

다양한 온도조건에서 섬유를 혼입한 콘크리트의 내충격 특성

최원석¹, 이형준^{2*}

¹충청남도개발공사, ²국립한밭대학교 건설환경공학과

Impact Resistance Characteristics of Fiber Reinforced Concrete Under Various Temperature Conditions

Won-Seok Choi¹, Hyung-Joon Lee^{2*}

¹Chungcheongnamdoo Development Corporation

²Division of Civil & Environmental Eng., Hanbat National University

요약 구조물은 사용 하중하에서 요구되는 성능뿐만 아니라 극한상황에서도 적절한 안전성 및 내구성이 요구되고 있다. 본 연구에서는 다양한 온도조건과 섬유혼입률에 따른 섬유보강 콘크리트의 내충격성을 분석하기 위해 충격기의 자유낙하에 의한 저속 충격실험을 수행하였다. 섬유는 PVA(Polyvinyl alcohol) 섬유와 마이크로 강섬유를 사용하였고, 섬유혼입률은 0.0 %, 0.5 %, 0.75 % 및 1.0 %, 온도조건은 -70 ℃, -35 ℃, 0 ℃, 35 ℃, 70 ℃ 및 140 ℃로 하였다. 저속 충격실험으로부터 최대 충격력과 지속시간을 측정하고 이로부터 충격 흡수에너지와 연성지수를 계산하여 섬유의 종류, 섬유혼입률 및 다양한 온도조건에서 콘크리트의 내충격 특성을 비교분석 하였다. PVA 섬유보강 콘크리트의 내충격성은 보통 콘크리트보다 섬유의 가교 역할로 인하여 모든 온도 조건에서 향상되는 것으로 나타났다. 마이크로 강섬유 콘크리트 실험체는 보통 콘크리트나 다른 복합재료 실험체보다 높은 기본강도를 가지고 높은 연성지구를 나타내므로 내충격성이 우수한 것으로 나타났고, 저온에서는 섬유혼입률이 증가할수록 연성지수가 증가하는 것으로 나타났으며, 고온 조건에서는 강섬유의 정착성능 저하로 혼입률 증가에 따른 내충격성 증가효과가 감소하는 것으로 나타났다.

Abstract In this study, low-velocity impact testing was conducted to analyze the impact resistance of fiber-reinforced concrete containing different fiber contents at various environmental temperatures. Polyvinyl alcohol (PVA) or micro steel fiber contents were set at 0.0 %, 0.5 %, 0.75 %, or 1.0 %, and testing was conducted at -70, -35, 35, 70, and 140°C. Maximum impact force and the durations of low-velocity impacts were measured, and impact absorption energies and ductility indices were calculated to compare and analyze the impact resistance characteristics of concrete according to fiber type, mixing rate, and temperature. PVA fiber-reinforced concretes had lower basic strengths than concrete, but heating improved impact resistance. On the other hand, micro steel fiber-reinforced concrete had higher basic strengths than concrete, and their impact resistances were excellent at all fiber contents and temperatures. However, impact resistance decreased with heating due to a deterioration in the fixing performance of micro steel fibers.

Keywords : Fiber-Reinforced-Concrete, Impact-Resistance, Low-Velocity Impact, Temperature, Ductility-Index

*Corresponding Author : Hyung-Joon Lee(Hanbat National Univ.)

email: leehj@hanbat.ac.kr

Received January 8, 2024

Accepted February 6, 2024

Revised February 5, 2024

Published February 29, 2024

1. 서론

최근 설계 및 시공 기술의 발전에 따라 다양한 토목 구조물은 장·대형화가 이루어지고 있고, 극한상황에서의 하중으로 인해 발생하는 인명 및 재산 피해를 예방하기 위해 발전된 설계 기술과 다양한 설계 방법이 적용되면서 구조물은 하중으로부터 안전을 보장받고 있다. 일반적으로 구조물은 사용 하중 하에서 요구되는 성능 이외에도 극한상황에서 발생하는 하중에 대해서도 적절한 안전성과 내구성이 요구되고 있다[1].

장대화 및 대형화된 구조물에 대해 극한상황에서 발생하는 여러 가지 문제를 해결하기 위해 다양한 보강재료 연구가 진행되고 있고, 섬유보강 콘크리트가 신소재 기술의 발전과 함께 보통 콘크리트의 역학적 성질을 개선 및 보강하기 위해 적용되어 왔다. PVA (Poly-vinyl alcohol), 강(Steel), 유리, 탄소 섬유 등은 콘크리트의 내마모성 및 내구성 증진, 충격하중과 반복하중에 대한 저항성 증가 등 여러 장점을 갖고 있다[2].

