

입체 섬유 적용 콘크리트의 물리적 특성에 관한 연구

A Study on the Physical Properties of Concrete with Three-dimensional Fiber Application

이재민¹, 장일영^{2*}

Jae-Min Lee¹, Il-Young Jang^{2*}

〈Abstract〉

In this paper, a study on the physical properties of mortar applying 3D Textile was conducted to compensate for the shortcomings of the existing concrete surface repair and reinforcement method. In the tests conducted to analyze the physical properties, compressive strength, flexural strength, and dynamic modulus measurement tests were conducted. As a result of the compressive strength test, as the number of surfaces to which the stereoscopic fiber was applied increased, the amount of displacement and strength reduction rate increased, and the flexural strength also increased as the number of surfaces to which the stereoscopic fiber was applied increased. In addition, it was confirmed that the use of stereoscopic fibers tended to decrease the dynamic modulus of elasticity. This result is a characteristic of the application of stereoscopic fibers, and it caused a decrease in compressive strength due to a decrease in the mortar content of the part to which the stereoscopic fiber was applied, and the high tensile force of the stereoscopic fiber is believed to have affected the increase in flexural strength.

Keywords : Concrete Surface Repair, 3D Textile, Compressive Strength, Flexural Strength

1 정회원, 주저자, 금오공과대학교 토목공학과, 박사과정

1 Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology, Ph.D. program

2* 정회원, 교신저자, 금오공과대학교 토목공학과, 교수
E-mail: jbond@kumoh.ac.kr

2* Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology, Professor

1. 서론

콘크리트는 높은 경제성, 성형 용이성 및 높은 성능을 지니고 있는 우수한 건설재료로 널리 사용되고 있다. 한 번 시공하면 몇 십 년 동안 사용할 수 있을 만큼 내구성 또한 뛰어나지만 물리·화학적으로 열악한 환경에 적용되는 경우가 많기 때문에 열화에 의한 손상이 발생한다. 열화는 주로 콘크리트 표면에서 발생하며 지속적인 열화는 단면 손실에 의한 강도저하나 내부 철근이 노출되어 부식하면 구조적으로 큰 손상을 줄 가능성이 있다 [1,2].

일반적으로 콘크리트 표면의 손상을 보수하기 위해 모르타르 보수공법이 이용된다. 모르타르 보수공법은 기존 콘크리트 결손부위에 모르타르를 도포하여 보수하는 공법으로 주로 들뜸 박리 등 단면결손 부위에 많이 이용하며 경제적이며 시공성이 좋아 각종 콘크리트 성능저하부의 보수에 광범위하게 적용되고 있으나 신뢰도가 다소 낮다는 단점이 있다. 시공 후에 바탕조정으로 인하여 완벽하게 시공된 것 같지만 구조체의 내구성 등은 회복되지 못하므로 시공 후 1~2년 정도에 다시 보수를 요하는 경우가 많다[3].

모르타르 보수공법의 내구성 부족문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 플라스틱 소재의 입체섬유를 보수공법에 적용하고자 한다. 입체섬유는 3차원적인 형태를 가지는 섬유로 의료분야나 의류산업에서는 적극적으로 사용되고 있다. 건설업계에서는 아직 적극적으로 사용되지는 못하지만 주로 콘크리트와 같은 시멘트 기반의 재료에 적용되어 강도와 내구성을 향상시키는데 활용된다. 또한 모르타르와의 결합을 강화하고 균열형성을 방지하며 구조적인 성능을 향상시켜 외부요인에 대한 저항력을 향상시키는 데 도움을 준다[4].

