

20CTAP-
C151959
-02

비정형 콘크리트 패널 제작을 위한
3D 프린팅 장비 개발

2021

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 20CTAP-C151959-02

비정형 콘크리트 패널 제작을 위한 3D 프린팅 장비 개발 최종보고서

2021. 01. 20.

주관연구기관 / 한밭대학교 산학협력단

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

제출문

제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘비정형 콘크리트 패널 제작을 위한 3D 프린팅 장비 개발’ (연구개발 기간 : 2019. 04. 15. ~ 2020. 12. 31.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2021. 01. 20.

주관연구기관명 : 한밭대학교 산학협력단 (대표자) 최종인 (인)



주관연구기관책임자: 한밭대학교 이동훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C151 959-02	해당 단계 연구 기간	2019/04/15.~ 2020/12/31	단계구분	(해당단계)1단계 (총단계)1단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	비정형 콘크리트 패널 제작을 위한 3D 프린팅 장비 개발			
연구책임자	이 동 훈	해당단계 참여연구원 수	총: 명 내부:18명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:360,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:360,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 명 내부:18명 외부: 명	총 연구비	정부:360,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:360,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한밭대학교 산학협력단 건설환경조형대학 건축공학과			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	본 연구과제는 보안과제가 아니므로, 본 연구과제의 보안등급은 일반으로 결정함이 타당함.				
요약				보고서 면수	

본 연구과제의 최종 목표는 자유곡면으로 이루어진 FCP(Free-form Concrete Panel)를 자동으로 제작할 수 있는 압축형 3D 프린팅 장비를 개발하는 것이다. 기존 FCP 생산 기술의 재사용 불가능, 양면 곡률 구현의 한계, 폐기물 증가, 높은 인력 의존도, 낮은 정밀도 등을 해결하기 위한 것으로 본 기술은 FCP의 다양한 형상 구현이 가능하며 공정의 자동화로 인한 자본집약적인 기술로 비정형 콘크리트 부재를 생산할 수 있는 최고 수준의 FCP 생산기술이다. 본 연구과제의 최종 목표를 달성하기 위한 주요 연구목표는 다음과 같다.

- FCP 제작용 3D 프린터 개발
- FCP 제작용 최적 콘크리트 배합비 도출

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구과제의 최종 목표는 자유곡면으로 이루어진 FCP(Free-form Concrete Panel)를 제작할 수 있는 3D 프린팅 장비의 개발이다. 본 연구에서 개발하는 3D 프린팅 장비는 기존의 압출형 3D 프린팅 방식이 아닌 압축형 방식으로 형상을 출력하는 새로운 기술이다. 본 기술을 통해 기존의 압출형 3D 프린팅 방식이 갖는 시공오차, 곡면 구현 등의 한계를 해결할 수 있으며 비정형 콘크리트 패널의 자동화 생산을 위한 기초원천 기술을 확보할 수 있다. 본 연구과제의 최종목표를 달성하기 위한 주요 연구목표는 다음과 같다. ○ FCP 제작용 3D 프린터 개발 ○ FCP 제작용 최적 콘크리트 배합비 도출
연구개발성과	○ 핵심 성과 A : FCP 제작용 3D 프린터 개발 - 양면 다점프레스 방식의 ‘3D 프린터’ 장비 개발 - 본 연구과제에서 개발한 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’장비는 FCP의 상·하부 형상을 구현할 수 있는 장비이다. 또한 기존의 FCP 하부형상을 구현하는 CNC(Computer Numerical Control) 장비와 압출형 3D 프린팅 방식의 한계를 해결할 수 있는 장비로 높은 진보성과 우월성을 갖는다. 따라서 본 개발 장비는 FCP 생산 분야에서의 독보적인 기술로써 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. - 자동 형상제어 측면 거푸집 시스템 개발 - 본 연구과제에서 개발한 자동 형상제어 측면 거푸집 시스템은 FCP의 측면 형상을 구현할 수 있는 장비이며 ‘측면형상 제어장비’와 ‘가변형 측면 거푸집’으로 구성된다. ‘측면형상 제어장비’는 기존의 장비 및 기술에선 적용되지 않았던 FCP의 측면 형상을 제어할 수 있는 장비로 다양한 형상의 FCP를 구현할 수 있다. ‘가변형 측면 거푸집’은 측면형상 제어장비와 함께 결합하여 FCP의 측면형상을 구현하는 거푸집이다. 본 거푸집은 곡선을 자유롭게 구현할 수 있으며 재활용이 불가능한 목재, 스티로폼, 강재, 등을 사용하는 비정형 거푸집과는 다르게 재활용이 가능한 거푸집이다. ○ 핵심 성과 B : FCP 제작용 최적 콘크리트 배합비 도출 - W/B를 고려한 FCP 제작용 콘크리트 배합비 도출 - - 성형성, 숙경성의 성능을 갖춘 FCP 제작용 콘크리트 배합비 도출 - 본 연구과제에서는 성형성, 숙경성의 성능을 갖춘 FCP의 최적의 콘크리트 배합비를 도출하기 위한 연구를 수행하였으며 최적의 배합비를 도출하였다. 도출된 배합비를 통해 제작된 FCP의 오차율은 3%이내를 만족하였으며 이러한 성과를 통해 비정형 콘크리트 패널 생산 분야에서의 경쟁력을 확보할 것으로 기대된다.

