

전자기장을 이용하여 강섬유를 원주방향으로 배열시킨 원통형 몰탈의 Double Punch 인장강도

Double Punch Tensile Strength of Cylindrical Mortar with Steel Fibers aligned in Circumferential Direction by Electro-Magnetic Field

신선철¹ · 누르 인다 무카로마² · 문도영^{3*} · 박대욱⁴

Sun-Chul Shin¹ · Nur Indah Mukharromah² · Do-Young Moon^{3*} · Dae-Wook Park⁴

(Received January 11, 2022 / Revised February 15, 2022 / Accepted February 15, 2022)

In this study, the direction of the steel fibers mixed in the normal mortar and the steel slag mortar was arranged in the circumferential direction by using an electromagnetic field, and a double punch test was performed to evaluate the effect of magnetic field exposure on tensile strength and on fracture energy. As a result of the experiment, it was confirmed that it is possible to arrange the steel fibers in the circumferential direction. Tensile strength and displacement at failure were also increased according to the arrangement of steel fibers due to exposure to electromagnetic fields. On the other hand, the fracture energy hardly increased. It is considered that there was a limit in resisting crack growth because the area where the arrangement of steel fibers could be adjusted under the electromagnetic field was not deep to center of specimen and the end shape of the steel fibers were straight not hooked. Additional research is needed to address these issues.

키워드 : 강섬유, 전자기장, Double Punch Test, 인성

Keywords : Steel fiber, Electro-magnetic field, Double Punch Test, Toughness

1. 서론

강섬유보강콘크리트는 우수한 인성(Toughness)으로 공장 바닥판, TBM 터널 세그먼트 구조 등에 활용되고 있다. 우수한 인성은 균열을 가로지르고 있는 강섬유의 부착과 정착성능이 균열의 급격한 성장을 지연시킴으로 인해 발생한다. 이때 가장 중요한 인자가 강섬유의 방향이다. 균열에 직각으로 배열된 강섬유가 직접적으로 균열저항성을 발휘하기 때문이다.

강섬유보강콘크리트의 타설 방법에 따른 강섬유의 배열상태 변화와 이것이 성능변화에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었다. Blanco et al.(2015)은 강섬유보강 슬래브의 크기와 타설 방향에 따른 강섬유의 배열상태를 코어를 채취하여 조사하였으며, 슬래브

의 크기가 작아 Wall effect가 클수록 강섬유 배열 방향의 등방성이 낮아진다고 보고하였다. 특히 슬래브가 클 때 중앙에서 타설하게 되면 흐름의 직각방향으로 강섬유가 배열되는 경향을 가짐을 보여줬다. Kang and Kim(2012)은 보 시험체의 콘크리트 타설 방향에 따른 연구를 수행하였다. 연구에서 타설 방향이 강섬유의 배열에 영향을 주며, 이에 따라 휨강도도 변화된다는 것을 실험을 통해 증명하였다.

강섬유의 방향을 인위적으로 조정하여 성능을 개선하려는 연구가 진행되었다. 전자기장을 이용한 방법이 가장 적극적인 방법으로 코일을 감싼 솔레노이드를 이용하여 강섬유를 코일방향의 직각으로 배열시키는 방법이다. Michels and Gams(2016); Javahershenas et al.(2021); Hajforoush et al.(2020); Ferrández et al.(2019)등이 솔레

* Corresponding author E-mail: dymoon@ks.ac.kr

¹군산대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan-si, 54151, Korea)

²경성대학교 토목공학과 석사과정 (Department of Civil Engineering, Kyungshung University, Busan, 48434, Korea)

³경성대학교 토목공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Kyungshung University, Busan, 48434, Korea)

⁴군산대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan-si, 54151, Korea)

노이드를 이용하여 균열의 직각방향으로 강섬유 방향을 조정하는 실험적 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 연구는 시편내에서 강섬유의 방향이 전자기장의 직각인 한 방향으로만 고정되고 다양한 방향으로 조정하는 것은 불가능하다. Mu et al.(2019)만이 솔레노이드를 파이프 구조에 적용하여 원주방향으로 강섬유 방향을 조정하는 실험연구를 수행하였으나, 이는 반드시 파이프 구조에만 적용할 수 있는 한계가 있다.

본 연구에서는 Switched Reluctance Motor(SRM)에 사용되는 수개의 코일을 이용하여 몰탈에 보강된 강섬유를 원주방향으로 배열시키는 실험적 연구를 수행하였다. 특히 몰탈에 사용되는 잔 골재를 천연잔골재 모래에서 고로슬래그로부터 재생산된 재생스틸슬래그로 치환하여 그 영향을 고찰하는 연구를 수행하였다. 스틸슬래그는 자석에 반응하는 물질로서 전자기장에 반응하기 때문에 전자기장에 노출되었을 때 강섬유와 같이 반응하여 강섬유의 방향전환에 영향을 줄 것으로 기대하였다.

