

강섬유 보강 콘크리트의 방향성 제어를 위한 마그네틱 노즐 원천기술 개발 최종보고서

2018. 12. 31.

주관연구기관 / 대구대학교 산학협력단
공동연구기관 / 세종대학교 산학협력단

2018

강섬유 보강 콘크리트의 방향성 제어를 위한
마그네틱 노즐 원천기술 개발 최종보고서
국토교통과학기술진흥원

국 토 교 통 부
(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 귀하

'강섬유 보강 콘크리트의 방향성 제어를 위한 마그네틱 노즐 원천기술 개발'(연구개발 기간 : 2017. 06. 30 ~ 2018. 12. 31.) 과제의 최종보고서(보완본) 1부를 제출합니다.

주관연구기관명 : 대구대학교 산학협력단 (대표자) 윤재웅 (인)

공동연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 (대표자) 백성욱 (인)



주관연구기관책임자: 이종한

공동연구기관책임자: 안윤규

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C1329 63-02	해당 단계 연구 기간	2018.01.01. ~ 2018.12.31.	단계구분	2단계 / 2단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	강섬유 보강 콘크리트의 방향성 제어를 위한 마그네틱 노즐 원천기술 개발			
연구책임자	이종한	해당단계 참여연구원 수	총: 21 명 내부: 16 명 외부: 5 명	해당단계 연구비	정부: 201,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 25 명 내부: 19 명 외부: 6 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속 부서명	대구대학교 산학협력단 세종대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	본 연구과제는 건축/토목/플랜트 시공분야 및 엔지니어링 분야의 기반기술로 제공이 가능하므로 연구과제 보안등급 분류상 일반과제로 분류함
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

본 연구의 최종목표는 강섬유 보강 콘크리트의 섬유 방향성을 제어하고 분포도를 유지할 수 있는 타설 노즐의 형상과 마그네틱 노즐 원천기술 개발임

- 매트릭스 유동특성을 고려할 수 있는 전산해석기법을 개발하고 노즐의 형상과 마그네틱 노즐에 의한 섬유의 방향성 제어 효과를 분석함
- 형상 기반 변수를 개선하여 최적안을 도출하고, 도출된 형상 설계 변수에 따라 노즐 시작품을 제작, 타설실험을 통해 강섬유의 방향성과 분포도 성능을 검증함
- 마그네틱 변수를 개선하고 최적안을 도출하고, 도출된 마그네틱 설계 변수에 따라 노즐 시작품을 제작, 타설실험을 통해 강섬유의 방향성과 분포도 성능을 검증함

보고서 면수 80

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	○ 본 연구개발의 최종목표는 강섬유 보강 콘크리트의 섬유 방향성을 제어하고 분포도를 유지할 수 있는 타설 노즐의 형상과 마그네틱 노즐 원천기술을 개발한다. 이를 위해 1차년도 연구개발 목표는 Multi-physics 전산해석기술에 기반한 매트릭스 유동 특성과 섬유 방향성, 노즐의 형상 관계를 분석하고 마그네틱의 밀도와 위치에 따른 강섬유의 제어 성능을 평가한다. 2차년도 연구개발 목표는 최적 설계 변수를 개선, 도출하여 노즐 시작품을 제작하고 실내 실험을 통해 개발 노즐의 성능을 검증한다. • 1차년도 연구개발 내용 - 매트릭스 유동특성과 강섬유, 마그네틱 기반 Multi-physics 전산해석기술 개발 - Multi-physics 해석을 통해 섬유 방향성과 노즐의 형상 관계 분석 - 노즐 형상 및 마그네틱에 따른 강섬유 방향성과 분포도 분석 • 2차년도 연구개발 내용 - 최적 설계 변수 개선 및 도출을 통한 노즐 시작품 제작 - 제작된 시작품과 타설 장비를 활용한 실내 성능검증 실험 - 이미지분석기법을 이용한 노즐 형상 및 마그네틱에 따른 강섬유 방향성 및 분포도 분석				
연구개발성과	• 섬유의 방향성과 노즐 형상 및 마그네틱의 관계 분석 • 마그네틱과 노즐형상에 따른 섬유 방향성 분석 • 설계 변수 최적화를 바탕으로 노즐 시작품 제작 및 성능 검증 • 실내 실험을 통한 개발 노즐의 성능 검증				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 강섬유 보강 콘크리트의 강도 및 연성도를 효율적으로 향상시켜 현재의 적용 한계성을 뛰어 넘을 수 있음 • 현장 적용성과 실용화를 고려하여 기존의 콘크리트 타설 노즐에 탈부착이 가능하도록 개발함으로써 설치의 편의성을 확보 • 창의적이고 새로운 개념으로 해외 기술 수출 및 국내외 강섬유 기반의 콘크리트 타설 분야 등에서 시장 경쟁력 확보가 가능 • 연구 종료 이후, 국내 강섬유 회사 및 콘크리트 회사와의 기술 이전을 논의하여 향후 사업화 과제 추진 계획				
핵심어 (5개 이내)	강섬유 보강 콘크리트	노즐 형상	마그네틱 노즐	섬유 방향성	섬유 분포도

< SUMMARY >

Purpose & Contents	• The purpose of this research is to develop nozzle shapes and magnetic nozzles that can control the fiber orientation and maintain the fiber distribution in steel fiber-reinforced concrete. In the first year, multi-physics computational analysis method is developed to evaluate the control performance of the magnetic field and nozzle shape. In the second year, based on the optimized design parameters, the prototype of the nozzle is manufactured and validated using the laboratory experiments. • Research and development contents in the first year – Develop multi-physics computational method for the fluid-steel-magnetic interaction analysis – Evaluate the relationship between nozzle shapes and fiber orientation – Evaluate fiber orientation and distribution according to the magnetics and nozzle shapes • Research and development contents in the second year – Manufacture nozzle prototypes based on the optimized design parameters – Validate the nozzle prototypes from the laboratory experiments – Evaluate the performance of the fiber orientation and distribution using image processing technique				
Results	• Relationship between fiber orientation, nozzle shapes, and magnetics • Fiber orientation with the magnetics and nozzle shapes • Prototype nozzles and based on the optimized design parameters • Evaluation of performance of the developed nozzles from experiments				
Expected Contribution	• Improve the strength and ductility of steel fiber reinforced concrete and exceed the limit of its application with economical efficiency • Able to attach and detach the developed nozzle to the current pouring equipment • Possible to secure market competitiveness in the field of steel fiber reinforced concrete • Further develop and transfer the current research achievements to steel fiber and concrete companies after the completion of the research				
Keywords	Steel Fiber reinforced concrete	Nozzle shape	Magnetic nozzle	Fiber orientation	Fiber distribution

< Contents >

1. Outline of research and develop project	7
2. Domestic and overseas technology development status	14
3. Research contents and performance	17
4. Achievement of goals and contribution to related fields	64
5. Plan to utilize R&D achievements	69
6. Overseas science and technology information collected during the research process	71
7. Security rating of R&D achievements	74
8. Research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System	75
9. Implementation of safety measures in laboratories based on R&D tasks	76
10. Representative research results of R&D Project	77
11. Others	79
12. References	80

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	14
3. 연구수행내용 및 성과	17
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	64
5. 연구개발성과의 활용 계획	69
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	71
7. 연구개발성과의 보안등급	74
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	75
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	76
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	77
11. 기타 사항	79
12. 참고 문헌	80

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 노즐의 형상 및 마그네틱을 이용하여 콘크리트에 혼입된 보강용 강섬유의 방향성을 효율적으로 제어하고 향상시킬 수 있는 강섬유 보강 콘크리트의 타설 제어 노즐을 개발함 (그림 1.1 참고)
- 마그네틱-유동-구조계의 상호작용(magnetic-fluid-structure interaction)을 고려한 Multi-physics 전산해석 기법을 개발하여 최적의 형상과 자속 밀도 등을 고려한 제어 노즐을 제안함
- 제안 기술은 실내 모형실험을 통해 강섬유의 방향성 제어 성능과 강섬유의 분포 성능을 검증함
- 기존의 콘크리트 이송관 출구단에 부착되어 콘크리트와 함께 토출되는 강섬유의 방향성을 제어할 수 있도록 개발함

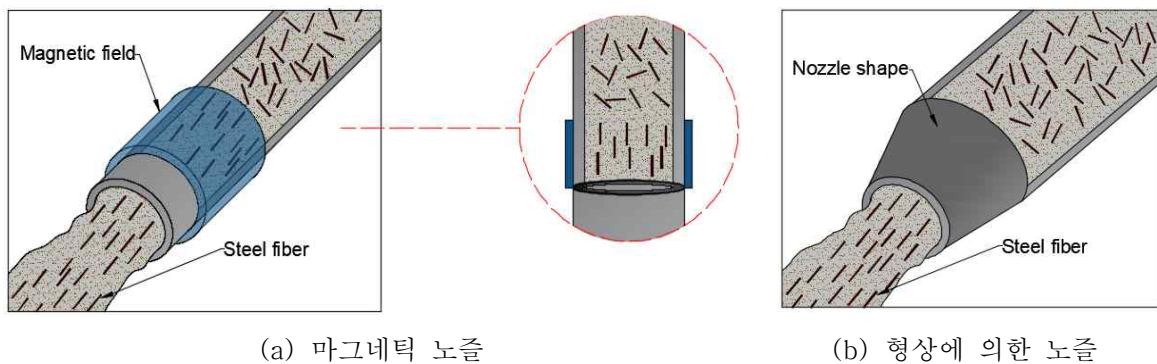


그림 1.1 개발 개념도

2. 연구개발의 필요성

- 콘크리트의 취성 파괴를 방지하기 위하여 강섬유 또는 유기섬유 등의 보강섬유를 콘크리트에 혼입하여 콘크리트의 역학적 성능을 개선한 섬유 보강 콘크리트에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있음 (그림 1.2 참고)
- 특히, 강섬유 보강 콘크리트는 터널의 숏크리트, 프리캐스트 라이닝, 도로, 슬래브 등에 활발히 적용되고 있으며, 최근에는 콘크리트 구조 부재로 적용이 확대되고 있음 (그림 1.3 참고)
- 또한, 강섬유 보강 콘크리트는 내진성능 향상을 위한 연성도 확보에도 효과적인 것으로 알려짐에 따라 그 적용성이 더욱 확대되고 있음



그림 1.2 섬유 보강 콘크리트의 연도별 논문 추이



그림 1.3 강섬유 보강 콘크리트 예시

- 강섬유 보강 콘크리트에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 우수한 역학적 성능이 검증되었으나, 현장 적용성의 확대를 위해서는 강섬유의 방향성과 분포성을 확보할 수 있는 기술이 반드시 필요함
- 섬유보강 콘크리트의 품질을 확보하고 본래의 성능을 발휘하기 위해서는 보강 섬유의 방향성을 조절하고 균등하게 분산시키는 것이 중요함
- 특히, 강섬유 보강 콘크리트에서 섬유의 방향성을 조절할 수 있는 기술은 강섬유 보강 콘크리트의 인장 특성을 결정하는데 매우 중요한 요소임
- 최근에는 섬유보강 시멘트계 재료의 굳기 전 레올로지(Rheology) 및 유동 특성, 타설방법에 따라 섬유의 분산성과 방향성을 향상시키는 연구가 이루어지고 있으나, 아직 확립되지 못하고 있는 실정임

- 섬유 보강 콘크리트의 타설방향에 따른 유동흐름의 차이로 섬유의 방향성과 분포도에 큰 차이가 발생하였으며, 휨인장 강도 실험결과 약 50% 가량의 차이가 발생한 것으로 보고됨 (그림 1.4 참고)
- 따라서, 보강섬유의 배치 또는 배열 방향과 분포성을 섬유 보강 콘크리트의 타설 단계에서부터 조절할 수 있는 기술 또는 방법에 대한 요구가 늘어나고 있는 실정임

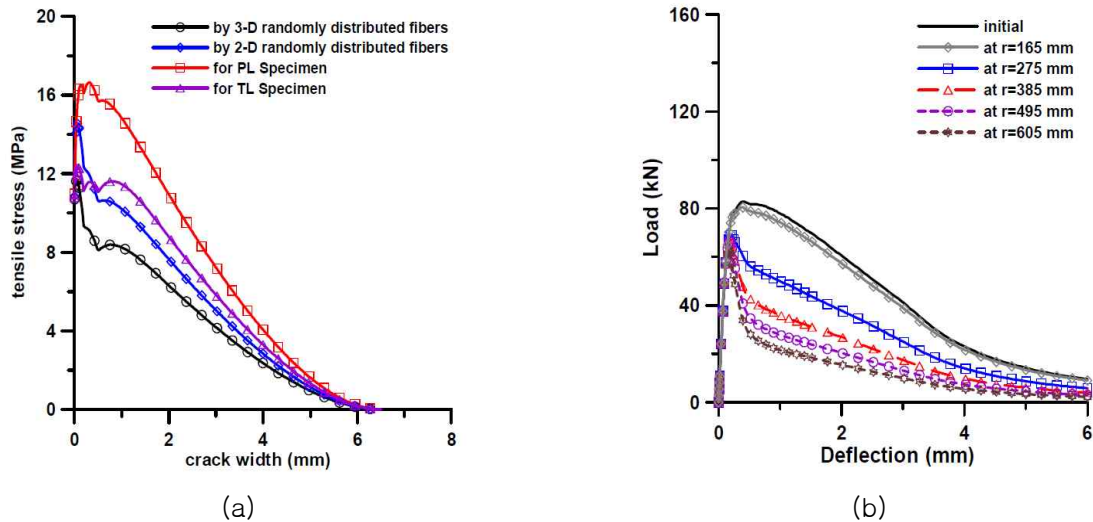


그림 1.4 (a) 섬유방향성 분포에 따른 인장거동 비교, (b) 유동에 따른 휨 인장거동 예측
(Kang, S. T. and Kim, J. K. 2010)

- 이에, 본 연구에서는 다양한 형상 및 마그네틱 노즐을 개발하여 강섬유 보강 콘크리트 타설 시 강섬유의 방향성과 분포도를 효율적으로 제어할 수 있는 원천기술을 개발하고자 함
- 섬유보강 콘크리트에서 보강섬유는 주로 인장응력에 저항하는 부재이므로, 구조물의 용도나 기능에 따라서는 보강섬유를 특정한 방향으로 배열되도록 조절하면서 섬유의 방향성 향상과 함께 분포성을 향상시킬 필요가 있음
- 강섬유의 방향성을 효율적으로 조절함으로써 강섬유 보강 콘크리트의 적용성을 확대시킬 수 있고, 안전하고 경제적인 건설이 가능할 것으로 기대됨
- 현재 국내시장은 숏크리트 분야를 중심으로 시장이 형성되어 있으나, 해외시장은 점차 구조용 부재로 적용이 확대되고 있어, 제안 기술은 현재 국내 강섬유 업체의 시장 확대와 해외시장에서 기술경쟁력을 향상시킬 수 있을 것으로 판단됨
- 강섬유 보강 콘크리트의 강섬유 방향성과 분포도는 타설 이후 경화된 콘크리트에서 비파괴 검사 기술의 한 부분으로 마그네틱을 활용한 연구가 해외에서 일부 시도되어 왔으나, 타설 시 방향성을 제어하면서 분포도를 향상시키는 기술 개발은 현재 전무한 상황임
- 더욱이, 강섬유 보강 콘크리트는 최근 자가센싱이 가능한 재료로써 각광받고 있어, 섬유의 방향성을 조절할 수 있는 기술 개발은 센싱 능력 또한 향상시킬 수 있을 것으로 기대됨

3. 연구개발 범위

3.1 최종 목표

○ 강섬유 보강 콘크리트의 섬유 방향성 제어를 위한 노즐 형상 및 마그네틱 노즐 개발

- 80% 이상의 강섬유 방향성 제어 성능
- 0.6 이상의 강섬유 분포도 계수 유지 성능
- 원천 기술에 대한 국내외 특허 확보

3.2 1차 연도

(가) 개발 목표

- 주관연구기관(대구대학교): 노즐 형상과 마그네틱 위치, 밀도에 따른 섬유 방향성 분석 및 최적 설계 변수 제시
- 공동연구기관(세종대학교): 재료 유동 특성과 강섬유 방향성 분석 및 Multi-physics 전산해석 기술 개발

(나) 개발 내용 및 범위

○ 강섬유 보강 콘크리트의 Multi-physics 전산해석기술 개발

- 노즐형상 설계에 앞서 노즐 안에서의 콘크리트 유동특성과 섬유의 방향성 관계 분석
: Multi-physics 전산해석을 통해서 방향성 제어가 없을 경우, 노즐내의 매트릭스 유동특성과 섬유의 방향성 분석(그림 1.5 참고)

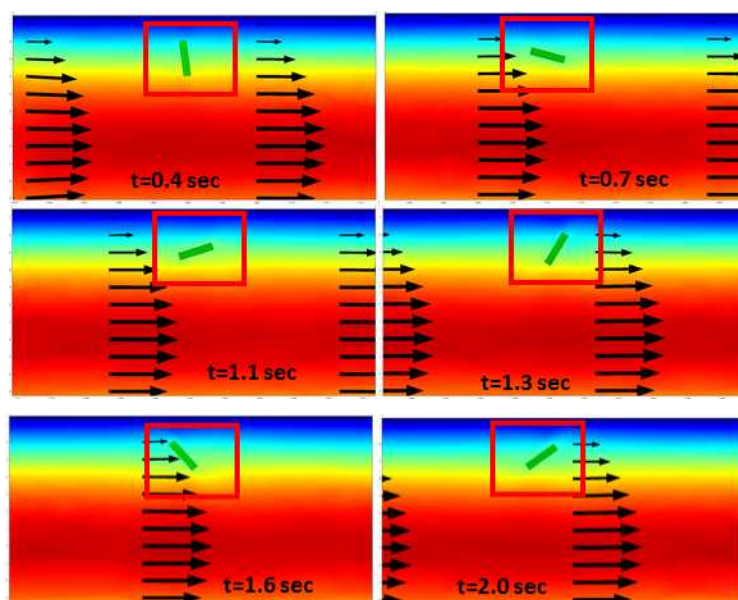


그림 1.5 일반적인 노즐 내 강섬유의 유동특성 분석 예시

- Multi-physics 전산해석을 통해 강섬유 보강 콘크리트의 섬유 방향성과 노즐 형상 관계 분석
- Multi-physics 전산해석을 통해 노즐 형상에 따른 강섬유의 방향성 분석(그림 1.6-7 참고)

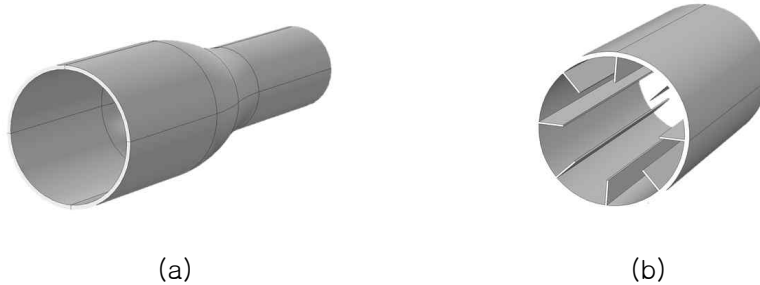


그림 1.6 노즐형상의 종류 예시: (a) T-노즐, (b) B-노즐

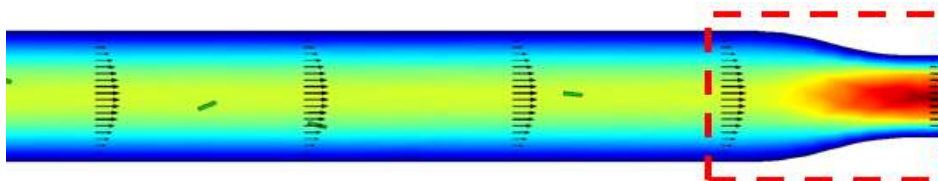


그림 1.7 노즐형상에 따른 강섬유 방향성 분석 예시: T-노즐

- 마그네틱 및 노즐 형상의 다양한 조합에 따른 강섬유의 방향성과 분포도 분석
- 강섬유 보강 콘크리트 노즐 출구 형상 각각에서의 마그네틱 위치, 밀도에 따라 섬유 제어에 미치는 영향 분석(그림 1.8 참고)

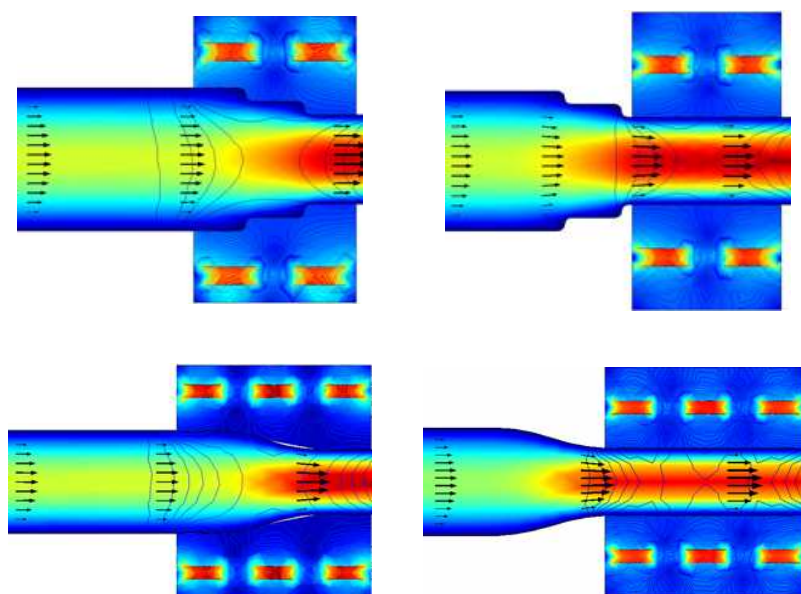


그림 1.8 마그네틱 위치에 따른 영향성 분석 예시

3.3 2차 연도

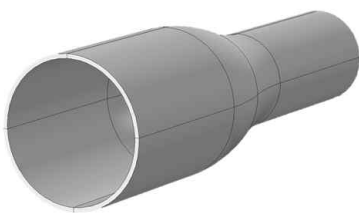
(가) 개발 목표

- 주관연구기관(대구대학교 산학협력단)
: 형상에 기반한 타설 노즐 시작품 제작 및 실내 실험을 통한 성능 검증과 개선
- 공동연구기관(세종대학교 산학협력단)
: 마그네틱 기반 타설 노즐 시작품 제작 및 실내 실험을 통한 성능 검증과 개선

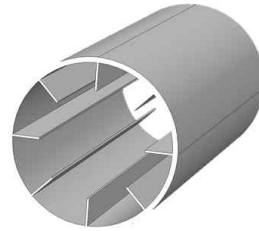
(나) 개발 내용 및 범위

○ 형상에 기반한 타설 노즐 시작품 제작

- Multi-physics 해석을 통한 T-노즐, B-노즐, TB-노즐의 변수 개선
- 개선된 T-노즐, B-노즐, TB-노즐에 대한 시작품 제작 (그림 1.9 참고)
 - 노즐의 크기, 소요경비, 정밀성, 제작기간 등을 고려하여 주문 제작



(a)



(b)

그림 1.9 노즐 형상 시작품 예시: (a) T-노즐, (b) B-노즐>

○ 실내 실험을 통한 성능 검증과 개선

- 1차년도에 제안된 실험 장비의 개선과 활용을 통해 실험 계획안 수립

타설 장비	시편	실험 계획안
		• 실험변수 설정 가. 강섬유 보강 콘크리트 혼입률 - 0.25 ~ 0.75% 나. 노즐 형상 - T-노즐 - B-노즐 - TB-노즐 - 마그네틱 노즐 • 타설 후 Image processing 기법을 이용한 강섬유의 방향성 및 분포도 제어 성능 분석

- 강섬유 보강 시멘트 복합체를 이용한 실내 검증 실험
 - 개선된 변수에 의한 강섬유 보강 시멘트 복합체를 활용한 실내 검증 실험
- Image processing 기법을 이용하여 설계 제작된 노즐로부터 강섬유의 방향성과 분포도 제어 성능 분석
 - 강섬유 보강 시멘트 복합체 시편에 대한 Image processing 알고리즘 개발 : 단면의 절단을 통해 강섬유의 방향성과 분포도를 평가함
- 노즐 형상과 강섬유 혼입율에 따른 섬유 방향성 관계 분석
 - 대상 강섬유는 실무에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 형상비 50~100, 혼입율 0.25 ~ 0.75% 범위 내에서 수행함
- 검증 실험으로 제안된 시스템을 상호 비교·분석하여 노즐의 변수 개선

○ 마그네틱 기반 타설 노즐 시작품 제작

- 1차년도 Multi physics 해석을 통해 도출된 마그네틱 강도와 위치를 바탕으로 부착형 마그네틱 타설 노즐 시작품 제작 (그림 1.10 참고)



그림 1.10 부착형 마그네틱 타설 노즐 제작 및 부착 예시

○ 실내 실험을 통한 성능 검증

- 강섬유 보강 시멘트 복합체를 활용하여 제작된 마그네틱 노즐에 대하여 실내 타설 실험을 수행하여 성능을 검증함
- Image processing 기법을 이용하여 설계 제작된 노즐로부터 강섬유의 방향성과 분포도 제어 성능 분석 (그림 1.11 참고)

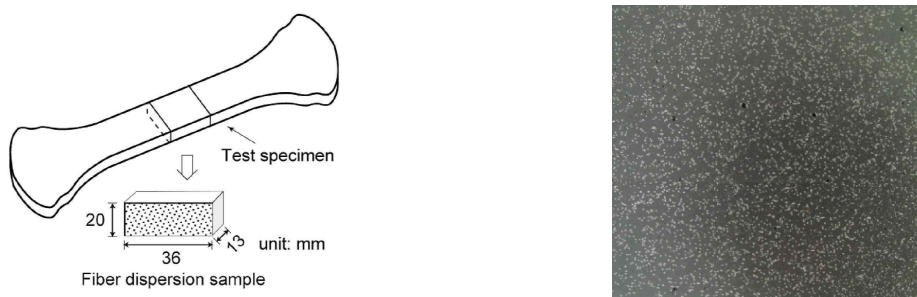


그림 1.11 강섬유 시편의 단면 이미지 예시

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내외 강섬유 보강 콘크리트와 관련된 학술성과(논문, 보고서, 단행본 등 포함)는 콘크리트 구조물의 강도 향상과 연성도 향상 목적 등으로 많은 연구가 활발하게 수행 중임(그림 2.1 참고)