연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 기술적 측면 BIM을 이용한 설계-생산 인터페이스의 구축으로 Digital design 업무의 생산성, 효율성 향상시킬 수 있다 ○ 학문적 측면 다양한 비정형 형태에 대한 시뮬레이션 및 최적화 연구를 통해 국제수준의 FCP 생산 기술을 학문적으로 정립할 수 있으며 비정형 건축기술 분야에서 우리나라가 국제적인 학문적 허브가 될 수 있다. ○ 경제적·산업적 측면 FCP 생산을 위한 추가적인 거푸집이 필요 없으며 일관된 품질과 경제성을 확보할 수 있다. 또한, 비정형 건축 기술의 발달로 관광산업의 증가와, 해외 수주 및 국제적 기술 이전이 가능할 것이다. ○ 사회적 측면 ○ FCP 생산 기술은 발주자, 설계자, 시공자는 물론 성능평가를 위해 일반인 및 전문가의 관심과 참여를 유발하는 혁신적인 기술이 될 수 있을 것으로 예상된다. 특히, 본 장비를 통해 축조된 비정형 건축물은 도시 사회를 미래지향적으로 발전시키는 계기가 되며 그 과정에서 축적된 DB는 다양한 전문가들이 각각의 목적에 따라 응용할 수 있다.					
	국문핵심어 (5개 이내)	3D 프린터	비정형 콘크리트 패널	비정형 건축	자동화 생산	로드
	영문핵심어 (5개 이내)	3D printer	Free-form Concrete Panel	Free-form construction	Production automation	Rods
	※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)					

< 목 차 >

1장. 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발의 개요	1
2. 연구개발 대상의 국내·외 현황	2
2장. 연구수행내용 및 성과	8
1. 연구개발 추진 전략(이론적, 실험적 접근방법)	8
가. 연구개발 추진 전략 및 방법	8
나. 연구개발 추진 체계	9
다. 연구개발 추진 일정	9
2. 연구 내용	11
가. 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’	11
(1) 개발개념	11
(2) 개발상세	13
(가) 상·하부 곡률 형성 기술	13
(나) 연동운동 기술	19
나. 측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술	21
(1) 개발개념	21
(2) 개발상세	27
(가) FCP의 측면 각도 조절 기술	27
(나) 거푸집 지지 및 고정 기술	30
(다) 가변형 측면 거푸집	32
다. FCP(Free-form Concrete Panel)제작용 3D 프린팅 장비	38
(1) 장비의 구성	38
(2) FCP 제작 방식	43
라. FCP 및 생산용 거푸집 재료	46
(1) FCP 생산용 최적 콘크리트 배합비 도출	46
(2) FCP 생산을 위한 거푸집 재료	54
3. 연구개발 성과	56
가. 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’	56
(1) 기술 요약 정보	56
(2) 논문 게재 성과	61
(3) 특허 성과	62
(4) 시작품 제작 성과	63
나. 측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술	64
(1) 기술 요약 정보	64

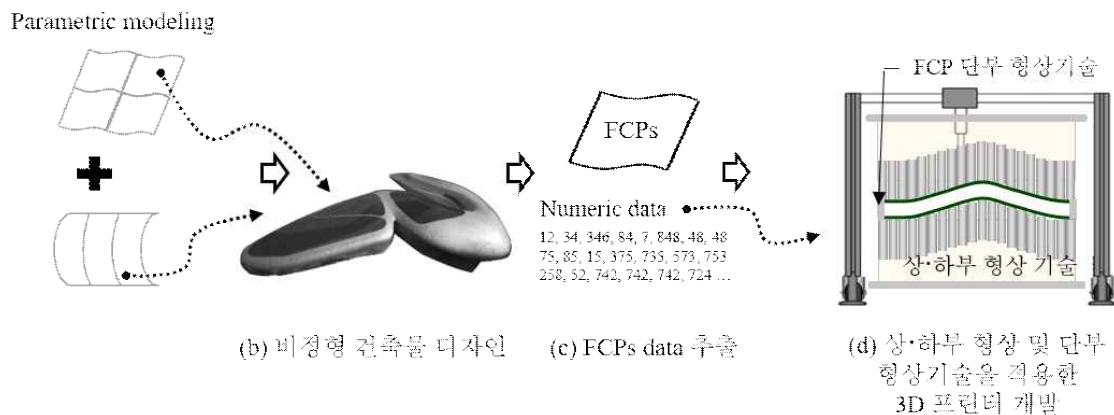
(2) 논문 게재 성과	69
(3) 특허 성과	70
(4) 시작품 제작 성과	71
다. FCP 및 생산용 거푸집 재료	73
(1) 핵심 연구 내용	73
(2) 논문 게재 성과	78
4. 연구 결과	79
 3장. 목표 달성도	86
1. 연구개발 목표 달성도	86
2. 연구개발 성과지표 달성도	89
 4장. 연구개발성과의 활용 계획	93
붙임. 참고 문헌	95