2. 전자기장유도 장치 제작

몰탈 내부에 보강된 강섬유를 원주방향으로 정렬되도록 하기 위하여 전자기장 유도 장치를 제작하였다. 제작 전 전자기장 해석을 수행하였으며, 그 결과에 따라 코일의 제원과 회전수를 결정하고 회로를 구성하였다.

2.1 전자기장 해석

전자기장 해석 프로그램은 ANSYS Electronics Desktop을 사용하였으며, 2D해석을 수행하였다. 전류 1.4 Ampere를 입력치로 해석하였다. Fig. 1은 해석결과를 나타내고 있다.

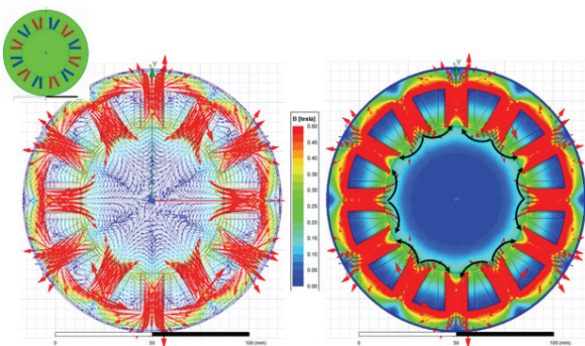


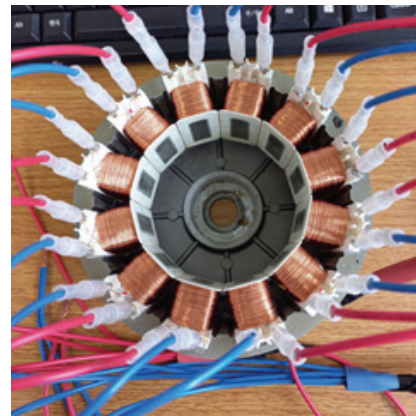
Fig. 1. Magnetic field analysis results

Fig. 1과 같이 12개의 코일을 사용하며, 인근의 코일을 건너뛰어 그 다음의 코일에 연결하는 방식으로 회로를 구성하게 되면 원주방

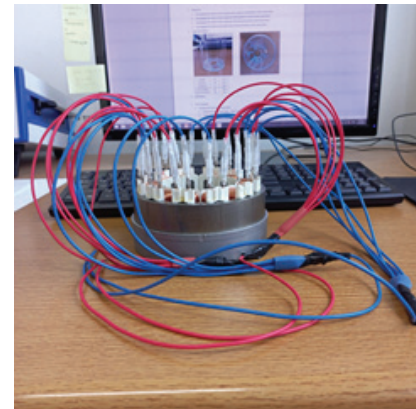
향의 정렬이 가능하며, 유도되는 전자기력의 수준이 0.5 Tesla로 몰탈의 점성을 극복하고 섬유의 배열이 가능한 것으로 판단되었다.

2.2 전자기장 유도장치 제작

전자기장 유도장치는 Fig. 2와 같이 제작하였다. 사용된 코일의 직경은 0.25 mm이며, 각 코일의 회전수는 732턴으로 하였다. 전류인가장치는 직류(DC)장치로서 6 Ampere까지 인가가 가능한 장치를 사용하였다.



(a) Top side view



(b) Plan view

Fig. 2. Steel fiber alignment device using electromagnetic field

2.3 강섬유 정렬을 위한 필요전자기력 계산

Mu et al.(2015)에 따르면 몰탈에 혼입된 한 개의 강섬유에 전자기력 B 에 의해 발생하는 힘은 다음 식 (1)에 의하여 계산된다.

$$f_1 = \frac{B^2 S}{2\mu_0 l} \quad (1)$$

식 (1)에서 f_1 은 강섬유에 작용하는 분포력(N/m), B 는 인가된 전류에 의하여 코일에 발생하는 전자기력($N/(A \cdot m)$), S 는 강섬유의 단면적(m^2), μ_0 는 진공투자율로서 $1.256 \times 10^{-6} \frac{N}{A^2}$ 이며, l 은 강섬유의 길이(m)이다.

강섬유의 중심에 대한 회전력 $M_1(N \cdot m)$ 은 식 (2)와 같다.

$$M_1 = 2 \int_0^{l/2} \frac{B^2 S \sin \theta}{2\mu_0 l} x dx \quad (2)$$

식 (2)에서 θ 은 시간 $t(s)$ 에서 회전각(rad)이다.