극한의 온도상태에서 온도 변화가 콘크리트 재료의 거동 특성에 영향에 대한 연구는 미미한 실정이다. 기후변화에 관한 정부간 협의체 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)의 5차 평가서에 따르면, 지구 지표 온도는 지난 30년 동안 약 0.85(0.65-1.06) °C 증가하였으며, 이러한 지구 지표의 온도상승은 대다수의 육지 지역에서의 극한 고온 현상의 발생과 간헐적으로 발생하는 겨울의 극한 저온 현상의 증가할 것으로 추정하고 있다[3].

세계적으로 발생하는 지구 온난화로 인한 기상이변을 고려할 때, 다양한 온도 상태에서의 재료의 거동 특성을 파악하는 것은 중요한 부분이라 할 수 있다. 본 연구에서는 극한 저온과 고온의 극한 온도에서 충격하중을 받는 섬유보강 콘크리트의 거동특성을 실험적으로 분석하였다.

2. 섬유보강콘크리트의 실험변수

2.1 연구배경 및 실험변수

섬유보강 콘크리트는 과거부터 활발하게 활용되고 있는 재료로서 고대에는 석회 모르타르와 석회에 잘게 썰린 짚 또는 말총을 사용하여 취성재료의 보강재료로 사용하였다. 1900년대 이후 석면섬유를 혼입하는 섬유보강 콘크리트의 개념이 시작되었다. 추후 석면섬유의 인체 유해성으로 인하여, 대체 섬유의 개발이 진행되었으며, PVA, 강, 유리, 탄소 등 다양한 섬유 재료가 콘크리

트의 보강재료로 활용되고 있다. 콘크리트는 토목 및 건설 현장에서 널리 쓰이는 구조 재료로서 시멘트와 모래, 골재, 물의 적절한 혼합으로 얻어지는 복합재료로서, 섬유보강 콘크리트는 각 재료의 이방성을 활용하여, 설계의 유연성을 가지며, 구조물의 안정성을 확보하기 위해 활용되고 있다.

섬유보강 콘크리트의 메커니즘은 섬유와 매트릭스의 부착을 통해 외부 하중에 의해 발생하는 균열의 진전을 방지하며, 섬유 재료의 가교역할로 콘크리트의 취성적 파괴특성을 연성적 파괴 거동으로 유도 시킨다. Fig. 1은 보통 콘크리트와 섬유보강 콘크리트의 균열 발생 시 모습을 나타낸 것으로, 그림에서 보느냐와 같이 섬유는 콘크리트의 국부적 균열의 발생 및 진전을 억제한다.

섬유보강 콘크리트의 내충격성에 대한 국내 연구로는 Min 등[1]은 저속충격하중을 받는 FRP쉬트와 강섬유로 보강한 콘크리트의 휨과 편칭 파괴 거동 특성을 분석하였으며, Yoo 등[4]은 보강재료 외부 보강된 강섬유 콘크리트 슬래브의 내충격성을 평가를 하였다. 국외 연구로는 Shavari[5]와 Manolis 등[6]은 PVA 섬유 콘크리트 슬래브의 충격 거동을 실험적으로 평가하였으며, Mohammadi 등[7]은 강섬유 콘크리트의 혼입률과 섬유 길이에 따른 내충격성 평가를 위해 자유낙하 충격실험을 수행하였다. 온도 조건에 따른 섬유보강 콘크리트의 내충격성 관한 국내외의 연구는 미비한 실정이다[8-10].

본 논문에서는 기존 구조물 및 신규 구조물의 강도 및 강성 보강을 위하여 사용되고 있는 섬유보강 콘크리트를 대상으로 온도 변화에 따른 내충격성을 규명하고자 하였다. 동일한 섬유혼입률로 하였을 때 PVA와 강섬유의 혼입효과를 분석하기 위해 섬유혼입률을 동일하게 0~1.0%사이의 4종류, 온도조건을 -70 ~ 140 °C사이의 6가지로 실험변수를 선정하였고, 충격실험은 질량체의 자유낙하에 의한 저속충격시험을 수행하여 섬유종류, 섬유혼입률 및 온도 조건에 따른 섬유보강콘크리트의 내충격 성능을 분석하였다.