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1장. 연구개발과제의 개요

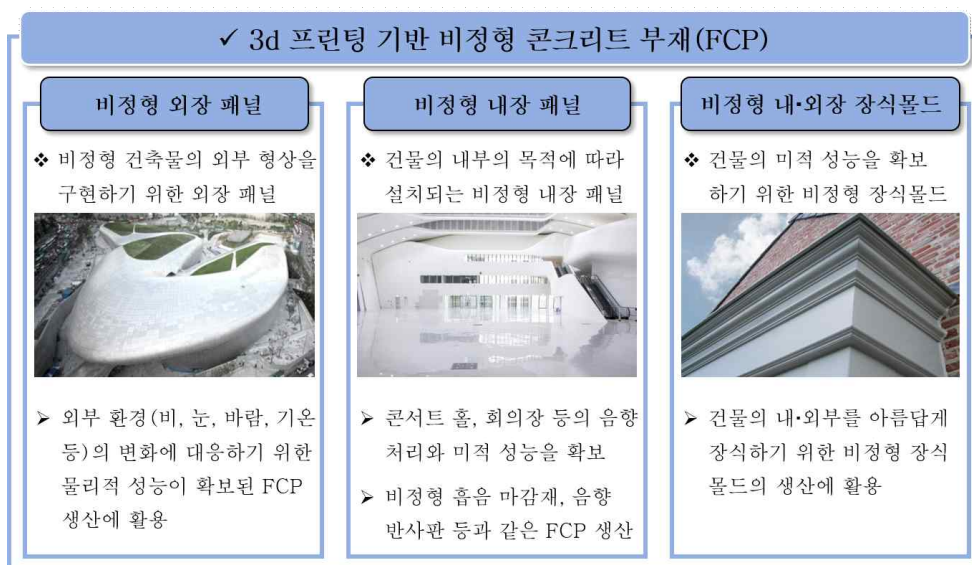
1. 연구개발의 개요

- 본 과제의 핵심기술은 <그림 1-1-1>과 같이 FCP(Free-form Concrete Panel) 비정형 부재 생산기술이다. 본 기술은 3D 프린팅 장비를 개발하여 FCP 부재의 형상을 구현하고, GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete) 등과 같은 콘크리트 복합체를 구현된 형상에 맞추어 타설하는 과정을 통해 최종 FCP를 생산한다.



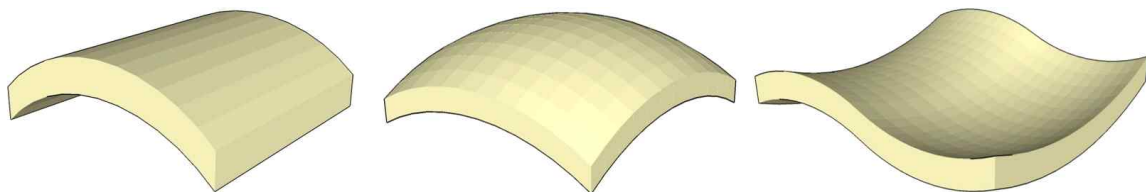
<그림 1-1-1> 비정형 콘크리트 부재 생산을 위한 3D 프린팅 기술의 개요

- 본 과제의 개발기술을 활용하여 생산되는 비정형 콘크리트 부재(Free-form Concrete Panel, FCP)은 <그림 1-1-2>와 같이 자유곡면으로 이루어진 비정형 건축물에 시공되는 외장, 내장패널 뿐만 아니라 비정형 장식몰드를 포함한 모든 비정형 부재이다.



<그림 1-1-2> 구매 수요 맞춤형 비정형 콘크리트 부재

- 기존의 Steel, Glass, Aluminium, Titanium 등의 재료를 사용하는 기술과 달리 본 기술은 시멘트, 규사, 펄프 등으로 배합된 시멘트 복합체, GFRC(Glass Fiber Reinforced Concrete), HPC(High Performance Concrete) 등의 섬유보강 재료를 이용하여 비정형 외장패널, 비정형 내장패널, 비정형 내·외장 장식 몰드 등을 생산한다.
- 그 이유는 구매 수요에 맞춰 건축 부위별 비정형 부재의 요구 성능이 다르고, 콘크리트를 이용하여 패널을 제작할 경우, 구조적 안정성과 시공성과 경제성이 우수하고 형상, 두께, 마감면의 성형, 재료의 균질성의 장점을 가지기 때문이다(Lee et al., 2015).
- 특히, 비정형 부재는 <그림 1-1-3>과 같이 단방향(single curved) 부재와 이중 곡면(double curved) 부재로 이루어진다. 기존의 기술로는 단방향 부재의 경우, 전개적인 속성을 띄므로 구부리는(bending) 방법만으로 제작 가능하여 Steel, Aluminium, Titanium, Glass 등의 재료들을 사용하여 생산되며, 이중 곡면 부재는 찢거나 늘리지 않고는 변형을 가져오기 때문에 특수 장비로 제작되거나 몰드에 의해 주조된다. 이는 고가로 생산되며, 유지관리 측면에서도 고가의 비용을 지불해야 한다.
- 따라서 본 과제의 개발기술은 콘크리트의 재료적 특성으로 인하여 유지관리 측면에서 효율적이며, Steel, Aluminium, Titanium, Glass 재료들을 사용하여 제작되는 기존의 비정형 부재 보다 성능측면, 원가측면에서 매우 우수한 기술이다.



