Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 16, No. 6 pp. 4192-4200, 2015

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.6.4192
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

기포를 혼입한 섬유보강 셀룰러 스프레이 콘크리트 공법의 분산성 및 휨인성 평가

이겨레[1*], 한승연[1], 남궁경[1], 윤경구[1]
[1]강원대학교 토목공학

Dispersibility and Flexural Toughness Evaluation of Fiber Reinforcement Cellular Sprayed Concrete by added Foam.

Kyeo-Re Lee[1*], Kyeong Nam-Gung[1], Seung-Yeon Han[1], and Kyong-Ku Yun[1]
[1]Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

요 약 본 논문에서는 방호·방폭 구조물용 스프레이 콘크리트 재료 개발을 위해 기포를 혼입하여 강섬유의 분산성을 향상시킴으로서 강섬유 혼입 고인성 셀룰러 스프레이 콘크리트 재료를 개발하였다. 강섬유의 분산성 향상을 위해 과다하게 투입된 기포는 스프레이를 통해 대부분 소산하여 최종적으로 3 % ~ 6 % 미만의 적정 혼입율을 만족하게 되며, 이 상태에서 압축강도 및 휨인성 특성에 대해 고찰하였다. 압축강도 시험결과 28일 및 56일 강도에서 우수한 강도성능을 나타냈으며, 휨강도 및 휨인성 특성 또한 우수한 성능을 보여 과다하게 투입된 기포는 강섬유의 분산성을 향상 시키지만, 강도저하를 유발하지는 않는 것으로 판단된다. 그러나 화상분석을 통한 공극구조 분석 결과 소요의 간격계수와 비표면적을 얻는데 실패하였으며, 이것은 스프레이에 의한 공기량 소산 효과가 너무 커 간격계수가 다소 크게 측정된 것으로 판단된다.

Abstract In this paper, dispersibility of steel fiber is improved mixing with form for material development of protection and blast resistant structure sprayed concrete. And it is developed a high toughness cellular sprayed concrete material using steel fiber. Oversupply form for dispersibility improvement of steel fiber is mostly fade away through sprayed, finally it is satisfied with the proper mixing ratio under 3 % ~ 6 %. This is considered for compressive strength and flexural toughness. Test results of compressive strength showed superior strength capability in 28, 56 days, also flexural strength and flexural toughness is great. Then oversupply form is enhanced for dispersibility of steel fiber and I think that it did not cause decreasing of strength. But analysis results of pore structure through image analysis failed for a great spacing factor and specific surface area. This is largely measured in spacing factor because air content have a grate evaporation effect for sprayed.

Key Words : cellular, dispersibility, flexural toughness, sprayed concrete, steel fiber

1. 서론

우리나라는 남북 분단으로 인한 특수한 군사적 대치 상황과 최근 연평도 폭격사건 등 인명 및 재산피해 또한 발생하고 있으며, 군사시설물에 대한 방호·방폭 기능 향상을 위한 국가 차원의 대책이 필요한 상황이다. 또한 폭발사고의 위험성이 상존하고 있는 석유화학 관련 산업의 해당 시설물 및 주변 건물의 안전 확보 차원의 다양한 방호·방폭 관련 수요가 증가하고 있으며, 민간 대형 시설물에서도 방호·방폭 안전성 기능을 확보하는 방식으로 정책의 변화가 이루어지고 있다.

방호·방폭의 전통적 설계방식은 구조물의 두께를 증가시킴으로써 안전성을 확보하는 것으로써, 일반 민간 시설물과 같이 건축구조물용 자재 및 부재 두께의 제약

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호방폭연구단(과제번호 : 13SCIPS02)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.
*Corresponding Author : Kyeo-Re Lee(Kangwon National Univ.)
Tel: +82-10-8255-0856 email: leekr@kangwon.ac.kr
Received May 19, 2015 Revised June 8, 2015
Accepted June 11, 2015 Published June 30, 2015

을 받는 여건에는 직접 적용이 힘들기 때문에, 이를 고려한 고성능의 방호·방폭용 자재의 개발이 필요한 실정이다. 일반 건축물 및 시설물의 부재 두께에 대한 여건을 고려한 방호·방폭 성능 향상 재료개발 및 공법 개발이 필수적이다.

Shen, Zhang et al. 섬유를 혼입하여 구조 부재를 보강하는 경우 혼입율을 제한적으로 이용하기 위해 구조물의 인장부위에만 적용하는 연구를 진행하였다[1,2].