한편, 몰탈에 의한 저항분포력은 식 (3)과 같으며, 이에 의한 회전저항모멘트는 식 (4)와 같다.

$$f_2 = 2\pi\eta\omega x \left(\ln \frac{l}{d} + \ln(2) - 0.5\right) \quad (3)$$

$$M_2 = 2 \int_0^{l/2} 2\pi\eta\omega x \left(\ln \frac{l}{d} + \ln(2) - 0.5\right) x dx \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 f_2 , M_2 는 저항분포력(N/m)과 저항모멘트($N \cdot m$), η 는 몰탈의 점도($Pa \cdot s$), ω 은 강섬유의 회전각속도(rad/s), x 는 강섬유의 중심에서 임위점까지의 거리(m), d 는 강섬유의 직경(m)이다.

만일 $M_1 > M_2$ 이면 강섬유가 회전하며, 전자기력의 방향으로 정렬된다. 상기식에서 노출시간 $t = 5s$, 2.1장의 해석결과와 같이 코일의 전자기력 $B = 0.5 Tesla$, 통상적인 몰탈의 점도를 $\eta = 6 Pa \cdot s$ 로 계산한 결과, 다음과 같이 M_1 이 M_2 에 비하여 매우 큰 것을 알 수 있으며 강섬유의 회전에 충분한 회전력을 얻을 수 있다.

$$M_1 = 1.02 \times 10^{-5} N \cdot m > M_2 = 9.47 \times 10^{-6} N \cdot m$$

3. 실험개요

3.1 배합 및 사용재료

본 실험에 사용된 몰탈 배합의 배합표는 Table 1과 같으며, 몰탈의 28일 압축강도결과도 제시되어 있다. 일반몰탈시험체(NM)의 압축강도 보다 스틸슬래그 몰탈(SSM)의 압축강도가 훨씬 낮은 것으로 나타났는데, 재료의 단위중량의 차이를 고려하지 않고 일반 몰탈과 동일한 배합비를 적용한 결과이기 때문이며, 일반몰탈과 스틸슬래그 몰탈이 각각의 컨트롤 시편으로서 분석되었다.

Table 1. Mix proportion and compressive strength

Type	Composition (kg/m ³)				Comp. strength
	Cement	Water	Sand	Steel slag	Mean ± SD
NM	865	364	939	-	30.66 ± 3.67
SSM	865	364	-	939	14.11 ± 2.01



Fig. 3. Steel slag(left) and fibers(right) used

강섬유는 길이 13 mm, 직경 0.2 mm로 형상비 65의 강섬유를 사용하였으며, 마이크로 강섬유를 사용하였다. 인장강도는 생산자로부터 받은 자료에 의하면 1,100 MPa이다(Fig. 3).

실험에 사용된 재료는 스틸슬래그는 에코마이스터에서 생산하고 있는 PS Ball 제품으로 제철소에서 발생하는 슬래그를 재활용하기 위해 가공한 제품이며 기존에 콘크리트 제조에 사용하는 모래 대체재로 사용되고 있다. 화학 조성물은 철 생산 공정에서 원료의 조성에 따라 다르지만, 칼슘옥사이드(Calcium oxide)가 40 %, 실리카(Silica) 35 %, 알루미늄(Alumina) 13 %, 마그네시아(Magnesia)가 8 % 정도이다. Fig. 4와 같이 자석에 반응한다. 자체 물성 실험결과 절건 및 표건밀도는 각각 3.56 g/cm³, 3.57 g/cm³, 흡수율은 0.42 %, 조립율은 3.16으로 나타났다. 단위용적 질량은 2.263 g/cm³이다.

3.2 원형 몰탈 시험체 제작

원형 몰탈시편은 Fig. 4와 같이 아크릴로 제작된 몰드를 사용하



Fig. 4. Acryl mold for the mortar specimen

였다. 시편의 크기는 Double Punch Test 실험에 적합한 시편의 조건과 전자기장 노출장치의 공간에 적합하도록 설계하였다.

3.3 Double Punch Test

Double Punch Test, 일명 DPT 시험법은 일반 및 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도를 간접적으로 평가하는 방법으로 유럽에서 널리 사용되고 있는 방법이다(Chen and Yuan 1980; Chen 1970; Molins et al. 2009). 이 방법은 노치 휨시험에 비하여 시험체 제작과 실험이 간편하기 때문에 품질관리 및 평가에 주로 사용되며, 그 사용이 크게 확산되고 보편화 되어 최근에는 ASTM 시험기준 제정을 위한 초안이 발표되었다(ASTM 2019). Fig. 5는 DPT 시험체의 형상과 파괴면 형성의 개념을 설명하고 있다.

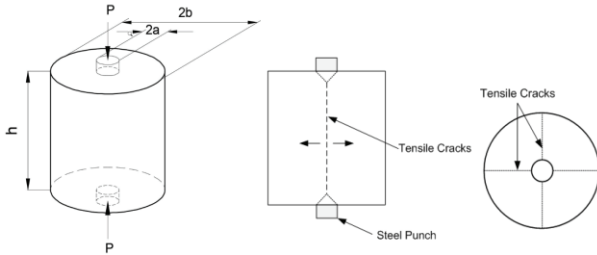


Fig. 5. DPT test method and fracture surfaces

DPT 인장강도는 식 (5)을 통해 계산한다.

$$f_t(t) = \frac{P}{\pi(1.2bh - a^2)} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

여기서, P 는 실험에서 획득한 최대하중(N), b 는 실험체의 반경(mm), a 는 펀치의 반경(mm), h 는 시편의 높이이다.