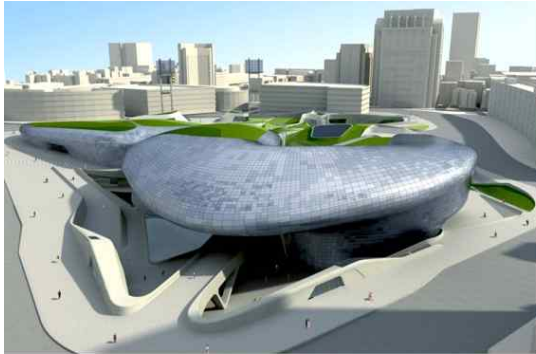
(a) 단방향(Single curved) 부재

(b) 이중 곡면(Double curved) 부재

<그림 1-1-3> 비정형 부재의 종류

2. 연구개발 대상의 국내·외 현황

- 비정형 콘크리트 생산기술 분야에서 막대한 자본을 투입하여 BIM을 활용한 3D 설계기술과 CNC 가공기술이 지속적으로 연구되고 있다(Ryu et al., 2012; Bae et al., 2009; Lee, 2008). 그러나 대부분의 프로젝트에서는 비정형 콘크리트 부재의 생산에 활용되는 거푸집을 1회성으로 맞춤 제작하기 때문에 재활용이 어렵다. 이러한 이유 때문에 아직도 비정형 건물을 축조하는 것은 비용, 시간을 포함하여 생산성에 막대한 부담을 주고 있다.
- 비정형 패널의 경우 Steel, Concrete 이 외에도 Glass, Aluminium, Titanium, GFRC(Glass Fiber Reinforced Concrete) 등 다양한 재료들이 사용된다(Kim et al., 2015).이 중에서 GFRC와 같은 콘크리트를 이용하여 패널을 제작할 경우, 구조적 안정성과 시공성과 경제성이 우수하고 형상, 두께, 마감면의 성형, 재료의 균질성의 장점을 가진다(Lee et al., 2015). 특히, 콘크리트의 재료적 특성으로 인하여 유지관리 측면에서 효율적이다.



(a) 동대문 디자인 플라자 - 외부



(b) 동대문 디자인 플라자 - 내부

<그림 1-2-1> 동대문 디자인 플라자 조감도

- 비정형 건물의 시공을 위해 막대한 자본투입과 함께 다양한 기술이 적용되고 있지만 아직도 고품질의 비정형 부재를 경제적으로 생산하는 기술은 매우 부족하다. The Sydney Opera House의 경우, 초기 예상 총 공사비는 7백만 USD이었으나 1억 2백만 USD로 15배 증액되었으며, Bilbao Guggenheim Museum은 총 공사비 1억 2천 7백만 USD로 소요되어 최초 대비 14배가 소요되었다. 또한, <그림 1-2-1>과 같이 동대문 디자인 플라자(Dongdaemun Design Plaza & Park)는 잦은 설계 변경, 공기 지연 등으로 인하여 최초 예산의 2배가 소요되었다.
- 이러한 공사비 상승의 원인은 비정형 곡면의 품질 확보를 위해 설계, 생산 및 설치 단계에 투입되는 많은 인력과 시간 때문이다. 특히, 비정형 패널(free-form panels)의 생산과 설치 시 투입되는 비용은 일반 패널보다 2배 이상이다. FCMs(Free-form concrete Members)의 경우에도 생산용 거푸집은 재활용이 불가능하여 생산성 및 원가 측면에서 막대한 부담을 주고 있다.
- 영국 Loughborough University의 IMCRC (Innovative Manufacturing and Construction Research Centre)는 비정형 콘크리트 부재를 구현하기 위해 3D Printing 공법을 연구하였다(IMCRC, 2014). 그러나 플로팅(plotting) 방식의 제작으로 인해 하나의 부재를 생산하는데 많은 시간이 소요되어 경제적인 측면에서 대량 생산이 불가능하다 (Kim, 2014). 그리고 Plotted layers 간의 부착력 확보와 매끄러운 형상을 만들기 위해 Troweling을 해야 하는 문제가 해결되어야 한다.
- 이 밖에도, 비정형 콘크리트 부재 생산기술 관련 연구는 CNC 가공된 EPS (Expandable Polystyrene) (Mandl et al, 2008; Lindsey and Gehry, 2001), 목재 (Toyo Ito & Associates, 2006), 섬유(Schipper and Janssen, 2011) 등을 이용하여 실용화 노력을 하고 있으나, 거푸집의 재활용이 어려워 과도한 비용과 시간 소요되어 실용화의 어려움이 있다.
- 비정형 콘크리트 부재 생산기술에 관한 연구를 살펴보면, <그림 1-2-2>와 같이 Latorre (2010)는 유압 시스템(pneumatic system)을 이용하여 비정형 돔의 형상을 만들기 위해 거푸집을 제작하였으나, 다양한 형상 구현이 어려운 문제점이 있다.