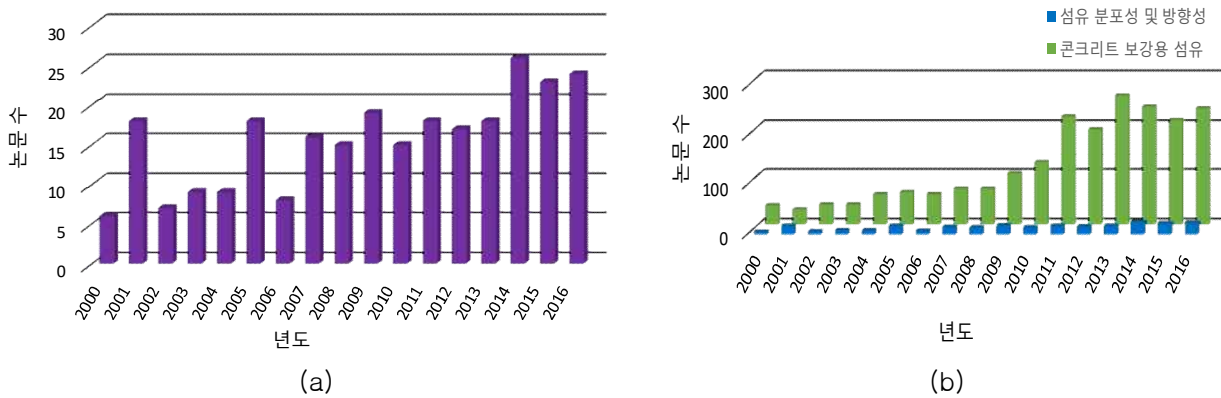


그림 2.1 (a) 강섬유 보강 콘크리트의 연도별 논문 추이 및 (b) 섬유 분포성 및 방향성 논문 현황

- 강섬유 보강 콘크리트의 강섬유 방향성과 분포도를 향상시키기 위한 연구는 대부분이 타설 방법이나 매트릭스 유동 특성에 대한 연구임
- 타설 후 경화된 섬유 보강 콘크리트에서 강섬유의 방향성과 분포도를 측정하기 위한 비파괴 기술 연구들은 해외에서 일부 시도 되고 있으나, 타설 시 타설 노즐 형상 및 마그네틱을 활용하여 방향성을 제어하는 원천 기술은 전무한 상황임(표 2.1 참조)

표 2.1 강섬유 보강 콘크리트 섬유 방향성 관련 주요 논문

저 자	제 목	연 도
Lataste J.F. et al.	Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements	2008
Faifer et al.	Steel Fiber Reinforced Concrete Characterization Based on a Magnetic Probe	2010
Laranjeira F. et al.	Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete	2011
Zandi Y. et al.	Effect of distribution and orientation of steel fiber reinforced concrete	2012
Suuronen J. P. et al.	Analysis of short fibres orientation in steel fibre-reinforced concrete(SFRC) by X-ray tomography	2013
Sebaibi N. et al.	Influence of the distribution and orientation of fibres in a reinforced concrete with waste fibres and powders	2014
Alberti M.G. et al.	Fibre distribution and orientation of marco-synthetic polyolefin fibre reinforced concrete elements	2016

○ 2000년~2017년까지의 강섬유 보강 콘크리트에 대한 특허 동향을 분석한 결과 일본이 약 56%, 미국과 한국이 거의 동일하게 약 17% 실적을 보유하고 있음

- 강섬유 보강 콘크리트에 대한 특허는 일본이 가장 많이 보유하고 있으며 2000년도 이후에는 점차 감소하고 추세인 반면에 국내의 경우 지속적으로 특허를 출원하고 있음 (그림 2.2 참고)
- 일본의 경우 콘크리트 보강용 섬유 관련 특허 출원 건수는 지난 2000년~2007년 1036건에서 2008년~2016년 474건으로 감소하였으며, 국내의 경우 2000년~2007년 140건에서 2008년~2016년 190건으로 증가함
- 이는 강섬유 보강 콘크리트의 재료적 성과에 이어 구조적 적용성 확대에 대한 요구 증대와 기술적 진보가 필요할 것으로 판단됨

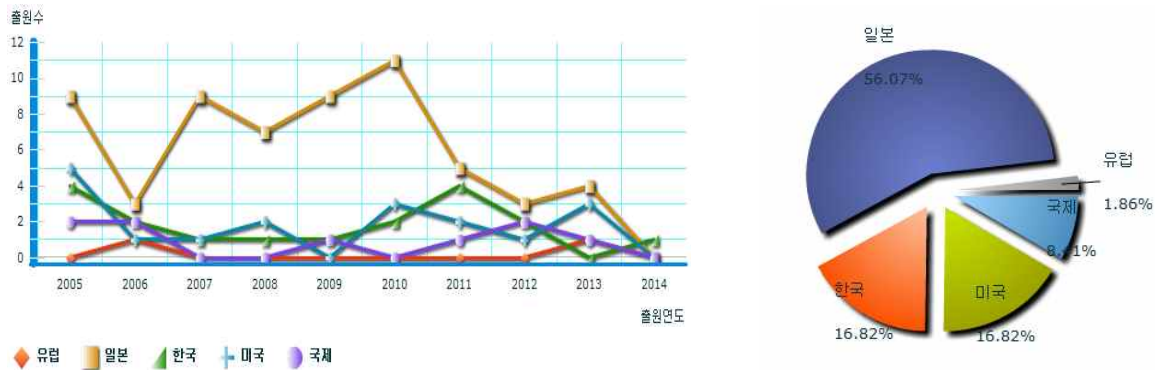


그림 2.2 연도별 및 국가별 강섬유 보강 콘크리트 관련 기술 특허 동향

- 하지만, 강섬유 보강 콘크리트 관련 특허 중 섬유의 분포성 및 방향성 제어에 관한 특허는 아직 연구개발 초기 단계(그림 2.3 참고)에 있으며, 강섬유 보강 콘크리트의 방향성 제어에 관한 원천 연구는 수행된 바 없는 실정임

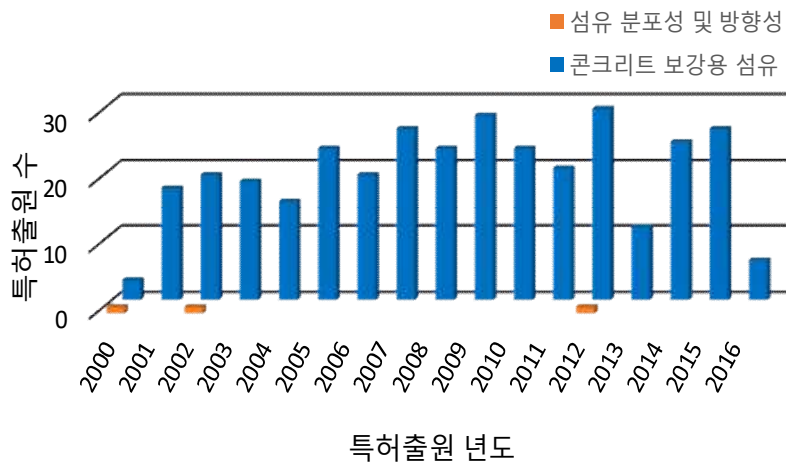


그림 2.3 강섬유 분포성 및 방향성 특허 현황

표 2.2 강섬유 보강 콘크리트 섬유 방향성 및 분포도 관련 주요 특허

출원인	발명명칭	출원 국가
Akazawa, et al	Device for disentangling and spreading short steel fibers	US
OHBAYASHI corp.	Method for controlling orientation of reinforcement fiber in confluent part, and confluent structure of fiber reinforcement concrete member or fiber reinforcement mortar	JP
ISHIKAWAJIMA CONSTERIALS Corp.	Method for orienting fiber in fiber reinforced concrete or mortar and fiber-orienting fixture used therefor	JP
MATSUI KATSUMI, MARUYAMA KATSUHIRO	Fiber orienting method and apparatus used therein	JP
주식회사 금강	콘크리트용 강섬유의 분산 공급장치	KOR
청조화성주식회사	콘크리트보강용 강섬유의 분산처리장치	KOR
박성용, 김성태	섬유보강 콘크리트 타설용 노즐	KOR

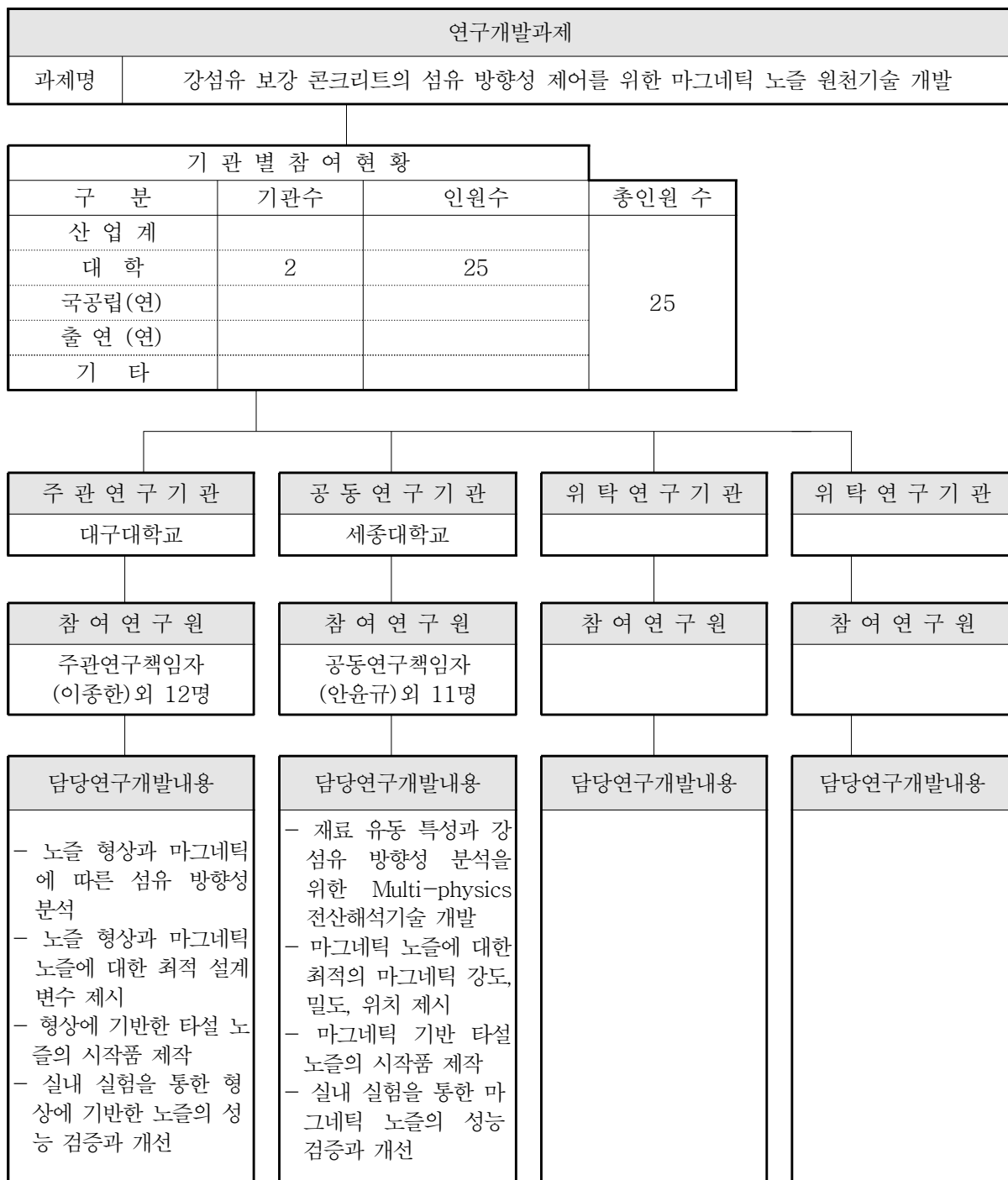
- 본 과제는 마그네틱-유동-구조계의 상호작용을 고려하여 콘크리트 보강 강섬유의 방향성 제어 노즐을 개발함으로써 기존 방법에 비해 차별성과 독창성이 높아 학문적 성과와 기술적 우위를 선점할 수 있음
- 더구나 강섬유의 방향성과 분포도를 동시에 제어할 수 있는 노즐의 적용 및 연구사례는 거의 전무하여 제안과제는 기술적인 선점뿐만 아니라, 산업적인 기대효과도 높을 것으로 판단됨

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 연구개발 추진 전략 및 방법

- 본 과제는 다양한 변수를 가지고 있는 타설 노즐에 대한 전산해석과 실험 검증을 포함하고 있어, 1차년도에는 전산해석을 통한 타설 노즐의 변수를 제안하고, 실험을 위한 타설장비를 고안, 제작함. 2차년도에는 타설 노즐 변수를 개선하고 최적화함으로써 검증 실험 계획을 수립하고, 1차년도의 기초실험을 방법으로 타설 장비를 개선하여 노즐의 형상과 마그네틱 노즐에 의한 검증 실험을 수행함
- 본 과제의 주관 및 공동 연구기관 책임자는 강섬유 보강 콘크리트 및 마그네틱 센서 관련 풍부한 연구경험과 실적을 바탕으로 본 과제에서 요구되어지는 다양한 전산구조 해석과 실험을 효율적으로 수행함
- 최종 기술성숙도 TRL 4단계를 달성한 이후, 건설 현장에 직접적으로 적용하기 위하여 콘크리트 레미콘 및 타설 제작 업체 등과의 실용화와 사업화를 염두에 두고 개발할 예정임
- 노즐 형상과 마그네틱에 따른 실험적 검증을 위해서 관련 분야 전문가의 자문을 수행함. 또한, 본 연구에 관심을 가지고 있는 각 대학의 교수팀과 전문가들의 기술 자문과 세미나를 활용하여 제안 기술을 발전시킬 계획임

2. 연구개발 수행 체계



3. 연구수행 내용 및 결과

3.1 연구개발결과 요약

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
Multi-physics 전산해석기술 개발 및 노즐형상과 마그네틱에 의한 방향성 분석	매트릭스 동점성과 속도에 대한 분석	• 매트릭스 동점성 계수(Dynamic viscosity) 7 Pa.s을 기준값으로 결정함 • 매트릭스 유체 흐름속도를 0.3m/s을 기준값으로 결정함
	원형 노즐에 대한 강섬유의 방향성 분석	• Multi-physics 해석에 의해 일반 원형 노즐에서는 노즐 중앙부에서는 일정한 유속으로 인해 회전이 발생하지 않음 • 노즐의 벽면과 중앙부에서의 저항력 차이로 강섬유 회전이 발생하여, 노즐에서 토출 후 약 20° 이상의 방향각이 발생함
	T-노즐(Tapered nozzle) 형상 변수에 따른 강섬유의 방향성 분석	• T-노즐의 변단면 감소율인 높이-길이 비 (D_c/L_c) = 0.3, 0.6 일 때 강섬유 방향성 제어에 효과적임 • 2차 노즐 길이(L_2)가 2차 노즐 직경(D_2)과 같을 경우 강섬유 방향성 제어에 효과적임
	TB-노즐(Tapered and Bladed nozzle) 형상 변수에 따른 강섬유의 방향성 분석	• 블레이드의 길이가 $0.5D_2$, $1.0D_2$ 일 때, 변단면 내에 위치할 경우 인 경우 강섬유의 방향성 제어에 가장 효과적임 • 블레이드가 기존이 원형 단면, 또는 변단면 내에 부착된 경우 강섬유의 방향성 제어에 효과적임
	마그네틱 강도와 밀도에 따른 강섬유의 방향성 분석	• 노즐 측면과의 부착성과 자기장 끝부분으로 인한 회전 현상 제어를 위해 자속강도 0.8T를 기준값으로 설정함 • 큰 강도의 하나의 마그네틱을 적용하는 것보다 작은 강도의 여러 개의 마그네틱을 적용하는 것이 마그네틱 필드(Magnetic field) 범위 확대에 효율적임
	노즐 형상과 마그네틱 조합에 의한 강섬유의 방향성 분석	• 마그네틱의 부착위치가 기존의 원형노즐(1차노즐)이나 T-노즐의 2차 노즐에 위치한 경우 강섬유의 방향성 제어에 효과적임 • 마그네틱 개수가 증가할수록 강섬유의 방향성 제어 유효길이가 늘어남

노즐 형상과 마그네틱 노즐에 대한 최적안 제시	T-노즐(Tapered nozzle) 형상 변수 개선을 통한 최적안 도출	• 선행 해석을 통해 섬유가 T-노즐의 변단면을 지나 2차 노즐에 진입하게 되면 회전이 다시 발생하게 되어 섬유의 방향성 제어 효과가 반감됨 • 2차 노즐 길이(L_2)를 제거하고, 강섬유의 길이(L_f)를 기준값으로 하여 T-노즐의 변수들을 개선함 • 노즐 직경(D_2)이 $2L_f$, 변단면의 경사각 56°를 T-노즐의 최적안으로 도출함
	B-노즐(Tapered nozzle)에 대한 최적안 도출	• 블레이드 길이(L_b) $6L_f$, 블레이드부착 위치(L_1) $6L_f$, 블레이드 부착 간격(D_b) $2L_f$를 B-노즐의 최적안으로 도출함 • 최적화된 B-노즐은 노즐의 직경 변화에 거의 영향을 받지 않고, 섬유의 방향각 제어 성능을 보임
	TB-노즐(Tapered and Bladed nozzle) 형상 변수 개선을 통한 최적안 도출	• T-노즐 및 B-노즐 최적안 도출에 의해 TB-노즐에 대한 변수들을 개선함 • 최적화된 T-노즐($D_2=2L_f$, $\theta=56^\circ$)에 블레이드 간격(D_b)=$1.3L_f$, 블레이드 길이(L_b)=$4L_f$, 블레이드 부착위치(L_1)=0를 TB-노즐의 최적안으로 도출함
	마그네틱 노즐 변수 개선을 통한 최적안 도출	• 노즐 형상과 마그네틱 조합에 의한 선행 해석 결과 마그네틱에 의한 효과가 지배적임 • 탈부착의 편의성과 마그네틱 효과의 최대화를 위하여 기존 원형 노즐에 마그네틱 노즐을 부착하는 것으로 변수를 개선함 • 마그네틱 노즐의 길이 15cm, 노즐 내 마그네틱 강도 0.019T를 최적안으로 도출함
제작된 시작품을 이용한 실내 검증 실험 수행	실험장비 제작과 개선, 섬유 방향성 제어 효과 평가를 위한 초기 선행실험 실시	• 투명 물질과 강섬유를 혼합한 (혼입률 0.1%) 후 노즐형상 (원형노즐, T-노즐)에 따른 초기 선행 실험을 실시함 • 1차 선행실험에서 타설 장비의 압력조절 어려움, 교반기 회전날개의 속도조절 어려움, 교반기 투입기의 제작 보완 등으로 강섬유의 분포도 제어 성능을 정확히 평가하기 어려웠으며, 장비 개선의 필요성을 확인함 • 2차 선행실험을 실시하여, 노즐형상에 따른 강섬유의 방향성과 분포도 향상 가능성을 확인함

	최적화된 T, B, TB, 마그네틱 노즐에 대한 실내 검증 실험 수행	- T, B, TB, 마그네틱 노즐의 최적안을 바탕으로 시작품 제작하였음 - 노즐의 형상, 섬유 혼입률이며, 각 변수에 대해 3개의 시편을 제작하여 총 45개의 시편을 제작하였음 - 개선된 타설 장비를 이용하여 사각형 시편에 수직타설 실험을 수행하고, 양생 후 절단기를 이용하여 각 시편에 대해서 상·하부 5cm, 중앙부는 4cm 간격으로 절단하여 강섬유의 방향성과 분포도를 분석함
이미지분석기법 기반의 강섬유 방향성 및 분포 성능 검증	기존의 원형 노즐에 대한 강섬유 및 분포도 계수	- 기존 원형 노즐을 이용하여 타설 시, 강섬유의 방향성계수 평균값과 표준편차는 각 50.8%, 2.2%로 평가되었음 - 기존 원형 노즐을 이용하여 타설 시, 강섬유의 분산도계수 평균값과 표준편차는 각 0.586, 0.051로 평가되었음
	T-노즐에 대한 강섬유 방향성 및 분포도 계수	- T-노즐 타설 시, 강섬유의 방향성계수 평균값은 68.6%, 표준편차는 2.9%로 나타남 - 기존 원형 노즐 대비 약 35.0% 이상의 강섬유의 방향성 제어 효과를 보임 - 강섬유 혼입률 (0.25, 0.50, 0.75%)에 따른 강섬유의 방향성계수 차이는 거의 없는 것으로 평가됨 - T-노즐 타설 시, 강섬유의 분산도계수 평균값은 0.653, 표준편차는 0.051로 나타남 - 기존 원형 노즐에 비해 약 20.5% 이상의 강섬유의 분산도 제어 효과를 보임 - 강섬유 혼입률이 0.25%에서 0.75%로 증가함에 따라 강섬유의 분산도계수는 거의 선형적으로 증가함
	B-노즐에 대한 강섬유 방향성 및 분포도 계수	- B-노즐 타설 시, 강섬유의 방향성계수 평균값은 70.4%, 표준편차는 2.4%로 나타남 - 기존 원형 노즐 대비 약 38.6% 이상의 강섬유의 방향성 제어 효과를 보임 - 강섬유 혼입률(0.25, 0.50, 0.75%)에 따른 강섬유의 방향성계수 차이는 거의 없는 것으로 평가됨 - B-노즐 타설 시, 강섬유의 분산도계수 평균값은 0.706, 표준편차는 0.062으로 나타남

		• 기존 원형 노즐에 비해 약 11.6% 이상의 강섬유의 분산도 제어 효과를 보임 • 강섬유 혼입률이 0.25%에서 0.75%로 증가함에 따라 강섬유의 분산도계수는 거의 선형적으로 증가함
	TB-노즐에 대한 강섬유 방향성 및 분포도 계수	• TB-노즐 타설 시, 강섬유의 방향성계수 평균값은 76.6%, 표준편차는 2.1%로 나타남 • 기존 원형 노즐 대비 약 50.8% 이상의 강섬유의 방향성 제어 효과를 보임 • 강섬유 혼입률(0.25, 0.50, 0.75%)에 따른 강섬유의 방향성계수 차이는 거의 없는 것으로 평가됨 • TB-노즐 타설 시, 강섬유의 분산도계수 평균값은 0.667, 표준편차는 0.053으로 나타남 • 기존 원형 노즐에 비해 약 13.9% 이상의 강섬유의 분산도 제어 효과를 보임 • 강섬유 혼입률이 0.25%에서 0.75%로 증가함에 따라 강섬유의 분산도계수는 거의 선형적으로 증가함
	마그네틱 노즐에 대한 강섬유 방향성 및 분포도 계수	• 마그네틱 노즐 타설 시, 강섬유의 방향성계수 평균값은 70.0%, 표준편차는 1.9%로 나타남 • 원형 노즐 대비 37.7% 이상의 강섬유의 방향성 제어 효과를 보임 • 강섬유 혼입률 (0.25, 0.50, 0.75%)에 따른 강섬유의 방향성계수 차이는 거의 없는 것으로 평가됨 • 마그네틱 노즐 타설 시, 강섬유의 분산도계수 평균값은 0.683, 표준편차는 0.063으로 나타남 • 기존 원형 노즐에 비해 약 16.6% 이상의 강섬유의 분산도 제어 효과를 보임 • 강섬유 혼입률이 0.25%에서 0.75%로 증가함에 따라 강섬유의 분산도계수는 거의 선형적으로 증가함

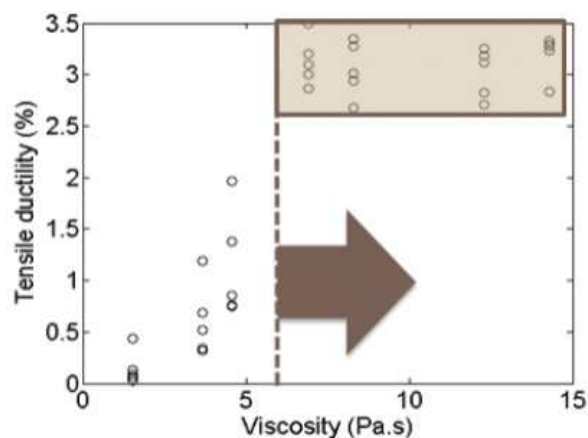
3.2 연구개발 주요내용

3.2.1 전산해석을 위한 매트릭스 동점성과 속도에 대한 분석

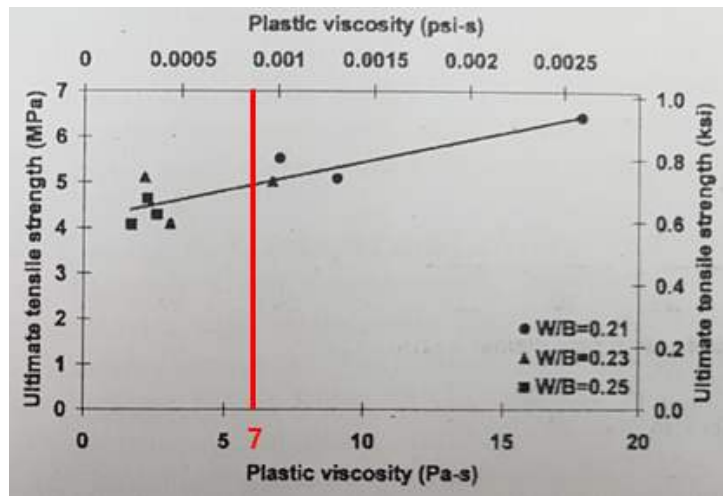
- Multi-Physics 전산해석기술 기반 매트릭스 유동특성과 노즐의 형상, 강섬유의 방향성을 분석하기 위해 강섬유의 형상과 콘크리트의 재료 물성치를 정의함 (표 3.1 참고)
- 본 연구개발에서는 개발기간과 전산결과의 신뢰성을 위하여 COMSOL multiphysics 상용 소프트웨어를 사용하여 매트릭스 유동특성, 노즐형상 등을 고려함.
 - 강섬유의 크기는 $20 \times 2\text{mm}$ (형상비 10), 탄성계수는 205 GPa, 밀도는 7850 kg/m^3 을 적용하였으며, 콘크리트의 밀도는 2300kg/m^3 로 정의함.
 - 강섬유가 콘크리트에 비해 강자성체이므로, 마그네틱과의 유도성을 고려하여 강섬유의 상대투자율은 1000, 콘크리트의 상대투자율은 1로 정의함.
 - 콘크리트 동점성도(Dynamic Viscosity)는 매트릭스의 점성과 인장 변형 성능 상관관계 평가에 의해 매트릭스의 점성이 7 Pa.s 이하일 때는 점성도와 변형성능이 비례관계에 있으나, 7 Pa.s 이상일 때 모르타르의 점성과 관계없이 변형 성능이 3% 정도로 균일하게 나타남. 따라서, 본 연구에서는 Multi-physics 해석 시 고려한 콘크리트의 동점성도의 기준값을 7 Pa.s로 결정함 (그림 3.1 참고)

표 3.1 강섬유 및 콘크리트의 재료 물성치

상대투자율 (Relative Permeability)	강섬유	1000
	콘크리트	1
강섬유의 탄성계수(Modulus of Elasticity)		205 GPa
밀도 (Density)	강섬유	7850 kg/m^3
	콘크리트	2300 kg/m^3
콘크리트의 동점성도(Dynamic Viscosity)		7 Pa.s