Fig. 6은 실험을 위한 실험 set-up 모습을 보여주고 있다. 하중은 1 mm/Min.의 속도로 변위제어를 통해 수행되었다. 총 변위가 10 mm까지 실험을 수행하였으며, 가력장치와 시험상면의 접촉이 발생할 때 하중이 증가하는 것이 관찰되었으며, 이 순간 이후의 하중-변위 결과는 삭제하였다.

3.4 실험변수

본 실험변수를 Table 2에 정리하였다. 비교를 위한 시편으로서 전자기장에 노출시키지 않은 NM, SSM, NM_SF 시편을 각각 5개씩 제작하였다. 또한 NM_SF-MF 시편과 SSM_SF-MF는 전자기

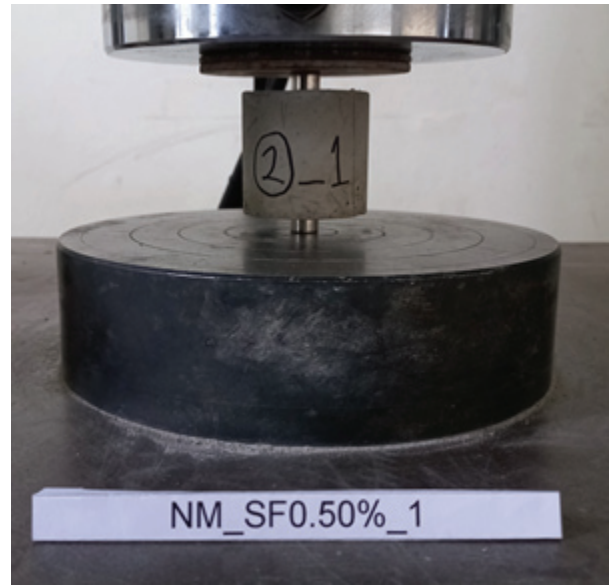


Fig. 6. Set-up for DPT

장 노출장치를 이용하여 1.85 Ampere(0.5T)의 직류전류를 5초간 노출시켰다.

Table 2. Test specimen summarization

ID.	Applied current (A)	Exposure time (s)	Steel fiber vol. (%)	No. of specimens
NM	-	-	-	5
SSM	-	-	-	5
NM_SF	0	0	0.5	5
NM_SF-MF	1.85	5	0.5	5
SSM_SF-MF	1.85	5	0.5	5

4. 실험결과 및 고찰

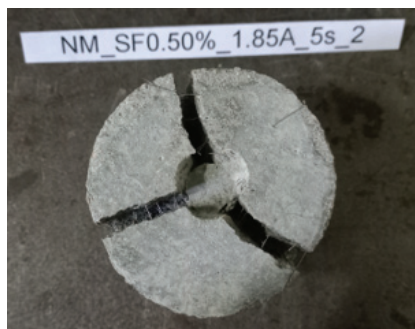
모든 실험체의 실험결과는 Table 3에 정리하였다. 5개 시험체의 평균과 표준편차를 제시하였으며, ratio는 NM 시험체와 SSM 시험체의 평균치에 대한 각 시험체군의 평균치의 비를 나타낸다.

4.1 파괴모드

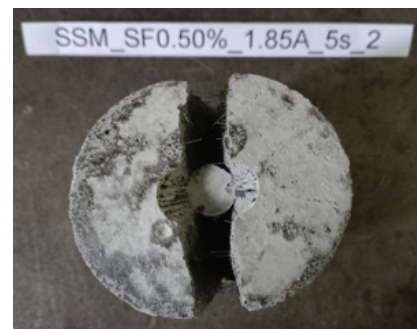
모든 시험체는 상면 펀치의 관입으로 인한 2~3개의 파괴면 형성과 함께 전형적인 인장파괴의 모습을 나타냈다(Fig. 7). 파괴시 큰 충격음과 함께 수직균열이 상면에서 보 높이의 중앙까지 발생하였으며, 하중은 감소하였으며, 수직변위의 증가에 따라 균열폭이 점차적으로 증가하면서 최종 파괴에 도달하였다. UTM장치의