본 연구에서는 입체섬유가 적용된 콘크리트의

보수현장 적용 가능성을 검토하기 위해 물리적 특성을 분석하였으며 추가적으로 진동 및 소음에 대한 평가를 실시하였다. 물리적 특성을 분석하기 위해서 콘크리트 분야에서 가장 널리 사용되는 압축강도와 휨강도 실험을 수행하였으며 진동 및 소음에 대한 기본적인 분석을 하기 위해서 동탄성계수 측정 실험을 수행하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

2.1.1 입체섬유

본 연구에서는 Polyethylene을 원료로 하여 제작된 입체섬유를 사용하였고 모르타르가 원활히 입체섬유내부로 침투할 수 있도록 모레크기 이상의 섬유간격을 가지게 하였다. 입체섬유는 Fig. 1과 같이 Top sheet, Bottom sheet 및 Spacer layer로 구분되며 모르타르가 침투하는 면인 Top

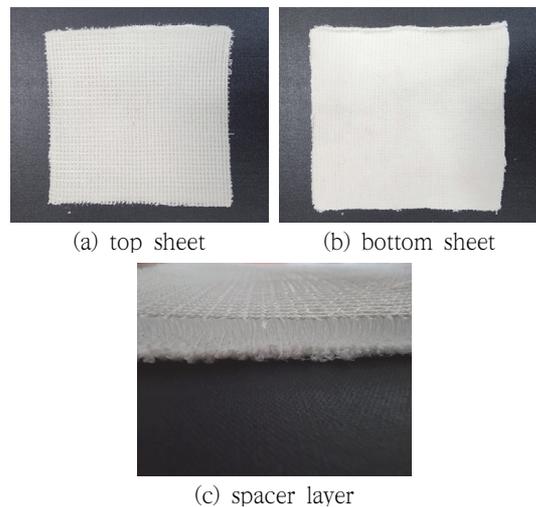


Fig. 1 3D-Textile

face sheet 5mm * 5mm의 간격을 가지고 직조되어 있고 Bottom face sheet의 경우 가로세로 1mm이하의 간격을 가지고 직조되어 모르타르의 누출을 막는다. 입체를 형성하기 위해 존재하는 Spacer layer의 경우 10mm의 길이를 가지고 있다. 그 외의 입체 섬유의 정보를 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Characteristics of 3D-Textile

Type of yarn	Tenacity (g/denier)	Elongation at break (%)	Specific gravity (g/cc)
Polyethylene	2.6 - 4.2	65%	0.91

2.1.2 시멘트

모르타르제작에 사용된 시멘트는 KS L 5201 (포틀랜드 시멘트)규격을 만족하는 보통포틀랜드 시멘트로 아래의 Table 2와 같은 화학적 특성을 가진다.

Table 2. Chemical composition of cement

Oxides (%)	Fe ₂ O ₃	4.37
	MgO	2.69
	Al ₂ O ₃	3.40
	SiO ₂	15.60
	SrO	0.10
	CaO	70.00
	K ₂ O	1.71
	SO ₃	1.45

2.1.3 잔골재

배합에 사용된 잔골재는 경북지역에서 채취한 강사를 이용하였고 비중 2.6, 흡수율 1.05의 값을 가진다. 잔골재는 사용되기 이틀 전 수분을 공급한 뒤 24시간 건조하여 표건 상태를 유지하여 사용되었다.

2.2 실험방법

2.2.1 배합비

배합비는 문헌 조사를 거쳐 모르타르가 입체 섬유 내부로 충분히 침투할 수 있는 유동성을 확보하고 내구성을 발휘할 수 있는 비율로 결정하여 사용했다[5]. 유동성을 위해 물-시멘트 비는 0.5로 일반적인 실험용 모르타르 배합보다 약간 높게 하였고 일정수준 이상의 강도 확보를 위해 시멘트-잔골재 비율을 1:1로 하여 최종적으로 시멘트:래:물의 비율은 1:1:0.5로 결정하였다.

2.2.2 시편제작

압축강도 및 동탄성계수 시험을 위한 시편은 Ø100mm * 200mm 크기의 실린더형 몰드를 사용하여 제작하였고, Fig. 2와 같이 미적용, 한 면 적용, 양면적용 세 가지 변수를 두었다. 휨강도 시험을 위한 시편은 100mm * 100mm * 400mm 크기의 직육면체 몰드를 사용하였다. 압축강도 시편과 마찬가지로 Fig. 3과 같이 미적용, 한 면 적용, 양면적용 세 가지 변수를 두었으며 모든 실험에 사용되는 시편은 입체섬유를 적용하지 않은 시편을 Control로 두었다.