(a) 매트릭스 점성과 인장변형성능과의 관계



(b) 매트릭스 점성과 최대인장강도와의 관계

그림 3.1 매트릭스 점성과 인장 변형 성능 및 최대인장강도와의 관계 (Yang E. H. 2009)

- 파이프 내 강섬유 보강 콘크리트의 유속은 유압 펌프의 압력에 의해 좌우되며, 본 연구에서는 매트릭스 유속을 결정하기 위해 유속 0.1, 0.3, 0.5 m/s에 대한 전산해석을 수행함. 전산 해석 시 2개의 강섬유를 상·하 대칭으로 배치시킴 (그림 3.2 참고)
- 해석 결과로부터 각 유속 별 노즐 위치에 따른 강섬유의 형상은 그림 3.3과 같으며, 유속에 따른 노즐 위치별 강섬유의 방향각은 표 3.2에 제시함.
- 매트릭스 유속이 빨라질수록 강섬유의 흐름도 빨라져 상대적으로 강섬유의 회전속도를 감소시키지만, 0.3m/s와 0.5m/s에서의 강섬유의 방향각은 유사한 방향성을 보였음. 따라서, 본 연구에서는 강섬유의 회전을 적절히 제어할 수 있는 0.3m/s를 매트릭스 유속 기준값으로 결정함

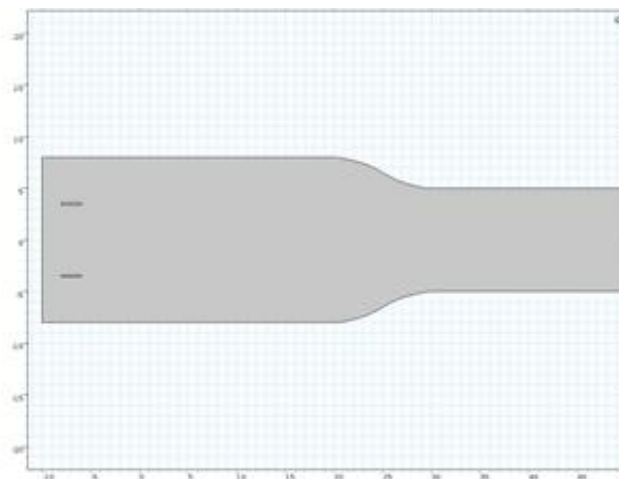
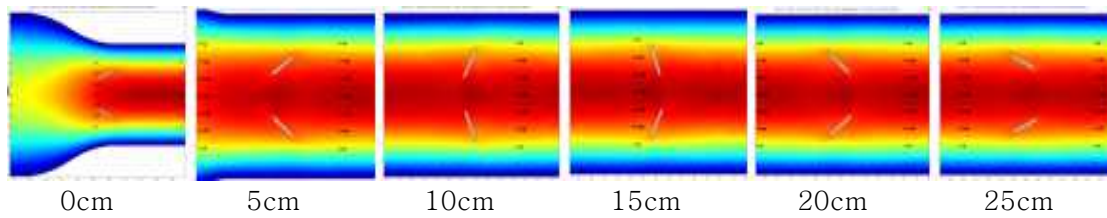
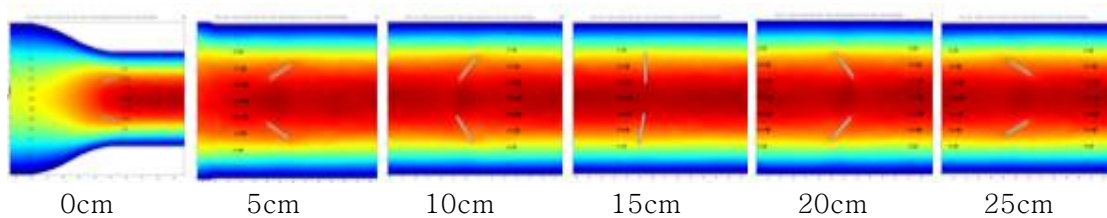


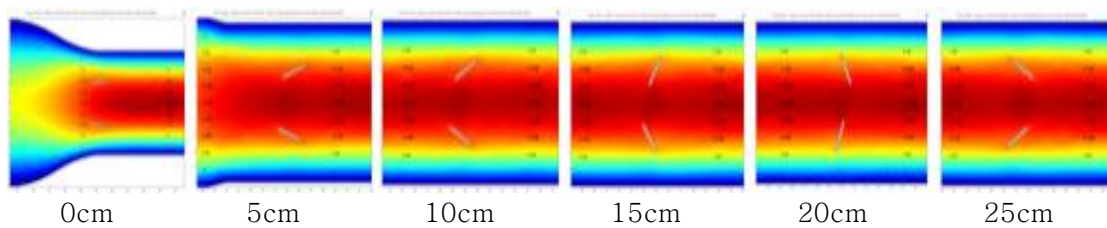
그림 3.2 유입속도를 결정하기 위한 노즐 내 강섬유의 배치



(a) 유입속도 0.1m/s일 때 강섬유의 형상



(b) 유입속도 0.3m/s일 때 강섬유의 형상



(c) 유속 0.5m/s일 때 강섬유의 형상

그림 3.3 유입속도에 따른 강섬유의 형상

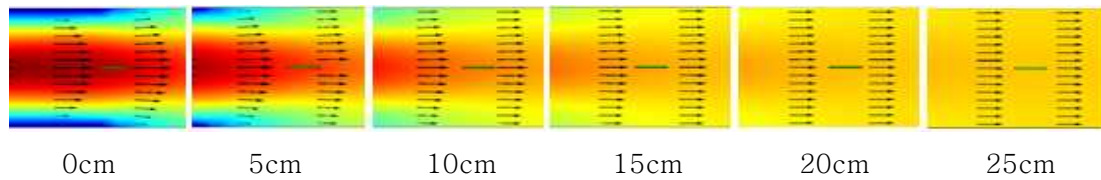
3.2.2 Multi-physics 해석을 통해 섬유 방향성과 노즐의 형상 관계 분석

(가) 원형 노즐에 대한 강섬유의 방향성 분석

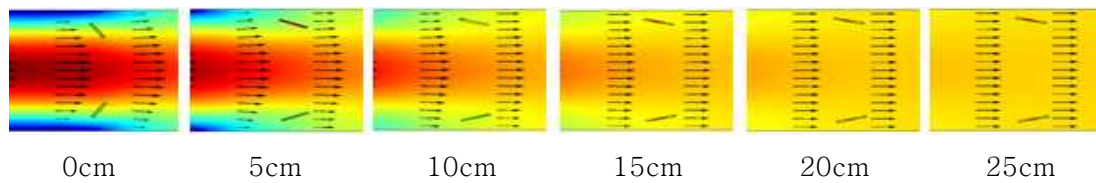
- 원형 노즐 내 강섬유의 방향성을 분석하기 위하여 그림 3.4와 같이 전산해석 모형화를 실시함. 또한, 노즐의 직경은 강섬유의 길이를 고려하여 160mm으로 하고 3개의 강섬유를 노즐의 상부, 중심부, 하부에 각각 위치시켜 타설 노즐 입구에서부터 강섬유의 방향각을 측정함
- 그림 3.5는 각 위치별 강섬유의 형상이며, 각 위치별 강섬유의 방향각은 표 3.3에 계산하였음. 노즐의 벽면과 중심부의 저항상의 차이로 강섬유의 방향성에 차이가 발생하는 것을 확인함
- 노즐 중심에 위치한 강섬유는 일정한 유속으로 인해 회전이 발생되지 않고 토출 후 방향각 0° 를 유지하였음
- 상·하단에 위치한 강섬유는 토출 시 유속 차이로 인해 약 66° 의 방향각이 발생하고, 이후 유속차이가 급격하게 줄어들어 토출 후 20cm 이후부터는 약 20° 를 유지하였음



그림 3.4 Multi-Physics 해석 시 고려한 원형 노즐 형상



(a) 중심부 강섬유



(a) 상·하부 강섬유

그림 3.5 원형 단면에서의 강섬유의 각 위치별 형상

표 3.3 원형 노즐에 대한 각 위치별 강섬유의 방향각

Location (cm)	Top (°)	Middle (°)	Bottom (°)
0	66	0.0	66
5	31	0.0	31
10	24	0.0	24
15	22	0.0	22
20	20	0.0	20
25	20	0.0	20

(나) T-노즐(Tapered nozzle) 형상 변수에 따른 강섬유의 방향성 분석

- 일반 원형 노즐에 비해 변단면을 가지는 노즐의 경우, 단면이 줄어들므로 인해 유체의 속도가 빨라져 강섬유의 방향성 제어 성능이 향상될 것으로 판단됨. 따라서, 본 연구에서는 변단면을 가지는 T-노즐(tapered nozzle)에 대한 최적 형상을 도출하기 위해 Multi-physics 해석을 수행함

- T-노즐의 해석 변수는 1차적으로 그림 3.6에 보인 바와 같이 변단면 감소율인 높이-길이의 비(D_c/L_c)와 2차 노즐의 길이(D_2)로 정의함
- 변단면 감소율은 3개의 높이-길이 비($D_c/L_c = 0.6, 0.3, 0.15$)를 고려하였으며, 강섬유의 개수는 그림 3.7과 같이 3개와 4개에 대하여 해석을 수행함
- 총 6개의 변수 해석을 수행하고 표 3.4에 제시된 바와 같이, 2차 노즐의 시작 부분을 기준으로 하여 5cm 간격으로 강섬유의 방향각을 측정함
- 그림 3.8은 Multi-physics 해석에 의한 각 위치별 강섬유 회전 형상의 예시이고, 그림 3.9-3.10은 강섬유의 개수 별 변단면 감소율에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각을 나타냄
- 변단면 감소율에 따른 해석 결과, 변단면 감소율이 0.3, 0.6일 때, 강섬유의 방향성 제어에 효과적인 것으로 평가되었음. 또한, 2차 노즐의 길이(L_2)에 따른 해석 결과, $L_2=1.0D_2$ 일 때 강섬유의 방향성 제어에 효과적인 것으로 평가됨
- 또한, 강섬유의 개수(3, 4fiber) 모두에서 최적화된 단면, 즉 변단면 감소율(0.3), 2차 노즐길이($1.0D_2$), 예서는 강섬유의 위치에 거의 영향을 받지 않는 것으로 평가됨

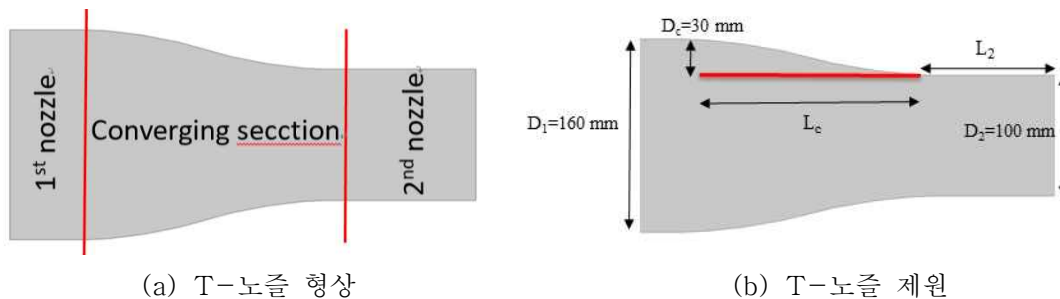


그림 3.6 Multi-Physics 해석 시 고려한 T-노즐 형상 및 제원

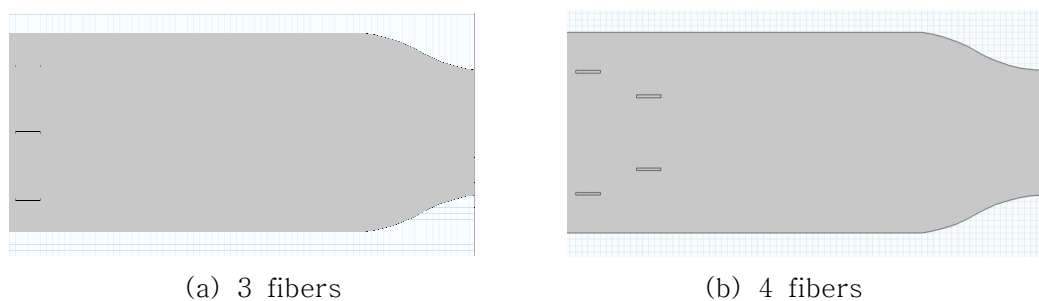
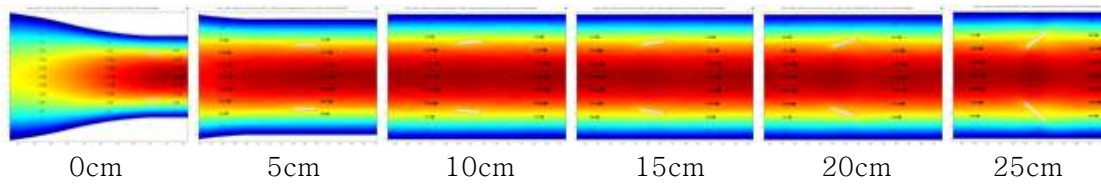
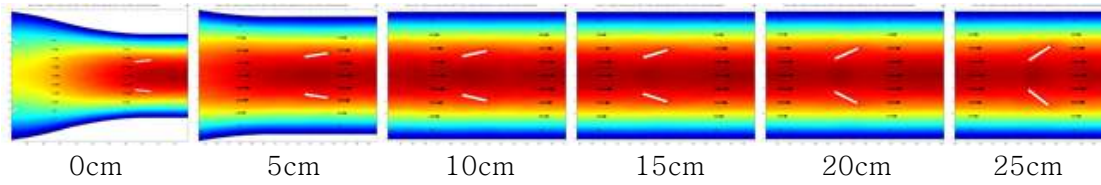


그림 3.7 T-노즐 내 강섬유 개수의 따른 배치



(a) $G=20\text{cm}$ (4 fibers)에서 최상·하단 강섬유의 각 위치별 형상

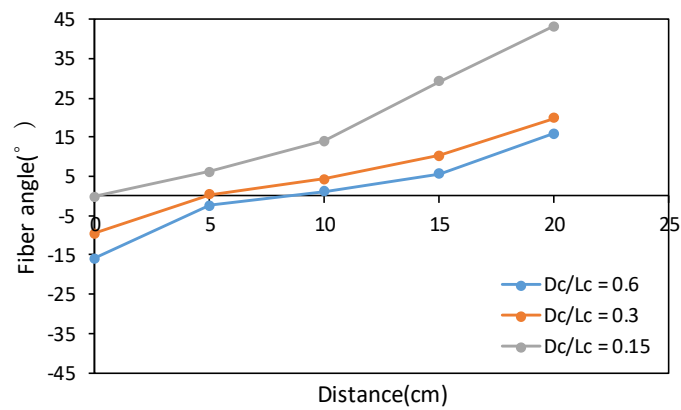


(b) $G=20\text{cm}$ (4 fibers)에서 가운데 상·하단 강섬유의 각 위치별 형상

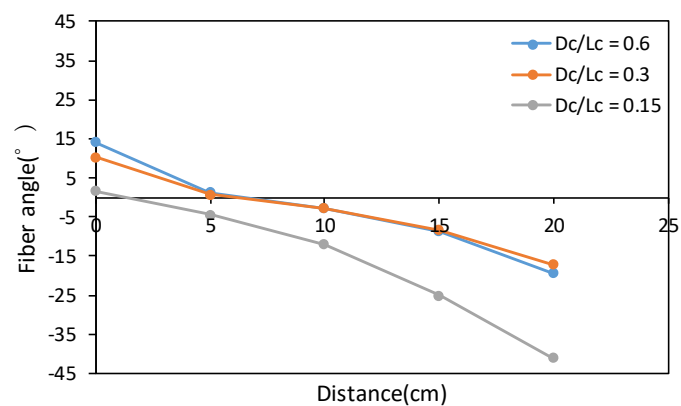
그림 3.8 Multi-physics 해석에 의한 T-노즐의 각 위치별 강섬유 형상

표 3.4 T-노즐 최적인 도출을 위한 변단면의 경사와 강섬유의 개수

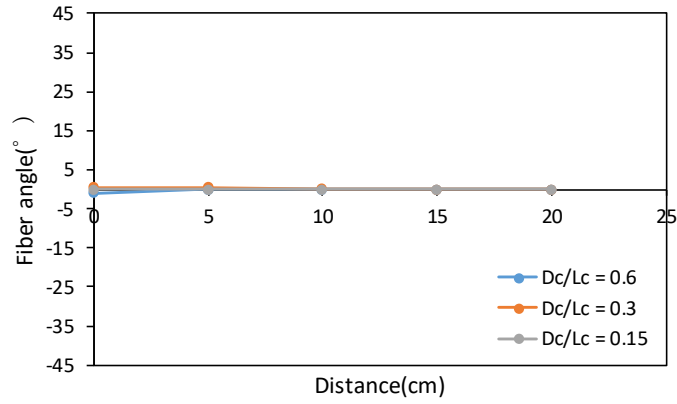
Gradient	The Number of Fiber
5 cm (0.5d)	3EA, 4EA
10 cm (1.0d)	3EA, 4EA
20 cm (2.0d)	3EA, 4EA



(a) 상부 강섬유

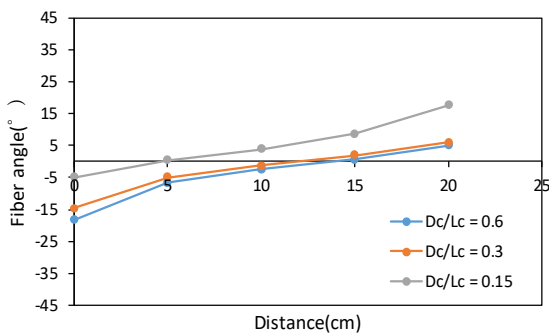


(b) 하부 강섬유

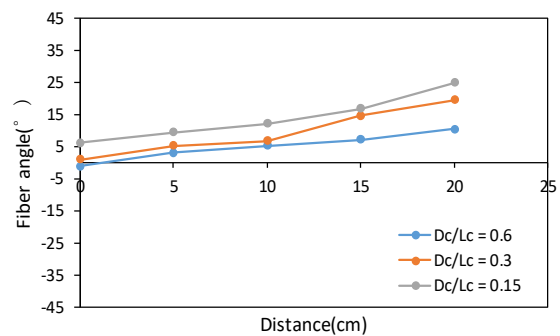


(c) 중심부 강섬유

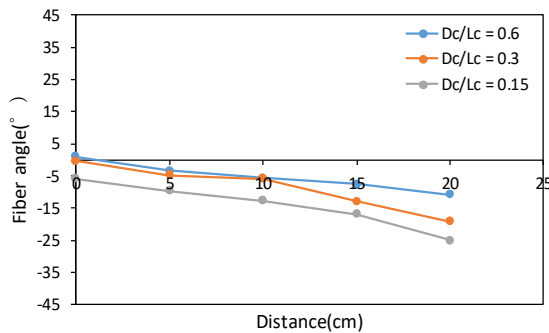
그림 3.9 T-노즐 변단면의 경사에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각(3fiber)



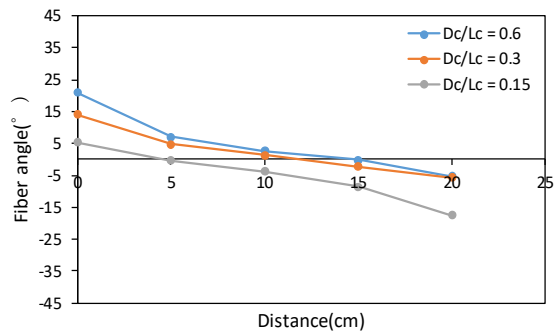
(a) 상부 강섬유



(b) 가운데 상부 강섬유



(c) 가운데 하부 강섬유



(d) 하부 강섬유

그림 3.10 T-노즐 변단면의 경사에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각(4fiber)

(다) TB-노즐(Tapered and Bladed nozzle)형상 변수에 따른 강섬유의 방향성 분석

- TB-노즐은 앞서 도출된 T-노즐 형상(그림 3.11 참고)에 대하여 블레이드(blade)를 부착하여 강섬유의 방향성 제어 효과를 평가함
- TB-노즐의 형상 효과를 평가하기 위하여 블레이드의 위치와 길이에 대한 변수 해석을 실시하였음. 블레이드 위치는 1차 노즐, 1차 노즐과 변단면 중간, 변단면 내 위치를 고려하였고, 블레이드의 길이는 $0.5D_2$, $1.0D_2$, $1.5D_2$, $2.0D_2$ 를 고려하였음 (표 3.5 참고)
- 따라서, 총 12개의 변수에 대하여 전산해석을 수행하였으며, 2차 노즐의 시작 부분을

기준으로 하여 5cm 간격으로 강섬유의 방향각을 측정하였음.

- 그림 3.12는 Multi-physics 해석에 의한 각 위치 별 강섬유 형상의 예시이며, TB-노즐 블레이드 부착 위치에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각을 그림 3.13-3.16에 제시하였음
- 그림 3.13-3.16에서 보인 바와 같이, 블레이드가 기존의 원형 단면이나 변단면 내에 부착되며 블레이드의 길이가 $0.5D_2$, $1.0D_2$ 인 경우가 상대적으로 강섬유의 방향성 제어에 효과적인 것으로 확인됨

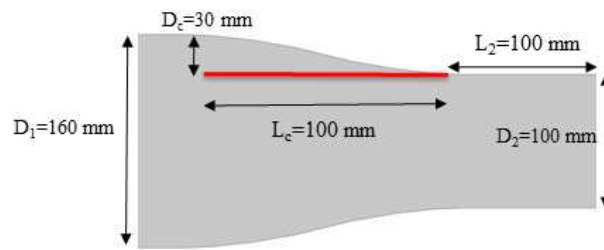
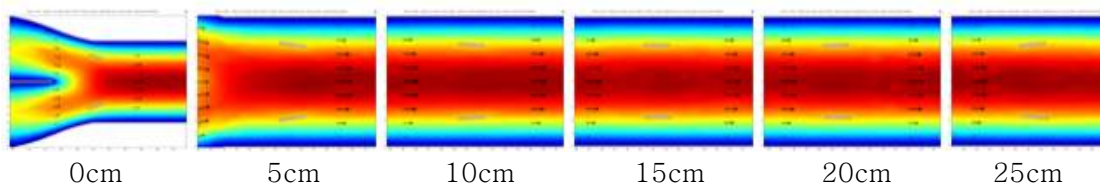


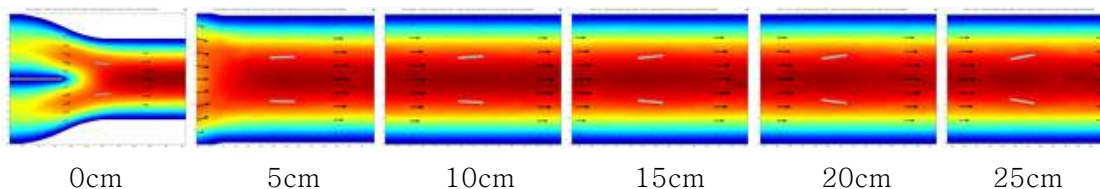
그림 3.11 최적안 T-노즐의 형상

표 3.5 TB-노즐 최적안 도출을 위한 변수

The number of fiber	Location of blade	Length of blade (cm)
4 fibers	First nozzle	5($0.5D_2$), 10($1.0D_2$), 15($1.5D_2$), 20($2.0D_2$)
	Between first nozzle and converging section	
	Second nozzle	

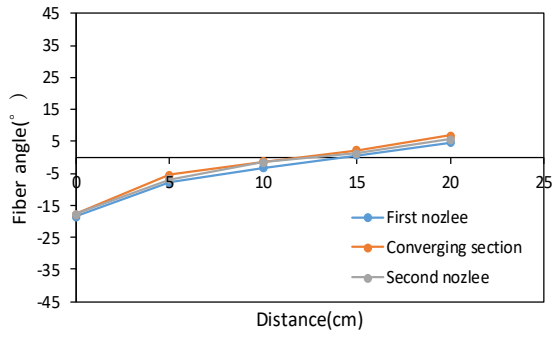


(a) 최상·하단 강섬유의 각 위치별 형상

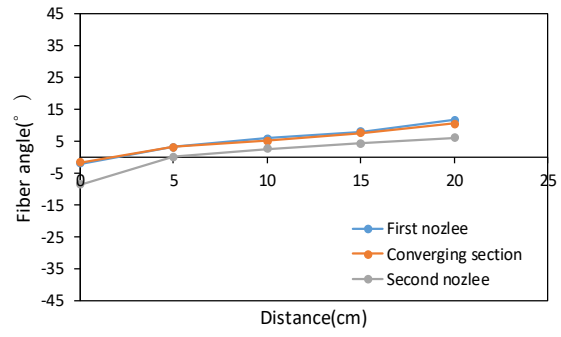


(b) 가운데 상·하단 강섬유의 각 위치별 형상

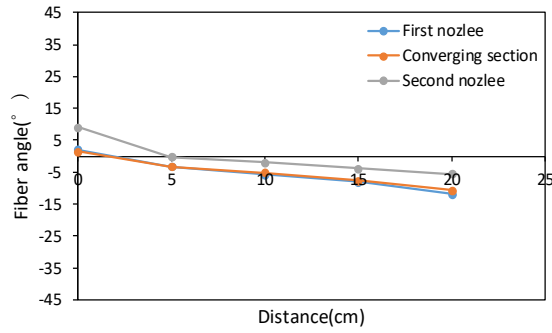
그림 3.12 블레이드($0.1D_2$)가 1차 노즐과 변단면에 중간에 위치한 경우 각 위치별 강섬유 형상



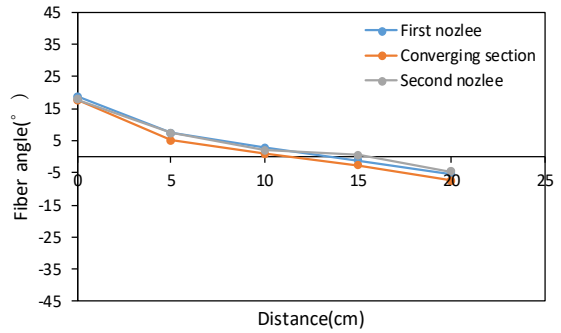
(a) 상부 강섬유



(b) 가운데 상부 강섬유

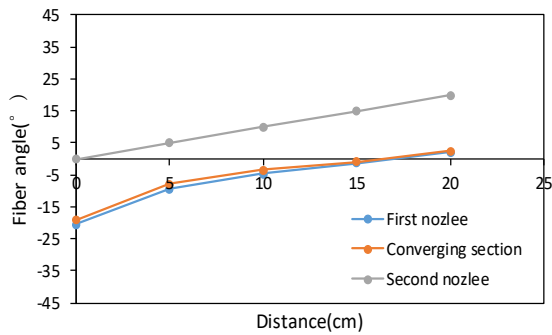


(c) 가운데 하부 강섬유

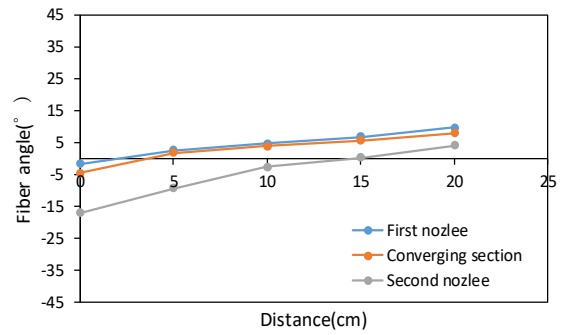


(d) 하부 강섬유

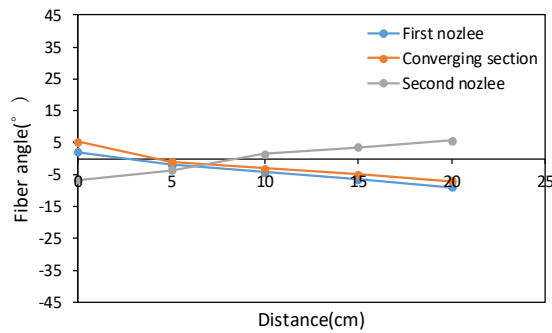
그림 3.13 TB-노즐 블레이드 부착 위치에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각 ($0.5D_2$)