Table 3. Test specimen summarization

ID.	Peak load (kN)		Tensile strength (MPa)		Displacement at peak load (mm)		Fracture energy (KNmm)		Fracture mode	No. of Fracture surface	
	Results	Ratio	Results	Ratio	Results	Ratio	Results	Ratio			
NM	1	28.50	1.00	4.31	1.00	2.23	1.00	0.24	1.00	Tensile	3
	2	30.04		4.55		1.97		0.26		Tensile	2
	3	26.95		4.08		2.51		0.42		Tensile	2
	4	31.27		4.73		1.82		0.18		Tensile	2
	5	28.50		4.31		1.83		0.56		Tensile	2
	Mean±SD	29.05±1.65		4.40±0.25		2.07±0.30		0.33±0.16		-	-
NM_SF	1	32.75	1.02	4.96	1.02	1.90	0.92	19.81	69.12	Tensile	3
	2	34.62		5.24		1.95		13.37		Tensile	2
	3	25.99		3.93		1.80		27.65		Tensile	2
	4	25.21		3.81		1.90		29.85		Tensile	3
	5	29.01		4.39		2.01		23.40		Tensile	2
	Mean±SD	29.52±4.11		4.47±0.62		1.91±0.08		22.81±6.55		-	-
NM_SF-MF	1	32.82	1.08	4.97	1.08	3.06	1.10	20.89	67.79	Tensile	3
	2	33.27		5.03		2.00		21.46		Tensile	3
	3	30.30		4.58		2.51		21.39		Tensile	3
	4	32.04		4.85		2.08		21.34		Tensile	3
	5	29.14		4.41		1.75		26.79		Tensile	3
	Mean±SD	31.51±1.74		4.77±0.26		2.28±0.52		22.37±2.48		-	-
SSM	1	12.96	1.00	1.96	1.00	0.96	1.00	0.02	1.00	Tensile	2
	2	12.70		1.92		0.83		0.34		Tensile	3
	3	14.57		2.20		0.89		0.03		Tensile	2
	4	12.57		1.90		0.83		1.55		Tensile	2
	5	13.60		2.06		0.89		0.18		Tensile	3
	Mean±SD	13.28±0.82		2.01±0.12		0.88±0.06		0.42±0.64		-	-
SSM_SF-MF	1	21.47	1.61	3.25	1.61	1.66	1.80	28.36	69.67	Tensile	3
	2	20.05		3.03		1.65		23.87		Tensile	2
	3	19.15		2.90		1.42		32.47		Tensile	3
	4	23.73		3.59		1.68		34.94		Tensile	3
	5	22.57		3.41		1.53		26.65		Tensile	2
	Mean±SD	21.39±1.85		3.24±0.28		1.59±0.11		29.26±4.45		-	-



(a) Three radial cracks



(b) Two radial cracks

Fig. 7. Fracture surfaces of the tested specimens

램 총 변위가 10 mm까지 실험하였으나 펀치의 높이가 10 mm이므로 펀치가 완전히 시험체에 관입되면 램과 시험체 상면의 접촉되어 하중이 증가할 때 실험을 종료하였다.

시험 종료 후 시험체를 완전히 파괴시켜 단면에 배열된 강섬유를 관찰하였다. 표면부에 관찰되는 강섬유는 원주의 접선방향으로 배열된 것이 확인하나, 중심부 강섬유는 방향이 일정하지 않은 것을 볼 수 있다(Fig. 8). 표면부에 배치된 강섬유는 강한 전자기장의 영향을 받아 정렬이 잘된 반면 중앙부에 있는 섬유는 전자기력이 도달하지 못해 섬유의 배열이 일정하지 않은 것을 알 수 있다.