모르타르는 기계식 배합을 이용했으며 건비빔을 1분간 진행하고 이후 배합수를 첨가하여 3분간 혼합하였다. 모르타르는 각 시험의 용도에 맞는

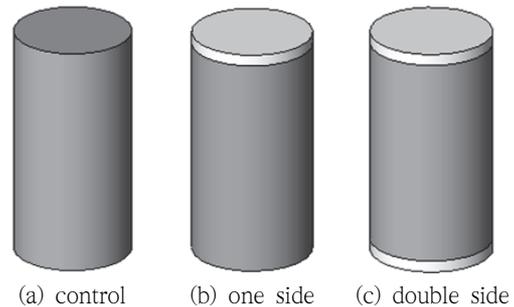


Fig. 2 Silander mold

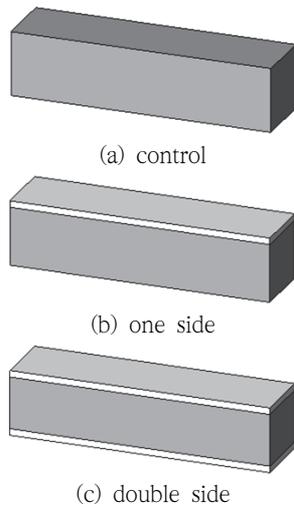


Fig. 3 Rectangular parallelepiped mold

몰드에 타설된 이후 24시간동안 기건 양생을 진행 하였고 이후 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 수중환경에서 목표한 기간 동안 수중양생을 실시하였다.

2.2.3 압축강도

압축강도 측정은 KS F 2405 (콘크리트의 압축 강도 시험 방법)을 기준으로 측정하였다. 양생 14일 28일이 경과된 모르타르를 대상으로 시험을 진행 하였으며 최대용량 2000kN의 만능재료시험기(Universal Testing Machine; UTM)를 활용하였다. 가력조건은 하중제어방식으로 재하속도는 150kN/min로 시험체가 파괴될 때 까지 진행하였다.

2.2.4 휨강도

휨강도 측정은 KS F 2408 (콘크리트 휨강도 시험 방법)에 따라 진행되었다. 압축강도와 동일하게 양생 14일, 28일이 경과된 직육면체 모르타르 시편을 대상으로 시험을 진행하였으며 최대용량 1000kN의 Actuator를 사용하였다. 가력조건은 변위제어방식으로 재하속도 2mm/min으로 진행하였다. 휨강도는 식(1)에 따라 계산되었으며, f_b 는 휨

강도(MPa), P 는 시험기가 나타내는 최대 하중(N), l 은 파괴 단면의 너비(mm), b 는 파괴 단면의 너비(mm), h 는 파괴 단면의 높이(mm)를 의미한다.

$$f_b = 3P/2bh^2 \quad (1)$$

2.2.5 동탄성계수

동탄성계수 측정은 KS F 2437(강제 공명 자치에 의한 콘크리트의 동탄성계수, 동 강성 계수 및 동탄성계수 및 동 푸아송비의 시험)의 종 방향 시험방법에 의해 진행되었다. 종방향 시험에 의한 동탄성계수는 식(2)와 같이 계산한다. 여기서, E_D 는 동탄성계수(MPa), W 는 공시체의 질량(kg), f_1 는 종진동의 1차 공명 진동수(Hz), L 은 공시체의 길이(mm), A 는 공시체의 단면적(mm^2)이다.

$$E_D = C_1 W f_1^2 \quad (2)$$

$$C_1 = 400 \times 10^{-5} \frac{L}{A} \quad (3)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도

재령 14일차 입체섬유 모르타르의 압축강도를 시험체 마다 2회씩 측정하여 Fig. 4에 나타냈다. 모든 종류의 시험체는 최대강도 이후에 급격히 파괴되는 취성적인 거동을 나타내며, 동일한 시험체 간에 유사한 하중-변위 곡선의 형상을 보여주는 것으로 나타났다. 입체섬유를 넣은 one side 및 double side의 경우 입체섬유를 넣지 않은 control에 비해 최대 강도 값이 나타나는 변위가 증가하