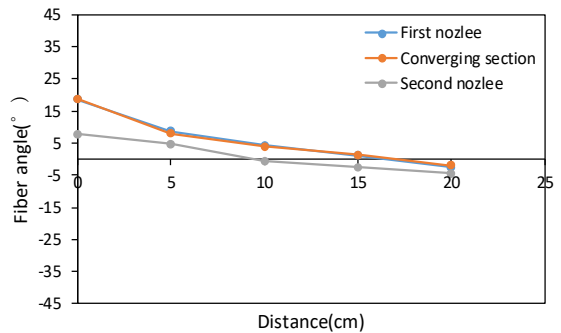
(a) 상부 강섬유



(b) 가운데 상부 강섬유

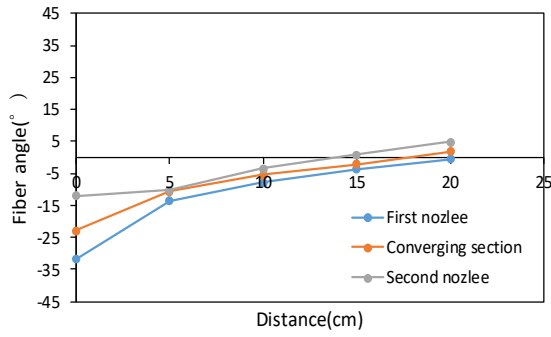


(c) 가운데 하부 강섬유

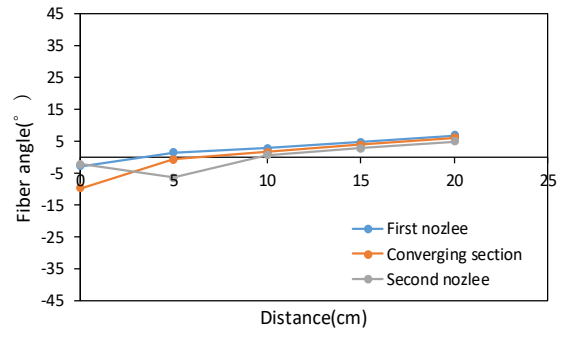


(d) 하부 강섬유

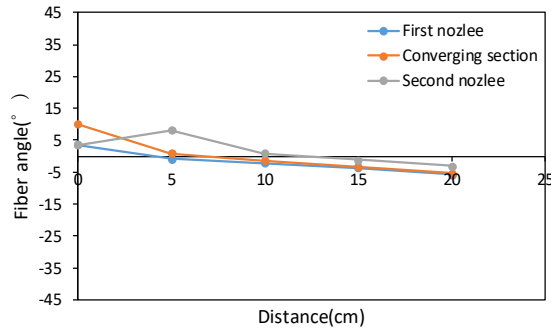
그림 3.14 TB-노즐 블레이드 부착 위치에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각 ($1.0D_2$)



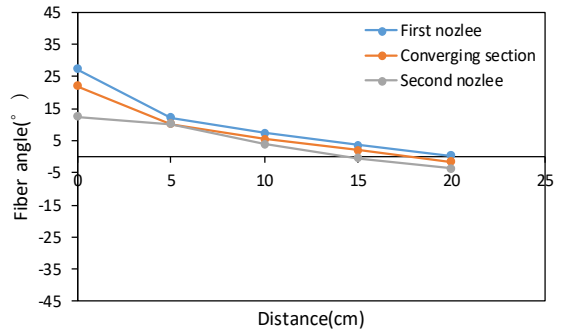
(a) 상부 강섬유



(b) 가운데 상부 강섬유

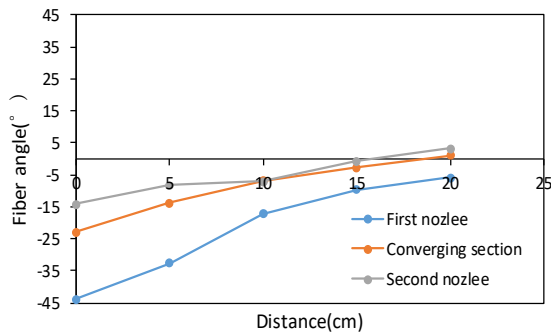


(c) 가운데 하부 강섬유

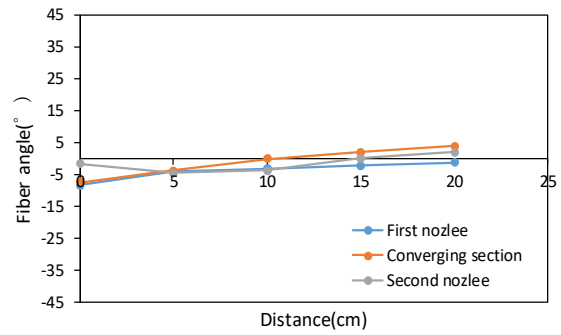


(d) 하부 강섬유

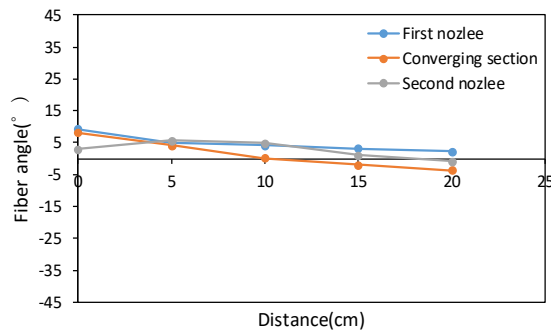
그림 3.15 TB-노즐 블레이드 부착 위치에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각 (1.5D₂)



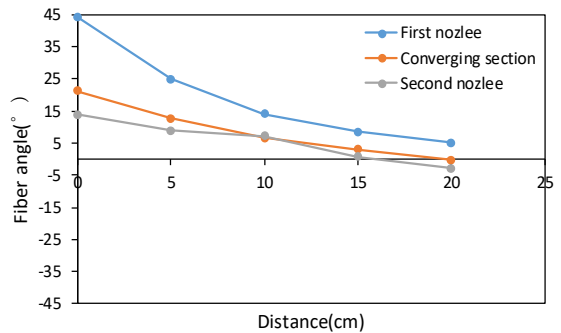
(a) 상부 강섬유



(b) 가운데 상부 강섬유



(c) 가운데 하부 강섬유

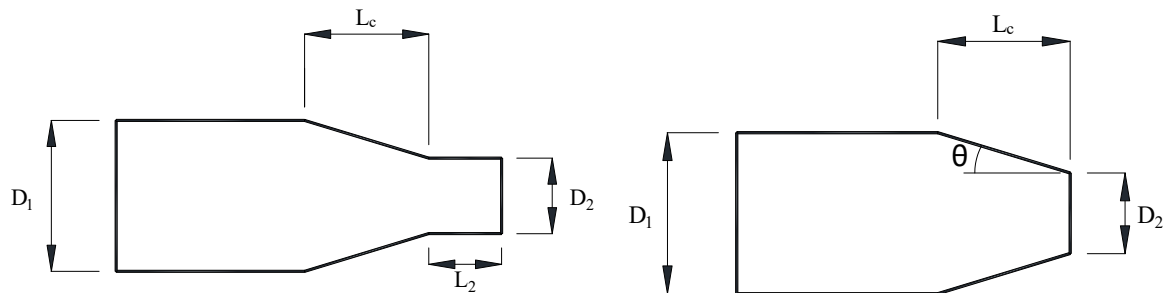


(d) 하부 강섬유

그림 3.16 TB-노즐 블레이드 부착 위치에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각 (2.0D₂)

(라) T-노즐(Tapered nozzle)형상 변수 개선을 통한 최적안 도출

- 1차 해석을 통해 T-노즐 형상 변수는 그림 3.17(a)와 같이 변단면 감소율(D_c/L_c)이 0.3, 2차 노즐 직경(D_2)과 2차 노즐 길이(L_2)의 비(D_2/L_2)가 1.0인 경우로 결정하였음
- 하지만, 섬유가 변단면을 지나 2차 노즐을 지날 때 유속의 차이로 인해 섬유는 다시 회전하게 되어, 변단면에 의한 섬유의 방향성 제어 효과가 반감됨
- 따라서, 그림 3.17(b)와 같이 2차 노즐 길이(L_2)를 제거함으로서, T-노즐의 섬유 방향성 제어 성능을 개선하고자함



(a) 개선 전 T-노즐

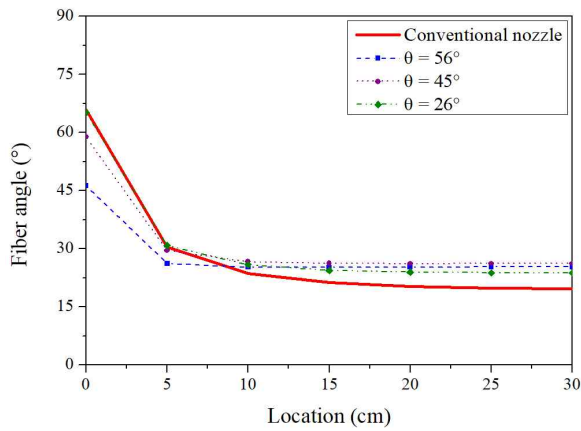
(b) 개선 후 T-노즐

그림 3.17 개선 전 · 후 T-노즐 형상

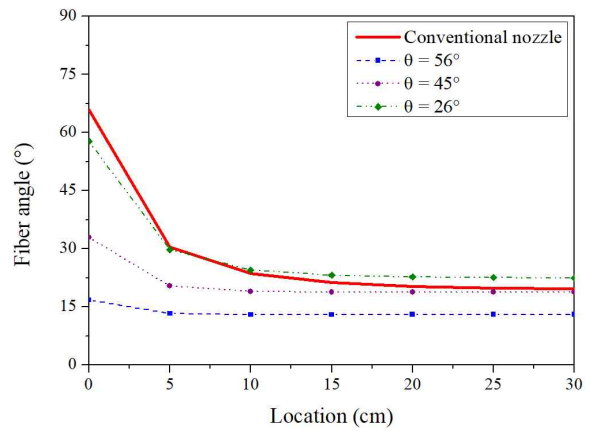
○ T-노즐의 최적안 도출

- 1차 노즐 직경은 16cm이며, 2차 노즐 직경(D_2)은 섬유의 길이를 기준으로 $2L_f$, $3L_f$, $4L_f$, $6L_f$ 를 고려하였으며, 변단면의 각도(θ)는 약 25° , 45° , 56° 를 변수로 결정함. 최상단 강섬유의 방향각을 노즐 출구에서 도출된 후 5cm 간격으로 분석하였음(그림 3.18 참고)
- $D_2=6L_f$ 의 경우는 기존 원형 노즐 타설 시 섬유 방향각(약 20°)과 유사하거나 다소 좋지 않아 T-노즐에 의해 섬유 방향각의 향상을 기대할 수 없음
- $D_2<6L_f$ 의 경우는 T-노즐에 의해 섬유의 방향각은 향상되며, 변단면의 각도(θ)가 증가함에 따라 섬유의 방향각이 작아지는 경향을 보여 T-노즐에 의해 섬유의 방향각 제어 성능을 기대할 수 있음
- $D_2=4L_f$ 의 경우는 변단면 각도(θ)가 약 56° 일 때 방향각 제어 성능을 가장 좋았으며, 도출 직후부터 거의 일정하게 섬유 방향각이 약 15° 를 유지함
- $D_2=3L_f$ 의 경우는 변단면 각도(θ)가 약 45° , 56° 일 때 방향각 제어 성능 향상을 보였으며, 도출 직후부터 거의 일정하게 섬유 방향각이 각각 약 15° , 7.5° 를 유지함

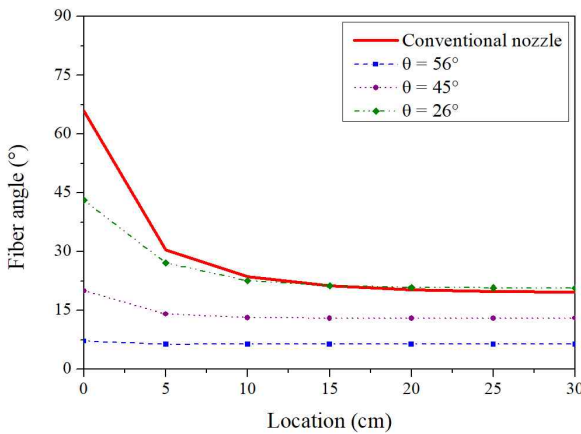
- $D_2=2L_f$ 의 경우는 변단면 각도(θ)가 약 25° , 45° , 56° 일 때 방향각 제어 성능 향상을 보였으며, 도출 직후부터 거의 일정하게 섬유 방향각이 각각 약 15° , 7.5° , 0° 를 유지함
- 따라서, T-노즐 형상에 대한 최적안은 $D_2=2L_f$, $\theta=56^\circ$ 로 결정할 수 있음
- 또한, 도출된 최적안 T-노즐에 대하여 섬유의 길이 변화(2, 3, 4, 5cm)에 따른 섬유의 방향각을 분석한 결과, 모두 약 3.7° 이하로 최적안 T-노즐은 섬유 길이 변수를 적절히 반영하였음
- 그리고, 도출된 최적안 T-노즐에 대하여 1차 직경 변화(12, 16, 20cm)에 따른 섬유 방향각을 분석한 결과, 모두 약 0.8° 이하로 최적안 T-노즐은 1차 노즐 직경 변수를 적절히 반영하였음



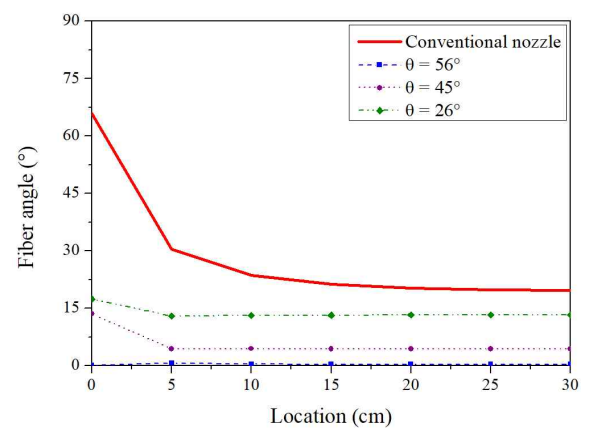
(a) $D_2=6L_f$



(b) $D_2=4L_f$



(c) $D_2=3L_f$



(d) $D_2=2L_f$

그림 3.18 T-노즐의 2차 직경(D_2)과 변단면 각도(θ) 변화에 따른 섬유 방향각

(마) B-노즐(Tapered nozzle)에 대한 최적안 도출

○ 블레이드 길이의 최적화

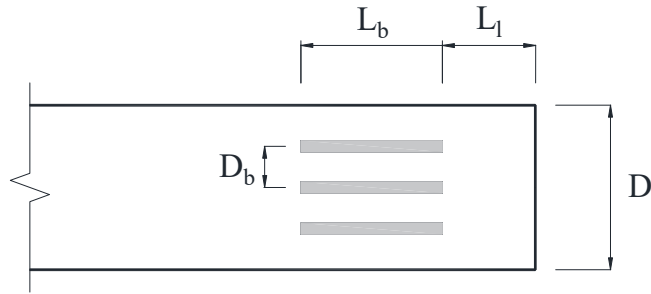


그림 3.19 B-노즐 형상과 변수

- B-노즐에 대한 변수 최적화를 위하여 그림 3.19와 같이 직경(D)을 $8L_f$, 블레이드 간격(D_b)을 $2L_f$, 블레이드 부착위치(L_f)를 $6L_f$ 로 가정하였음
- 가정되어진 B-노즐 변수에 대하여 블레이드 길이 변화($L_b = 2L_f, 4L_f, 6L_f, 8L_f, 10L_f$)에 따른 최상단 강섬유($L_f=20\text{mm}$)의 방향각을 노즐 출구에서 도출된 후 5cm 간격으로 분석하였음(그림 3.20-3.21 참고)
- $L_b = 2L_f$ 경우, 블레이드 노즐이 부착되지 않은 기존 원형노즐에서의 섬유의 방향각(약 20°)보다 좋지 않아, 블레이드 노즐에 의한 섬유 방향각 향상을 기대할 수 없음
- $L_b = 2L_f$ 에서 $6L_f$ 로 길어짐에 따라, 섬유 방향각이 감소하였으며, $L_b = 6L_f$ 이상인 경우 섬유 방향각이 다시 증가하였음. 즉, $L_b = 4L_f$ 경우 섬유의 방향각은 약 15° , $L_b = 6L_f$ 경우 섬유의 방향각이 약 0° , $L_b = 8L_f$ 경우 섬유의 방향각은 $L_b = 4L_f$ 경우와 유사하게 섬유 방향각이 약 15° , $L_b = 10L_f$ 경우 섬유의 방향각은 약 25° 로 평가됨
- 따라서, $L_b = 6L_f$ 를 블레이드 길이의 최적안으로 결정함

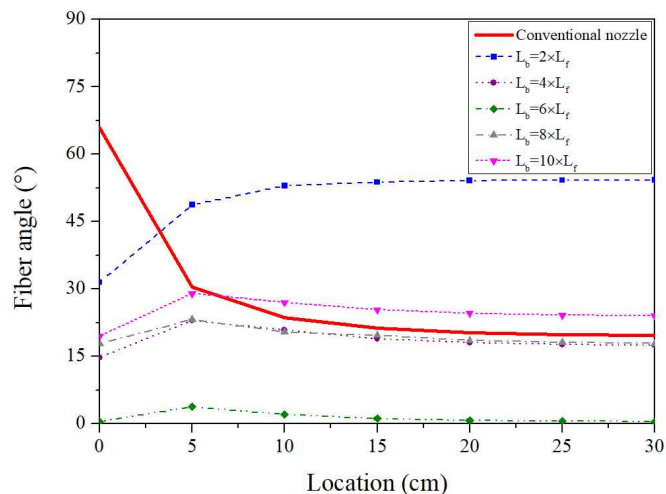


그림 3.20 블레이드 길이(L_b) 변화에 따른 섬유 방향각

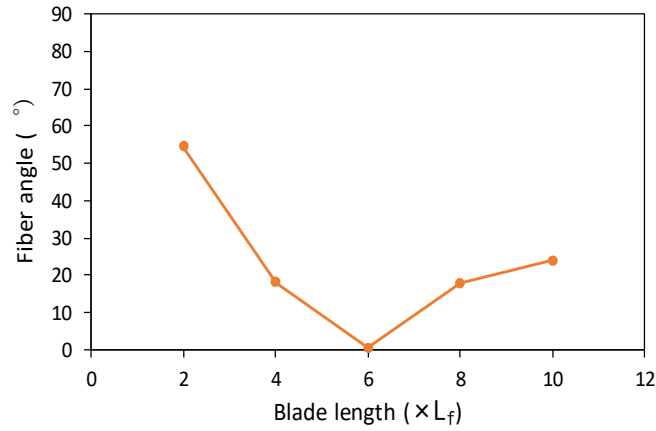


그림 3.21 도출 후 20cm 위치에서 블레이드 길이(L_b) 변화에 따른 섬유 방향각

○ 블레이드 부착 위치의 최적화

- 블레이드 부착위치 최적안 결정을 위해 블레이드 노즐 직경(D)을 $8L_f$, 블레이드 간격(D_b)을 $2L_f$ 로 가정하였으며, 블레이드 길이(L_b)는 앞서 최적화된 길이 $6L_f$ 로 고려함
- 블레이드 부착위치 변화($L_1 = 0, 2L_f, 4L_f, 6L_f, 8L_f, 10L_f, 12L_f, 14L_f$)에 따른 최상단 강섬유($L_f = 20\text{mm}$)의 방향각을 노즐 출구에서 도출 후 20cm에서 분석하였음(그림 3.22 참고)
- $L_1 = 0$ 에서 $2L_f$ 로 길어져도 섬유의 방향각은 약 15° 의 섬유 방향각을 유지하였음
- $L_1 = 2L_f$ 로에서 $6L_f$ 로 길어짐에 따라 섬유 방향각이 감소하였으며, 즉, $L_1 = 2L_f$ 경우 섬유의 방향각은 약 15° , $L_b = 4L_f$ 경우 섬유의 방향각은 약 11° , $L_b = 6L_f$ 경우 섬유의 방향각이 약 0° 로 나타남
- $L_b = 6L_f$ 이상인 경우 섬유 방향각이 다시 증가함. 즉, $L_b = 8L_f$ 경우 섬유의 방향각은 약 3° , $L_b = 10L_f$ 경우 섬유의 방향각은 약 6° , $L_b = 12L_f$ 경우 섬유의 방향각은 약 9° , $L_b = 14L_f$ 경우 섬유의 방향각은 약 15° 로 나타남
- 따라서, $L_b = 6L_f$ 를 블레이드 부착 위치의 최적안으로 결정함

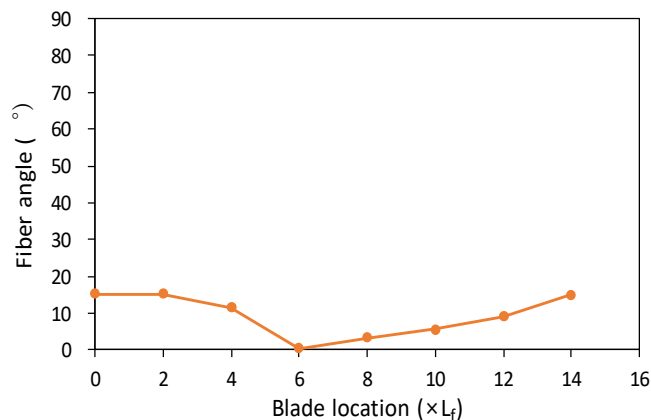


그림 3.22 도출 후 20cm 위치에서 블레이드 부착위치(L_1) 변화에 따른 섬유 방향각

○ 블레이드 간격의 최적화

- 블레이드 간격(D_b)의 최적안 결정을 위해 블레이드 노즐 직경을 $8L_f$ 로 가정하였으며, 블레이드 부착위치와 블레이드 길이(L_b)는 앞서 최적화된 $6L_f$ 로 고려함
- 블레이드 간격 변화($L_l = 1.2L_f, 1.3L_f, 1.6L_f, 2L_f, 2.4L_f, 2.7L_f$)에 따른 최상단 강섬유 ($L_f=20\text{mm}$)의 방향각을 노즐 출구에서 도출 후 20cm에서 분석하였음(그림 3.23 참고)
- $D_b = 2.7L_f, 2.4L_f, 2.0L_f$ 순으로 감소할수록 섬유 방향각은 약 25° , 약 15° , 약 0° 로 감소하였고, $2.0L_f$ 에서 $1.2L_f$ 로 감소할수록 섬유 방향각은 약 0° 에서 약 10° 로 증가하였음
- 따라서, $D_b=2.0L_f$ 를 블레이드 간격의 최적안으로 결정함

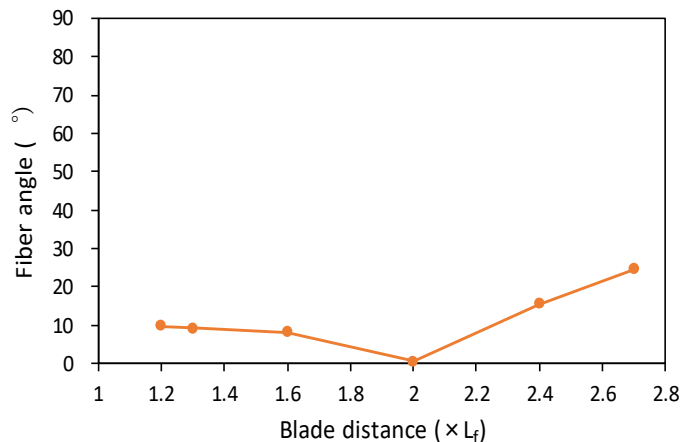


그림 3.23 도출 후 20cm 위치에서 블레이드 간 간격(D_b) 변화에 따른 섬유 방향각

○ 블레이드 노즐 직경 및 섬유 길이 변수에 대한 검증

- 섬유 방향각을 약 0° 로 제어할 수 있는 B-노즐의 최적안은 블레이드 길이(L_b) $6L_f$, 블레이드 부착위치(L_l) $6L_f$, 블레이드 간격(D_b) $2L_f$ 로 결정됨.(그림 3.24 참고)
- 최적화된 B-노즐에 대하여 직경 변화($6L_f, 8L_f$)와 섬유길이 변화(20, 30, 40, 50mm)에 따른 최상단 강섬유의 방향각을 추가적으로 분석하였음. 표 3.12와 같이 모든 변수에서 섬유 방향각은 1° 이하이며, 최적안 B-노즐 형상은 노즐 직경 변화에 거의 영향을 받지 않으며, 섬유길이 변수를 적절히 반영하여 섬유의 방향각 제어의 우수한 성능을 나타냄

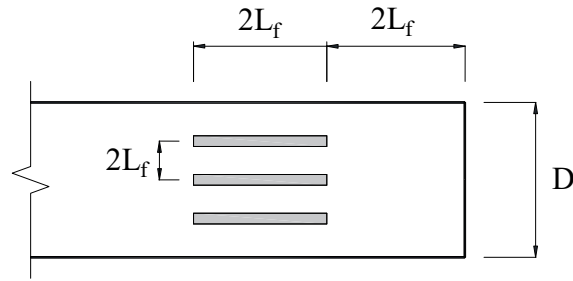


그림 3.24 최적안 B-노즐

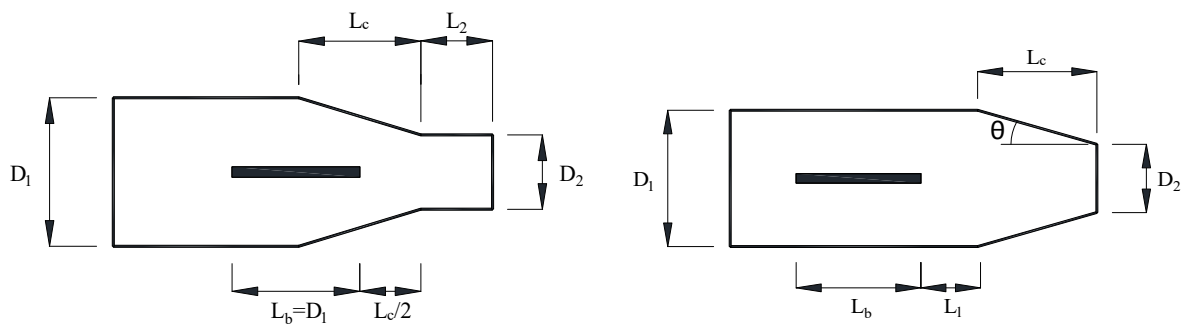
표 3.6 최적안 노즐에서의 섬유 길이 및 노즐 직경에 따른 섬유 방향각