2.2 복합재료 선정 및 실험체 제작

일반적으로 PVA, 강, 유리, 석면, 합성, 천연 섬유 등이 섬유보강콘크리트에 활용되고 있으며, 본 논문에서는 온도 변화에 따른 섬유보강 콘크리트의 내충격성을 확인하기 위하여, 화재에 대한 저항성, 낮은 탄성계수 등의 단점을 가진 PVA 섬유와 온도 및 건조수축 철근의 대체용으로 활용되고 있는 마이크로 강섬유를 선정하여 실험을 진행하였다. PVA 섬유는 콘크리트에 혼입 시 화학적,

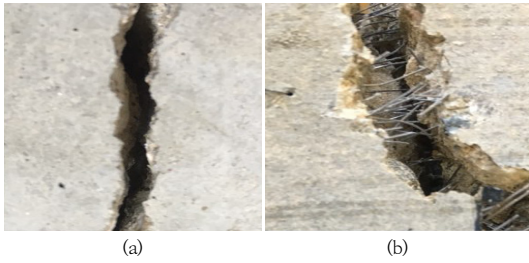


Fig. 1. Crack section of concrete
(a) Plain concrete (b) Fiber reinforced concrete



Fig. 2. Fiber reinforced materials
(a) PVA fiber (b) Micro steel fiber

물리적으로 우수한 접착성을 가지며, 탄성계수에 비해 높은 인장강도를 가지고 있다. 또한 강성이 낮아 분산성이 탁월하다. 마이크로 강섬유는 콘크리트에 혼입 시 균열 진전 저항성과 에너지 흡수특성 등을 가지고 있다.

본 연구에서 사용한 PVA 섬유와 마이크로 강섬유는 Fig. 2와 같은 형상을 갖고 있으며, 섬유의 재료적 특성은 Table 1과 같다. 실험을 위하여 제작한 섬유보강 콘크리트 실험체는 혼입률에 따른 특성을 분석하기 위하여 섬유마다 3가지 조건의 혼입률을 적용하였으며, Table 2에는 각 실험체의 섬유 혼입률과 시험체 기호를 나타냈다. 섬유보강콘크리트의 워커빌리티를 확보하기 위하여 S사의 액상형 폴리카르보나트 고성능 AE감수제를 0.7~1.3 % 첨가하였고, 굵은골재는 최대치수가 10 mm 인 부순자갈, 잔골재는 강모래를 사용하였으며, 보통 콘크리트의 배합표는 Table 3과 같다.

2.3 섬유보강 콘크리트의 강도특성

섬유보강 콘크리트의 기본강도 특성을 확인하기 위하여 콘크리트 압축강도 시험방법(KS F 2405)에 따라 실린더 형 $\varnothing(100 \times 200)$ mm의 실험체를 제작 28일 재령에서의 압축강도를 측정하였으며, 중앙점 재하법에 따른 콘크리트 휨강도 시험방법(KS F 2408)에 따라 $(50 \times 50 \times 150)$ mm의 실험체를 제작하여 휨강도를 측정하였다.

Table 1. Properties of fiber materials

Materials	Density (g/m ³)	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile Strength (MPa)	Type
PVA	1.3	0.04	12.1	1,597	Fiber
Micro Steel	7.8	0.2	12	2,700	Fiber

Table 2. Fiber content and notation

Material	Details	Fiber content (%)	Notation
Plain	Normal Concrete	-	NC
PVA	Poly-Vinyl Alcohol	0.50	P-0.5
		0.75	P-0.75
		1.00	P-1
Micro Steel	Micro Steel	0.50	M-0.5
		0.75	M-0.75
		1.00	M-1

Table 3. Mix proportions of concrete

W/C (%)	Slump (mm)	S/a (%)	Unit content(kg/m ³)			
			W	C	S	G
47	100	48	170	362	836	923

Table 4. Strength test results of composite concrete

Specimen	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)
NC	24.41	3.31
P-0.5	9.11	4.24
P-0.75	7.15	4.61
P-1	6.05	3.25
M-0.5	28.50	7.29
M-0.75	27.17	8.63
M-1	25.49	8.17

일반 및 섬유보강 콘크리트의 압축강도와 휨강도의 실험결과를 Table 4에 나타낸 것과 같다. 무근콘크리트의 압축강도와 휨강도는 각각 24.41 MPa 및 3.31 MPa 이고, 마이크로 강섬유를 0.5 % 혼입한 콘크리트의 압축강도와 휨강도는 각각 28.50 MPa, 8.63 MPa 로 측정되었다. PVA 섬유를 0.5 % 이상 혼입한 경우에는 압축강도와 휨강도는 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 PVA 섬유혼입률이 증가하면 섬유 뭉침 현상을 유발하여 품질이 저하되는 것으로 판단된다. 다른 연구에 따르면 PVA 섬유는 0.3 %로 혼합하였을 때 부작용을 최소화하면서 최대의 효과를 보이는 것으로 알려져 있다[11].

