK (250 μm)
0	7.5	10.0(2.75)			8.5(2.7)		
1	13.5	3.8(1.00)	13.0	6.5(1.88)	5.2(2.15)	8.5	6.2(2.20)
2	-	3.2(1.38)	12.5	3.7(1.13)	4.6(1.38)	-	3.2(1.50)
3	10.5	1.1(0.25)	10.5	3.6(0.63)	2.7(0.85)	13	3.9(1.00)
4	-	-	11.5	3.1(0.63)	1.6(0.58)	-	2.8(0.73)

현무암 섬유 보강 콘크리트의 유동성은 섬유 혼입률 1%에서 급격한 감소를 나타내고 있으며, 섬유의 혼입량이 증가할수록 슬럼프의 감소가 계속 관측되었다. 이러한 결과는 K 슬럼프 시험결과와도 거의 일치하는 경향을 나타내고 있으며 250μm 섬유 혼입시 K 슬럼프와 슬럼프의 회귀분석결과는 식 2와 같으며, 회귀분석 곡선은 다음 그림 1와 같다.

$$Y = 2.84 X + 0.84, \quad R^2 = 0.87 \quad (2)$$

이와 같은 결과는 섬유의 표면적이 동일 용적의 골재에 비해 현저히 커져 섬유표면에 다량의 수분이 흡착하므로 발생하는 것이다. 또한, 표면적이 더 큰 직경 150μm 의 섬유가 직경 250μm 섬유보다 같은 혼입률에서 BFRC의 유동성이 더 감소함을 알 수 있다.

유동성의 감소를 개선하기 위해서는 단위부피당 함유된 섬유의 전 표면적에 따라 적절히 단위 수량을 증가시키거나, 감수제, AE제 등을 사용하여 충분한 워커빌리티를 얻어야 할 것이다.

4.2 섬유의 길이 변화

현무암 섬유의 배합시간에 따른 길이 변화의 측정결과를 그림 2의 직경 150μm 섬유를 첨가하였을 때의 시간-길이변화 곡선으로 나타내었다.

현무암 섬유는 전단강도가 작은 취성재료이기 때문에 길이감소량은 배합과 동시에 급격히 감소함을

알 수 있고, 배합시간이 늘어남에 따라 감소량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 섬유 길이 감소는 섬유의 부착을 저해하여 대부분의 섬유소가 충분한 용력을 받지 못하여 섬유의 보강 효과를 감소시킬 것으로 사료된다.

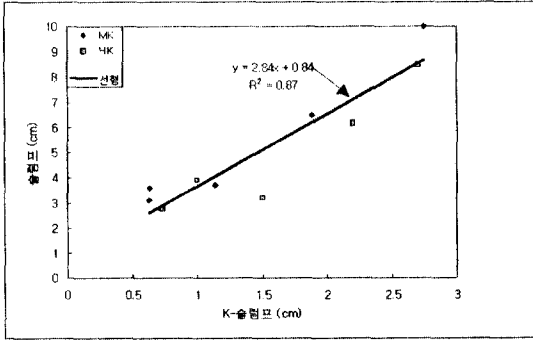


그림 1 K슬러프-슬러프 곡선 (250 μ m)

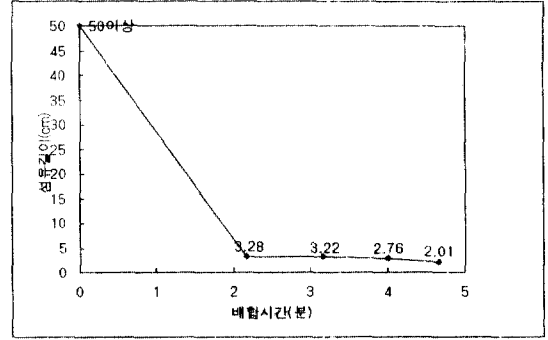


그림 2 배합시간에 따른 섬유의 길이변화 (150 μ m)

4.3 배향계수

직경 150 μ m 섬유를 첨가한 시료의 실험에 의해 측정된 단위면적당 섬유의 수를 이용한 배향계수 계산결과는 다음 표 4와 같다.

표 4 배향계수(α)

섬유혼입률(%)	LFN	MFN	HFN
1	0.248	0.332	0.350
2	-	0.290	-
3	0.292	0.272	0.323
4	-	0.301	-

측정결과 직경 150 μ m 섬유의 배향계수는 0.248 - 0.350으로 Romualdi의 3차원 랜덤 배향시의 배향계수 0.405 보다 작음을 알 수 있다. 배향계수의 측정 결과는 이론적인 값보다 작게 나타났다. 이러한 이유로는 시료의 다짐시 진동 다짐기를 이용하여 다짐을 실시한 결과 진동다짐의 다짐 방향이 수직으로 진동하므로 수직 진동에 의하여 섬유가 단면 방향으로 배향된 것으로 추정된다. 이는 시편의 크기가 적어서 그 효과가 큰 것으로 보인다.