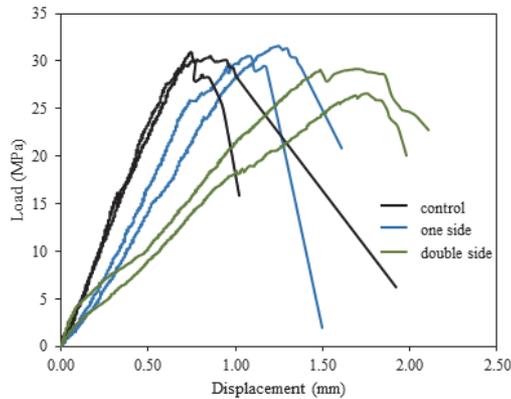


Fig. 4 Compression strength test results

는 경향을 보여준다. control의 경우 평균 0.75mm의 변위에서 최대 강도가 나타났으며 one side는 1.2mm, double side는 1.7mm에서 나타났는데 이는 control에 비해 60%, 160%증가한 수치이다.

이와 같은 결과 나타난 이유는 입체섬유적용부의 부분적인 압축강도 저하 때문인 것으로 판단된다. 압축강도 시험체에서 입체섬유가 적용된 부분은 적용되지 않은 부분과 다르게 단면의 일부분을 압축력이 상당히 낮은 섬유로 대체되어 있고, 섬유가 적용되지 않은 부분에 비해 강도를 발휘하는 시멘트 경화체가 낮은 비율로 있기 때문에 비교적 낮은 강도발현을 나타내고 압축에 의한 변위가 비교적 쉽게 발생한 것으로 판단된다.

이러한 경향은 한쪽 면에만 입체섬유가 적용된 one side 시편에 비해 양면에 적용된 double side 시편에서 더 크게 나타났으며 control시편과 one side 시편의 변위 값 차이가 0.45mm, one side 시편과 double side시편의 변위 값 차이가 0.5mm를 나타내는 것으로 볼 때 두께 10mm의 입체섬유를 적용시 한 면 당 0.45mm - 0.5mm의 추가적인 변위를 발생시키는 것으로 사료된다.

Table 3에 재령 14일과 28일의 입체섬유 적용 모르타르의 최대압축강도를 나타냈다. 모든 시편에서 재령일이 14일에서 28일로 증가함에 따라

Table 3. Maximum compressive strength

	14일	28일
Control	31.3	41.7
One side	31.7	37.1
Double side	28.5	33.1

압축강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 가장 큰 증가율을 나타내는 시편은 control이며 33%의 증가율을 나타냈다. 그 다음으로 one side 시편이 17%, double side 시편이 16%의 증가율을 보였다. 재령일의 증가가 압축강도의 상승을 일으키는 이유는 시멘트 클링커의 지속적인 수화 반응에 의해 경화체가 생겨난 결과이며 다른 시편에 비해 시멘트의 포함량이 가장 큰 control에서 가장 높은 강도 상승을 나타낸 것으로 판단된다.

14일의 강도에서는 control과 one side 시편사이의 강도차이는 크게 발생하지 않았으며 double side 시편은 약 3MPa의 강도저하를 나타냈다. 28일의 강도에서는 control이 41.7 MPa로 가장 높은 압축강도를 나타냈고 one side 시편이 37.1MPa, double side 시편에서 33.1MPa 순으로 압축강도가 나타났다. 전체적으로 입체섬유가 적용되는 면의 개수가 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 나타냈으며 28일 재령기준으로 한 면당 약 4MPa의 강도감소를 보였다.