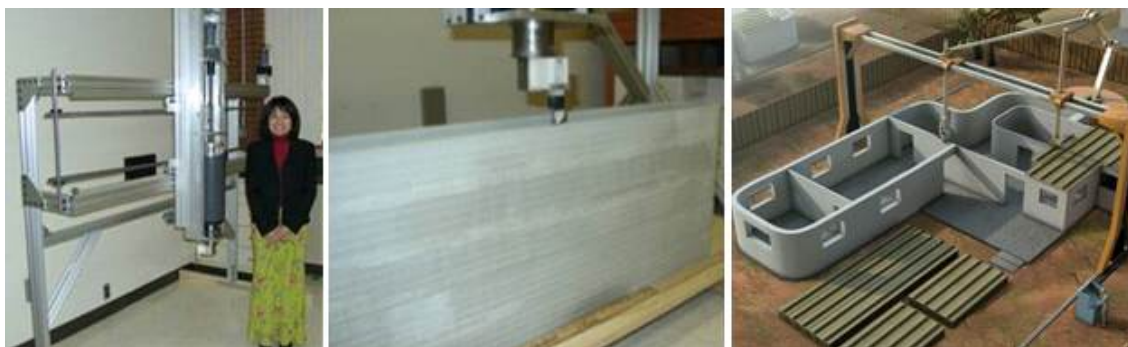
<그림 1-2-2> Pneumatic System(Latorre, 2010)

- Verhaegh(2010)는 <그림 1-2-3>과 같이 섬유(Fabric)를 거푸집으로 이용하여 비정형 콘크리트 부재를 구현하였으나 Flexible한 Fabric의 재활용 및 보강방법에 관한 추가적인 연구가 필요하다.



<그림 1-2-3> 섬유(Fabric)를 활용한 거푸집(Verhaegh, 2010)

- 비정형 타설 자동화를 위하여 미국 University of Southern California의 CRAFT(Center for Rapid Automated Fabrication Technologies)는 <그림 1-2-4>와 같이 로봇 자동화, 건설 프로세스, 신재료, 컴퓨터 디자인을 연구하며 건축물 자동화 건설을 위하여 대형의 기계 제작 및 활용에 대한 연구를 진행하였다. 그러나 대형 부재 제작을 위한 추가적인 연구가 필요하며 비정형 부재제작은 불가능 하다.

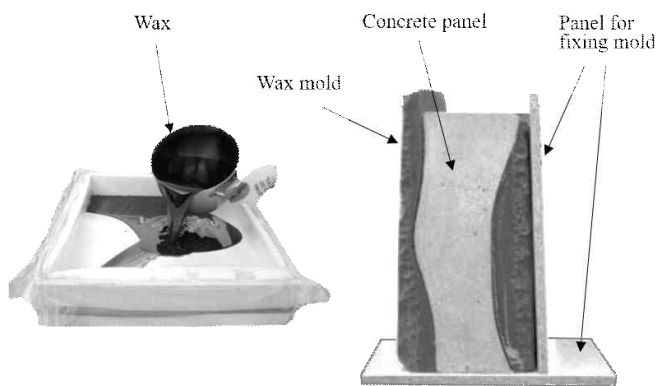


<그림 1-2-4> CRAFT 로봇 자동화 시스템(University of Southern California)

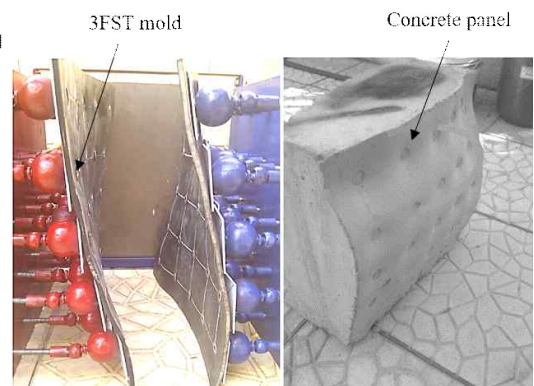
- 앞서 개발된 연구에 문제점을 인식하여 거푸집의 재활용이 가능한 기술에 대한 연구도 진행되었다. Oesterle et al.(2012)는 <그림 1-2-5>의 (a)와 같이 왁스를 사용한 비정형 몰드의 개념 제시하여 재활용 가능한 거푸집에 대한 연구를 진행하였다. 그러나 왁스 거푸집의

형상을 구현하기 위한 장비 또는 기술에 대한 개념만을 제시할 뿐 실무 적용이 가능한 방법을 설명하지 못하였다.