3. 내충격성 실험

3.1 실험 개요

내충격성 실험은 자유낙하에 의한 저속 충격 실험으로서 실험체의 지지 조건, 낙하 무게, 힘 등 여러 인자에 영향을 받는다[12]. 이러한 실험체에 적용되는 영향을 최소화하기 위하여, 복합재료의 자유 낙하 충격 실험 ASTM D 7136과 플라스틱 천공 충격 거동 측정실험 KS M ISO 6603의 규정을 적용하여, 실험체의 2방향을 지그(jig)를 통해 고정하였다. 실험체의 크기는 (100×150×20) mm로 제작하여 충격실험을 수행하였다. Fig. 3은 ASTM D 7136의 실험체 크기 규정에 따라 제작된 지그와 실험체 사진을 보여주고 있다.

3.2 내충격성 실험장치

자유낙하 충격실험은 H대학교 공동실험실습관에서 보유하고 있는 Instron사의 CEAST 9350 만능형 충격 실험기로 실시하였다. 실험체에 적용되는 초기 충격 에너지는 100 J이며, 총 중량이 20.88 kN이고 지름이 12.7 mm인 반구형 낙하 충격기(striker)를 낙하시키는 자유 낙하 실험을 진행하였다. 실험에 적용된 상온 및 고온은 충격실험기의 히터를 활용하여 온도를 유지하였으

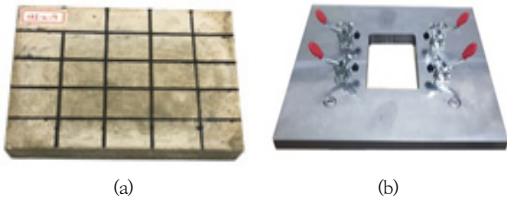


Fig. 3. Specimen and experimental jig
(a) Specimen (b) Support jig

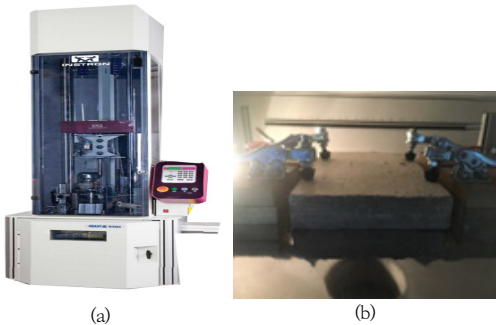


Fig. 4. Low velocity impact test
(a) Testing machine (b) Mounted specimen

며, 액화질소를 활용하여 저온상태를 유지하였다. Fig. 4는 실험 장비 및 실험체 설치한 모습을 보여주고 있다. 실험체에 적용되는 충격력은 낙하 충격기의 질량과 속도에 따라 설정되며, 초기 충격 에너지는 Eq. (1)과 같이 초기 속도와 질량, 초기 속도는 Eq. (2)와 같이 중력 가속도와 낙하 높이에 의해 각각 계산된다. 초기 설정 에너지(E_i)의 크기에 따라 초기 속도(v_i)는 2.82 m/s, 낙하 높이(H) 406 mm에서 실험을 수행하였다.

$$E_i = \frac{1}{2}mv_i^2 \quad (1)$$

$$v_i = \sqrt{2gH} \quad (2)$$

여기서, m 은 충격기의 질량이다.

3.3 내충격성 실험

실험에서 관성력의 영향을 최소화하기 위해 낙하 충격기의 로드 셀(load cell)에 대해 교정을 실시하였고, 실험장비의 데이터 자동획득장치(data acquisition system)에 의해 800kHz의 Sampling rate로 충격력 데이터 $F(t)$ 를 획득하였다. 획득된 충격력 데이터를 활용하여, 시간 이력에 따른 속도는 Eq. (3), 실험체의 흡수에너지는 Eq. (4), 낙하 충격기의 변위는 Eq. (5)로 각각 계산하였다.

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \quad (3)$$

$$E_{ab}(t) = \frac{mv^2}{2} - \frac{1}{2}m \left(v_i - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right)^2 \quad (4)$$

$$\delta(t) = \delta_i + v_i t + \frac{1}{2}gt^2 - \int_0^t \left(\int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad (5)$$

실험에서 얻은 충격흡수에너지는 초기에너지와 전파에너지의 합으로 계산되며, 온도에 따른 실험체의 내충격성능은 Eq. (6)에 의해 계산되는 연성지수(Ductility Index, DI)의 비교분석으로 분석하였다[13].

$$DI = \frac{E_p}{E_i} \quad (6)$$

여기서, E_i 는 초기 에너지이며, E_p 는 전파에너지이다. E_i 는 최대 충격하중이 발생하기 전까지의 충격 흡수에너지이고 E_p 는 최대 충격하중이 발생한 후 실험체의 파괴 시까지 흡수된 충격 에너지이다. Fig. 5는 충격 시험에서 획득할 수 있는 초기에너지와 전파에너지 구역을 그래프로 표현한 것이다.