따라서 본 연구에서는 구조물 전체에 강섬유를 다량 함유하여 방호·방폭 성능을 향상시키기 위해 기포를 혼입하여 섬유의 최대 혼입율 및 분산성 평가를 진행하였으며, 기존 구조물의 인장강도 및 휨 인성 증진을 통해 방호·방폭 성능을 향상시키 위한 보수 보강 공법으로써 섬유를 효과적으로 분산 가능한 스프레이 콘크리트 공법의 적용방안을 검토하였다. 슬럼프, 공기량, 단위수량 변화, 강도발현특성 등의 기초적 특성을 평가하고, 휨인성 특성과 화상분석을 통한 내구특성 시험을 실시하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 개요

본 연구는 크게 실내배합과 스프레이 콘크리트 타설로 나뉜다. 첫 번째 실내배합 단계에서는 강섬유의 최대 혼입율과 기포의 최적 혼입율을 결정하게 된다. 기 배합된 콘크리트에 섬유를 일정량 이상 투입하게 되면 섬유 뭉침(Fiber Ball) 현상이 발생하게 되는데, 이 때 적정한 기포를 혼입하면 기포의 볼베어링 효과에 의해 섬유 뭉침 현상이 해소된다. 그러나 기포를 다량 혼입하게 되면 콘크리트의 유동성이 증가하여 상대적으로 비중이 높은 강섬유가 가라앉으며 재료분리가 발생한다. 따라서 본 단계에서는 재료분리가 발생하지 않는 한도 내에서 섬유의 최대 혼입율을 결정하는 것에 목적이 있다.

두 번째 스프레이 콘크리트 타설 단계에서는 배합단계에서 콘크리트 내부에 과다하게 혼입된 기포가 펌핑성을 향상시켜 막힘 현상을 완화하고, 공기압 분사를 통해 뿜어 붙이는 타설 과정을 거쳐 콘크리트 내부에 과다하게 투입된 기포는 스프레이 전 공기량에 관계 없이 스프레이 후 대부분 소산하게 되어 최종적으로 일정한 공기량을 유지하는데 목적이 있다 Fig. 1은 스프레이 후 일정하게 수렴하는 공기량을 보여주는 그래프이다[3].

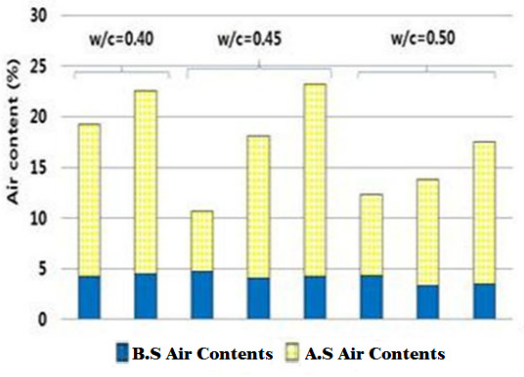


Fig. 1. Air Content of Sprayed (Before Sprayed, After Sprayed)

2.2 개발 목표 및 배합 설계

기포의 혼입을 통해 스프레이 전 공기량을 25 % ~ 30 %로 유지하여 펌핑성을 개선하며, 공기량이 30 %를 초과하게 되면 상대적으로 무거운 강섬유가 침하하여 재료분리가 발생하게 된다. 스프레이 후의 공기량을 5 % 이하로 소산시켜 강도와 내구성을 확보하고, 단위시멘트량을 460 kg/m^{3}으로 결정하였으며 실리카퓸을 시멘트 중량대비 7 %로 치환하여 장기강도 및 내구성을 향상시켰다. 잔골재율은 리바운드량 저감을 고려하고자 70 %로 설정하여 경제성을 확보하였다. Table 1과 같은 대안검토를 통해 Table 2와 같은 배합으로 재료를 개발하였다[4].

Table 1. Material Development Objective

Type			Target
Slump		mm	100 Over
Air Contents	Before sprayed (B.S)	%	25~30
	After sprayed (A.S)		3~6
	Hardened		3~6
Percent of Steel Fiber		%	1~4
Compressive Strength		MPa	40 Over
Flexual Toughness		-	I5 > 5

Table 2. Mixing properties of sprayed concrete

Gmax (mm)	Slump (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m^3)					SP (%)
				W	C	S	G	SF	
10	100 over	40	70	184	427.8	1,233	523	32.2	0.3

2.3 실험 재료

2.3.1 시멘트

시멘트는 KS L 5201에서 규정에 의거, 규격에 만족하는 국내 S사 생산의 1종 포틀랜드 시멘트(분말도 3,289 ㎠/g, 밀도 3.15 g/㎤, 강열감량 0.61 %, 안정도 0.08 %)를 사용하였다.

2.3.2 실리카퓸

실리카퓸은 각종 실리콘 및 훼로 실리콘 등의 규소합금을 전기 아크식 노에서 제조할 때 배출되는 가스에 부유하여 발생하는 미세한 분말이다. 비표면적이 약 200,000 ㎠/g로서 보통 포틀랜드 시멘트의 50 ~ 60배 이다. 입자의 90 %이상이 구형으로 된 초미립자 분말로서, 시멘트 중량의 5 % ~ 15 %정도 치환하면 콘크리트 내부 구조가 치밀하게 되어 고강도를 발현할 수 있으며 재료분리 저항성, 수밀성, 내화학약품성이 향상되고 알칼리 골재반응의 억제효과 또한 기대할 수 있다. Table 3은 본 실험에서 사용된 실리카퓸의 물리·화학적 특성을 나타낸 것이다.