이와 같은 결과가 나타난 원인은 섬유가 적용된 부분에서 선행적인 모르타르의 파괴가 발생했기 때문인 것으로 사료된다. 섬유에 의해 낮은 압축강도를 나타내는 부분에서 선행적으로 파괴를 나타내고 가장 외측의 모르타르는 시편 외부로 탈락되어 단면의 손실을 가져오기 때문에 입체섬유가 적용되지 않은 부분으로 고른 하중전달을 하지 못하고 집중하중 및 편심하중을 전달하여 보다 빠른 파괴에 이르게 한 것으로 판단된다. 단면손실에 의한 조기파괴는 양면적용 시에 더욱 큰 영향을 미치기 때문에 더욱 낮은 강도를 나타낸 것으로 사료된다.

3.2 휨강도

재령 14일차 입체섬유 모르타르의 휨강도를 시험체 마다 1회 측정하여 Fig. 5에 나타냈다. 모든 시험체는 최대강도 이후에 취성적으로 파괴되는 양상을 띠었고 이는 압축강도 실험 때 보다 더욱 강하게 나타났다. 압축강도 실험과 마찬가지로 최대강도가 나타나는 변위가 입체섬유를 넣는 경우가 크게 나타나았는데 control이 1.9mm에서 최대강도나 가나타난 반면 one side에서 2.3mm, double side에서 3.6mm의 값을 나타냈다.

위와 같은 결과는 우선 섬유적용부의 낮은 압축강도에 의한 변위 발생으로 추정된다. 본 연구에서 실시한 휨강도 시험은 2개의 받침점과 1개의 가력점으로 이루어져 있는데 휨 파괴가 발생하기 전까지 각 지점의 섬유적용부에서 압축에 의한 변위가 발생한 것으로 사료된다. 또한 입체섬유의 재료인 Polyethylene은 모르타르에 비해 매우 높은 인장력을 가진 재료로 추가 인장력에 의한 변위 상승을 고려해 볼 수 있다.

Table 4에 재령 14일과 28일의 입체섬유 적용 모르타르의 최대 휨강도 결과를 나타냈다. 휨 강도 시험은 압축부와 인장부가 구분 되는 시험이므로

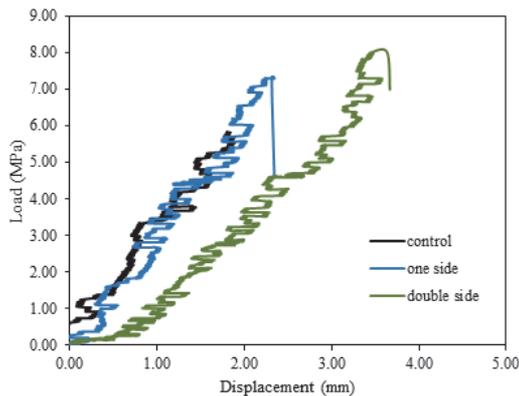


Fig. 5 Flexural strength test results

Table 4. Maximum bending strength (MPs)

	14일	28일
control	5.94	9.61
one side	7.15	11.28
double side	8.01	11.47

로 입체섬유가 적용된 시편의 경우 방향이 고려되어야 한다. control과 double side 시편의 경우 위아래가 대칭이므로 방향이 고려되지 않았고 one side의 경우 입체섬유가 적용된 면이 인장부에 위치하도록 하였다.

모든 시편은 재령일이 증가할수록 강도도 함께 증가하는 경향을 나타냈다. control의 경우 재령 14일에 비해 28일 강도가 3.67MPa, one side는 4.13MPa, double side는 3.46MPa의 강도 상승을 보여줬다. 재령 28일의 강도에서 입체섬유가 적용된 모르타르 시편은 control에 비해 항상 높은 강도를 나타냈으며 one side 시편은 17%, double side 시편은 19%의 향상된 값을 보여줬다.

이와 같은 결과는 입체섬유의 높은 인장력에 의한 것으로 가장 높은 인장력을 받는 시편 하부에서 입체섬유가 저항하여 강도가 상승한 것으로 사료된다. 또한 단면적용과 양면 적용된 시편간의 휨강도 차이는 0.19MPa로 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 확인되는데 이는 압축부에 추가적으로 입체섬유가 적용되어도 추가적인 강도상승은 크지 않음을 의미한다.