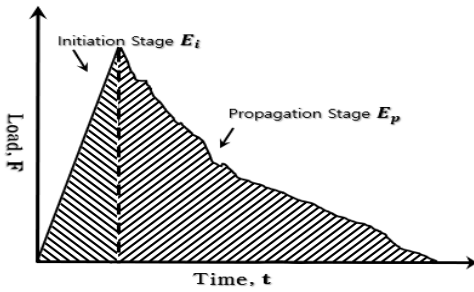


Fig. 5. Energy of two stage curve obtain in impact Testing

4. 실험결과 및 분석

보통콘크리트와 섬유혼입률을 3가지로 변화시킨 PVA 섬유와 마이크로 강섬유 콘크리트에 대해 -70, -35, 0, 35, 70, 140 ℃ 등 6가지의 온도조건에 따라 내충격 실험을 실시하였다.

보통 콘크리트와 섬유보강 콘크리트는 자유 낙하 충격 실험에 의한 파괴 형상이 다르게 나타나며, 온도가 35 ℃ 이고 섬유혼입률이 0.5 %인 경우의 파괴 형상은 Fig. 6 에 나타낸 것과 같다. 보통콘크리트에서는 콘크리트가 완전히 파괴되어 시험체가 여러 개의 조각으로 분리되는데 비해 섬유보강콘크리트에서는 균열의 형상은 비슷하나 섬유의 브릿지(bridge) 작용에 의해 완전히 분리되지 않은 것으로 나타났다.

Table 5에는 섬유보강 콘크리트에 대해 충격시험을 수행하여 얻은 최대 충격력과 초기에너지와 전파에너지로부터 계산된 연성지수를 나타냈다[10,14].

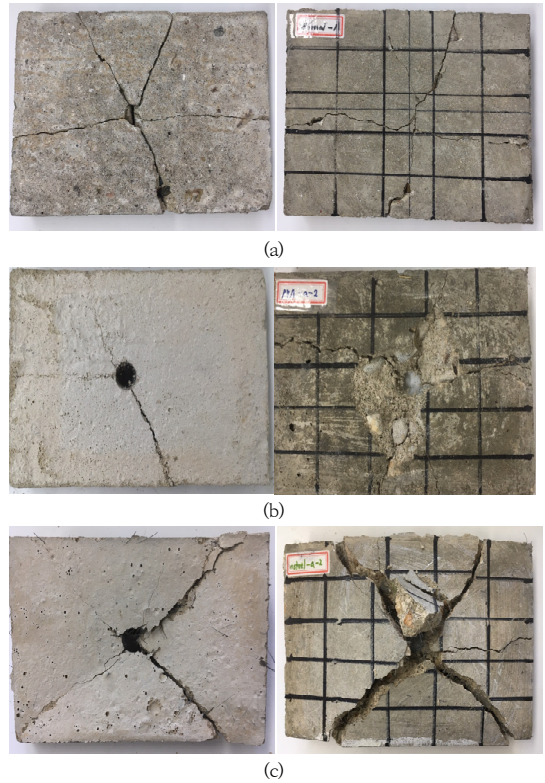


Fig. 6. Specimen state after low-velocity impact test
 (a) Plain con'c: Contact side(left), Other side(right)
 (b) PVA fiber: Contact side(left), Other side(right)
 (c) Steel fiber: Contact side(left), Other side(right)

4.1 온도변수에 따른 최대 충격력 변화

Fig. 7과 8은 다양한 온도조건하에서 실험을 수행하여 얻은 섬유혼입률이 1.0 %인 PVA 섬유콘크리트와 마이크로 강섬유 콘크리트 실험체의 하중-시간과의 관계를 보여주고 있다.

Table 5. Impact test results of composite concrete

Result	Temperature (C°)	NC	PVA			Micro steel		
			P-0.5	P-0.75	P-1	M-0.5	M-0.75	M-1
Peak Force, F (N)	140	5089.81	2749.34	3589.66	2340.95	5794.77	6381.30	5191.32
	70	6181.09	3225.90	3882.92	2977.75	5853.99	6970.64	6031.64
	35	6570.23	3020.05	4218.48	3067.99	6361.56	8050.64	7630.49
	0	6511.01	4475.08	4252.32	4601.98	8470.80	7661.50	9330.85
	-35	7086.26	5422.55	3928.04	3400.73	7794.04	8775.34	9889.18
	-70	8028.08	5687.62	5053.15	4379.21	9550.80	13385.78	11586.72
Ductility Index, DI	140	1.10	4.97	2.53	2.40	7.00	5.89	7.39
	70	1.61	5.32	3.00	2.98	8.37	12.09	11.02
	35	1.19	7.63	5.32	5.36	8.38	6.62	7.39
	0	0.83	3.92	2.50	1.94	4.01	5.07	6.73
	-35	1.08	3.77	4.05	2.03	3.93	3.37	4.39
	-70	1.21	3.38	3.08	2.57	4.98	4.47	4.71