섬유 길이(mm) 노즐 직경($\times L_f$)	20	30	40	50
6	0.7°	0.9°	1.0°	0.8°
8	0.5°	0.1°	0.6°	0.1°

(바) TB-노즐(Tapered and Bladed nozzle) 형상 변수 개선을 통한 최적안 도출

○ TB-노즐의 최적안 개선

- T-노즐의 최적안 도출과 B-노즐의 최적안 도출에 의해 TB-노즐 형상 또한 개선될 필요가 있음(그림 3.25 참고)
- 1차 해석을 통해 TB-노즐은 블레이드 부착 위치가 1차 노즐과 변단면에 위치하였을 때 섬유의 방향성 제어 향상에 효과적이므로 향후 시작품 제작의 편의성을 위해 블레이드 부착 위치(L_1)는 1차 노즐만을 고려하였음



(a) 개선 전 TB-노즐

(b) 개선 후 TB-노즐

그림 3.25 개선 전 · 후 TB-노즐 형상

- 개선되어진 최적안 T-노즐 형상에 블레이드의 길이 변화($1L_f$, $4L_f$, $8L_f$, $12L_f$) 및 블레이드 간격의 변화($2L_f$, $1.3L_f$)에 따른 섬유($L_f=30\text{mm}$)의 방향각을 노즐 출구에서 도출 후 20cm에서 분석하였음. 블레이드 부착위치(L_1)는 0으로 가정함

- $D_b=1.3L_f$ 의 경우, L_b 가 $1L_f$ 에서 $4L_f$ 로 증가할 때 섬유 방향각은 약 3° 에서 약 0° 로 감소하며, $4L_f$ 로에서 $12L_f$ 로 증가할수록 섬유 방향각은 약 0° 에서 약 4° 로 증가함 (그림 3.26 참고)
- $D_b=2L_f$ 의 경우, L_b 가 $1L_f$ 에서 $12L_f$ 로 증가할 때 섬유 방향각은 약 23° 에서 약 4° 로 감소함(그림 3.26 참고)
- $D_b=1.3L_f$, $2L_f$ 일 때 블레이드 길이 변화에 따른 섬유 방향각의 차이는 각각 약 3° , 약 19° 였으며, 특히 $D_b=1.3L_f$ 일 때 블레이드 길이 변화에 따른 섬유 방향각의 차이가 거의 없음.
- 본 연구에서는 섬유의 방향각이 약 0° 로 나타나는 $D_b=1.3L_f$, $L_b=4L_f$ 를 블레이드 간격 및 길이의 최적안으로 결정함
- 개선되어진 최적안 T-노즐 형상에 대하여 블레이드 부착 위치 변화($L_1=0$, $1.5L_f$, $4L_f$, $6L_f$, $8L_f$, $12L_f$)에 따른 섬유($L_f=30\text{mm}$)의 방향각을 노즐 출구에서 도출 후 20cm에서 분석하였음. 블레이드 길이 및 간격은 최적화 길이 및 간격($(L_b=4L_f, D_b=1.3L_f)$)으로 고려함
- 블레이드 부착 위치(L_1)가 0에서 $8L_f$ 로 증가할수록 섬유의 방향각은 약 0° 에서 약 17° 로 증가하여, 섬유의 방향각이 약 0° 인 $L_1=0$ 을 블레이드 부착 위치의 최적안으로 결정함(그림 3.27 참고)
- TB-노즐에서 변단면 경사의 변화($\theta=27^\circ$, 37° , 56° , 72°)에 따른 섬유($L_f=30\text{mm}$)의 방향각을 노즐 출구에서 도출 후 20cm에서 분석하였음. 2차 노즐 직경, 블레이드 길이, 간격, 부착위치는 도출된 최적안으로 고려함
- 변단면 경사가 27° 에서 37° , 56° 로 증가할수록 섬유의 방향각은 약 4° 에서 약 3° , 약 0° 로 감소하였으며, 56° 에서 72° 로 증가할수록 섬유의 방향각은 약 0° 에서 약 3° 로 증가함
- 따라서, TB-노즐의 최적안은 그림 3.28에 보인 바와 같이 최적안 T-노즐($D_2=2L_f$, $\theta=56^\circ$)에 블레이드 길이 $4L_f$, 블레이드 간격 $1.3L_f$, 블레이드 부착 위치 0으로 결정함

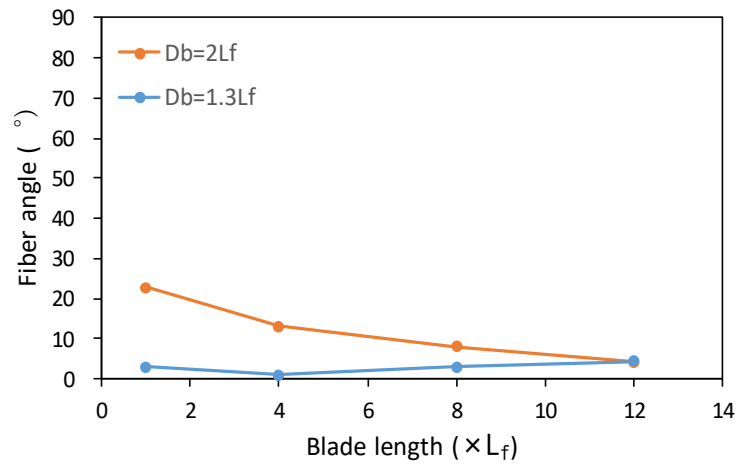


그림 3.26 도출 후 20cm 위치에서 TB-노즐 내 블레이드 길이 (L_b) 변화에 따른 섬유 방향각

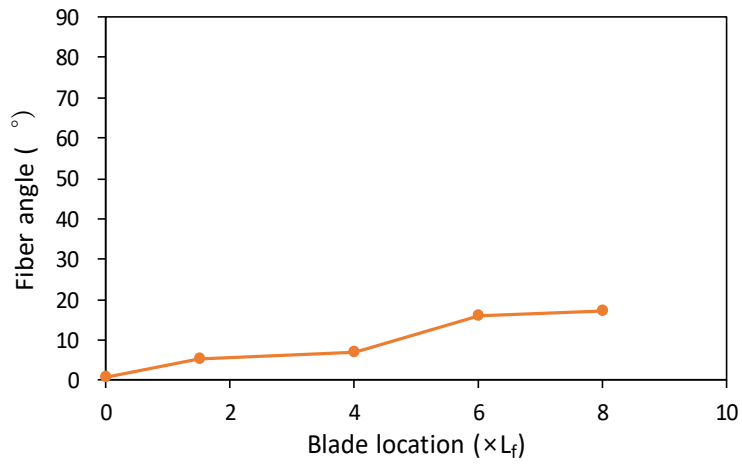


그림 3.27 도출 후 20cm 위치에서 블레이드 부착 위치 (D_b) 변화에 따른 섬유 방향각

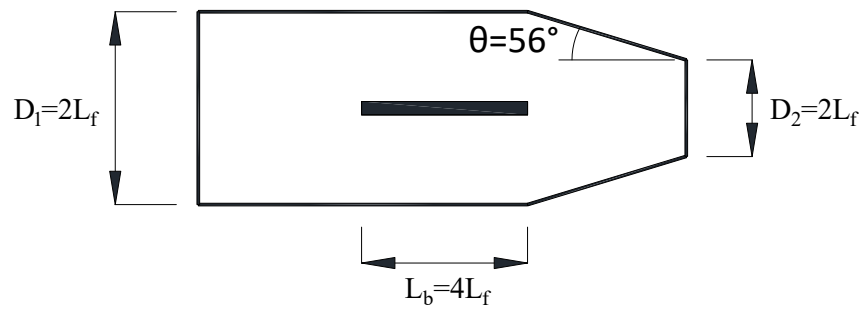


그림 3.28 최적인 TB-노즐

3.2.3 마그네틱 및 노즐 형상에 따른 강섬유 방향성 분석

(가) 전산해석을 위한 마그네틱 강도와 밀도에 대한 분석

- 마그네틱 노즐의 강도와 밀도에 대한 전산해석도 COMSOL multiphysics 상용 소프트웨어를 사용하여 매트릭스 유동특성, 노즐형상 등과의 영향을 평가함.
- 자속 강도와 밀도의 기준값을 결정하기 위해 3가지의 자속 강도(0.8, 1.0, 1.3 T)에 대한 전산해석을 수행함. 노즐의 상·하에 $4\text{cm} \times 1\text{cm}$ 크기를 갖는 마그네틱을 각 3개씩 총 6개를 부착하였으며, 노즐과 마그네틱의 간격은 5cm로 정의함
- 그림 3.22-3.24는 자속 강도에 따른 강섬유의 각 위치별 형상이며, 자속 강도에 따른 강섬유의 방향각을 표 3.7에 제시함
- 3가지의 자속 강도 (0.8, 1.0, 1.3T)에 대하여 강섬유의 방향성 제어효과가 유사하게 나타났으나, 자속 1.3T의 경우는 강섬유와 노즐 측면과의 부착성이 증가하여 방향성 제어 효과가 떨어질 것으로 판단함
- 또한, 그림 3.29-3.31에서 보는 바와 같이, 자기장(magnetic field) 끝부분의 형상이 타원형 모양으로 인해 강섬유의 회전현상을 발생시키는 경향을 보임. 이러한 회전 현상은 자속 강도를 낮게 함으로써 제어할 수 있을 것으로 판단됨
- 따라서, 본 연구에서는 노즐 측면과의 부착성과 자기장 끝부분으로 인한 회전 현상의 제어를 위해 자속 강도 0.8T를 기준값으로 결정함

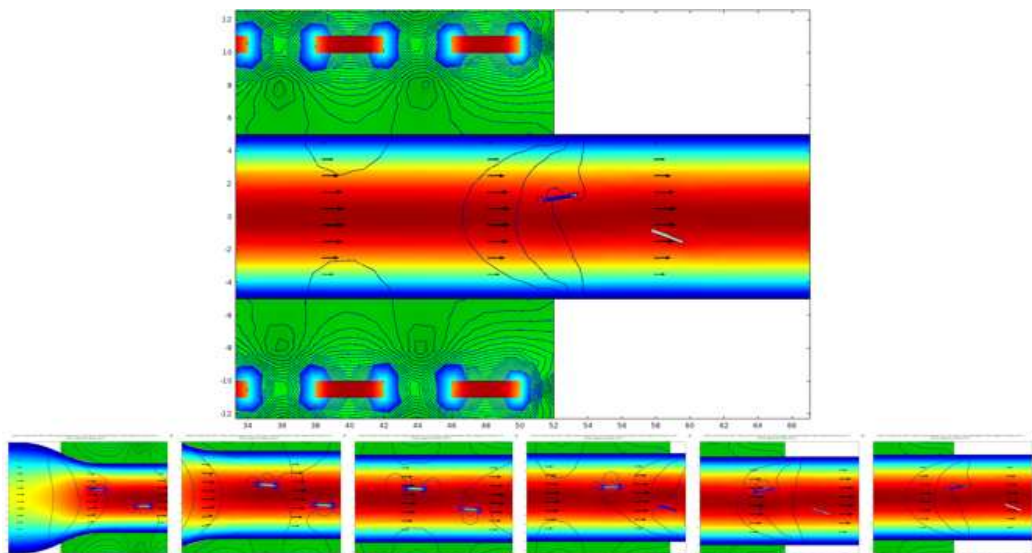


그림 3.29 자속 강도에 따른 각 위치 별 강섬유 형상 (0.8T)

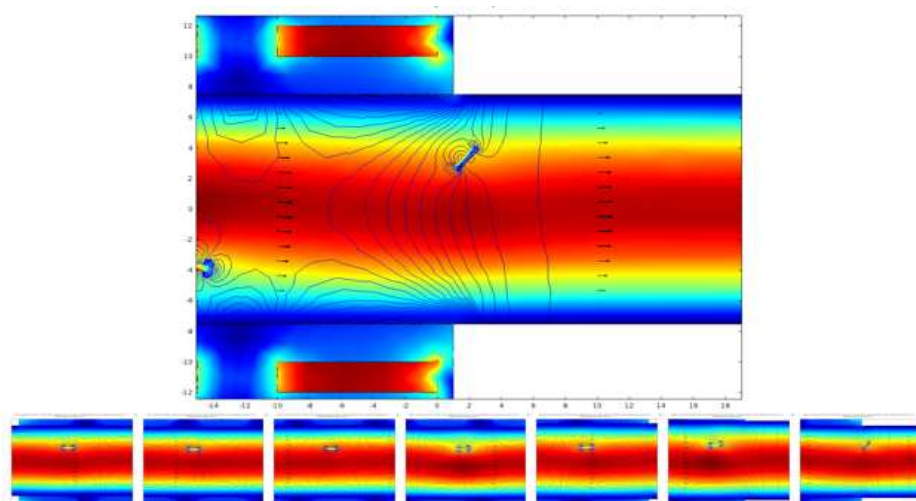


그림 3.30 자속 강도에 따른 각 위치 별 강섬유 형상 (1.0T)

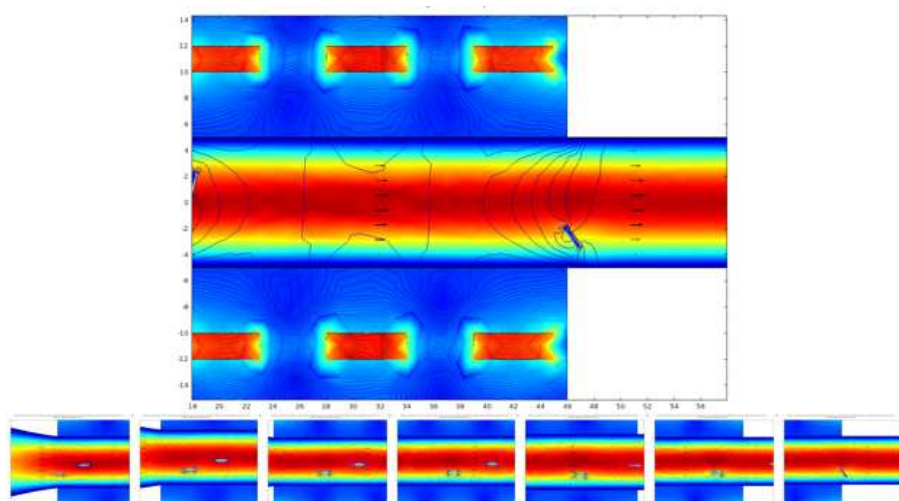


그림 3.31 자속 강도에 따른 각 위치 별 강섬유 형상 (1.3T)

표 3.7 자속 강도에 따른 강섬유의 방향각

	0.8 Tesla	1.0 Tesla	1.3 Tesla
Location (cm)	Fiber angle (°)	Fiber angle (°)	Fiber angle (°)
0	-5.0	-0.6	-12.2
5	-4.9	-2.3	7.9
10	-2.9	-2.5	3.3
15	2.1	-5.6	0.8
20	6.6	1.8	-7.2
25	9.7	9.9	-11.9

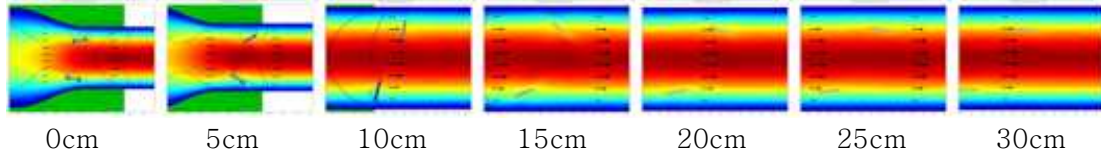
(나) 노즐 형상에 따른 마그네틱 효과 평가

○ T-노즐과 마그네틱 조합에 따른 강섬유의 방향성 분석

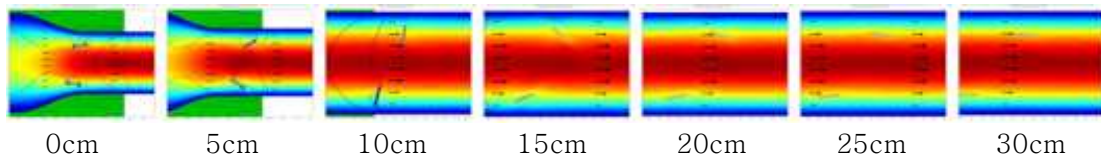
- 노즐 형상과 마그네틱 조합에 따른 강섬유 방향성 제어 성능을 평가하기 위하여, T-노즐에 대하여 마그네틱 영향을 분석하였음
- T-노즐과 마그네틱 조합에 따른 강섬유의 방향성 분석을 위해, 표 3.8과 같이 마그네틱 개수(4, 6, 8, 10개)와 마그네틱 부착 위치(1차노즐, 변단면, 2차노즐) 총 12개의 변수 해석을 수행하였으며, 2차 노즐의 시작 부분을 기준으로 하여 5cm 간격으로 강섬유의 방향각을 계산하였음
- 그 외의 변수인 마그네틱의 간격(5cm), 마그네틱 크기(4cm×1cm), 마그네틱 강도(0.8T)를 동일하게 적용하였고, 마그네틱은 그림 3.25과 같이 노즐의 상·하부에 절반씩 배치하였음
- 그림 3.32은 Multi-physics 해석에 의한 각 위치 별 강섬유 형상의 예시이며, 마그네틱 개수와 마그네틱 부착 위치에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각을 그림 3.33-3.36에 제시함
- 마그네틱 개수가 증가할수록 강섬유의 방향성 제어 유효길이가 늘어났으며, 마그네틱 부착 위치가 1차 노즐과 2차 노즐에 위치한 경우 강섬유의 방향성 제어에 가장 효과적인 것으로 나타남

표 3.8 T-노즐과 마그네틱 조합에 따른 강섬유의 방향성의 분석을 위한 변수

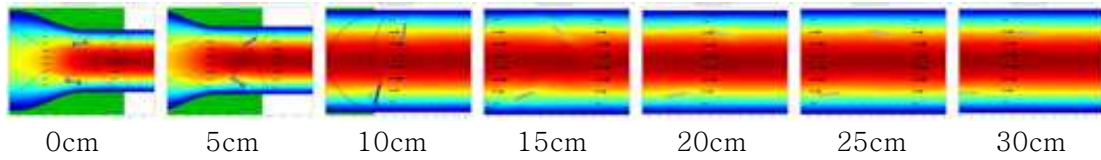
The number of fiber	Location of blade	The number of magnetic
4 fibers	First nozzle	4, 6, 8, 10 EA
	Between first nozzle and converging section	
	Second nozzle	



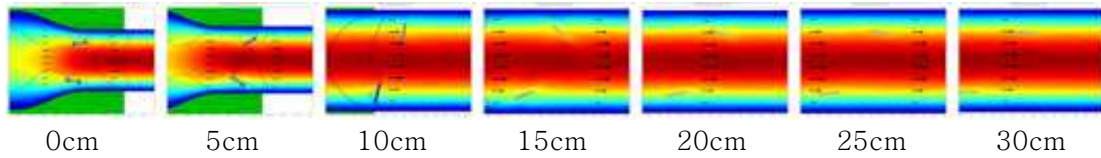
(a) 최상단 강섬유의 각 위치별 형상(마그네틱 4개)



(b) 가운데 상단 강섬유의 각 위치별 형상(마그네틱 6개)

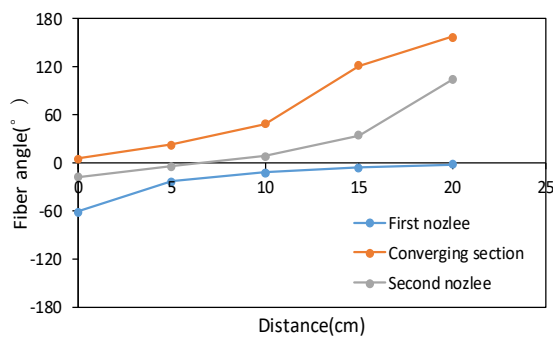


(c) 가운데 하단 강섬유의 각 위치별 형상(마그네틱 8개)

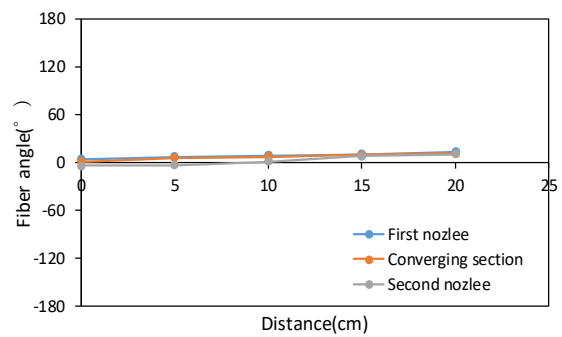


(d) 최하단 강섬유의 각 위치별 형상(마그네틱 10개)

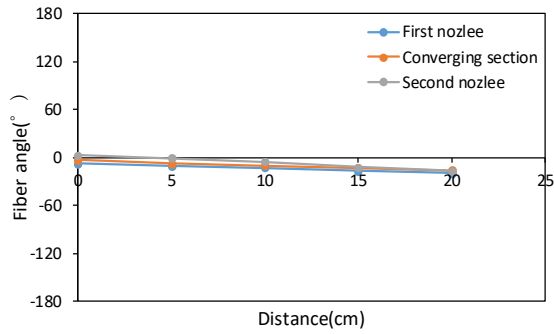
그림 3.32 T-노즐과 마그네틱 조합에 의한 각 위치별 강섬유 형상



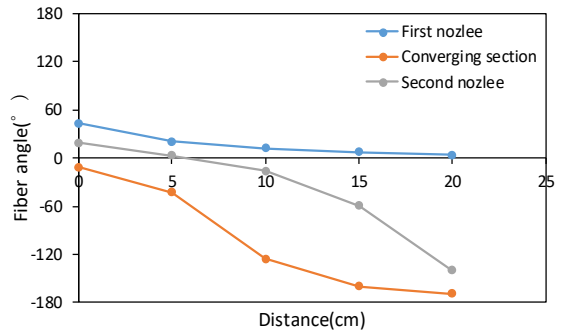
(a) 상부 강섬유



(b) 가운데 상부 강섬유

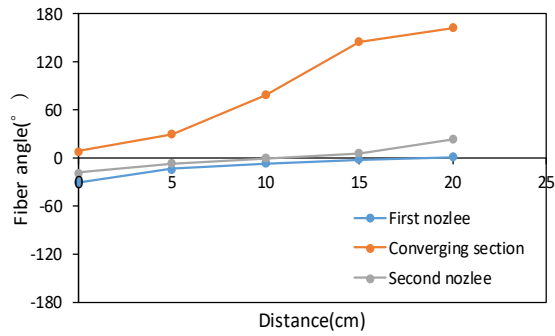


(c) 가운데 하부 강섬유

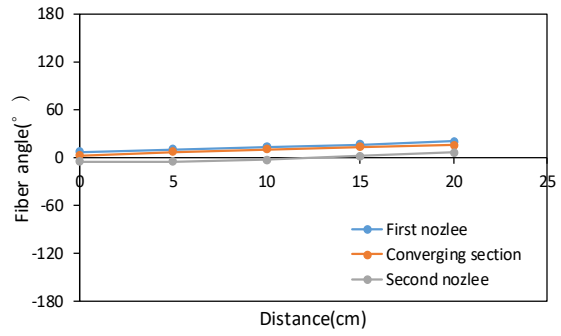


(d) 하부 강섬유

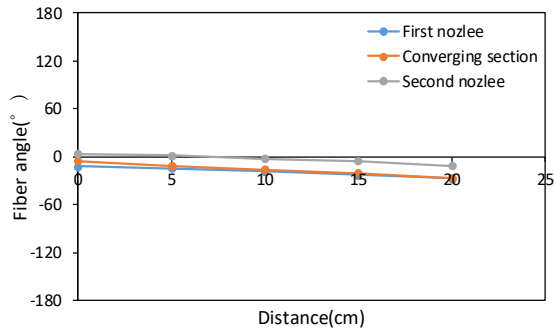
그림 3.33 T-노즐과 마그네틱 조합에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각 (4개)



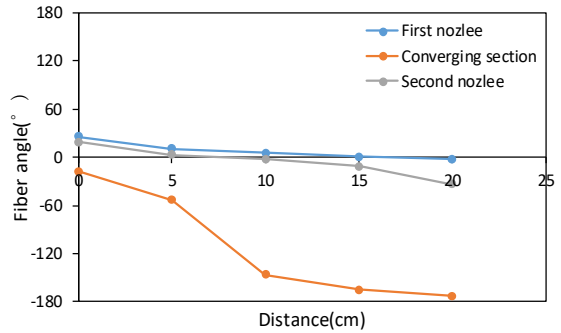
(a) 상부 강섬유



(b) 가운데 상부 강섬유

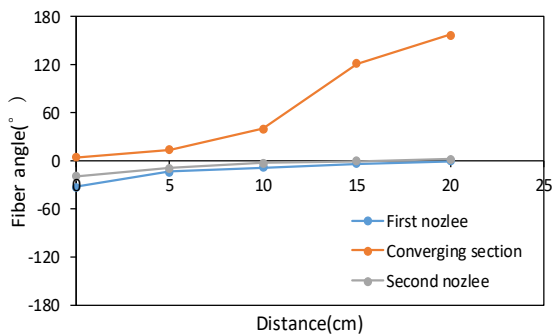


(c) 가운데 하부 강섬유

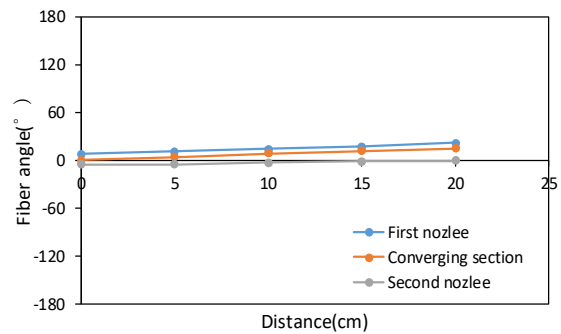


(d) 하부 강섬유

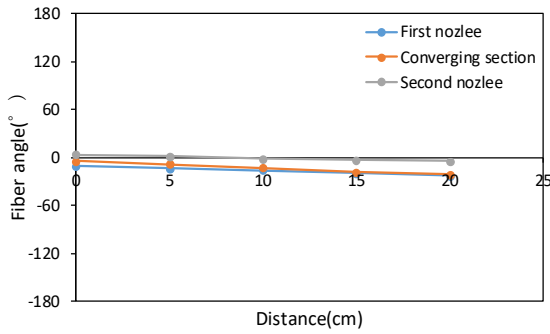
그림 3.34 T-노즐과 마그네틱 조합에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각 (6개)