Table 3. Physical properties and chemical composition of silica fume

Type		Test
Physical properties	Density(g/㎤)	2.2
	ignition loss(%)	3.45 below
	Fineness(㎠/g)	150,000~300,000
	Form	Sphericity 90%
	Particle size(㎛)	1
	Unit weight(kg/m³)	250~300
	Ingredient	Silicon(85% more than)
Chemical properties	SiO_2(%)	85~95
	Al_2O_3(%)	1.5 below
	Fe_2O_3(%)	3.0 below
	CaO(%)	0.7 below
	MgO(%)	2.0 below
	SO_3(%)	0.2 below

2.3.3 골재

굵은 골재는 최대치수(Gmax) 10 mm인 세척 쇄석과 잔골재는 부순 모래를 사용하였다. 굵은 골재와 잔골재의 기준은 따로 정하지 않았고 다만, 13, 10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15 mm 체를 준비하여 각각의 체에 잔류하는 입도의 골재를 제작 한 뒤 KS F 2577 “숏크리트용 재료” 입도분포 곡선의 중간선에 해당하는 골재를 각각 따로 개량하여 실험하였다. 혼합골재의 물리적 특성은 Table 4와 같고, KS F 2577 “숏크리트용 재료” 입도분포 곡선과 실험에 사용된 혼합골재의 입도분포 곡선은 Fig. 2와 같다[5].

Table 4. Physical properties of mixed aggregate

Aggregate type	Specific gravity	Fineness modulus
Mixed aggregate	2.82	3.75

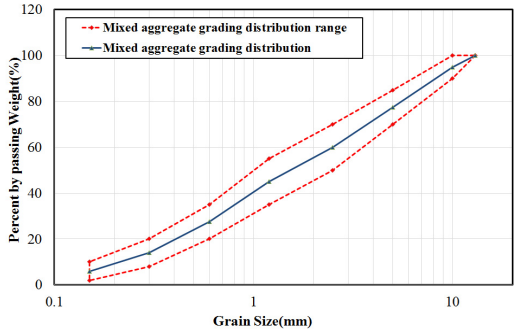


Fig. 2. KS F 2577 Distribution of mixed aggregate

2.3.4 강섬유

강섬유는 일반적인 Hook형 강섬유를 사용하였으며, 본 연구에서는 국내 H 사의 제품을 사용했다. 일반적으로 터널 현장에서 가장 많이 사용하는 강섬유(30 mm)를 선정하여 실험에 사용하였으며, Table 5는 본 연구에서 사용된 강섬유의 주요 제원이다.

Table 5. Physical properties of Steel Fiber

Type	Test
Length (mm)	30
Diameter (mm)	0.5
Aspect ratio	60
Specific gravity	7.85
Tensile strength of fiber(MPa)	1020.2

2.3.5 기포제

기포제의 계면활성분자는 친수기와 소수기로 이루어져 있고, 친수기의 경우 물, 소수기의 경우 계면에 배열되어 기포제를 희석한 수용액의 표면장력, 점도 등의 특성을 변화 시킨다. 또한 미세한 연행기포는 볼베어링 효과를 이용하여 콘크리트의 혼합을 더 용이하게 만든다. 본 논문에서는 해외 C사의 기포제를 이용하여 선발포 기포생성 후 콘크리트에 혼입하는 방식을 사용하였다.

2.4 시험 방법

2.4.1 실내배합

실내배합에서 상하 교반 중력식 배합기를 통해 배합된 기포를 혼입한 콘크리트에 강섬유를 체적대비 투입 후 분산성 및 유동성을 확보 하고, Fiber Ball 현상이 발생하는지 확인 한다. 섬유는 일반적인 강섬유 혼입 숏크리트에서 사용하는 1.0 %부터 4.0 % 까지 혼입하여 섬유의 최대 혼입율을 확인 했다.

섬유의 뭉침 현상은 1차 육안으로 확인하게 되며, 2차적으로 씻기 실험을 통해 체적 대비 강섬유의 혼입량을 확인 할 수 있다.

강섬유가 일정량 이상 과다하게 투입되면 섬유 뭉침 현상이 발생하게 되며, 이 때 기포를 혼입하여 섬유 뭉침 현상을 저감 시키고 작업성을 개선시키는 형태로 실험을 진행하였다.

기포 투인 전, 섬유 뭉침 현상이 나타난 재료에 기포를 투입하여 섬유의 분산성을 향상시키고 콘크리트의 작업성이 향상되는 변화가 Fig. 3에 나타나 있다.

Fig. 3. Improving material property using form concrete Improvement of material property using form concrete

2.4.2 스프레이 콘크리트 타설

실내 배합을 통해 최대 섬유 혼입율과 최적 기포 혼입율이 결정 되면 실제 스프레이 콘크리트 타설을 실시 하여 공기압에 의한 고압 분사를 통해 콘크리트 내부의 공기가 대부분 소산되어 최종적인 공기량과 타설 가능 한 강섬유 최대 혼입율을 확인했다. Fig. 4는 스프레이 콘크리트의 개념도이다.