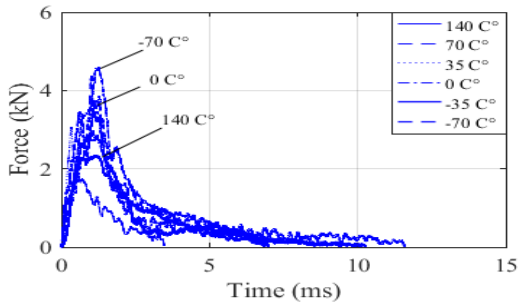


Fig. 7. Force-time result of P^{-1} specimen under various temperature condition

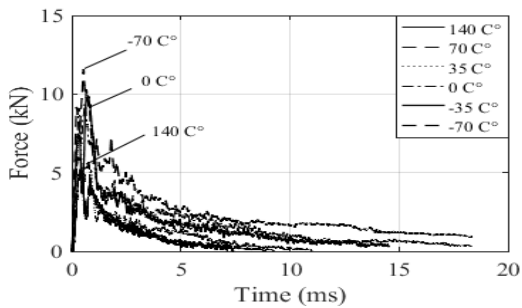


Fig. 8. Force-time result of M^{-1} specimen under various temperature condition

Table 5 와 Fig. 7에서 보는 바와 같이 보통 콘크리트와 섬유보강 콘크리트 모든 경우에 최대충격력은 온도가 높으면 감소하고 온도가 낮으면 증가하는 경향을 나타냈다. 온도가 낮아지면 최대충격력이 증가하는 현상은 저온에서는 실험체 내부의 수분 빙결 현상으로 인하여 발생하며, 고온에서는 실험체 내부의 수분 증발 현상으로 인하여 콘크리트 강도가 저하되어 최대 충격력이 감소하는 것으로 알려져 있다.

PVA 섬유콘크리트에서는 35 °C 대비 140 °C에서 최대 충격력은 P-0.5 실험체는 약 8.9 %, 저온 -70 °C에서는 P-0.5는 약 88 %, P-0.75는 약 19.8 %, P-1에서 약 43 % 증가하는 것으로 나타났다. 마이크로 강섬유 혼입률이 0.5 %인 콘크리트(M-0.5)에서는 최대충격력은 고온인 140 °C에서 약 8.9 % 감소하고, 저온인 -70 °C에서는 약 50.1 % 증가하는 것으로 나타났다.

강섬유콘크리트는 PVA 섬유콘크리트 실험체보다 온도변화 및 섬유혼입률에 따라 최대 충격력의 변화가 크게 나타났으며 이것은 강섬유가 PVA섬유에 비해 보강효과가 우수함을 나타내며, 또한 강섬유 콘크리트에서는 저온보다는 고온에서 강섬유혼입에 따른 충격력의 증가

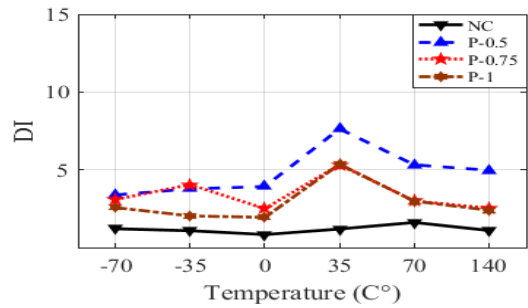


Fig. 9. Ductility index of PVA fiber concrete under various temperature

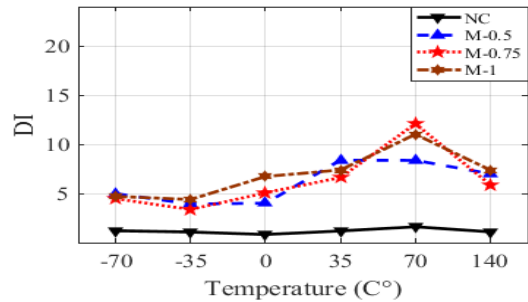


Fig. 10. Ductility index of micro steel fiber concrete under various temperature

효과가 작게 나타나는데 이는 온도가 높아지면 강섬유의 정착성능 저하로 인해 발생하는 것으로 알려져 있다[15].