4.4 압축강도

그림 3은 150 μ m 섬유 혼입시 혼입률에 따른 압축강도의 변화를 나타낸다. 유동화제를 첨가하지 않은 MK, HK배합의 경우 모든 섬유혼입률에서 기준배합보다 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. MK, HK 배합의 경우 혼입률 2%에서 309.5kg/cm²으로 최대의 보강효과를 나타내며, 전체적으로 5-8%의 강도증가를 나타내고 있다.

HK배합의 경우에는 섬유혼입물 1%에서 최대로 327.3kg/cm²을 나타냈으며, 기준배합에 대하여 4% 증가하는 것으로 나타났으며, MK배합과 같이 전체적으로 강도가 증가하는 것으로 측정되었다.

4.5 할렬 인장강도

그림 4의 고유동화제와 150 μ m 의 가는 섬유를 첨가한 LFN의 배합의 경우에 혼입물 1%에서 오히려 강도의 감소가 관측되었으며, 섬유혼입물 3%에서 약 3%의 강도증가 관측되었다.

MFN 배합에서는 섬유혼입물 1-3%까지는 기준배합에 비하여 강도의 감소가 관측되었고, 혼입물 4%에서 31.7kg/cm²로 기준배합인 30.6kg/cm²보다 약간 증가하는 것으로 관측되었으나, 전반적으로 인장강도의 증가는 크지 않은 것으로 관측되었다. HFN 배합에서는 기준배합에 비하여 혼입물 1%에서 31.8kg/cm²으로 약간 증가하는 것으로 관측되었으나 오히려 3%의 경우에는 29.4kg/cm²로 기준배합에 비해 감소하는 것으로 나타났다.

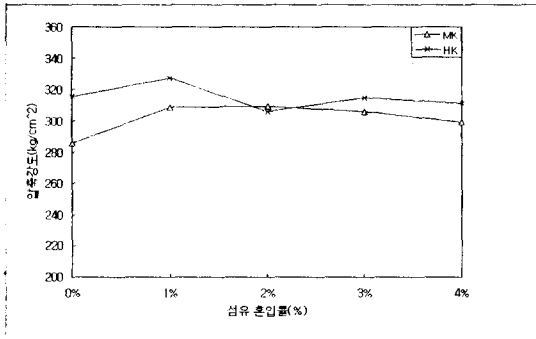


그림 3 250 μ m 섬유 혼입시 혼입률-압축강도 변화

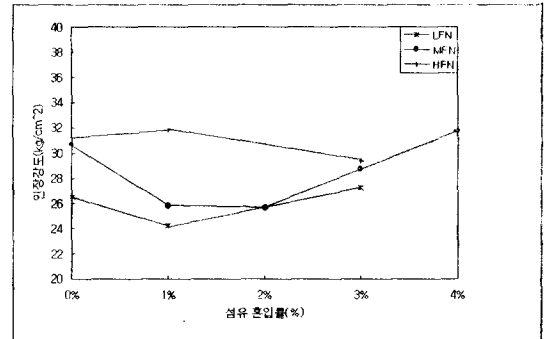


그림 4 유동화제를 사용한 배합의 혼입률-인장강도 변화

4.6 휨 강도

150 μ m 섬유 혼입시 유동화제를 첨가하지 않은 시료인 MN은 기준 배합에 비하여 섬유혼입물 1%에서 40.4kg/cm²으로 기준배합보다 작은값을 나타내나 혼입물 2%에서는 42.2kg/cm²로 약간 증가하고, 혼입물 3%에서 오히려 감소하는 것으로 나타났다. C1배합에서는 섬유혼입물 4%에서 47.9kg/cm²으로 약 10%의 최대 강도 증가를 나타내었다.

4.7 탄성계수

LFN 배합의 경우 탄성계수는 혼입물 1%에서 4.8%감소하고 3% 혼입시 약4% 증가하는 경향을 보인다. MFN 배합에서는 혼입물 2%에서 약 14%의 최대 증가율을 나타내고 점차 감소하여 4%에서는 기준배합에 비해 감소하는 경향을 나타낸다.

위 두 배합은 압축강도 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 전체적으로 탄성계수는 압축강도의 증가폭보다 큰 것으로 나타났다.

HFN의 배합에서는 전체적으로 탄성계수의 감소가 관측되고 있다. 섬유를 1% 혼입한 경우 기준배합에 6.8%, 3%혼입시 4.5% 감소하는 것으로 관측되었다.