시험체 제작은 600 mm × 600 mm × 250mm의 패널에 콘크리트를 타설하여 Ø100 원주형 코어를 채취하고 커팅 후 강도 시험 및 내구특성 시험을 실시하였으며, 빔 몰드 역시 460 mm × 460 mm × 100 mm의 패널에 타설하여 컷팅후 휨 인성 시험에 사용하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 패널의 형태를 나타낸다[6].

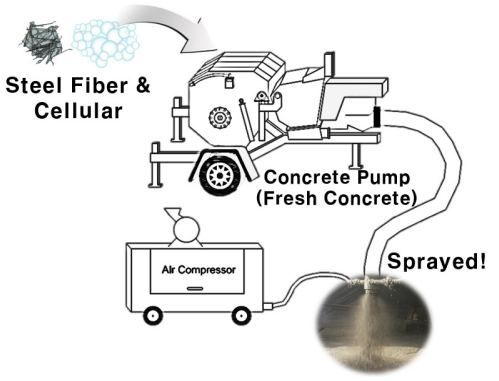


Fig. 4. Concept of sprayed concrete

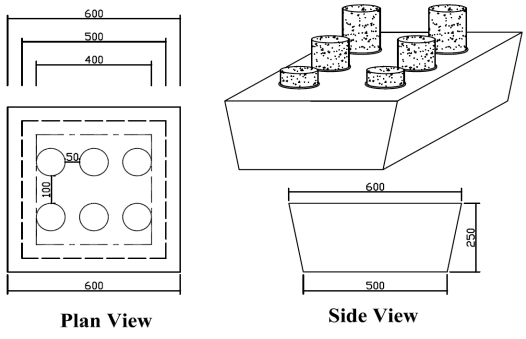


Fig. 5. Panel Manufacturing of Cylindrical Specimen

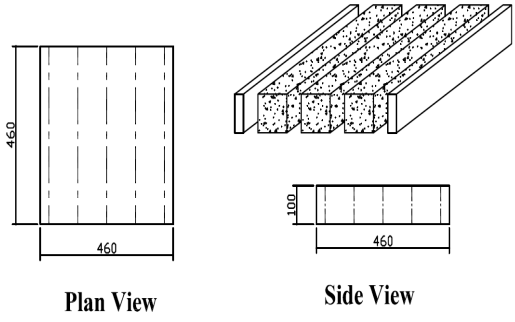


Fig. 6. Panel Manufacturing of Beam Specimen

2.4.3 기초물성 및 내구성 시험

기초물성 및 내구성 시험은 Table 6과 같은 일정에 의해 몰드를 제작하여 시험을 진행하였다. 측정방법은 KS 규정과 ASTM 규정에 의거 진행되었으며, 시험 여건상 일부 시험은 횟수를 변경하였다. 공인된 규정이 없는 경우 본 연구에서 고안된 방법을 통해 시험을 진행하

였다. Table 6은 기초물성 및 내구성 시험의 세부 개요이다.

Table 6. Testing schedule of Basic property and Durability

Test item	schedule & time	Test types
Slump	B.S and A.S each 1	KS F 2402
Air Contents	B.S and A.S each 1	KS F 2421 KS F 2449
Dispersibility Test	A.S twice	Fiber Washing KS F 2783
W/B Test	B.S and A.S each 1	-
Compressive Strength	A.S 28, 56 days	KS F 2405
Flexual Toughness	A.S 28day	KS F 2566
Image Analysis	A.S 28day twice	ASTM C 457

B.S : Before Sprayed
A.S : After Sprayed

1) 슬럼프 시험

굳지 않은 콘크리트의 반죽질기를 판단하기 위하여 슬럼프 시험은 KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험방법)의 규정에 의거하여 수행하였다[7].

2) 공기량 시험

굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험은 기포 혼입에 의한 공기량(10 % 초과 유무)에 따라 각각 KS F 2421(압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법)과 KS F 2449(굳지 않은 콘크리트 용적에 의한 공기량 시험 방법) 규정을 병행하여 수행하였다[8,9].

3) 분산성 평가

분산성 평가는 공인된 시험방법이 없기 때문에 본 연구에서 고안된 시험방법을 통해 진행하였다. 배합이 완료 된 콘크리트를 KS F 2783(강섬유 보강 숏크리트 재료의 시료 채취 방법)의 규정에 의거 일정한 용적(Φ 100×200)을 채취하고 콘크리트를 새척하여 자석을 이용해 강섬유만 채취하였다. 측정 된 섬유를 비율로 환산하여 혼입율이 배합설계에서 목표로 한 혼입율과의 차이를 비교하는 방법으로 진행되었다 Fig. 7은 분산성 평가의 개념도이다[10].