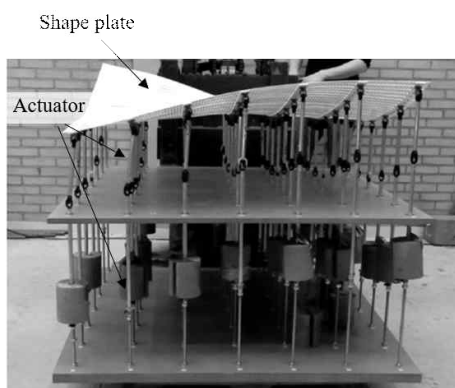
- <그림 1-2-5>의 (b)와 같이 Savvides(2012)는 일정한 간격의 로드를 사용하여 비정형 형상을 만드는 3FST(Free Form Formwork System Technology) 기술을 개발하여 거푸집을 재활용할 수 있었으나, 콘크리트 양생 완료시점까지 거푸집 분리가 불가능하고, 형상구현 능력과 오차 등에 대한 검증이 이루어지지 않아 아이디어 제시 수준에서 머물렀다.
- 또한, <그림 1-2-5>의 (c) 및 (d)와 같이 4TU(2017), Schipper and Eigenraam(2016), Adapa (2017)에서 연구된 machine은 형상판 설치 후 machine을 구동하여, 형상판의 면적 및 크기를 그대로 유지하여 비정형 형상을 구현하였다. 이때 상부 핀(NCRs)은 수직이동 뿐 아니라 수평이동도 함께 이루어지는 방식이다. 이러한 방식은 형상판의 면적 및 크기에 의존하여 구현되므로 Free-form panel의 좌표값에 대한 데이터 전달 시 오차가 발생하여 정확한 크기로 형상을 구현하기 어렵다. 또한 입력 값에 의한 자동 수치제어가 아닌 사람의 손으로 제어하기 때문에 한계가 크다.



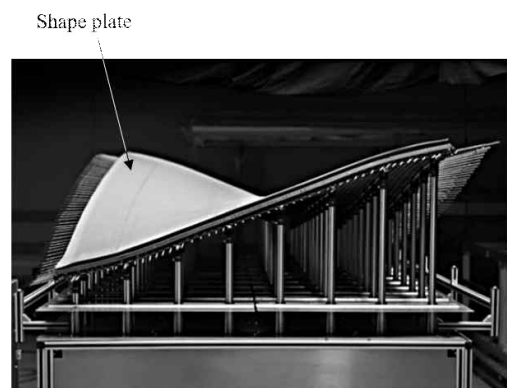
(a) Form manufacturing using wax and concrete panel
(Oesterle et al., 2012)



(b) Form manufacturing using 3FST and concrete panel
(Savvides, 2012)



(c) Prototype built in the project Kine-Mould
(4TU, 2017; Schipper and Eigenraam, 2016)



(d) Mold controlled by computer
(Adapa, 2017)

<그림 1-2-5> 비정형 콘크리트 부재 생산을 위한 실험 사례

- 지금까지 언급한 것과 같이 비정형 콘크리트 부재 생산과 관련하여 많은 연구가 진행되었으나, 아직도 설계된 형상과 일치하는 부재를 생산하기 위해 많은 시간과 비용이 소요된다.

이 밖에도 <표 1-2-6>과 같이 여러 문제점이 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여, 경제적으로 정확한 형상의 FCP을 신속하게 생산하는 기술 개발이 필요하다.

- 기존 비정형 콘크리트 패널의 경우 철근 보강이 불가능하여 인장력 확보가 어려워 여러 하중에 대한 강성 확보가 시급하다. 이에 따라 철근, 와이어 메쉬 등의 보강재 없이 자체적으로 강성을 확보할 수 있는 시멘트 복합체, GFRC 및 HPC 등을 활용한 콘크리트 부재 개발이 필요하다.
- 기존의 Glass, Aluminium, Titanium을 이용한 비정형 패널은 고가이며 균열, 파손, 변형 등의 문제점이 발생한다. 또한, 보수 보강 시 부재 자체를 교체해야하고 이에 따른 막대한 유지관리 비용이 발생한다. 이는 유지관리가 타 재료에 비해 용이한 비정형 콘크리트 부재 생산 기술 개발 및 적용으로 해결 가능하다.
- 또한 비정형 외장 패널의 경우 단열 성능이 확보되어야 한다. 그러나 기존의 비정형 외장패널은 별도의 단열층을 배치하여야 하며, 이로 인한 비용상승, 시공 생산성 저하, 단열층 파손에 따른 성능저하 등의 문제가 있다. 본 과제의 시멘트 복합체, GFRC, HPC 등을 적용한 비정형 패널은 단열층을 패널 내에 배치할 수 있어서 기존 방식보다 우수한 단열성능, 시공의 간편함, 비용저감의 효과를 얻을 수 있다.