4.2 온도변수에 따른 연성지수의 변화

Fig. 9는 보통 콘크리트와 PVA 섬유콘크리트의 온도 조건에 따른 연성지수(DI)의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 PVA 섬유콘크리트는 본 실험에서 적용된 모든 온도 조건에서는 보통 콘크리트보다 연성지수가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 PVA 섬유의 가교 역할로 인해 실험체에 가해지는 충격 시간이 증가함으로 인해 연성지수가 증가하는 것으로 판단된다. 섬유혼입률이 0.5 %인 경우에 상온인 35 °C인 경우에 연성지수는 5.32이고, -70 °C인 일 때 3.08, 140 °C일 때 2.53이었다. 이것은 본 실험에서 적용한 섬유혼입률에서는 PVA 섬유의 보강효과가 작게 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 마이크로 강섬유콘크리트의 온도조건에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 온도가 -70 °C에서 70 °C까지 변하는 구간에서는 온도가 높아짐에 따라 연성지수가 약간 증가하고, 140 °C로 온도가 증가하면 연성지수가 감소하는 경향을 보였다.

다양한 온도조건에서의 강섬유콘크리트의 연성지수는 PVA 섬유콘크리트의 연성지수에 비해 상온이나 고온의 조건에서는 약 2배 이상 크게 나타났고, 저온 조건에서도 약 1.5배 큰 것으로 나타났다.

4.3 섬유혼입률에 따른 연성지수의 변화

Fig. 11은 PVA 섬유콘크리트 실험체의 혼입률에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것이다. PVA 섬유 혼입률 0.5 % 에서 가장 큰 연성지수를 보였고, 섬유혼입률이 0.5 % 이상인 경우에는 섬유혼입률이 증가할수록 연성지수가 감소하는 경향을 보였다. 본 실험에서는 실험의 여건상 시험체를 작게 제작하였기 때문에 섬유의 분산성이 저하되어 PVA 섬유혼입률 0.5 %일 때 가장 큰 연성지수를 보인 것으로 판단된다.

Fig. 12는 마이크로 강섬유콘크리트의 섬유혼입률에 따른 연성지수를 나타낸 것으로 고온에서는 섬유혼입률 0.5 % 일 때 가장 큰 연성지수를 보였다. 저온에서는 섬유혼입률이 증가할수록 연성지수가 증가하고 고온 조건에서는 연성지수가 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이는 저온 조건에서 상온이나 고온 조건보다 섬유의 혼입이 콘크리트의 충격에너지 흡수능력을 향상시키는 것으로 판단된다.