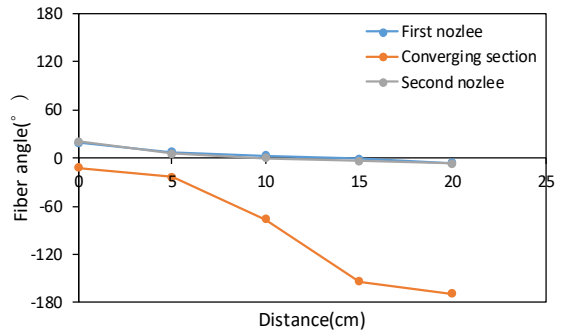
(a) 상부 강섬유



(b) 가운데 상부 강섬유

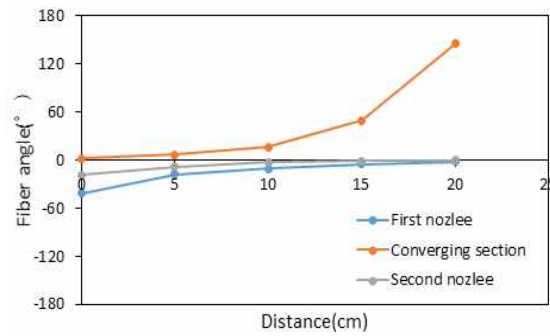


(c) 가운데 하부 강섬유

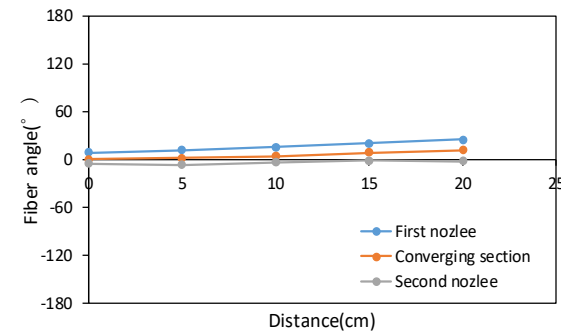


(d) 하부 강섬유

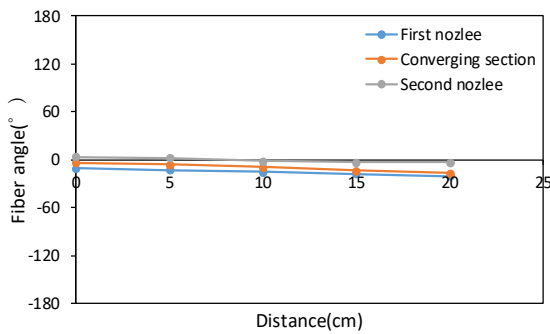
그림 3.35 T-노즐과 마그네틱 조합에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각 (8개)



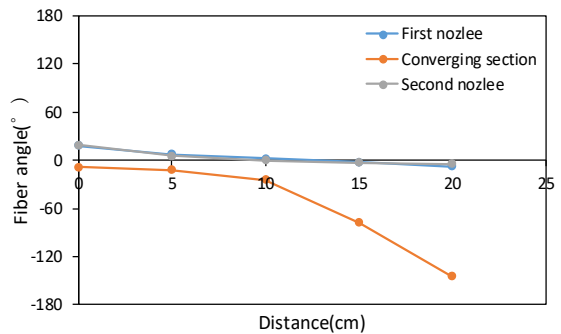
(a) 상부 강섬유



(b) 가운데 상부 강섬유



(c) 가운데 하부 강섬유



(d) 하부 강섬유

그림 3.36 T-노즐과 마그네틱 조합에 따른 각 위치별 강섬유의 방향각 (10개)

(다) 마그네틱 노즐 변수 개선과 최적안 도출

- 선행 해석 결과 마그네틱이 1차노즐과 2차 노즐에 위치하는 것은 T-노즐에 의한 강섬유의 방향성 제어 효과보다 마그네틱에 의한 효과가 더 큰 것을 의미함
- 따라서, 본 연구에서는 탈부착의 편의성과 마그네틱 효과 최대화를 위하여 기존 원형 노즐에 마그네틱 노즐을 부착하는 것으로 변수를 개선하고 최적안을 도출함
- 마그네틱 강도의 최적화

- 마그네틱 강도 최적화를 위해 그림 3.37과 같이 직경 10cm, 길이 45cm의 원형 노즐 좌·우에 3cm×1cm 크기를 갖는 마그네틱을 각 3개씩 총 6개를 부착하였음
- 노즐과 마그네틱의 간격은 1cm, 마그네틱 간 간격은 3cm로 정의하여 마그네틱 강도 0 T, 0.1T, 0.2T, 0.3T, 0.4T, 0.5T에 대해 multi-physics 해석을 수행함
- 그림 3.38과 같이 강섬유가 마그네틱 노즐 위치를 지나갈 때 자기장의 영향으로 강섬유의 방향성 제어효과가 나타나지만, 그림 3.39에서 보는 바와 같이 자기장 끝 부분의 형상이 타원형 모양으로 인해 강섬유의 회전현상을 다시 발생시키는 경향을 보임
- 따라서, 그림 3.40-3.41에서 보는 바와 같이 0.2T, 0.3T, 0.4T의 경우는 토출 후 강섬유의 방향각이 각각 21°, 33°, 45°로 기존 원형노즐에 비해 방향성 제어 효과가 나타났으며, 앞서 기술한 바와 같이 마그네틱 강도가 증가할수록 자기장 끝 부분의 영향으로 강섬유 방향각이 높아지는 경향을 보임
- 마그네틱 강도가 0.1T 이하인 경우는 원형노즐에 의해 도출된 강섬유 방향각과 비교 시 자기장에 의한 제어 효과가 미비함

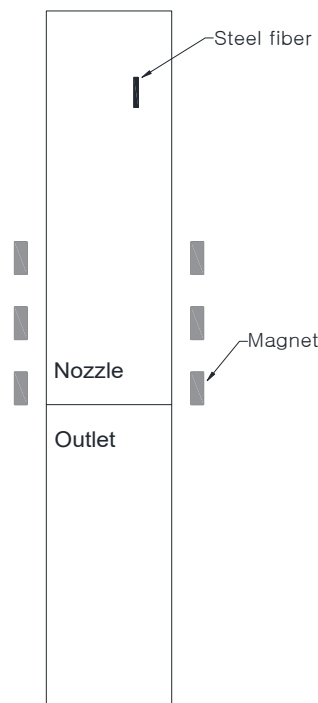


그림 3.37 Multi-physics 해석 시 고려한 마그네틱 노즐 형상

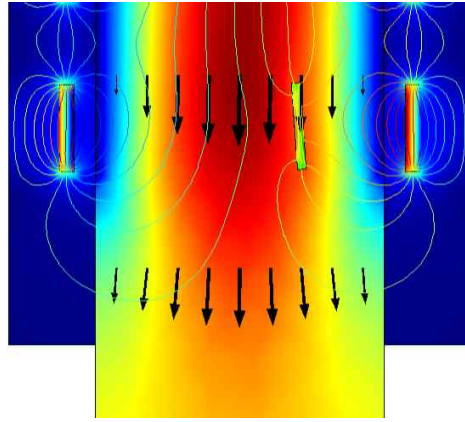


그림 3.38 자기장 내 강섬유의 방향각 제어효과

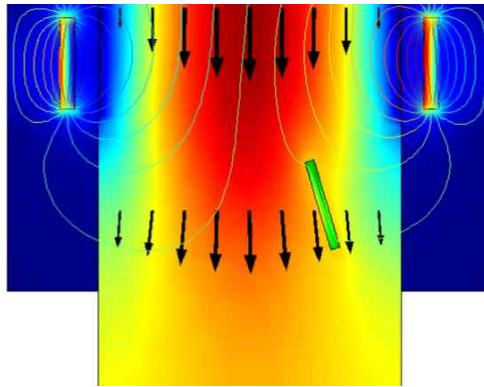


그림 3.39 자기장 끝부분의 타원형상에 의한 강섬유의 회전발생

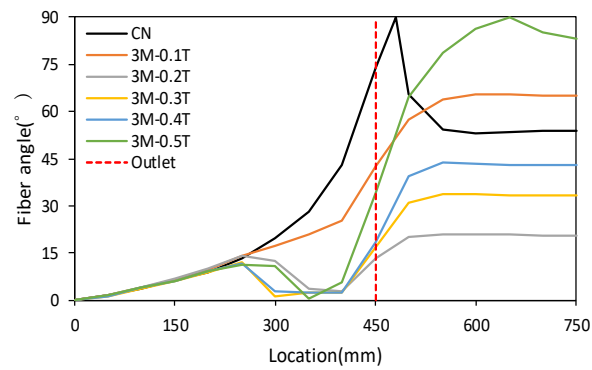


그림 3.40 각 위치별 섬유 방향각

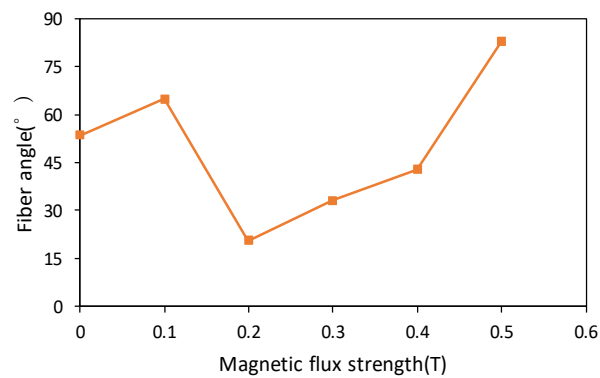


그림 3.41 도출 후 30cm에서의 섬유 방향각

○ 마그네틱 밀도의 최적화

- 마그네틱 밀도 최적화를 위해 노즐 좌·우에 $3\text{cm} \times 1\text{cm}$ 크기를 갖는 마그네틱을 각 2, 3, 4개씩 총 6, 8, 10개를 부착하였음.
- 노즐과 마그네틱의 간격은 1cm, 마그네틱 간 간격은 3cm로 정의하였으며, 마그네틱 강도는 앞서 최적화된 0.2T를 고려하였음
- 그림 3.42과 같이 마그네틱 개수가 2, 3, 4개 일 때 강섬유의 방향각은 각 약 30° , 21° , 27° 로 평가되어 강섬유의 방향각 제어에 가장 효과적인 마그네틱 밀도 즉 개수의 최적안은 3개로 결정함.
- 따라서, 마그네틱 간 간격을 고려하여 마그네틱 노즐의 길이를 15 cm로 결정함

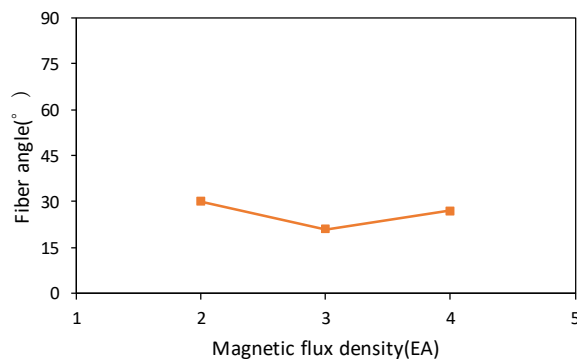


그림 3.42 마그네틱 개수에 따른 도출 후 20cm에서의 섬유 방향각

○ 마그네틱 노즐 내의 작용되는 실제 마그네틱 강도 평가

- 본 연구에서 최적화한 마그네틱 강도 0.2T는 마그네틱 중심부의 강도이며, 노즐 내 마그네틱 강도를 확인할 필요가 있음
- 마그네틱 강도가 0.2T를 갖는 마그네틱 노즐의 자기장 끝에서 1.5cm 간격으로 노즐 단면 내 마그네틱 강도 측정하였음(그림 3.43 참고)
- 그림 48에서 보는 바와 같이, 마그네틱 강도는 마그네틱 노즐의 중심 위치에서 가장 높았으며(4, 8번 단면), 노즐 벽면에서 약 0.019T로 가장 낮았음(그림 3.44 참고). 따라서, 노즐 내 마그네틱 강도를 0.019T로 결정하였음

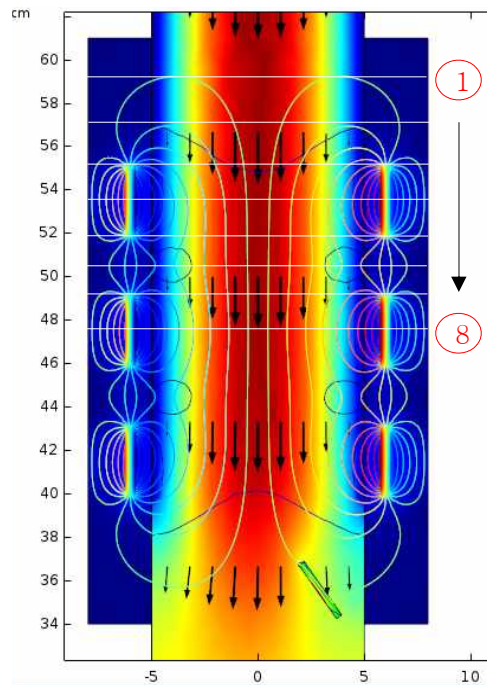


그림 3.43 마그네틱 강도 확인을 위한 노즐 단면

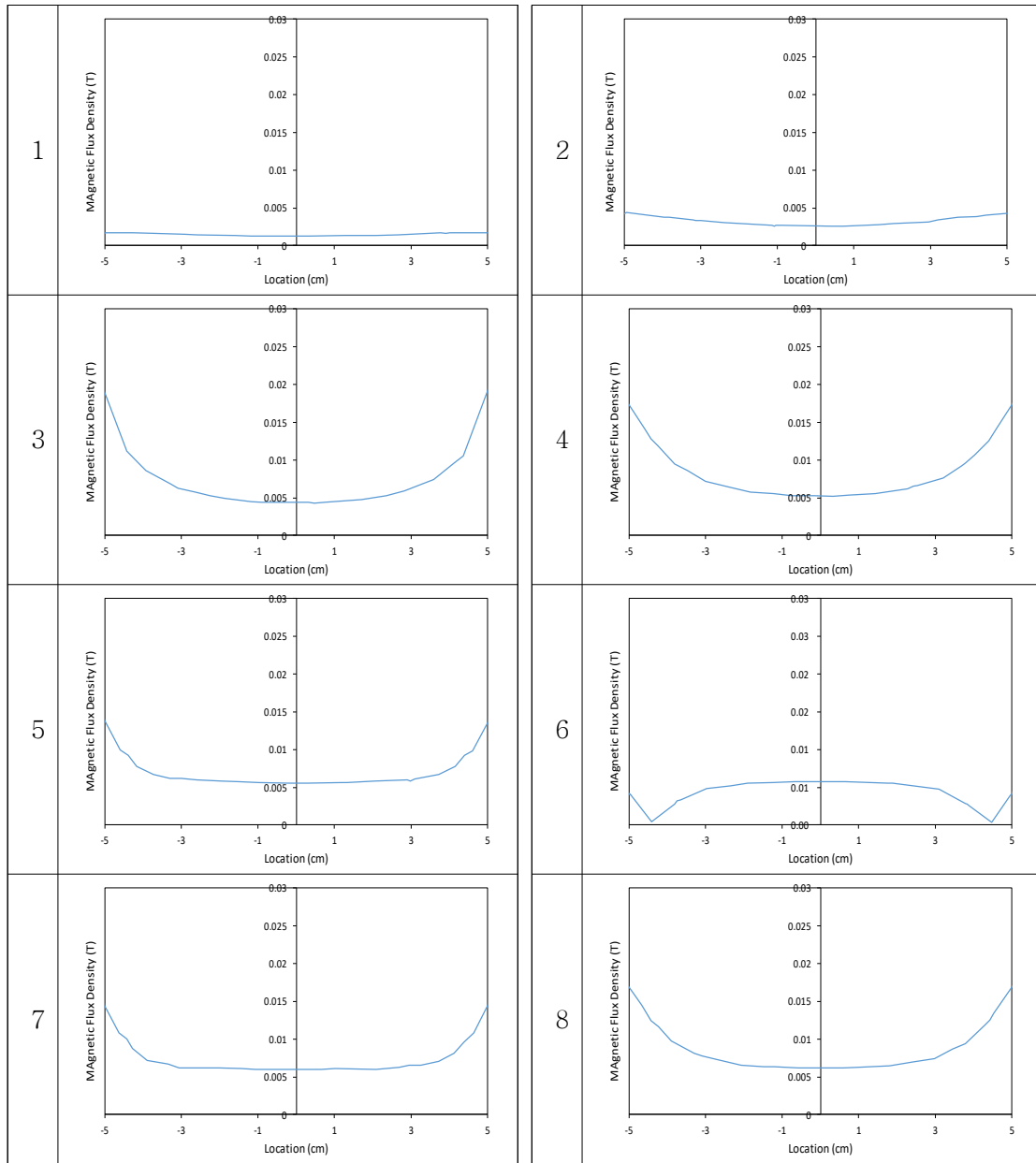


그림 3.44 각 노즐 단면 내 마그네틱 강도

3.2.4 실험장비 제작과 개선, 섬유 방향성을 제어 효과 평가를 위한 초기 선행실험 실시

(가) 실험장비 및 실험계획

○ 실험장비

- 1차적으로 도출된 T-노즐(그림 3.11 참고)을 바탕으로 T-노즐은 그림 3.45(a)와 같이 $D_1=100\text{mm}$, $L_2=62.5\text{mm}$, $D_2=62.5\text{mm}$, $L_c=62.5\text{mm}$, 원형노즐은 그림 3.45(b)와 같이 직경(D)= 100mm 로 제작하였음
- 타설 장비는 원통형 교반기가 일정 공기압에 도달하면 교반기 하단에 있는 밸브를 열어 압력에 의해 유체를 토출하는 방식으로 설계, 제작함 (그림 3.46 참고)

○ 실험계획

– 1차 선행실험

- 투명(반투명) 물질과 강섬유를 혼합한(혼입률 0.1%) 후 노즐형상(원형노즐, T-노즐)에 따른 강섬유의 방향성 및 분포도 제어 성능 평가를 위한 초기 선행 실험을 실시함
- 타설 후 디지털카메라로 시편(3.48 참고)을 촬영하여 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 강섬유의 방향성 및 분포도를 평가함
- 1차 실험에서 타설 장비의 압력조절 어려움, 교반기 회전날개의 속도조절 어려움, 교반기 투입기의 제작 보완 등으로 강섬유의 방향성 및 분포도 제어 성능을 정확히 평가하기 어려워, 장비의 개선을 통해 추후 실험을 진행함

– 2차 선행실험

- 1차 실험에서의 타설장비의 문제로 인해 타설장비 대신 사각형 깔때기를 노즐 시작 부분에 부착하여 강섬유 혼합물을 투입하는 방식으로 실험계획을 재수립함(3.48 참고)
- 노즐형상은 동일하게 고려하였으며, 타설 후 디지털카메라로 시편을 촬영하여 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 강섬유의 방향성 및 분포도 제어 성능을 분석함



(a) T-노즐



(b) 원형노즐

그림 3.45 강섬유의 방향성 및 분포도 제어 성능 실험을 위한 T-노즐



그림 3.46 타설 장비



그림 3.47 시편

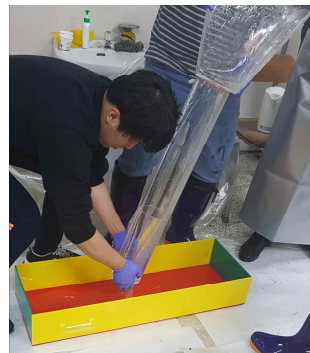
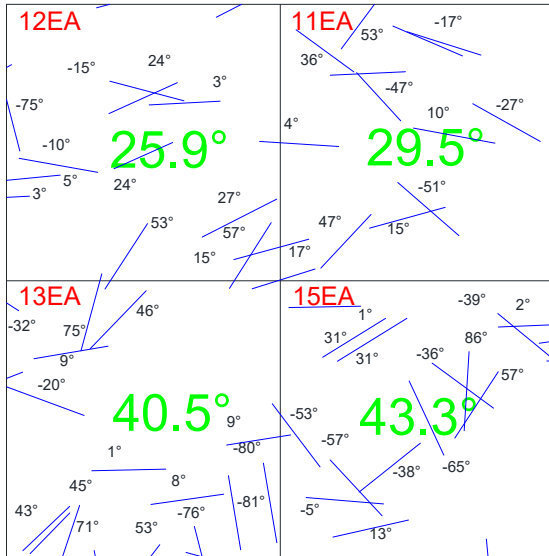


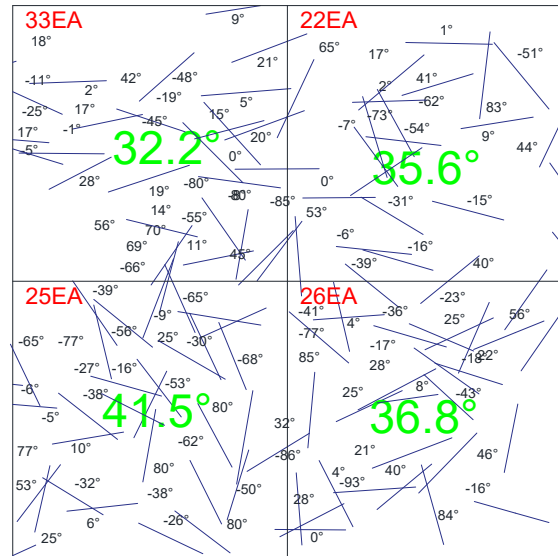
그림 3.48 2차 실험 장면 예시

(나) 실험결과

- 2차 선행실험 결과 노즐형상에 따른 강섬유의 방향성과 분포도 향상 가능성은 확인하였으나, 정량적인 평가를 위해서 추가적인 실험계획과 보완이 필요할 것으로 판단되었음
- 원형 노즐에 비해 T-노즐 형상이 강섬유의 분포도는 약간 향상되었으며, 방향각은 평균적으로 유사한 것으로 판단되었음(3.49 참고)
- 이번 실험은 수동적 타설로 타설 시 타설 방향의 일관성을 유지하기 어려웠으며, 폴리부텐의 투명한 물질을 사용함으로써 실제 시멘트 기반의 재료와는 차이(강섬유와의 혼합성, 유동성, 점성도 등)가 발생한 것으로 판단되었음
- 따라서, 이번 실험은 연구개발의 향후 실험 진행을 위한 선행실험으로, 본 실험에서는 실험계획과 방법을 보완하여 실험을 진행함



(a) 원형 노즐



(b) T-노즐

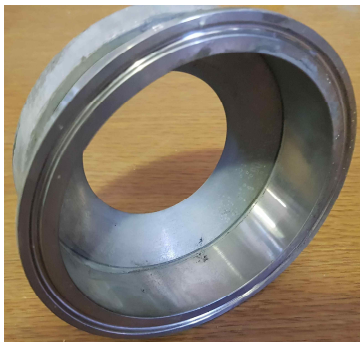
그림 3.49 강섬유의 방향각 및 분포도

3.2.5 최적화된 노즐에 대하여 실내 검증 실험 수행

(가) T, B, TB, 마그네틱 노즐의 최적안을 바탕으로 시작품 제작

○ 타설 노즐 제작

- T-노즐의 경우 그림 3.50과 같이 직경은 6cm(=2L_f), 변단면의 경사는 약 56°가 되도록 제작하였으며, 직경 10cm의 기존 원형 노즐에 부착하여 사용하도록 제작하였음



(a) T-노즐 부분



(b) 기존 원형 노즐과 T-노즐 결합

그림 3.50 T-노즐 제작

- B-노즐의 경우 그림 3.51과 같이 노즐의 직경 10cm, 블레이드 길이 12cm, 블레이드 간격 약 6cm(=2L_f), 블레이드 부착 위치는 노즐 출구에서 12cm로 제작하였으며, 기존의 원형 노즐에 탈부착이 가능하게 하였음

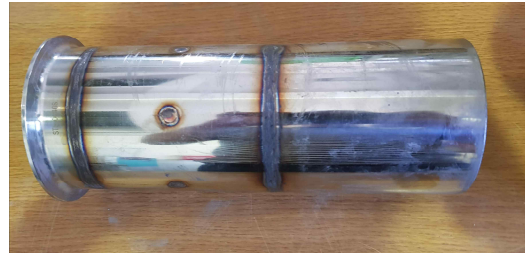
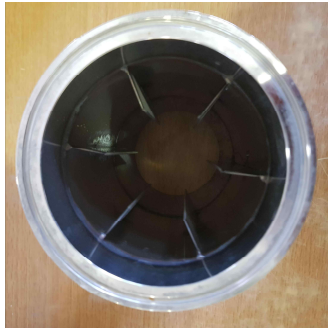
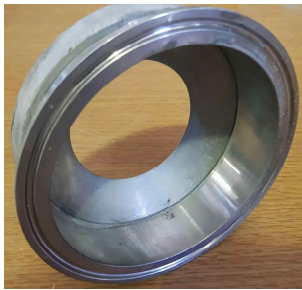


그림 3.51 B-노즐 제작

- TB-노즐의 경우 그림 3.52와 같이 블레이드 길이 12cm, 블레이드 간격 약 6cm(=2 L_f), 블레이드 부착 위치는 노즐 출구에서 0cm인 B-노즐과 T-노즐을 결합하여 제작하였음



(a) T-노즐 부분



(b) B-노즐 부분



(c) T, B-노즐 결합

그림 3.52 TB-노즐 제작

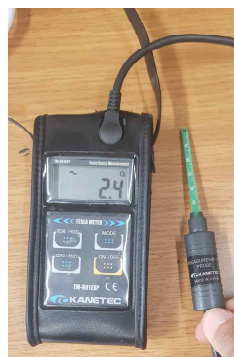
- 마그네틱 노즐의 경우 최적화된 해석결과를 바탕으로 그림 3.53과 같이 15cm 길이의 마그네틱 노즐을 제작하였으며, 추가적으로 마그네틱 강도를 조절할 수 있는 컨트롤러와 측정장비를 제작하여 노즐 내 마그네틱 강도 확인을 가능하게 하였음
- 컨트롤러를 이용하여 마그네틱 노즐 벽면의 마그네틱 강도가 약 0.019T가 되도록 전압을 50V로 고려하였음(3.54 참고)