<표 1-2-6> 기존 비정형 건축 연구의 한계 및 해결방안

구분		기존 기술의 한계	본 과제의 해결방안
생산 관리 측면	원가	거푸집 재활용 불가능	- 거푸집 역할을 하는 3D프린터에 의해 무한 반복 사용 가능 (거푸집 불필요)
		인력 의존도가 높음	- FCP 생산의 전공정 자동화로 생산인력 최소화
	품질	형상의 정밀도 부족	- BIM을 활용한 생산데이터를 추출 → 3D프린터를 활용한 정밀한 비정형 형상 구현
	공기	인력에 의존한 생산기간 증가	- 24시간 생산 자동화에 따른 획기적 생산시간 단축, 생산성 극대화
성능 측면	내구성	강도 및 내구성 부족	- GFRC, HPC, 시멘트 복합체 등을 사용하여 강도, 내구성 등 물리적 성능이 우수한 부재 생산
	단열성	단열성 및 경량성 부족	- 필요 시 부재 내부에 EPS 등을 두어 FCP을 생산할 수 있으므로 단열성, 경량성 확보 가능
	차폐성	차폐성 부족	- 접합부의 기밀성을 고려한 접합면의 정밀생산
	친환경성	폐기물 발생	- 생산장비 자체가 거푸집 역할 → 생산 폐기물 발생 제로
	미적 성능 만족도	비정형 형상의 Smoothness 한계	- 3D프린터 기술로 형상 한계 및 오차 문제 해결
		코너 부재 제작의 한계	- 코너(corner) 패널, 코너 몰드의 형상 구성, 절삭 가능
		양면 비정형 형상 제작의 한계	- 양면 3D프린터 사용으로 양면 비정형 구현 가능

- 비정형 건축물의 경우 절단면에 따라 단면이 계속 변하기 때문에 비정형 부재의 일체성, 균질성 및 차폐성능이 일정하지 못하다. 따라서 3D프린터를 활용하여 정밀한 형상을 갖는 부

재 생산이 필요하다.

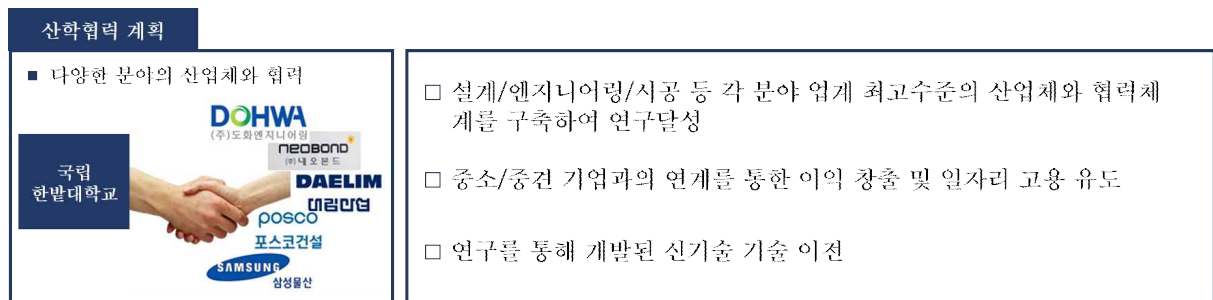
- 기존의 3D 프린팅, CNC milling, 3D 형상 출력장치 등의 기술은 형상과 크기에 제약이 있고, 오차 발생 빈도가 높다. 본 기술은 다양한 형상구현 기술을 융복합하여 1방향 곡면 뿐 아니라 2방향 곡면을 정밀하게 구현 가능하다.
- 본 과제의 사업화 기술은 기존의 노동집약적인 기술에서 전 공정의 자동화로 인한 자본집약적인 기술로 완성하여 경제성 확보, 폐기물 제로화, 생산시간 단축 등을 실현한 최고 수준의 비정형 콘크리트 부재 생산기술로 개발될 것이다.

2장. 연구수행내용 및 성과

1. 연구개발 추진 전략(이론적, 실험적 접근방법)

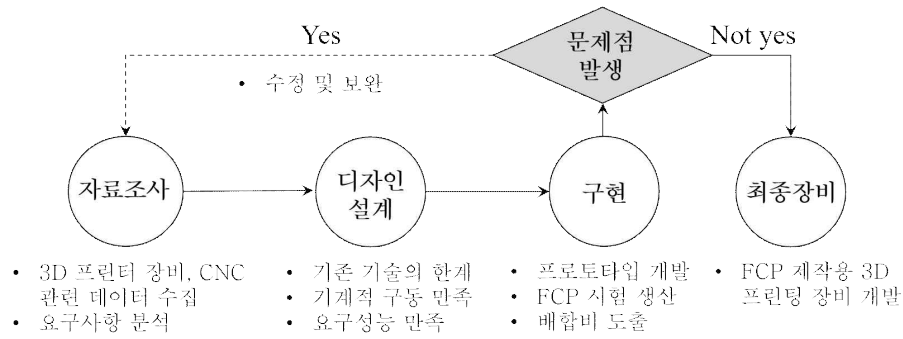
가. 연구개발 추진 전략 및 방법

- 본 연구에서 구현해내고자 하는 기술은 세계적으로 개발된 바가 없는 첨단 기술로 관련 전문가 또는 자료 수집에 한계가 있다. 그러나 본 연구의 책임자는 유사 기술(단면 다점프레스 장비)을 개발한 경력이 있으므로 현재의 문제점을 개선함과 동시에 기술 개발을 진행하려 한다. 최초 계약시, 유사 기술을 보유한 영국 Loughborough University의 IMCR팀과 미국 University of Southern California의 CRAFT팀과의 정보 교류를 하고자 하였으나 본 연구에서 구현하고자 하는 기술에 비해 상대측 연구가 매우 기초적인 수준이다. 국제적으로 협력체계를 구축하기 보다는 지금까지 연구책임자가 수행해온 연구결과로부터 얻을 수 있는 정보가 훨씬 많은 것으로 판단된다. 또한, COVID-19으로 인하여 국제적인 교류가 사실상 불가능하여 기술개발을 위한 방문 및 협력하지 못하고 있다. 따라서 본 연구과정에 있어 국제적으로 협력체계를 구축하기보다 연구책임자의 정보와 기술 개발 개념에 따라 연구를 수행하고자 한다. 한편, 유기적인 산학협력을 위해 관련 기업체들과의 협력체계를 구축하고 연구를 진행하고자 한다. 이를 통해 연구 성과를 달성하고 기업체와의 기술 공유를 통해 기술발전, 일자리 고용 유도 등의 파급 효과를 기대할 수 있다.