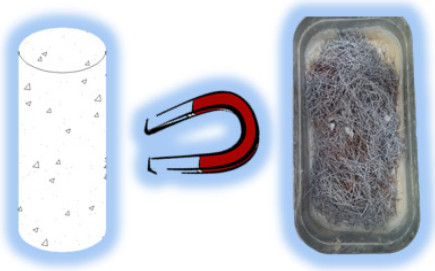


Fig. 7. Assessment of dispersive concept

4) 압축강도 시험 및 휨 인성

콘크리트의 성능평가를 위한 기본적인 자료로서 중요한 의미를 가지는 압축강도 시험은 ø100×200㎜의 코어 채취된 원주형 공시체를 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)규정에 따라 측정하였다.

콘크리트 휨 인성 시험은 100 × 100 × 460 ㎜의 각주형 시험편을 제작하여 KS F 2566(강섬유 보강 콘크리트의 휨인성 시험 방법) 규정에 의거, 하중을 연직으로 재하할 수 있으며 중심이 치우치지 않도록 가할 수 있는 3등분점 재하법으로 측정하였다.

압축강도 시험의 경우 재령 28일, 56일에, 휨 인성 시험의 경우 재령 28일에 실시하였다[11,12].

5) 화상분석 시험

화상분석이란 어느 주어진 화상으로부터 정량적인 정보를 추출해 가는 분석방법으로서 물체의 크기와 이의 분포도, 밝기, 높이, 면적, 위치, 형상 등을 추출해 내기 위한 분석 방법을 말한다. 화상분석에는 리니어 트레버스 방법과 포인트 카운트 방법(ASTM C 457)이 있다[13].

리니어 트레버스 방법은 현미경에 의해 확대된 콘크리트 표면에 나타난 공극의 크기, 개수 등을 육안으로 관측하여 하나씩 세어서 필요한 계수 등을 계산해 내는 방법이다. 이 방법은 측정에 많은 시간이 소요되기 때문에 최근에는 자동화 측정 장치를 이용하고 있다. 시멘트 페이스트를 통해서 잘 배치된 입방체로 분포되는 모든 공극은 같은 직경을 가진다는 가설을 바탕으로 간격계수(시멘트페이스트 속의 가장 먼 점으로부터 가장 가까운 공극벽에 대한 거리)는 입방체의 반대편에 위치한 두 공극의 외주 사이의 거리를 반으로 나눈 것과 같다.

본 연구에서는 경화 후 콘크리트의 공극구조 분석을 위해 분석기기인 HF-MA C01을 사용하여 시험하였으며

리니어 트래버스법을 자동화 측정하는 시험으로써 주어진 화상(image)으로부터 정량적인 정보를 추출할 수 있는 분석법을 이용하였다. 이는 공극의 크기와 분포도, 위치 등을 측정하여 전체 공기량, 간격계수, 비표면적, 공극 크기별 공기량, 공극 크기별 개수 등을 분석할 수 있다. 장비의 구성 및 사용방법이 전문가적 기술을 요구하지 않으며 공극 분석 시 해석 결과를 즉시 확인할 수 있다. 또한 화학약품 처리 등 특수 처리를 할 필요 없이 측정면을 연마하여 간단히 측정·분석 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 공기량 및 슬럼프 시험 결과

기포 혼입 후 공기량 시험은 일반적인 공기량 시험기를 이용한 압력법으로는 10 % 이상의 공기량을 측정 할 수 없기 때문에 용적법을 이용하여 진행하였고, 스프레이 후에는 압력법을 이용하여 실시하였다. 스프레이 콘크리트 타설 전 섬유의 혼입율과 펌핑성 및 작업성을 유지시키는 최적의 조건이라 판단되는 25 % ~ 30 %를 기준으로, 30 mm 강섬유를 사용 한 경우 28.1 % 로 측정되었다. 스프레이 콘크리트 타설 후 4.1 % 로 측정되어 공기압 분사에 의해 공기가 소산하여 적정한 공기량을 보이는 것으로 나타났다. 스프레이 전 공기량에 관계없이 스프레이 후 특정수치(3 % ~ 6 %)로 수렴하는 결과를 보이고 있다. 또한 화상분석 방법에 의해 측정 된 굳은 후의 공기량은 3.0%로 측정되었다. 이것은 콘크리트 내부의 공기가 경화 도중 스스로 소산 하고, 수축에 의해 손실되어 최종적으로 굳은 후 공기량은 굳기 전 공기량에 비해 다소 낮게 측정되었다. Fig. 8은 스프레이 콘크리트 타설 전·후와 굳은 후의 공기량 변화를 나타내고 있다.

슬럼프 시험은 KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험방법)에 준하여 실시하였고, 스프레이 콘크리트 타설 전 과다하게 투입된 공기량에 의해 100 mm 이상을 나타내, 30 mm 강섬유를 사용한 경우 140 mm 로 측정되었다. 스프레이 콘크리트 타설 후 50 mm 로 측정되어 공기압 분사에 의해 단위수량이 감소하면서 슬럼프가 저하되어 작업성에 적정한 슬럼프 값을 보이는 것으로 나타났다. Fig. 8은 스프레이 콘크리트 타설 전·후의 슬럼프 변화량을 나타내고 있다.