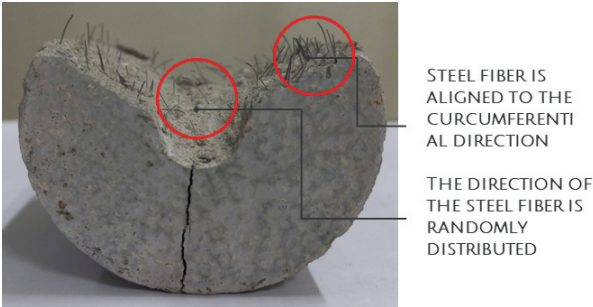


Fig. 8. Steel fiber orientation

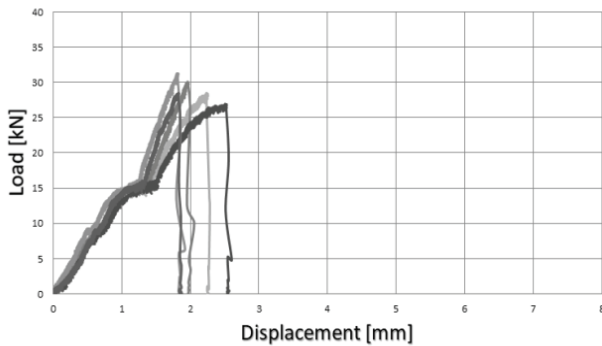


Fig. 9. P-D Curves for NM control specimen series

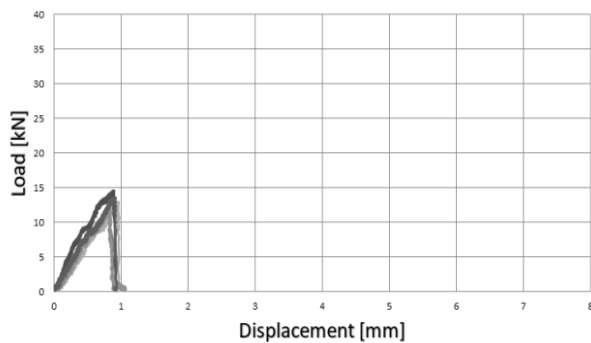


Fig. 10. P-D Curves for SSM series

4.2 하중-변위곡선

Fig. 9~Fig. 13은 하중-변위 곡선결과를 보여준다. NM 시리즈의 그래프를 보면, 하중은 균열이 발생할 때까지 급격하게 증가하며, 균열이 발생한 순간 시험체의 파괴로 하중은 0으로 감소하고, 더 이상 변위가 증가하지 않는다. 이와 같은 거동은 SSM 시리즈에서도 관찰된다. 균열을 연결해주는 강섬유가 없기 때문이다. 강섬유가 보강된 NM_SF 시리즈는 최대하중에서 균열이 발생하면서 약 5 kN까

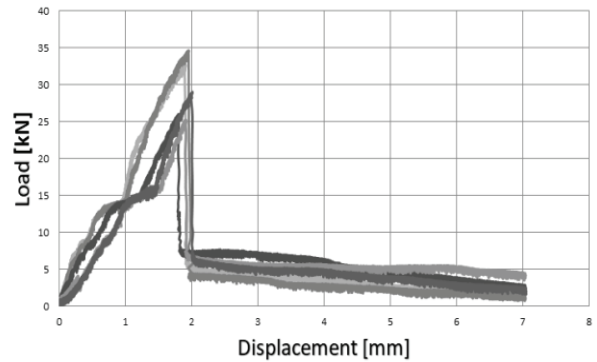


Fig. 11. P-D Curves for NM_SF series

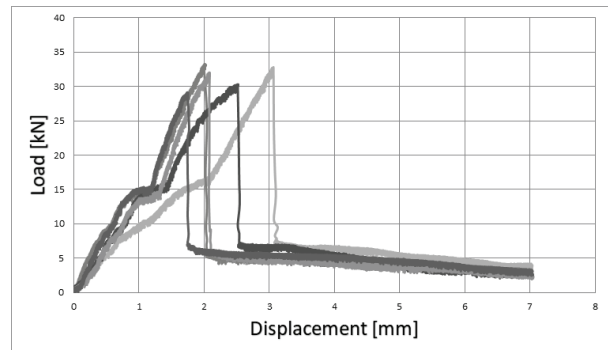


Fig. 12. P-D Curves for NM_SF-MF series

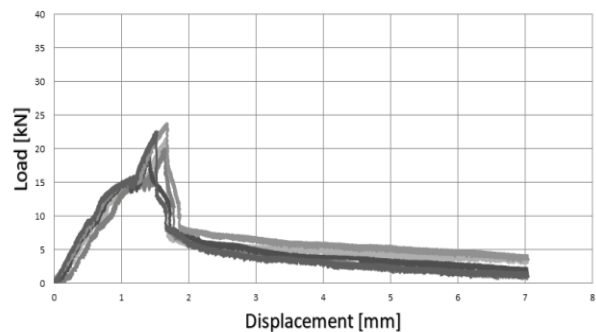


Fig. 13. P-D Curves for SSM_SF-MF series

지 하중이 급격하게 감소하지만 이후에는 하중이 매우 서서히 감소하며 변위가 지속적으로 증가하는 양상을 나타낸다. 강섬유의 균열저항 성능이 이와 같은 하중-변위거동을 발휘하게 함을 알 수 있다.

동일한 시험체이지만 전자기장에 노출된 NM_SF-MF 시리즈의 하중-변위 거동도 NM_SF 시리즈와 유사한 거동을 나타낸다. 그러나 최대하중 이후의 거동에서 NM_SF 시험체에 비하여 동일한 시험체간 하중의 변동이 감소하며 시험체간 매우 유사한 거동을 나타낸다. 특히 SSM_SF-MF 시험체의 경우 최대하중이 증가하고, 최대하중 이후 약 7 kN에서 하중이 지속적으로 감소하며 변형이 크게 증가하는 연성적인 거동을 나타낸다.