(a) 마그네틱 노즐



(b) 컨트롤러



(c) 테슬라미터



(d) 마그네틱 강도 측정

그림 3.53 TB-노즐, 컨트롤러, 테슬라미터 및 마그네틱 강도 측정

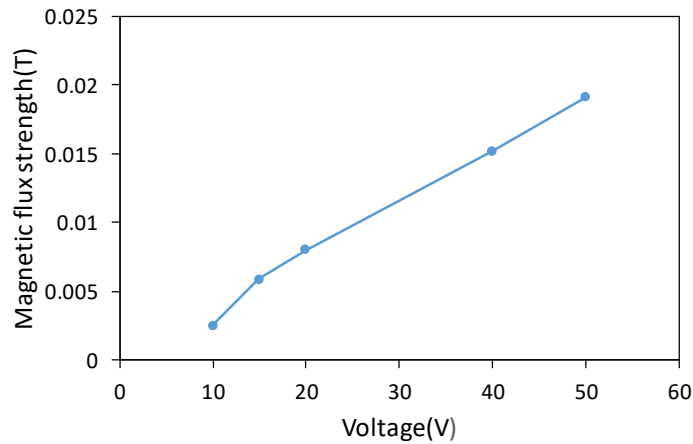


그림 3.54 전압에 따른 노즐 벽면에서의 마그네틱 강도

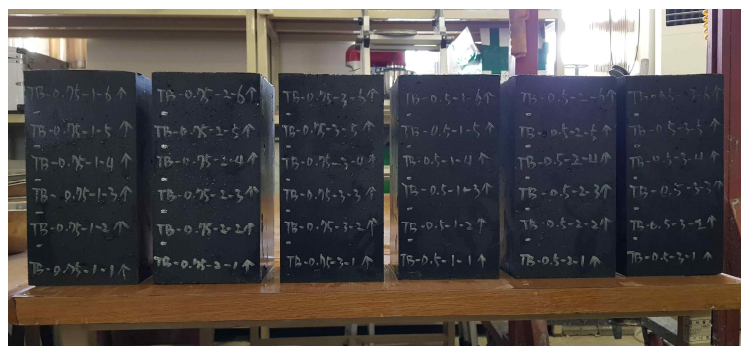
(나) T, B, TB, 마그네틱 노즐에 대한 실내 검증 실험 수행

○ 실험계획

- 실험의 변수는 표 3.9에서 보는 바와 같이 노즐의 형상, 섬유의 혼입률이며, 각 변수에 대해 3개의 시편을 제작하여 총 45개의 시편을 제작하였음
- 영상분석 시 시편과 강섬유의 명확한 구분을 위해 검은색 시멘트를 사용하였으며, 배합비는 $W/B=0.2$, $SP=0.225\%$ 로 고려함
- 제작된 타설장비를 이용하여 사각형 시편에 수직타설 실험을 수행하고, 양생시킨 후 절단기를 이용하여 그림 3.55와 같이 각 시편에 대해 상·하부 5cm, 중앙부는 4cm 간격으로 시편 축의 수직방향으로 절단함

표 3.9 섬유 방향성 및 분포도 평가를 위한 타설 실험 변수

노즐 형상	강섬유 혼입률 (%)	시편 개수
원형 노즐		
T-노즐	0.25	각 3EA
B-노즐	0.50	
TB-노즐	0.75	
마그네틱 노즐		



(a) 타설 후 시편



(b) 시편 절단

(c) 절단 후 시편

그림 3.55 타설 및 절단 후 시편

○ 타설장비, 시편, 강섬유

- 실제 성능 실험을 수행하기 위하여 타설 장비의 압력조절, 교반기 회전날개의 속도조절, 교반기 투입기 등을 개선함 (그림 3.56 참조)
- 강섬유 시멘트 복합체는 1차로 외부 교반기에서 혼합한 후, 타설장비의 교반기에 투입한 후, 교반기 내부가 일정한 공기압에 도달하게 되면 자동식 공기압밸브를 열어 재료가 노즐을 통해 시편에 타설되게 하였음. 사용된 강섬유는 일반적으로 많이 사용되는 길이 30mm, 직경 0.6mm (형상비 약 37)인 강섬유를 사용하였음
- 시편은 그림 3.57에서 보는 바와 같이 강섬유 길이(=3cm)를 고려하여 13cm×13cm×26cm 사각형 수직부재 시편을 제작하였음



그림 3.56 타설장비



(a) 시편 몰드



(b) 강섬유

그림 3.57 시편 및 강섬유

3.2.6 이미지분석기법 기반의 강섬유 방향성 및 분포 성능 검증

(가) 섬유 방향성계수(η_θ)

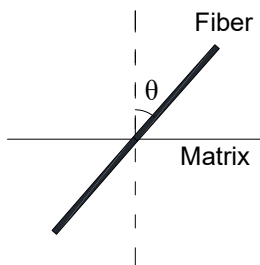
- 그림 3.58에서 보는 바와 같이 시멘트 기반 재료 내 섬유의 방향각(θ)은 절단면의 형상을 통해 계산할 수 있으며, 절단면의 장축(l)과 단축(d)로 아래 식으로 계산할 수 있음 (Abrishambaf A. et al. 2013, Deeb R. et al. 2014, Abrishambaf A. et al. 2015)

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{d}{l}\right)$$

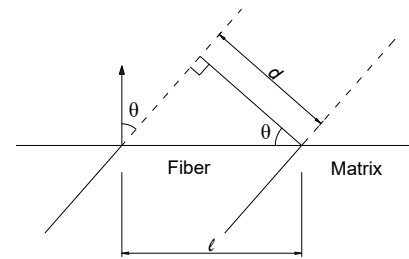
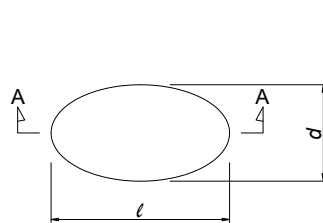
- 아래 식과 같이 절단면 내 모든 섬유의 방향각(θ)에 대해 $\cos\theta$ 의 평균값으로 섬유의 방향성계수를 정의함, 여기서, N_T^f 는 전체 강섬유의 개수임

$$\eta_\theta = \frac{1}{N_T^f} \sum_{i=1}^{N_T^f} \cos\theta_i \times 100\%$$

- 섬유가 절단면의 직각으로 전부 배열 시 방향성계수는 100의 값을 가지며, 절단면에 수평방향으로 전부 배열 시 0%의 값을 가짐



(a) 시멘트 기반 재료 내 섬유



A-A section

(b) 강섬유 절단면

그림 3.58 시멘트계 재료 내 섬유의 방향각

(나) 섬유 분산도계수(α)

- 시편 절단면에 대해 일정한 개수로 영역을 분할하고, 각 영역 내에 포함되는 섬유의 개수를 계산함. 영역 별 내 섬유의 표준편차(S)와 변동계수(ψ)를 계산하여 분산도계수(α)를 아래와 같이 정의하였음. 여기서, x_i 는 i 번째 영역 안에 있는 강섬유의 총 개수, $\bar{x}$ 는 $i \sim n$ 까지 각 영역 안에 있는 강섬유 수의 평균, n 은 섬유의 총 개수임 (Yang Y. 2001, Torigoe S. J. et al. 2003, Lee B. Y. et al. 2009, Yoo D. Y. et al. 2016)

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

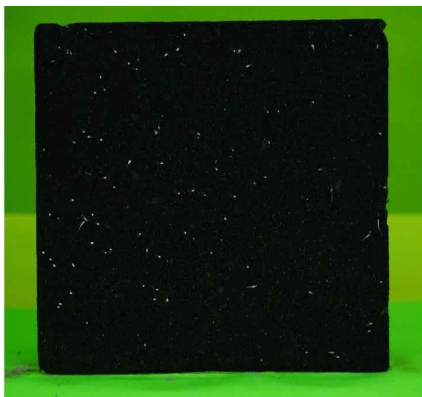
$$\Psi(x) = \frac{S(x)}{\bar{x}} \times 100\%$$

$$\alpha = e^{-\Psi(x)}$$

- 섬유가 균일하게 분포하였을 때, 즉 모든 영역에 같은 강섬유 개수의 강섬유가 존재할 때 1의 값을 갖게 됨. 또한, 비균일하게 분포할수록 0에 가까운 값을 갖게 됨

(다) 이미지프로세싱 기법

- 디지털 카메라로 촬영한 시편의 절단면에 대해 이미지프로세싱 기법을 이용한 섬유의 방향성 및 분포도 분석을 실시함
- 그림 3.59과 같이 컬러 시편 영상을 시편과 배경을 검은색(Black color), 강섬유는 흰색(White color)로 변환함. 그림 3.60에서와 같이 이진 영상에서 강섬유의 경계면을 인식하여 중심점과 경계면의 장·단축 비를 계산하였음

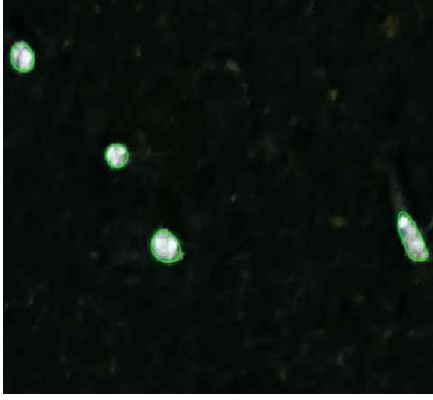


(a) 시편 영상

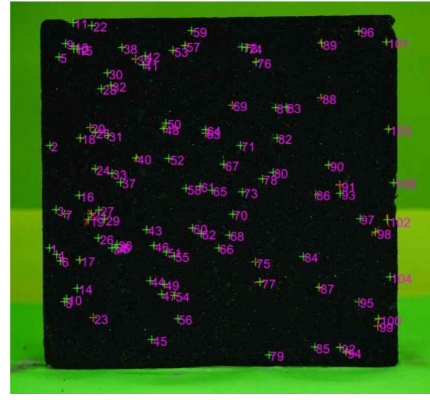


(b) 이진 영상

3.59 시편 이진영상 변환 결과(예시)



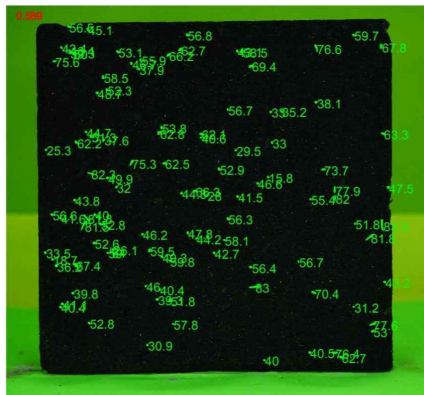
(a) 강섬유의 경계면 인식



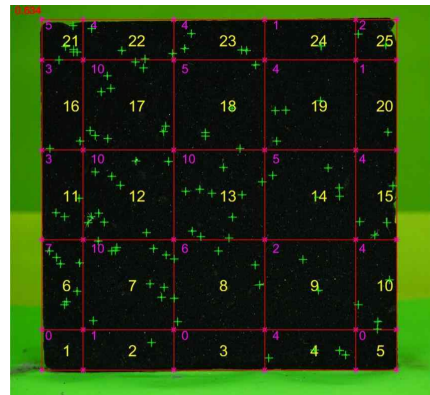
(b) 강섬유의 중심점 계산 결과

3.60 이진 영상에서의 강섬유 경계면 인식 및 중심점 계산(예시)

- 계산되어진 강섬유 경계면의 장 · 단축비를 이용하여 섬유 방향성계수를 계산하였음(그림 3.61(a) 참고)
- 시편의 측면은 강섬유 길이(L_f)를 기준으로 $L_f/2$ 길이로 분할하고, 시편의 중앙부는 가로 방향 3개, 세로 방향 3개로 총 9개 영역으로 분할함. 중앙부 9개 영역에 대해 강섬유의 중심점을 기준으로 각 영역 안에 분포하는 강섬유의 개수를 계산한 후, 섬유의 분포도계수를 계산하였음(그림 3.61(b) 참고)



(a) 섬유의 방향성계수 계산 결과



(b) 섬유의 분포도계수 계산 결과

그림 3.61 섬유의 방향성계수 및 분포도계수 계산 결과(예시)

(라) 섬유 방향성 분석 결과

- 기존 원형 노즐(C-노즐) 타설 시, 강섬유의 방향성계수 평균값과 표준편차는 각 50.8%, 2.2%로 평가되었음
- T, B, TB, 마그네틱 노즐 타설 시, 강섬유의 방향성계수 평균값은 각 70.4, 68.6, 76.6, 70.0%로 평가되었고, 표준편차는 각 2.9, 2.4, 2.1, 1.9로 나타남(표 3.10 참고)
- 방향성계수 평균값은 본 연구의 목표 성능인 80%에 다소 미치지 못하였지만, 63.9 ~ 80.8% 로 목표 성능에 근접하였음

- 특히, 본 연구에서 개발한 T, B, TB, 마그네틱 노즐은 기존 원형 노즐 대비 약 35.0, 38.6, 50.8, 37.7% 이상의 강섬유의 방향성 제어 성능 효과를 보임
- 방향성 제어 성능 실험은 최적화된 변수를 바탕으로 진행되어 TB-노즐이 다소 높은 제어 성능을 보였지만, 대체로 모든 노즐(T, B, TB, 마그네틱) 에서 유사한 방향성 제어 성능을 보였음(그림 3.62 참고)
- 또한, 각 노즐 별 강섬유 혼입률(0.25, 0.50, 0.75%)에 따른 강섬유의 방향성계수 차이는 0.3 ~ 4.4% 로서, 강섬유 혼입률에 따른 방향성계수 변화는 거의 없는 것으로 평가되었음(그림 3.63 참고)

표 3.10 노즐 별 방향성계수의 평균 및 표준편차

노즐	방향성계수(%)	평균값(%)	표준편차(%)
C-노즐	46.5 ~ 54.2	50.8	2.2
T-노즐	63.9 ~ 71.6	68.6	2.9
B-노즐	65.9 ~ 74.0	70.4	2.4
TB-노즐	73.4 ~ 80.8	76.6	2.1
마그네틱 노즐	67.0 ~ 73.3	70.0	1.9

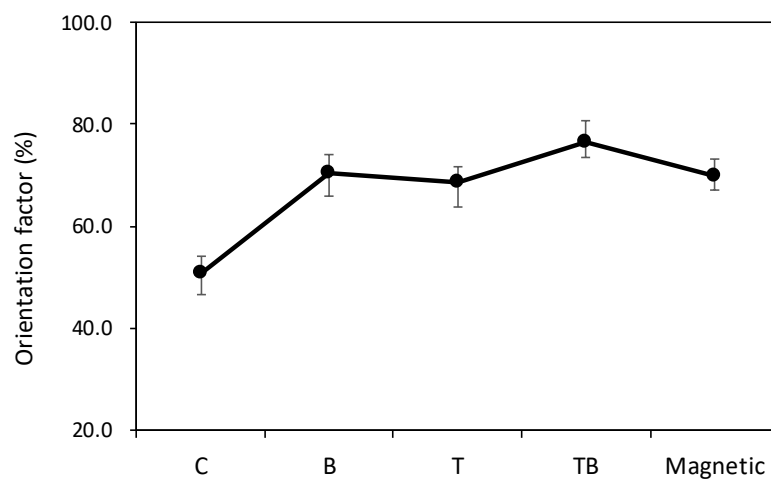


그림 3.62 각 노즐 별 방향성계수

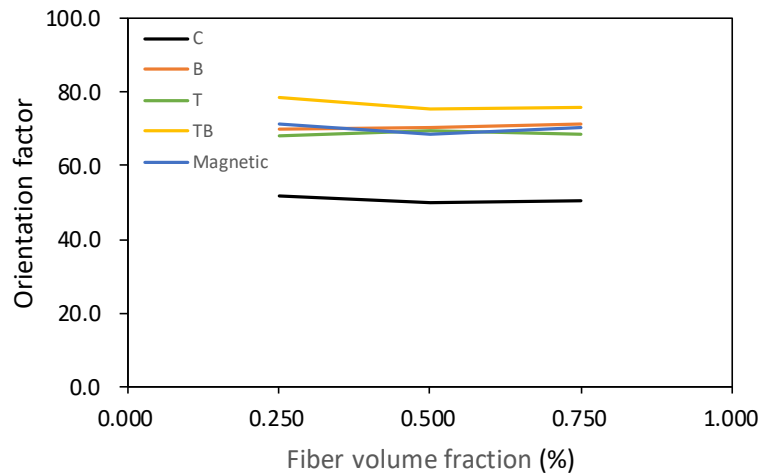


그림 3.63 각 노즐 별 강섬유 혼입률에 따른 방향성계수

(마) 섬유 분산도 분석 결과

- 기존 원형 노즐(C-노즐) 타설 시, 강섬유의 분산도계수 평균값과 표준편차는 각 0.586, 0.052로 평가되었음
- T, B, TB, 마그네틱 노즐 타설 시, 강섬유의 분산도계수 평균값은 각 0.653, 0.706, 0.667, 0.683으로 평가되었고, 표준편차는 각 0.053, 0.064, 0.057, 0.065으로 나타남 (표 3.11 참고)
- 본 연구에서 개발한 T, B, TB, 마그네틱 노즐은 기존 원형 노즐 대비 약 20.5, 11.6, 13.9, 16.6% 이상 강섬유의 분산도 제어 성능 효과가 뛰어나며, T-노즐 타설 시 기존 원형 노즐 대비 강섬유의 방향성계수가 약 20.5%로 강섬유의 분산도 제어에 가장 효과적임(그림 3.64 참고)
- 또한, 모든 노즐에서 강섬유 혼입률이 0.25%에서 0.75%로 증가함에 따라 강섬유의 분산도계수는 약 12.8% ~ 20.7% 로 거의 선형적으로 증가하여, 강섬유 혼입률은 섬유의 방향성에 비해 분산도에 영향을 미치는 것으로 판단됨(그림 3.65 참고)
- 본 연구에서 개발한 모든 노즐에서 분산도계수 0.600 이상(최대 분산도계수 0.840)의 분산도 제어 성능을 갖는 것으로 나타나 목표성능(분산도계수 0.600)을 달성하였음

표 3.11 노즐 별 분포도계수의 평균 및 표준편차

노즐	분포도계수	평균값	표준편차
C-노즐	0.471 ~ 0.666	0.586	0.052
T-노즐	0.568 ~ 0.787	0.653	0.053
B-노즐	0.620 ~ 0.830	0.706	0.064
TB-노즐	0.558 ~ 0.766	0.667	0.057
마그네틱 노즐	0.576 ~ 0.821	0.683	0.065

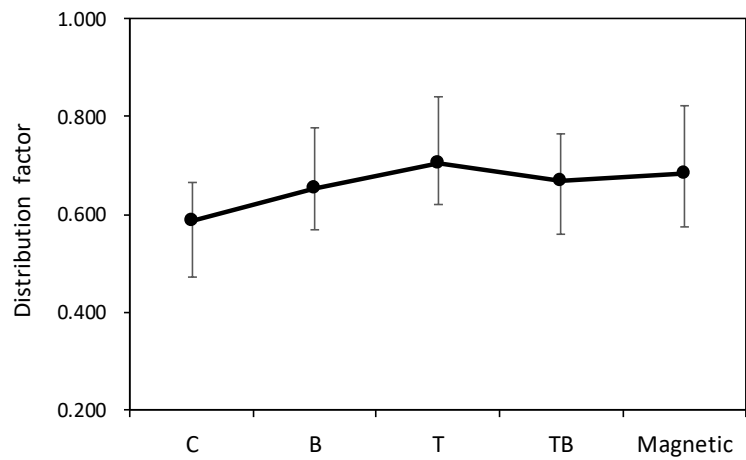


그림 3.64 각 노즐 별 분산도계수

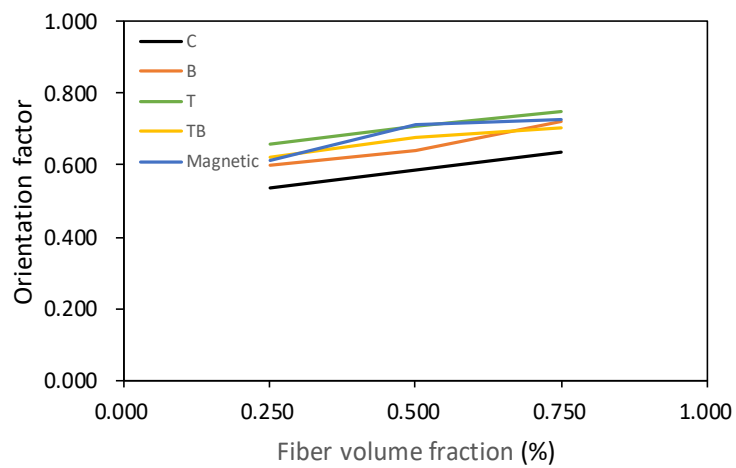


그림 3.65 각 노즐 별 강섬유 혼입률에 따른 분산도계수

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

1.1 정성적 연구 성과목표 달성도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준					
					질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	달성도 (%)
주관 /공동	1	Multi-physics 전산해석기반 최적노즐 설계	1-1	노즐형상과 섬유 방향성	①	개념 정리 및 해석모델	모델완성	모델제시	자체검증	100
					②	노즐형상 변수해석	변수제시	해석결과 제시	보고서	100
			1-2	마그네틱, 노즐형상과 섬유 방향성	①	개념 정리 및 해석모델	모델완성	모델제시	자체검증	100
					②	마그네틱 변수해석	변수제시	해석결과 제시	보고서	100
주관 /공동	2	섬유 방향성 제어 노즐 제작 및 실험 검증	2-1	형상에 기반한 시작품 제작 및 성능 검증	①	설계변수 도출	설계변수	설계변수 설정	특허출원 및 보고서	100
					②	최적노즐 설계, 제작	시작품	시작품제시	보고서	100
					③	성능 검증	성능실험	성능평가 결과제시	보고서	100
			2-2	마그네틱 시작품 제작 및 성능가증	①	설계변수 개선	설계변수	설계변수 개선안	특허출원 및 보고서	100
					②	실험체 제작	시작품	시작품 제시	보고서	100
					③	성능 검증 및 개선	성능실험	성능평가 결과제시	보고서	100

1.2 정량적 연구 성과목표 달성도

목 표			목표건수	달성건수	달성도 (%)
사업연계 지표	1	SCI(E)급 학술지 게재	2	2	100
	2	일반학술지 게재	2	1	50
	3	특허출원	2	4	400
	4	해외 학술대회 논문발표	0	2	200
	5	국내 학술대회 논문발표	0	6	600
	6	포상(학술대회 우수논문발표상)	0	1	100
계			6	16	100

① 핵심성과물별 세부 설명

목표	노즐 형상과 섬유의 방향성 관계 분석
목적	매트릭스 유동특성을 고려할 수 있는 전산해석기법을 개발하고 노즐의 형상에 의한 섬유의 방향성 제어 효과를 분석함
성능목표	(기존기술 수준) - 현재 연구에 의하면 강섬유의 방향성과 매트릭스 유동 특성과는 관련성이 높은 것으로 보이나, 정량적인 평가는 이루어지지 않음 (개발기술 수준) - 매트릭스 유동 특성과 노즐의 형상 등의 영향인자를 정량적으로 분석하기 위하여 Multi - physics 전산해석 기법을 제안함 - 기존의 원형 노즐에 대한 강섬유의 방향성을 분석함 - T-노즐(Tapered nozzle) 형상 변수에 따른 강섬유의 방향성을 분석함 - TB-노즐(Tapered and bladed nozzle)에 대한 강섬유 방향성을 분석함
질적성과	- Multi-physics 전산해석을 위한 매트릭스의 동점성 계수(7 Pa.s)와 유속(0.3m/s)에 대한 해석 기준값을 설정함 - 일반 원형 노즐의 내부 중앙부에서는 일정한 유속으로 섬유의 회전이 발생하지 않고, 노즐의 벽면과 중앙부 사이의 섬유에서 방향각이 발생함 - T-노즐의 단면 감소율과 직경에 따른 섬유의 방향성 제어 효과를 확인함 - T-노즐과 B-노즐 조합에 의한 섬유의 방향성 제어 효과를 확인함
양적성과	- 국내 학술대회 논문발표: 1건

목표	마그네틱과 노즐형상에 따른 섬유 방향성 분석
목적	마그네틱 효과를 고려할 수 있는 전산해석기법을 개발하고 마그네틱 및 노즐형상에 의한 섬유 방향성 제어 효과를 분석함
성능목표	(기존기술 수준) - 현재 타설 노즐 형상에 따른 강섬유 방향성과 분포도 연구는 전무함 - 현재 마그네틱을 사용한 강섬유 타설 기술 개발 연구는 없으며, 비파괴 검사 등의 분야에서 일부 적용 연구가 이루어짐 (개발기술 수준) - 마그네틱과 매트릭스 유동 특성 등의 영향인자를 정량적으로 분석하기 위하여 Multi - physics 전산해석 기법을 제안함 - 기존의 원형 노즐에 대한 강섬유의 방향성을 분석함 - 마그네틱 강도와 밀도에 따른 강섬유 방향성 제어 효과를 분석함 - 노즐형상과 마그네틱 조합에 의한 강섬유의 방향성 제어 효과를 분석함

질적성과	- Multi-physics 전산해석을 위한 마그네틱 강도와 밀도에 대한 해석 기준값을 설정함 - 마그네틱 강도에 따라 강섬유와 노즐 측면과의 부착성, 자기장 타원형에 의한 강섬유의 회전형상을 확인함 - 마그네틱 강도 조절과 밀도 조절에 따른 섬유 방향성 제어 효과를 확인함
양적성과	- SCI(E)급 학술지논문: 1건 - 특허출원: 1건 - 해외 학술대회 논문발표: 1건 - 국내 학술대회 논문발표: 1건

목표	형상에 기반한 노즐 시작품 제작 및 성능 검증
목적	형상 기반 변수를 개선하고 최적안을 도출하고, 도출된 형상 설계 변수에 따라 노즐 시작품을 제작, 타설실험을 통해 강섬유의 방향성과 분포도 성능을 평가함
성능목표	(기존기술 수준) - 현재 타설 노즐 형상에 따른 강섬유 방향성과 분포도 연구는 전무함 (개발기술 수준) - T-노즐에 대한 강섬유 방향성 분석을 통한 변수 개선, 최적안 도출 - B-노즐에 대한 강섬유 방향성 분석을 통한 변수 개선, 최적안 도출 - TB-노즐에 대한 강섬유 방향성 분석을 통한 변수 개선, 최적안 도출 - 최적안으로 제시된 T, B, TB 노즐에 대한 시작품을 제작함 - 노즐의 형상과 섬유 혼입률에 따른 시편을 제작하여 절단면에서의 강섬유 방향성과 분포도를 평가함
질적성과	- 투명 물질을 활용한 초기 선행 실험을 통해 원형노즐과 형상 변화에 의한 강섬유 방향성과 분포도 향상 가능성을 확인하고 타설 장비 개선을 실시함 - B-노즐 변수 개선을 통한 최적안 도출 : 블레이드 길이(L_b)=$6L_f$, 간격(D_b)=$2L_f$, 부착위치(L_b)=$6L_f$ - T-노즐 및 B-노즐 최적안을 이용한 TB-노즐 변수 개선 및 최적안 도출 : 최적안 T-노즐($\theta=56^\circ$, $D2=2L_f$)에 블레이드 길이=$4L_f$, 블레이드 간격=$1.3L_f$, 블레이드 부착 위치=0 - T-노즐, B-노즐, TB-노즐 대한 방향성 계수 평균값은 각 68.6, 70.4, 76.6% 로 평가됨 (기존 원형 노즐에 의한 방향성 계수값과 비교 시 각각 약 35.0, 38.6, 50.8% 향상을 보임) - T-노즐, B-노즐, TB-노즐 각각에 대한 목표 방향성 제어 성능 80%에 근접하였음(최대 방향성 계수값은 각각 71.6, 74.0, 80.8,%) - T-노즐, B-노즐, TB-노즐 대한 분포도 계수 평균값은 각 0.653, 0.706, 0.667로 평가됨 (기존 원형 노즐에 의한 분포도 계수값과 비교 시 각각 약 20.5, 11.6, 13.9% 향상을 보임) - T-노즐, B-노즐, TB-노즐 각각에 대한 목표 분산도 제어 성능 0.6 이상에 도달하였음(최대 분포도는 각각 0.653, 0.706, 0.667) - 강섬유 혼입률 증가에 따른 방향성 계수는 차이가 거의 없었으며, 분포도 계수는 거의 선형적으로 증가하였음