3.3 동탄성계수

입체 섬유 적용 모르타르의 공명진동 수 및 동탄성계수 측정결과를 Table 5에 나타냈다. 측정결과에서 입체섬유가 적용되지 않은 control에서 동탄성계수가 가장 높았고 one side, double side순으로 나타났고 one side는 2318.41MPa로 control

Table 5. Resonant frequency and dynamic elasticity coefficient results (MPa)

	공명진동수	동탄성계수
control	2740	2564.86
one side	2600	2318.41
double side	2162	1614.98

에 비해 9.61%, double side는 37.03% 감소된 값을 나타내는 것으로 확인되었다.

이와 같은 결과는 모르타르에 비해 강성이 낮은 입체섬유가 혼입되었고 추가적으로 모르타르의 압축강도가 낮아졌기 때문인 것으로 판단된다 [6,7]. 동탄성계수는 동결융해에 의한 내구성 손상을 판단하는 지표로 사용되기도 하고 압축강도를 추정할 수 있는 지표로도 사용 되는데, 일반적으로 동탄성계수의 하락폭이 크면 내구성이 크게 손상되었다고 판단되고 값의 크기를 비교하여 낮은 값을 가진 콘크리트가 비교적 낮은 강도를 지닌다고 판단되기도 한다.

하지만 김경우의 동탄성계수와 소음발생 관계에 관한 연구에 의하면 낮은 동탄성계수는 낮은 충격음 전달을 나타내어 소음을 저감하는 등 긍정적인 성능을 나타낼 수 있음을 시사하고 있다[8].

4. 결론

본 연구에서는 입체섬유를 적용한 시멘트 모르타르의 물리적 특성에 관한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

모르타르에서 입체섬유의 적용은 압축변위의 발생을 증가시키고 압축강도를 저하시키는 것으로 나타났는데 이는 입체섬유가 적용된 모르타르부분의 시멘트 경화체 부족에 기인한 변위 발생 및 편심에 의한 압축강도 저하로 사료된다.

압축강도 결과와 반대로 휨강도 시험에서는 입

체섬유의 적용이 모르타르 시편의 휨강도를 상승시키는 것으로 나타났는데 이는 입체섬유가 모르타르에 비해 높은 인장력을 가지기 때문인 것이며 이러한 인장력 강화 효과는 압축부에 적용되었을 때보다 인장부에 적용되었을 때 더 큰 효과를 나타냈다.

입체섬유의 적용은 모르타르의 동탄성계수를 낮아지게 하는 효과를 나타냈으며 이는 입체섬유의 낮은 강성에 의한 것으로 사료되며 낮은 동탄성계수는 소음 저감에 효과적일 것으로 판단되며 아파트의 층간소음이나 소음 저감이 필요한 상업시설에 건설재료로 적용 시 효과적일 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립금오공과대학교 2021년 교수연구년 제에 의하여 연구된 실적물이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 권성준, 송하원, and 변근주. 콘크리트학회논문집 19.3 (2007).
- [2] 김주현, 박정준, and 김종규. “탄소 제로화를 위한 혁신 기술 연구: 건설 및 콘크리트 산업에서의 이산화탄소 저감 방안 동향.” 한국산업융합학회 논문집 25.4 (2022): 549-563.
- [3] 이진철, et al. 한국건설순환자원학회논문집(구) 13 (2011).
- [4] 고희변, and 이진섭. 대한건축학회 논문집-구조계 16.11 (2000).
- [5] 문태철. 그라우트 모르타르 배합조건에 따른 물리적 성질의 특성. Diss. 조선대학교, 2009.
- [6] 한상훈, and 박우선. 한국해안·해양공학회논문집 21.6 (2009).
- [7] 한상훈, et al. 콘크리트학회논문집 13.6 (2001).
- [8] 김경우, 정갑철, and 손장열. 한국소음진동공학회논문집 18.8 (2008): 886-895.

(접수: 2024.04.18. 수정: 2024.04.30. 게재확정: 2024.06.07.)