4.3 인장강도와 파괴변위 비교

식(5)로 계산된 인장강도의 비를 Fig. 14에 비교하여 나타내었다. 일반몰탈인 NM 시리즈들의 결과를 보면, NM의 인장강도 보다 NM_SF의 인장강도가 근소하게 증가하며, NM_SF-MF에서는 약 8% 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 시험체라 할지라도 전자기장에 의하여 원주방향으로 정렬된 강섬유가 증가하게 됨에 따라 인장강도가 미소하지만 증가하는 것을 확인할 수 있다. SSM의 경우에서도 인장강도가 크게 증가하였다. 주목할 것은 강섬유로 인한 강도의 증가가 일반몰탈에 비하여 크게 증가하였다는 점이며, 몰탈에 혼입된 골재가 전자기장에 반응하면서 강섬유의 정렬을 용이하게 한 것이 이와 같은 큰 증가의 원인으로 판단된다.

Fig. 15는 파괴시 변위를 비교하고 있다. 파괴시 변위에 대한 비교에서도 강도와 유사한 결과를 나타내었다. 이는 전자기장으로 인한 강섬유의 정렬이 변위의 증가에도 영향을 준다는 것을 보여준다.

4.4 균열이후 파괴에너지

Fig. 16은 하중-변위곡선의 하부 면적을 파괴에너지로 규정하고 이를 계산하여 비교한 결과를 보여주고 있다. NM_SF와 NM_SF-MF 시험체의 결과가 거의 유사하다. SSM에서도 파괴에너지의 증가가 거의 유사한 수준이다. 이 결과는 전자기장으로 강섬유를 정렬하였으나 그 영향이 크지 않았다는 것을 의미한다. 본 실험에서 전자기장 노출을 통해 강섬유를 정렬하였으나, 시험체에 포함된 모든 강섬유가 정렬된 것이 아니라 표면에 배치된 강섬유만 정렬됨으로 인해서 그 영향이 제한적이었던 것이 원인으로 판단된다. 시험체에 포함된 모든 강섬유가 정렬될 수 있는 방법의 개발이 요구된다.

5. 결론

본 연구에서는 전자기장을 이용하여 일반몰탈과 스틸슬래그 몰

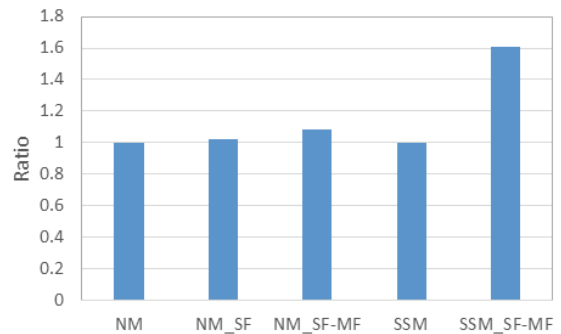


Fig. 14. Tensile strength comparisons

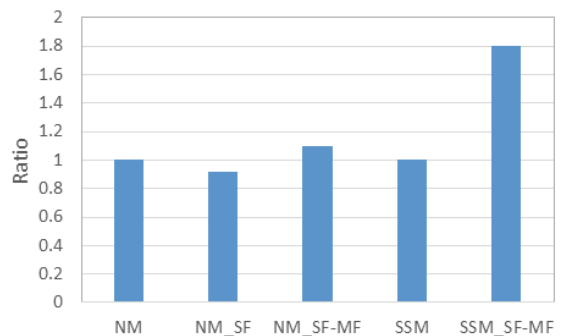


Fig. 15. Comparison in displacement at failure load

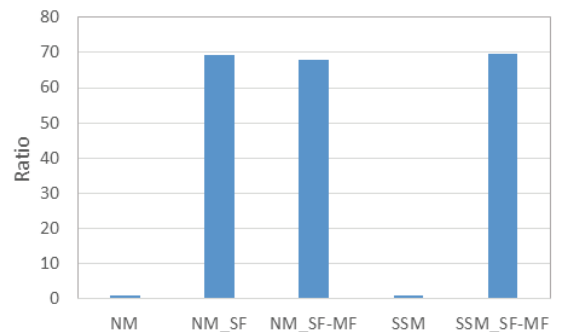


Fig. 16. Fracture energy comparisons

탈 내부에 혼입되는 강섬유의 방향을 원주방향으로 배열시켰으며, 성능변화를 확인하기 위하여 DPT 실험을 수행하였다. 본 실험을 통해 획득한 결론은 다음과 같다.