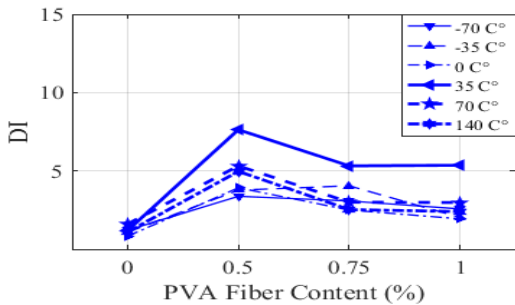


Fig. 11. Ductility index according to PVA fiber content

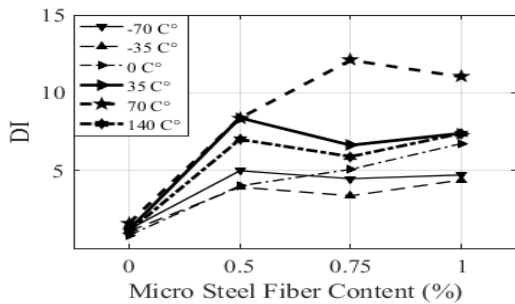


Fig. 12. Ductility index according to micro steel fiber content

5. 결론

본 연구에서는 섬유보강 콘크리트의 내충격 특성을 분석하기 위하여 섬유혼입률을 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 온도를 -70 °C, -35 °C, 0 °C, 35 °C, 70 °C, 140 °C로 하여 자유낙하 저속충격실험을 수행하였다. 실험에서 최대 충격하중과 지속시간을 측정하고 총 흡수에너지와 연성지수를 계산하여 내충격성을 비교분석하였으며, 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 보통콘크리트와 섬유보강 콘크리트 모든 경우에 고온에서 저온으로 감소할 때 실험체의 충격 흡수에너지와 최대 충격력은 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 저온에서 수분의 빙결 현상에 의해 발생하는 것으로 판단된다.
- 2) 섬유보강 콘크리트의 모든 실험체에서 섬유의 가교 역할로 인하여 큰 연성지수를 나타냈으며, 강섬유 콘크리트의 온도조건에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 온도가 -70 °C에서 70 °C까지 변하는 구간에서는 온도가 높아짐에 따라 연성지수가 약간 증가하였다.
- 3) 강섬유콘크리트는 다른 복합재료 실험체보다 높은 연성지수를 나타내며, 저온에서는 섬유혼입률이 증가할수록 연성지수가 증가하는 것으로 나타났고, 고온조건에서는 혼입률 증가에 따른 섬유보강 효과가 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 온도를 조절할 수 있는 챔버내에서 충격실험을 수행해야 하는 관계로 작은 규모로 실험체로 제작하였기 때문에 섬유의 혼입이 충격저항성에 미치는 영향이 일관성이 다소 미흡하게 나타났으며, 실험체 규모를 크게 하면 이와 같은 결과는 어느 정도 보완될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Min, K. H., Shin, H. O., Yoo, D. Y., and Yoon, Y. S., "Flexural and Punching Behaviors of Concrete Strengthening with FRP Sheets and Steel Fibers under Low-Velocity Impact Loading", *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(1), pp.31-38, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.1.031>
- [2] Oh, B. H., "Prospect and Necessity of Fiber Reinforced Concrete", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 8(4), pp.5-13, 1996.
- [3] IPCC, Climate Change, Synthesis Report., Contribution

- of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014
- [4] Yoo, D. Y., Min, K. H., Lee, J. Y., and Yoon, Y. S., "Evaluating Impact Resistance of Externally Strengthened Steel Fiber Reinforced Concrete Slab with Fiber Reinforced Polymers", *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(3), pp.293-303, 2012.
DOI: <https://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.3.293>
- [5] Shahvari, F. V., Assessing Impact Resistance of Concrete-Based Materials, University of California, Berkeley, CA, USA, 2008.
- [6] Manolis, G. D., Gareis, P. J., Tsonos, A. D., and Neal, J. A., "Dynamic Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete Salbs", *Cement and Concrete Composites*, 19(4), pp.341-349, 1997.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00030-9](https://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00030-9)
- [7] Mohammadi, Y., Carkon-Azad, R., Singh, S. P., and Kaushik, S. K., "Impact Resistance of Steel Fibrous Concrete Containing Fibres of Mixed Aspect Ratio", *Construction and Building Materials*, 23(1), pp.183-189, 2009.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.002>
- [8] Heo, K.H., Park, J. G., Kim, C. G., Lee, H. J., and Choi, W. S., "Impact Fracture Behavior under Temperature Variation and Compressive-Flexural Strength of Cement Composites using VAE Powder Polymer and PVA Fiber", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(1), pp.102-112, 2019.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1112/jksmi.2019.23.1.102>
- [9] Beaumont, P. W. R., Riewald, P. G., and Zweben, C., Methods for Improving the Impact Resistance of Composite Materials. In Foreign Object Impact Damage to Composites, ASTM International, 1975.
- [10] Choi, W. S and Lee, H. J., "Evaluation on the Ductility of Fiber Reinforced Concrete under High and Low Conditions", *Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Gangneung, Korea, 23(1), pp.412-413, April, 2019.
- [11] Kim, W. S., "Mechanical Characteristics of Fiber-reinforced Concrete Mixed with Graphene Oxide and Polyvinyl Alcohol Fibers", *Journal of the Korea Society for Advanced Composite Structures*, 14(4), pp.33-40, 2023.
DOI: <https://dx.doi.org/10.11004/kosacs.2023.14.4.033>
- [12] ASTM D 7136, Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, ASTM International, West Conshohocken. 2015.
- [13] Daghash, S. M., Soliman, E. M., Kandil, U. F., and Taha, M. M. R., "Improving Impact Resistance of Polymer Concrete Using CNTs", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(4), pp.539-553, 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s40069-016-0165-4>
- [14] Choi, W. S., *Impact Resistance of Composite Concrete Materials under Low Velocity Impact with Various Temperature Conditions*, Masters's Thesis, Hanbat National University, Daejeon, Korea, pp.32-44, 2019.
- [15] Moon, D. Y., "Experimental Study on Tensile Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Subjected to High Temperature", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(1), pp.63~71, 2013.
DOI: <https://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.1.063>

최 원 석(Won-Seok Choi)

[정회원]



- 2015년 2월 : 한서대학교 토목공학과 (공학사)
- 2019년 2월 : 국립한밭대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 2020년 6월 : 실크로드 주임연구원
- 2020년 7월 ~ 현재 : 충청남도개발공사 과장

<관심분야>

토목구조, 도시개발

이 형 준(Hyung-Joon Lee)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 2000년 8월 : 한국도로공사 수석연구원
- 2000년 9월 ~ 현재 : 국립한밭대학교 건설환경공학과 교수

<관심분야>

콘크리트 재료, 콘크리트 구조