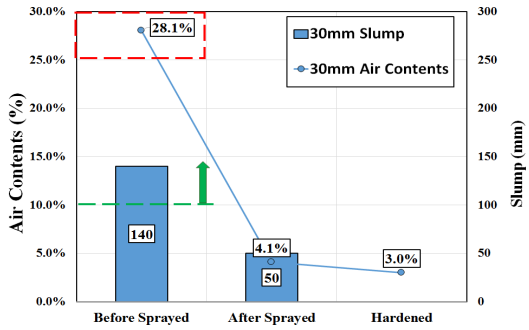


Fig. 8. Air Content&Slump of Sprayed (Before, After and Hardened)

3.2 분산성 및 혼입율 시험 결과

분산성 시험은 별도의 규정된 시험 방법이 없기 때문에 섬유 뭉침 현상을 육안으로 판단하여 실험하였으며, 기포 혼입을 통해 공기량을 25 % ~ 30 % 가량 혼입한 상태에서 최대 섬유의 혼입율을 평가 하였다. 체적대비 1.0 % 단위로 섬유를 혼입하여 최대 5.0 % 까지 혼입하여 분산유무를 판단한 결과 최대 4.0 % 까지 혼입이 가능할 것으로 판단되었다.

분산성 시험 결과 나타난 최대 혼입율인 4.0 % 혼입 시 실제 혼입율은 3.3%로 나타나 섬유 혼입이 높아질수록 실제 혼입은 다소 떨어지는 결과를 나타냈다. Fig. 9는 목표 혼입율 대비 실제 섬유의 혼입율을 나타낸 그래프 이다.

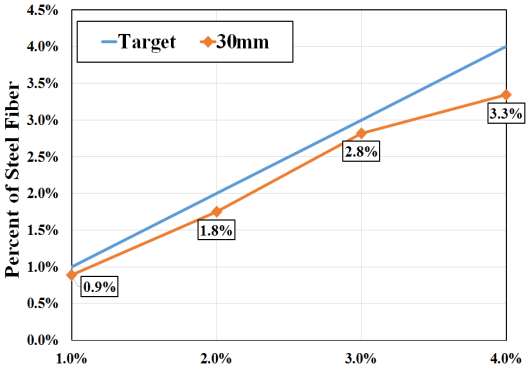


Fig. 9. Compared Fiber mixing ratio to Actual Fiber mixing ratio

3.3 스프레이 전 · 후의 단위수량 측정 결과

단위수량 측정은 단위수량 측정기를 이용하여 실시하였으며, 최초 기준배합, 스프레이 콘크리트 타설 전, 스프레이 콘크리트 타설 후 총 3회에 걸쳐 측정되었다. 기준배합에서 단위수량은 184.0 kg/m^3 이나 기포를 혼입하면서 가수가 발생하여 215.2 kg/m^3 으로 증가하였다. 그러나 스프레이 콘크리트 타설 중 공기압에 의해 재료 내부의 수분이 공기 중으로 소산하면서 단위수량이 감소하여 스프레이 후 최종 단위수량은 204.0 kg/m^3 으로 변화 하는 것으로 나타났다. Fig. 10은 기준 배합과 스프레이 콘크리트 타설 전·후의 단위수량 변화를 보여주는 그래프 이다.

단위수량 변화로 인해 W/B에도 변화가 발생하였다. 최초 기준배합에서의 W/B는 40.0 %를 기준으로 설계하였으나, 기포 혼입을 통한 가수로 인해 46.8 %로 증가하였다. 그러나 스프레이 콘크리트 타설 중 공기압에 의해 재료 내부의 수량이 공기중으로 소산하면서 W/B가 감소하여 고압 분사 후 최종 W/B는 30 mm 의 강섬유를 사용한 경우 44.3 % 로 변화하는 것으로 나타났다. Fig. 10는 기준배합과 스프레이 콘크리트 타설 전·후의 W/B 변화를 나타낸다.

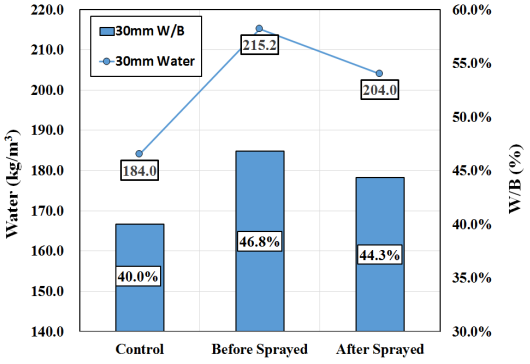


Fig. 10. Unit Quantity of Water and W/B Transition of Sprayed(Before and After)

3.4 압축강도 및 휨강도 시험 결과

압축강도 시험 및 휨강도 시험은 각각 KS F 2405(콘크리트 압축 강도 시험방법), KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험 방법) 에 준하여 실험되어 졌으며, 압축강도는 재령 28일의 압축강도는 평균 46.9 MPa로 측정되었으며 이것은 도로공사 표준시방서 고강도 숏크리트의 기준인 35MPa을 상회하여 목표 강도 40 MPa을 만족하는 것으로 나타났다. 재령 28일의 휨 강도는 평균 8.1 MPa로 나타났다.