양적성과	- SCI(E)급 학술지논문: 1건 - 특허출원: 2건 - 해외 학술대회 논문발표: 1건 - 국내 학술대회 논문발표: 2건
------	---

목표	마그네틱 기반 노즐 시작품 제작 및 성능 검증
목적	마그네틱 변수를 개선하고 최적안을 도출하고, 도출된 마그네틱 설계 변수에 따라 노즐 시작품을 제작, 타설 실험을 통해 강섬유의 방향성과 분포도 성능을 평가함
성능목표	(기존기술 수준) - 현재 마그네틱을 활용한 강섬유 타설 노즐 개발 연구 및 강섬유 방향성과 분포도 연구는 전무함 (개발기술 수준) - 마그네틱 노즐에 대한 강섬유 방향성 분석을 통한 변수 개선, 최적안 도출 - 최적안으로 제시된 마그네틱 노즐에 대한 시작품을 제작함 - 섬유 혼입률에 따른 시편을 제작하여 절단면에서의 강섬유 방향성과 분포도를 평가함
질적성과	- 기존 원형노즐에 탈부착식으로 사용될 수 있는 마그네틱 노즐을 제안하여 변수 개선 및 최적안을 도출 : 마그네틱 강도(노즐 내주 0.019T), 마그네틱 밀도(15cm) - 마그네틱 노즐에 대한 방향성 계수 평균값은 약 70.0% 로 평가됨 (기존 원형 노즐에 의한 방향성 계수값과 비교 시 약 37.7% 향상을 보임) - 마그네틱 노즐에 대한 목표 방향성 제어 성능 80%에 근접하였음(최대 방향성 계수값은 73.3%) - 마그네틱 노즐에 대한 분포도 계수 평균값은 0.683로 평가됨 (기존 원형 노즐에 의한 분포도 계수값과 비교 시 약 16.6% 향상을 보임) - 마그네틱 노즐에 대한 목표 분산도 제어 성능 0.6 이상에 도달하였음(최대 분포도는 0.821) - 강섬유 혼입률 증가에 따른 방향성 계수는 차이가 거의 없었으며, 분포도 계수는 거의 선형적으로 증가하였음
양적성과	- 일반학술지 논문: 1건 - 특허출원: 1건 - 국내 학술대회 논문발표: 2건

2. 관련 분야 기여도

○ 기술적 기여도

- 강섬유 보강 콘크리트 타설시 강섬유의 방향성 제어와 분포도를 향상시킬 수 있는 획기적인 원천기술 및 관련 논문, 특허를 확보함으로써 기술적 선점 확보가 가능할 것으로 판단됨
- 강섬유의 방향성 제어와 분포도 향상을 통해 강섬유 보강 콘크리트의 강도와 연성도를 효율적으로 향상시켜 현재의 적용 한계성을 뛰어 넘을 수 있음
- 매트릭스의 유동특성과 레올로지, 타설방향 등을 활용하여 섬유의 방향성 향상을 유도하는 타 연구 분야와 접목하여 시너지 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단됨
- 또한, 최근 활발히 연구가 수행되고 있는 강섬유 보강 콘크리트의 자가 센싱 능력 향상을 동시에 꾀할 수 있고, 추가적인 연구기획과 상시 모니터링 기술로 연계, 확장 가능함

○ 경제적·산업적 기여도

- 섬유 보강 콘크리트에 대한 연구가 활발히 이루어져, 현재 국내에서는 터널의 숏크리트에 적용되어지고 있으며, 기술 선진국에서는 프리캐스트 라이닝, 도로, 슬래브 등으로 적용성이 확대됨에 따라, 섬유의 방향성과 분포도를 제어 향상시킬 수 본 연구개발 과제의 성과는 국내의 건설회사를 포함하여 강섬유 제조, 판매, 적용 관련 회사 성장에 기여함
- 즉, 최근의 연구결과에 의하면 섬유의 방향성과 분포도의 차이에 의해 휨인장 강도가 약 50% 가량의 차이가 발생한 것으로 보고됨. 이는 섬유의 방향성과 분포도의 제어 성능 향상 시 인장성능의 향상을 통해 적용성 확대를 꾀할 수 있음
- 산업 성장과 함께, 강섬유의 방향성과 분포도 향상은 강섬유 보강 콘크리트의 품질 성능을 향상시킬 수 있으므로, 현재의 설계 및 시공조건에서 경제성 확보가 가능함
- 특히, 기존의 콘크리트 타설 노즐에 탈부착형으로 적용이 가능하므로, 기존 제품과의 호환성 및 경제성이 제고됨 (그림 1.1 참고)
- 본 연구개발은 기존 기술에 비해 창의적이고 새로운 개념으로 세계 최초의 원천기술 확보로 해외 기술 수출 및 국내외 강섬유 기반의 콘크리트 타설 분야에서의 시장 경쟁력 확보가 가능함
- 강섬유의 방향성 및 분포도를 예측하기 위한 비파괴 검사 시스템과의 연계 발전, 확장이 가능함

○ 사회적 기여도

- 강섬유 보강 콘크리트 타설이 필요한 다양한 사회기반시설물에 적용 가능하며 건설기계, 강섬유 제조산업 등 타분야, 타산업으로의 기술 전파가 기대됨
- 새로운 개념의 강섬유 콘크리트 타설 노즐의 상용화 및 사업화가 달성되면 경제적인 관점에서 국내외 건설시장에서 커다란 파급효과를 불러일으킬 것으로 판단됨
- 본 개발 기술과 함께 건설 산업의 회복 및 장기적인 저성장과 취업난에 부심하는 국내 경제의 돌파구로 작용할 수 있음
- 사회기반시설물에 대한 안전성과 붕괴사고를 예방하여 국민 불안감을 해소하고, 유지보수 비용 절감 및 적용성을 극대화할 수 있을 것으로 기대됨
- 기존의 강섬유 보강 콘크리트 대비 강도와 연성도의 효율적인 향상으로 구조물의 붕괴 이전에 사용자의 대피를 가능하게 할 것으로 기대됨

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 본 과제 의 최종성과물인 노즐 형상과 마그네틱을 고려한 강섬유 방향성 제어 노즐은 현장 적용성과 실용화를 고려하여 기존의 콘크리트 타설 노즐에 손쉽게 탈부착이 가능하도록 개발하였음
- 개발한 타설 노즐은 토목, 건축, 플랜트 등 강섬유 보강 콘크리트가 적용되는 다양한 산업분야에서 활용이 가능할 것을 판단됨

- 건설 현장에서 사업화 및 실용화 가능한 기술로 성장하기 위하여, 내 강섬유 제조회사 및 콘크리트 회사와의 기술 이전을 논의하여 향후 사업화 과제 추진 계획
- 사업화 과제 추진 시 본 연구개발의 성과품을 활용하여 다음과 같은 추가적이고 순차적인 변수 계획을 수립하고 검증이 요구됨: 1) 구조 부재별 타설방법과 타설배관(노즐) 평가 및 제시, 2) 관련 배관(또는 노즐)의 직경과 길이, 3) 강섬유의 크기, 4) 현장 적용 시나리오 기반 실험 검증



그림 5.1 강섬유 제작 및 강섬유 보강 콘크리트 현장 시공

- 건설 시공분야와 함께 마그네틱 센서 산업 등과 밀접한 관련성 있어, 관련 센서 개발을 위한 추가 연구과제 기획 및 사업화 과제 추진 계획

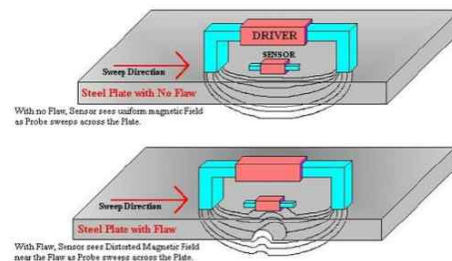


그림 5.2 마그네틱 센서 활용 예시

- 방향성과 분포도를 향상시킴으로써 섬유 보강 콘크리트의 전도성을 극대화할 수 있어, 자가 센싱 능력을 활용한 구조물 모니터링 용도로 활용할 수 있는 추가 연구과제를 계획함

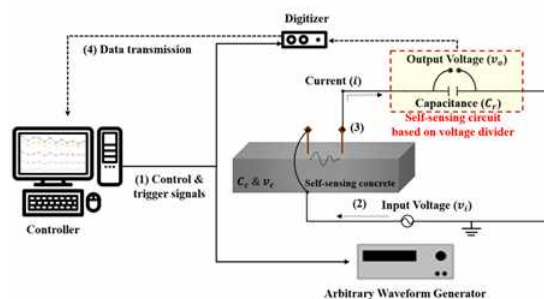
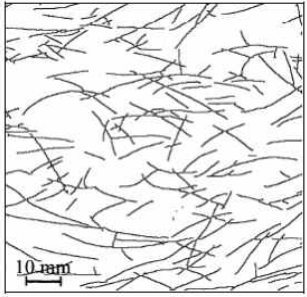
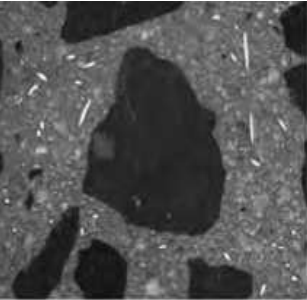
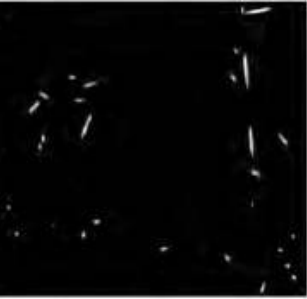
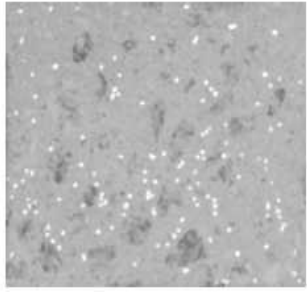


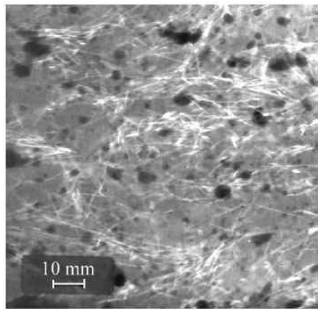
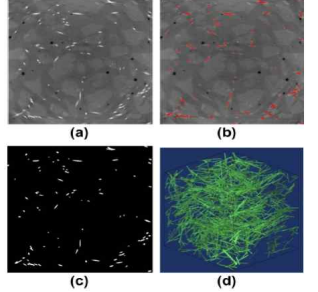
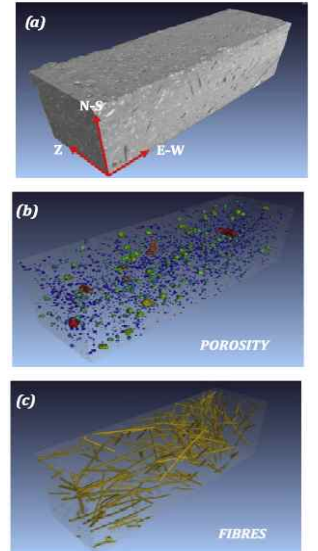
그림 5.3 자가 센싱 섬유 보강 콘크리트 활용 예시

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

○ 시멘트계 재료 내 강섬유의 방향성 및 분포도에 관한 학술자료

논문제목	저자(년도)	내용	관련 사진
Distribution of steel fibres in rectangular sections	Dupont D. & Vandewalle L. (2005)	- 섬유의 방향성계수를 이용한 직사각형 보 단면의 총 섬유의 수를 계산 방법을 제시함 - 제안된 방법을 실험결과와 비교한 결과, 섬유의 총 수는 전반적으로 일치함	
Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength	Barnett S. J. et al (2010)	- 수직 타설 시 타설 방향에 따른 섬유의 방향성에 관하여 연구를 수행함 - 섬유는 재료의 흐름 방향에 수직으로 배열되는 경향이 있으며, 시편 중앙에 타설 시 방사성 균열에 가장 효과적으로 저항할 수 있음	
High performance fiber reinforced self-compacting concrete (HPFR-SCC): a “smart material” for high end engineering applications	Ferrara L. (2012)	- 강섬유 보강 콘크리트의 타설 방법에 따른 기계적 특성에 대해 실험을 수행함 - 콘크리트의 적절한 점성도는 콘크리트 타설 방향으로 섬유를 배열할 수 있으며, 이는 콘크리트 구조물 내에 응력이 가해지는 예상방향으로 섬유의 배열을 유도할 수 있음	
Framework to predict the orientation of fibers in FRC: A novel philosophy	Laranjeira F. et al (2012)	- 콘크리트 구조물의 타설 및 제작 방법에 따른 섬유의 방향성을 예측하고 실험결과와 비교하였음 - 제안한 방법은 실험과 비교한 결과, 섬유의 방향성을 높은 정확도로 예측할 수 있는 것으로 나타남	

논문제목	저자(년도)	내용	관련 사진
Assessment of fibre orientation in reinforced concrete using fourier image transform	Redon C. et al (1998)	- 리본 형상의 강섬유 보강 콘크리트에 대해 이미지프로세싱 기법을 이용하여 섬유의 방향성을 분석하였음 - 섬유의 배열이 콘크리트 보의 기계적 거동에 관계가 있는 것을 확인함	
Characterization of fiber distribution in steel fiber reinforced cementitious composites with low water-binder ratio	Liu J. et al (2011)	- 절단되어진 시편 단면을 디지털카메라를 이용하여 단면을 촬영한 후 이미지프로세싱 기법을 이용하여 강섬유의 방향성 및 분포도를 분석함 - 시편의 크기와 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 분포도계수는 증가하지만 그 영향은 크지 않음 - 섬유의 방향성계수는 시편의 크기가 증가함에 따라 경계면의 영향은 작아짐	 
The influence of fibre orientation on the post-cracking tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete	Abrishambaf A. et al (2015)	- SFRSCC 시편의 균열 후 인장거동에 미치는 섬유의 방향성 및 분포도의 영향에 대해 연구를 수행함 - 이미지프로세싱을 이용하여 섬유의 방향성 및 분포도를 분석하였으며, 섬유의 방향성계수 및 분포도계수는 초기 균열 응력에 비례하는 함	 

영상분석기술	저자(년도)	논문제목	관련 사진
X-ray 촬영 장비를 이용하여 시멘트계 재료 시편 단면을 촬영한 후 이미지프로세싱 기법을 이용하여 강섬유의 방향성 및 분포도를 분석함	Redon C. et al (1998)	Assessment of fibre orientation in reinforced concrete using fourier image transform	
전자기장을 이용하여 콘크리트 구조물 내 강섬유의 방향성 및 분포도를 분석함	Faifer M. et al (2013)	Low Frequency Electrical and Magnetic Methods for Non-Destructive Analysis of Fiber Dispersion in Fiber Reinforced Cementitious Composites: An Overview	
μ CT (Micro computed tomography) 촬영 장비를 이용하여 시멘트계 재료 시편 단면을 촬영한 후 이미지프로세싱 기법을 이용하여 강섬유의 방향성 및 분포도를 분석함	Suuronen J. P. et al (2013)	Analysis of short fibres orientation in steel fibre-reinforced concrete (SFRC) by X-ray tomography, Journal of Materials Science	
	Liu J. et al (2013)	Study on 3D spatial distribution of steel fibers in fiber reinforced cementitious composites through micro-CT technique	
	Pujadas P. et al (2014)	Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels	

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	본 연구과제는 건축/토목/플랜트 시공분야 및 엔지니어링 분야의 기반기술로 제공이 가능하므로 연구과제 보안등급 분류상 일반과제로 분류하는 것이 적절할 것으로 판단됨	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설 · 장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 기술적 위험 요소 분석

- 본 연구는 연구수행에 있어 강섬유 보강 콘크리트 타설 및 방향성 및 분포도 분석 장비 사용과 관련하여 발생할 주요한 위험요소는 아래와 같음
 - － 타설 등의 장비 취급 부주의에 따른 위험
 - － 재료 혼합과 타설 시 환경오염 및 인체 피해 우려
 - － 검증 실험 시 실험실내 환경오염 우려

○ 안전 관리 대책

- 본 과제 주관연구기관에는 실험 및 연구활동을 수행할 때 발생할 수 있는 안전사고의 예방과 교내 환경오염방지를 위하여 대구대학교 연구실 안전환경 규정을 준수하고 있음
- 주관기간에서는 주관기관 자체적으로 연구활동종사자(학부생, 대학원생, 교원, 연구원, 조교, 직원)와 연구실 안전관리자 대상 정기교육(신규 교육•활동)또는 사이버교육(국가과학기술인력개발원 및 국가연구안전관리본부)을 실시 운영되고 있어, 모든 참여 연구원들이 적극 참여하여 연구실 안전 및 연구원의 안전을 확보할 수 있도록 함
- 공동연구기관에서는 연구활동종사자에 대해 피보험자 및 수익자로 하는 보험 가입 및 연구활동종사자(학부생, 대학원생, 교원, 연구원, 조교, 직원)와 연구실 안전관리자들을 대상으로 매년 안전교육을 아래와 같이 의무적으로 실시하고 있음

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Vision-based multipoint measurement systems for structural in-plane and out-of-plane movements including twisting rotation	대구대	제1	Smart Structures Systems	1.382	2017.11.15	단독사사	SCI급
2	논문	Shear capacity of cast-in headed anchors in steel fiber-reinforced concrete	대구대	제1	Engineering Structures	2.755	2018.09.15	단독사사	SCI급 (2017 JCR 상위 15%이내)
3	논문	SFRSCC의 섬유방향성에 미치는 입구 속도와 점성의 영향성에 대한 수치해석	세종대	교신	한국구조물 진단유지 관리공학회	등재지	2018.09.22	단독사사	
4	특허	강섬유보강 시멘트 복합재료의 방향성 제어 및 분산성 향상을 위한 탈부착식 마그네틱 타설 노즐	대구대 세종대	제1	대한민국		2018.11.28	단독사사	특허출원
5	특허	강섬유보강 시멘트 복합재료의 방향성 제어 및 분산성 향상을 위한 탈부착식 테이퍼형 타설 노즐	대구대	제1	대한민국		2018.08.10	단독사사	특허출원
6	특허	강섬유보강 시멘트 복합재료의 방향성 제어 및 분산성 향상을 위한 블레이드형 타설 노즐	대구대	제1	대한민국		2018.08.10	단독사사	특허출원
7	특허	형상기억합금이 포함된 콘크리트 구조물의 가열방법	대구대	제1	대한민국		2017.10.27	단독사사	특허출원
8	학술 발표	Evaluation of fiber orientation and distribution using sectional image analysis technique	대구대	제1	International Conference on Digital Image Correlation and Noncontact Experimental Mechanics		2018.10.16	단독사사	국외발표

9	학술 발표	Evaluating effects of fresh SFRSCC'S density and flow velocity on fiber alignment using finite element method	대구대	교신	4 th International Conference on Computational Design in engineering		2018.04.03	단독사사	국외발표
10	학술 발표	Numerical Investigation on Nozzle Shapes in the Alignment of Steel Fibers	대구대	제1	2017 대한토목학회 정기학술대회		2017.10.20	단독사사	국내발표
11	학술 발표	타설 노즐 형상에 따른 시멘트계 재료 내의 섬유 방향성에 대한 수치해석 연구	대구대	교신	2018 한국 구조물진단 유지관리 공학회 봄 학술발표회		2018.04.19	단독사사	국내발표
12	학술 발표	자기장을 활용한 강섬유의 방향성 제어에 관한 수치해석 연구	대구대	교신	2018 한국 구조물진단 유지관리 공학회 봄 학술발표회		2018.04.19	단독사사	국내발표
13	학술 발표	테이퍼 형상 노즐 출구에 의한 보 부재에서의 섬유 방향성 및 분산도 평가	대구대	교신	2018 한국 구조물진단 유지관리 공학회 가을 학술발표회		2018.10.04	단독사사	국내발표
14	학술 발표	테이퍼 형상 노즐 출구에 의한 수직부재에서의 섬유 방향성 및 분산도 평가	대구대	교신	2018 한국 구조물진단 유지관리 공학회 가을 학술발표회		2018.10.04	단독사사	국내발표
15	학술 발표	SFRCC에서 섬유 배열 제어를 위한 자기장 효과에 관한 수치해석적 연구	대구대	제1	2018 한국 전산구조 공학회 학술심포지엄		2018.11.16	단독사사	국내발표
16	포상	SFRCC에서 섬유 배열 제어를 위한 자기장 효과에 관한 수치해석적 연구	대구대	제1	2018 한국 전산구조 공학회 학술심포지엄		2018.11.16	단독사사	학술발표 우수논문상

제11장. 기타 사항

○ 본 과제 성과물을 활용한 후속 연구 및 사업화 추진

- 강섬유 보강 콘크리트 타설시 강섬유의 방향성 제어와 분포도를 향상시킬 수 있는 원천 기술 및 관련 논문, 특허를 바탕으로 강섬유 및 콘크리트 회사 등과 사업화 과제를 추진할 계획임
- 또한, 유동특성, 타설방향 등의 분야와 결합된 재료, 시공기술 개발과 강섬유 보강콘크리트의 자기센싱과 구조부재 적용과 관련된 연구과제를 추진할 계획임

제12장. 참고 문헌

- Abrishambaf A., Barros J.A.O., Cunha V.M.C.F., Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels, *Cement and Concrete Research*, Vol. 51, pp. 57–66, 2013
- Abrishambaf A., Cunha V.M.C.F., Barros J.A.O., The influence of fibre orientation on the post-cracking tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete, *Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol. 31, pp. 38–53, 2015
- Alberti M.G., Enfedaque A., Gálvez J.C., On the prediction of the orientation factor and fibre distribution of steel and macro-synthetic fibres for fibre-reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 77, pp. 29–48, 2016
- Barnett S. J., Lataste J. F., Parry T., Millard S. G., Soutsos M. N., Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength, *Materials and Structures*, Vol. 43, pp. 1009–1023, 2010
- Deeb R., Karihaloo B.L., Kulasegaram S., Reorientation of short steel fibres during the flow of self-compacting concrete mix and determination of the fibre orientation factor, *Cement and Concrete Research*, Vol. 56, pp. 112–120, 2014
- Dupont D., Vandewalle L., Distribution of steel fibres in rectangular sections, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 391–398, 2005
- Faifer M., Ottoboni R., Toscani S., Ferrara L., Steel fiber reinforced concrete characterization based on a magnetic probe, 2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings, 2010
- Faifer M., Ferrara L., Ottoboni R., Toscani S., Low Frequency Electrical and Magnetic Methods for Non-Destructive Analysis of Fiber Dispersion in Fiber Reinforced Cementitious Composites: An Overview, *Sensors*, Vol. 13, pp. 1300–1318, 2013
- Ferrara L., High performance fiber reinforced self-compacting concrete (HPFR-SCC): a “smart material” for high end engineering applications, Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano, Italy, 2012
- Kang, S. T., Kim, J. K., Flow-dependent fiber orientation distribution and its effect on the tensile behavior of ultra high performance cementitious composites, Korea Concrete Institute 2010 spring convention, pp. 483–484, 2010
- Kaufmann J., Frech K., Schuetz P., Münch B., Rebound and orientation of fibers in wet sprayed concrete applications, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 15–22, 2013
- Laranjeira F., Grünewald S., Walraven J., Blom C., Molins C., Aguado A., Characterization of orientation profile of steel fiber reinforced concrete, *Materials and Structures*, Vol. 44, No. 6, pp. 1093–1111, 2011
- Laranjeira F., Aguado A., Molins C., Grünewald S., Walraven J., Cavalier S.,

Framework to predict the orientation of fibers in FRC: A novel philosophy, Cement and Concrete Research, Vol. 42, pp. 752-768, 2012

- Lataste J.F., Behloul M., Breysse D., Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements, NDT&E International, Vol 41, pp.638-647, 2008
- Lee B. Y., Kim J. K., Kim J. S., Kim Y. Y., Quantitative evaluation technique of Polyvinyl Alcohol (PVA) fiberdispersion in engineered cementitious composites, Cement and Concrete Composites, Vol. 31, No. 6, pp. 408-417, 2009
- Liu J., Li C., Liu J., Du Z., Cui G., Characterization of fiber distribution in steel fiber reinforced cementitious composites with low water-binder ratio, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 18, pp. 449-457, 2011
- Liu J., Li C., Liu J., Cui G., Yang Z., Study on 3D spatial distribution of steel fibers in fiber reinforced cementitious composites through micro-CT technique, Construction and Building Materials, Vol. 48, pp. 656-661, 2013
- Pujadas P., Blanco A., Cavalaro S., Fuente A. D. L. , Aguado A., Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels, Construction and Building Materials, Vol. 64, 14 pp. 496-503, 2014
- Redon C., Chermant L., Chermant J., Coster M., Assessment of fibre orientation in reinforced concrete using Fourier image transform, Journal of Microscopy, Vol. 191, No. 3, pp. 258-265, 1998
- Sebaibi N., Benzerzour M., Abriak N. E., Influence of the distribution and orientation of fibres in a reinforced concrete with waste fibres and powders, Construction and Building Materials, Vol. 65, No. 29, pp. 254-263, 2014
- Suuronen J. P., Kallonen A., Eik M., Puttonen J., Serimaa R., H. Herrmann, Analysis of short fibres orientation in steel fibre-reinforced concrete (SFRC) by X-ray tomography, Journal of Materials Science, Vol. 28, No. 8, pp.1358-1367, 2013
- Torigoe S., Horikoshi T., Ogawa A., Saito T., Hamada T., Study on Evaluation Method for PVA Fiber Distribution in Engineered Cementitious Composite, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol, 1, No. 3, pp. 265-268, 2003
- Yang E. H., Sahmaran M., Yang Y., Li V. C., Rheological control in production of engineered cementitious composites, ACI Materials Journal, No. 106, pp. 357-366, 2009
- Yang Y., Methods study on dispersion of fibers in CFRC, Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 5, pp. 747-750, 2001
- Zandi Y., Husem M., Pul S., Effect of distribution and orientation of steel fiber reinforced concrete, Conference: Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Energy and development-environment-biomedic, pp.260-264, 2011

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.