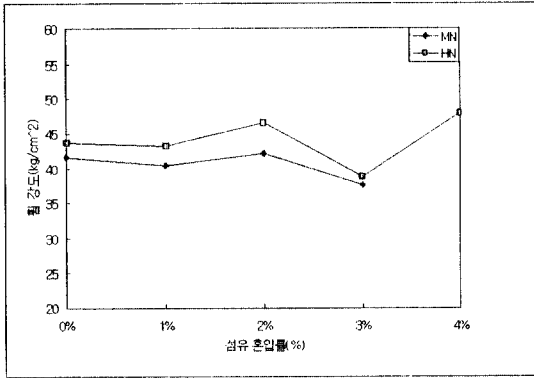


그림 6 150µm 섬유 혼입시 혼입률-휨강도 변화

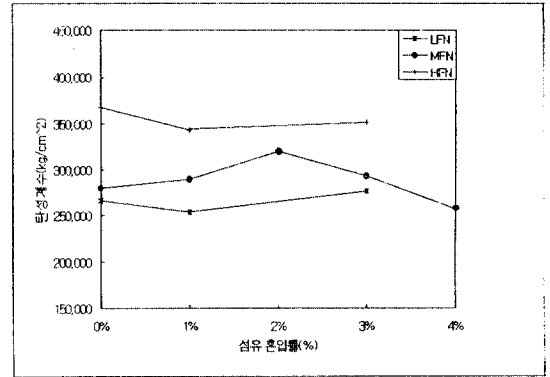


그림 7 유동화제를 사용한 배합의 혼입률-탄성계수 변화

5. 결 론

BFRC를 실용화 하기 위한 기초적인 연구 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) BFRC의 유동성 측정결과 섬유의 직경에 상관없이 모두 60% 이상의 유동성 감소가 관측되었으며, 감소량은 섬유의 첨가량에 반비례하였다. 또한 가는 섬유를 첨가한 것이 굵은 섬유를 첨가한 것보다 유동성의 감소량이 약간 더 큰 것으로 나타났다.
- 2) 현무암 섬유는 콘크리트에 첨가하여 배합할 때 급격한 길이감소가 관측되었다. 섬유의 길이가 감소하는 직경 150µm 인 가는 섬유가 직경 250µm 의 섬유보다 길이 감소율이 컸으며, 배합시간이 길어질수록 길이 감소율이 더욱 커지는 것으로 나타났으나, 최종적인 세장비는 직경이 150µm 인 가는 섬유가 더 큰 것으로 나타났다.
- 3) 배향계수의 측정은 Romualdi의 이론치 0.405 보다 작은 값으로 나타났다. 이러한 결과는 시편 제작시 진동테이블을 이용하여 다짐을 실시하였기 때문에 수직진동에 의하여 섬유가 단면 방향으로 배향된 점과 시편의 단면 크기가 작기 때문에 벽면의 구속 효과에 의한 영향이 더욱 크게 나타난 것으로 추정된다.
- 4) BFRC의 압축강도는 유동화제를 첨가하지 않은 시편의 경우는 약 10.4% 증가하였으며, 유동화제를 첨가한 시편의 경우는 약 4.0% 정도 증가하였다. 유동화제를 첨가 배합의 강도의 증가가 큰 이유는 섬유가 배합수의 일부를 흡착하여 유효 물-시멘트비를 낮춤으로써 콘크리트의 전반적인 물성이 향상된 것으로 판단된다.
- 5) BFRC의 인장강도는 유동화제를 첨가하지 않은 시편의 경우는 약 11% 증가하였으며, 유동화제를 첨가한 시편의 경우는 거의 강도증가가 없는 것으로 나타났다.
- 6) BFRC의 휨인장강도는 유동화제를 첨가하지 않은 시편의 경우는 약 14% 증가하였으며, 유동화제를 첨가한 시편의 경우는 최대 32% 까지 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 휨강도의 증가는 측정편차를 규명하는 추가적인 실험이 있어야 판단이 가능할 것으로 사료된다.
- 7) BFRC의 탄성계수는 유동화제를 첨가하지 않은 시편의 경우는 약 27% 증가하였으며, 유동화제를 첨가한 시편의 경우는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 산업기술정보원, "섬유보강 콘크리트의 기술현황과 전망" 1988.2
2. 이차돈, "강섬유 보강 콘크리트 내 강섬유의 채향성 및 분포특성에 관한 연구", 콘크리트학회, 제2권, 제3호, 1990.9.
3. 김경수 외, "섬유보강재가 콘크리트의 파괴인성과 강도에 미치는 영향", 대한토목학회논문집, 제15권, 제1호, 1995.1.
4. Robert M. Jones, "Mechanics of Composite Materials"
5. J.G.MORLEY, "Some aspects of crack growth and failure in fiber reinforced composites", J of Materials Science, 18, 1983
6. Shingeyuki Akiham, et al, "Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composite and the Application to Buildings"
7. Youjiang Wang, Victor C. Li, Stanley Backer, "Experimental Determination of Tensile Behavior of Fiber Reinforced Concrete", Jof ACI, Sep-Oct, 1990
8. M.J.Snyder, D.R.Lankard., "Factors Affecting the Flexural Strength of Steel Fibrous Concrete", J of ACI, Fed. 1972.
9. R.N.Swamy, P.S.Mangat, C.V.S.K.Rav, "The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices", ACI SP44, 1974