3.5 휨 인성 시험 결과

휨 인성 시험은 KS F 2566(섬유 보강 콘크리트의 휨성능 시험방법) 에 준하여 실험되어 졌으며, 재령 28일에 측정되었다. 방호·방폭에 대한 인성지수 기준은 국내·외 등급 기준이 전무하여 국제터널협회(ITA)의 등급 기준으로 설정하였으며, 섬유의 에너지 흡수 능력을 초기균열의 3배까지 고려하여 SFRS Ⅲ등급 이상인 I_5값을 5로 설정하였다. 측정 결과 I_5 지수의 경우 평균 5.82로 측정되어 목표를 만족했다. Fig. 11은 휨 인성 시험 결과 하중 변위 곡선을 보여주는 그래프 이다 [14].

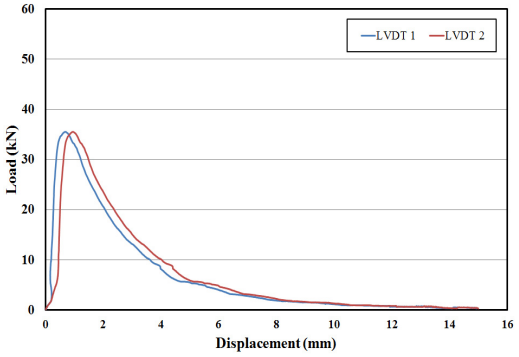


Fig. 11. Test Results of Flexural Toughness

3.6 화상분석 시험 결과

화상분석 시험은 ASTM C 457에 의거 경화된 콘크리트 시편 에서 공극의 크기와 분포도, 위치 등을 측정하여 전체 공기량, 간격계수, 비표면적, 공극 크기별 공기량, 공극 크기별 개수 등을 분석할 수 있다.

재령 28일의 시험편을 대상으로 화상분석을 실시했으며 시험 변수는 공기압 분사 하여 타설된 콘크리트가 굳은 후 공기량 소산 및 손실에 따른 적정 공기량을 유지하는가를 알아보기 위해 스프레이 콘크리트 타설 후 패널을 코어링 하여 시험했다.

시험 결과 비표면적 26.63 μm, 간격계수 326 mm^2/mm^3 으로 측정되었으며, 이것은 Kansas DOT에서 제시한 간격계수인 250 mm^2/mm^3 이하, Mindess 문헌에서 제시한 간격계수 200 mm^2/mm^3 이하를 만족하지

못하는 수치로, 동결융해에 대한 내구성은 떨어질 것으로 예상되어 진다[15,16]

4. 결론

본 연구에서는 기포를 혼입하여 섬유 혼입율을 높인 고인성 재료의 배합비를 제안하였으며 물리적 특성 및 내구성 시험을 통해 성능을 검증하였다. 제안된 스프레이 콘크리트 재료는 굳기 전 기포를 혼입함으로서 섬유 뭉침 현상 없이 섬유가 분산되며, 막힘없이 호스를 이송할 수 있는 우수한 펌핑 성능을 확보할 수 있다. 뿐만 아니라, 스프레이를 통해 기포를 소산시켜 콘크리트가 굳은 후에는 고강도 및 고인성을 확보할 수 있다. 이 실험의 종합적인 결론을 다음과 같이 나타내었다.