1. 몰탈내부에 있는 강섬유가 받는 회전력과 회전을 저항하는 힘의 평형으로부터 배열을 위해 필요한 전자기력을 산정하고 이를 실현할 수 있는 소규모 장비를 개발하였다.
2. 강섬유의 원주방향 배열을 위해 소요되는 시간과 자기력에 노출

- 된 DPT실험체의 파괴 후 내부 강섬유의 배열상태의 육안 조사결과, 원형시편의 표면부에 배치된 강섬유는 원주방향으로 배열되었으나, 중심부에 배치된 강섬유는 랜덤하게 배열됨을 확인하였다.
3. DPT실험결과로부터 인장강도, 파괴시 변위의 분석결과, 전자기장에 노출된 경우 인장강도와 파괴시 변위의 경우 표준편차를 초과하는 유의미한 성능의 증진이 확인되었다. 이는 일반몰탈과 스틸슬래그 몰탈에서 모두 확인되었으며, 스틸슬래그 몰탈에서는 그 양상이 더욱 명확하다.
 4. 하중-변위곡선의 하부면적의 변화를 분석한 결과에서는 전자기장에 노출에 대한 명확한 영향을 확인할 수 없었다. 이는 사용된 강섬유가 앵커리지가 없는 마이크로 섬유인 점과 시편 내부에 모든 섬유가 원주방향으로 배열된 것이 아니라 표면의 일부섬유만이 원주방향을 배열된 점 등에 따라 이와 같은 제한적인 결과를 얻은 것으로 판단된다.
 5. 추후 연구로서 시험체의 크기를 확대하고 단부형상이 있는 일반 강섬유를 이용한 실험적 연구, 원형 시편의 표면부 뿐 아니라 중심부에 강섬유도 모두 원주방향으로 배열시킬 수 있는 방법의 개발 등이 필요하다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단 이공분야기초연구사업 중 기본연구지원사업(과제번호 : 2020R1F1A1076566)의 연구비 지원으로 수행, 작성되었으며, 이에 감사합니다.

References

ASTM. (2019). Standard Test Method for Evaluating the Tensile Performance of Fiber-Reinforced Concrete(Using Cylindrical

Specimens with Double-Punch Loading). Draft Standard.

Blanco, A., Pujadas, P., De la Fuente, A., Cavalaro, S.H.P., Aguado, A. (2015). Assessment of the fibre orientation factor in SFRC slabs, *Composites Part B: Engineering*, **68**, 343–354.

Chen, W.F. (1970). Double punch test for tensile strength of concrete, *ACI Journal*, **7(2)**, 993–995.

Chen, W.F., Yuan R.L. (1980). Tensile strength of concrete: Double-punch test, *Journal of Structural Division*, **106(8)**, 1673–1693.

Ferrández, D., Saiz, P., Morón, C., Dorado, M. G., Morón, A. (2019). Inductive method for the orientation of steel fibers in recycled mortars, *Construction and Building Materials*, **222**, 243–253.

Hajforoush, M., Kheyroddin, A., Rezaiifar, O. (2020). Investigation of engineering properties of steel fiber reinforced concrete exposed to homogeneous magnetic field, *Construction and Building Materials*, **252**, 119064.

Javahershenas, F., Gilani, M.S., Hajforoush, M. (2021). Effect of magnetic field exposure time on mechanical and microstructure properties of steel fiber-reinforced concrete(SFRC), *Journal of Building Engineering*, **35**, 101975.

Kang, S.T., Kim, J.K. (2012). Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution, *Construction and Building Materials*, **28(1)**, 57–65.

Michels, J., Gams, M. (2016). Preliminary study on the influence of fibre orientation in fibre reinforced mortars, *Gradevinar*, **68(8)**, 645–655.

Molins, C., Aguado, A., Saludes, S. (2009). Double punch test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona Test), *Material and Structures*, **42(4)**, 415–425.

Mu, R., Qiu, X., Zhao, Q., Li, H. (2015). Aligned steel fibre reinforced cement based composites(I), orientation control of steel fibres, *Journal of Building Materials*, **18(2)**, 208–213.

Mu, R., Xue, Y., Qing, L., Li, H., Zhao, Y., Zhou, J., Su, J. (2019). Preparation and mechanical performance of annularly aligned steel fiber reinforced cement-based composite pipes, *Construction and Building Materials*, **211**, 167–173.

전자기장을 이용하여 강섬유를 원주방향으로 배열시킨 원통형 몰탈의 Double Punch 인장강도

본 연구에서는 전자기장을 이용하여 일반몰탈과 스틸슬래그 몰탈 내부에 혼입되는 강섬유의 방향을 원주방향으로 배열시켰으며, 성능변화를 확인하기 위하여 Double Punch 실험을 수행하였다. 실험결과, 전자기장을 이용하여 강섬유를 원주방향으로 배열하는 것이 가능한 것으로 확인되었다. 전자기장 노출로 인한 강섬유의 배열조정에 따라 인장강도와 파괴 시 변형도 유의미한 증가를 보였다. 반면 파괴에너지는 거의 증가하지 않았다. 전자기장이 영향을 미쳐 강섬유의 배열이 조정되는 구간이 크지 않은 문제와 사용한 강섬유가 직선으로 되어 있어 균열성장을 억제하는데 한계가 있었던 것으로 판단된다. 이와 같은 문제를 보완한 추가연구가 필요하다.