1) 공기량 및 슬럼프 시험 결과 스프레이 전 목표로 했던 25 % ~ 30 % 공기량을 만족하였으며, 슬럼프 역시 100 mm 이상을 만족하였다. 스프레이 후 공기가 소산하여 4.1 %로 나타났고, 화상분석 시험 결과 굳은 후 공기량은 3.0 %로 측정되었다. 과다하게 투입된 기포가 스프레이에 의해 대부분 소산하여 내구성능 저하를 유발하지 않는 한도까지 수렴하였다.
2) 분산성 및 혼입율 시험 결과 기포를 약 25 % ~ 30 % 혼입 하였을 경우 최적의 분산성을 보이는 것으로 나타났다. 섬유 혼입율이 높아질수록 실제 혼입율은 낮아지는 경향을 보이나 기포 혼입을 통해 섬유 뭉침 현상이 대부분 해소되었다.
3) 스프레이 전·후 단위수량 측정 결과 기포와 섬유를 투입 하면서 크게 증가했던 단위수량 및 W/B가 스프레이에 의한 수분의 소산으로 인해 감소하였다. 기포와 함께 투입된 물이 스프레이에 의해 소산되어 단위수량 이 다소 감소하였다.
4) 압축강도 및 휨강도 시험 결과 압축강도는 28일에 46.9 MPa로 측정되었으며, 휨 강도는 8.1 MPa로 나타났다. 목표로한 압축강도 40 MPa 이상을 확보하는 고강도 재료로서 성능을 확보하였고, 기포가 완전히 소산하였다는 반증을 보여준다.
5) 휨 인성 시험 결과 I_5 지수가 평균 5.82로 측정되어 목표를 만족했다. 그러나 공시체별 편차가 다소 나타났는데, 이것은 분산성능을 향상시켰다고는 하나 불특정 방향으로 분사된 섬유의 위치나 형태, 방향등의 변수에 의해 각각 다른 파괴형태를 보인 것으로 판단된다.
6) 화상분석 시험 결과 비표면적 26.63μm, 간격계수 326 mm^2/mm^3 으로 측정되었으며, 이것은 Kansas DOT에서 제시한 간격계수인 250 mm^2/mm^3 이하, Mindess 문헌에서 제시한 간격계수 200 mm^2/mm^3 이하를 만족하지 못하는 수치이다. 공기량 소산 효과가 너무 커 간격계수가 다소 크게 측정된 것으로 판단된다.

References

[1] Shen, B., Hubler, M., Paulino, G. H., and Struble, L. J., "Functionally-Graded Fiber-Reinforced Cement Composite : Processing, Microstructure, and Properties," Cement and Concrete Composites, Vol. 11, No. 6, pp. 663-673, 2008.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.002

[2] Zhang, J., Leung, C. K. Y., and Cheung, Y. N., "Flexural Performance of Layered ECC-Concrete Composite Beam," Composites Science and Technology, Vol. 11, No. 6, pp. 1501-1512, 2005.

[3] HAN SeungYeon, "Dispersion of Silica Fume by Air Slurry and its Effect on Mechanical Properties at Ready Mixed Concrete", Master's thesis of Engineering, Graduate school of Kangwon National University, 2014.

[4] Morgan D.R., "Freeze-Thaw Durability of Wet-Mix and Dry-Mix Shotcretes with Silica Fume and Steel Fibres" Reprinted, with permission, from Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 10, No.2, 1988.

[5] KIM Jin-woung, "Evaluation of Rheology and Constructability of Crushed-Sand Shotcrete", doctorate thesis of engineering, Graduate school of Kangwon National University, 2011.

[6] CHIO Sungyong, "Rheology and Air Void Structures of Wet-Mix Shotcrete", doctorate thesis of engineering, Graduate school of Kangwon National University, 2009.

[7] KS F 2402, "Method of test for slump of concrete", KS, 2007.

[8] KS F 2421, "Method of test for air content of fresh concrete by pressure method", KS, 2006.

[9] KS F 2449, "Method of test for air content of fresh concrete by volumetric method", KS, 2002.

[10] KS F 2783, "Sampling method for materials of steel

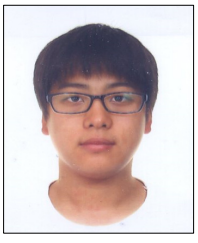
fiber reinforced shotcrete", KS, 2007.
[11] KS F 2405. "Standard test method for compressive strength of concrete", KS, 2010.
[12] KS F 2566, "Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete", KS, 2014.
[13] ASTM C 457, "Standard Test Method for Microscopical Determination of Air Void Content and Parameters of the Air Void System in Hardened Concrete", ASTM, 2009.
[14] Shotcrete for rock support-guidelines and recommendation, International Tunnelling Association, 1990.
[15] Kansas DOT Specification, "Division 400 Concrete Standard Specifications, 401 Concrete, 401-5 Commercial Grade Concrete", pp. 400-1~400-14, 2007.
[16] Mindess, S., Young, J. F., "Concrete", Prentice-Hall, pp.485-500, 1981.

이 겨 레(Kyeo-Re Lee) **[정회원]**

- 2011년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학학사)
- 2013년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>
토목, 숏크리트, 콘크리트 구조물, 도로포장

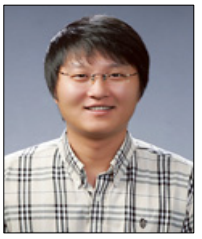
한 승 연(Seung-Yeon Han) **[정회원]**



- 2012년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학학사)
- 2014년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>
토목, 숏크리트, 콘크리트 구조물, 도로포장

남 궁 경(Kyeong Nam-Gung) **[정회원]**



- 2010년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학학사)
- 2012년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학석사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>
토목, 숏크리트, 콘크리트 구조물, 도로포장

윤 경 구(Kyong-Ku Yun) **[정회원]**

- 1992년 2월 : 미국미시간주립대학 토목공학석사
- 1995년 2월 : 미국미시간주립대학 토목공학박사
- 2000년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
토목, 숏크리트, 콘크리트 구조물, 도로포장