<그림 2-1-1> 산학 협력 계획

- 연구 개발은 <그림 2-1-2>와 같이 자료조사, 디자인 설계, 구현, 문제점 발생, 수정 및 보완, 최종 장비 개발 순으로 추진된다. 본 연구를 진행하기 위해 3D 프린터 장비, CNC 관련 데이터 수집하여 개발하기 위한 장비의 요구사항을 분석한다. 이를 바탕으로 개발 장비의 개념을 정립하고 기계적 구동을 고려한 디자인을 도출한다. 도출된 디자인은 프로토타입으로 제작하여 FCP 시험 생산 및 도출 과정을 통해 FCP 생산 시 문제점을 파악하고 수정 보완한다. 이러한 과정을 반복하여 구현된 장비의 수정 및 보완 사항이 없을 경우 최종장비를 개발한다.



<그림 2-1-2> 연구 개발 추진도

나. 연구개발 추진 체계

- 다음과 같은 연구개발 추진 체계에 따라 본 연구에서는 FCP 제작용 3D 프린팅 장비를 개발한다. FCP의 곡면을 구현하는 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’와 각기 다른 형상을 구현하는 측면형상 제어기술을 개발하며 본 장비를 통해 제작하기 위한 FCP의 최적 배합비를 도출한다.

연구개발과제		총 참여 연구원	
과제명	비정형 콘크리트 패널 제작을 위한 3D 프린팅 장비 개발	주관연구책임자 이동훈 외 총 7명	
기관별 참여 현황			
구분	연구기관수	참여연구원수	
대학	1	8	
한말대학교			
비정형 콘크리트 패널 제작을 위한 3D 프린팅 장비 개발			
이동훈 외 7명			
담당기술개발내용			
비정형 건축 구현을 위한 FCP(Free-form concrete panel)제작용 3D 프린팅 장비의 개발과 W/B에 따른 FCP 콘크리트의 배합비 도출			

다. 연구개발 추진 일정

- 본 연구에서의 추진일정은 <표 2-1-1>과 같다. 1차 연도는 연구 개발 계획을 수립하고 자료조사를 통해 3D 프린터 장비가 갖춰야 할 요구성능 분석에 관한 연구를 실시한다. 이를 바탕으로 개념 디자인을 도출하여 측면 형상 제어 기술은 측면 거푸집 이동장치와 형상 각도 조절장치 개발에 관한 연구를 진행한다. 그 후, 배합 실험으로 도출한 배합비로 1차 제작 및 테스트 과정을 거쳐 발생한 문제점들을 보완하여 2차 장비를 제작한다. 이 후, 최적 배합을 도출하기 위해 수차례의 배합실험을 실시한다.
- 2차 연도는 1차 연도에 진행되었던 배합실험에 따라 최적 배합비를 도출한다. 3D 프린터 장비의 시제품 제작을 목표로 하며 1차 연도에 진행된 시제품 개발 연구결과를 바탕으로 세부 디

자인, 제작, FCP 시험 생산, 보완의 순서로 연구를 진행한다. 측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술은 1차 연도에 도출된 문제점을 보완하여 3D 프린터 장비를 제작한다. 이 후, 장비를 사용하여 FCP를 시험 생산한 후 발생하는 문제점을 보완하여 최종적으로 장비를 개발하고 FCP를 제작한다.

<표 2-1-1> 연구개발 추진일정

1차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	계 획수립 및 자료조사													1,150	이동훈 (한밭대 학교)
2	요구성능 분석													1,150	이동훈 (한밭대 학교)
3	개념디자인													1,150	이동훈 (한밭대 학교)
4	측면 거푸집 이동장치 개발													46,000	이동훈 (한밭대 학교)
5	형상 각도 조절 장치 개발													46,000	이동훈 (한밭대 학교)
6	1차 제작 및 테스트													5,750	이동훈 (한밭대 학교)
7	문제점 보완													1,150	이동훈 (한밭대 학교)
8	2차 수정 제작													1,150	이동훈 (한밭대 학교)
9	배합실험													11,500	이동훈 (한밭대 학교)
2차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	최적 배합비 도출													2,450	이동훈 (한밭대 학교)
2	세부 디자인 (상세 도면)													2,450	이동훈 (한밭대 학교)

3	3D 프린터 장비제작													220,500	이동훈 (한밭대 학교)
4	FCP 시험 생산													2,450	이동훈 (한밭대 학교)
5	문제점 보완													2,450	이동훈 (한밭대 학교)
6	최종 제작 및 테스트													14,700	이동훈 (한밭대 학교)

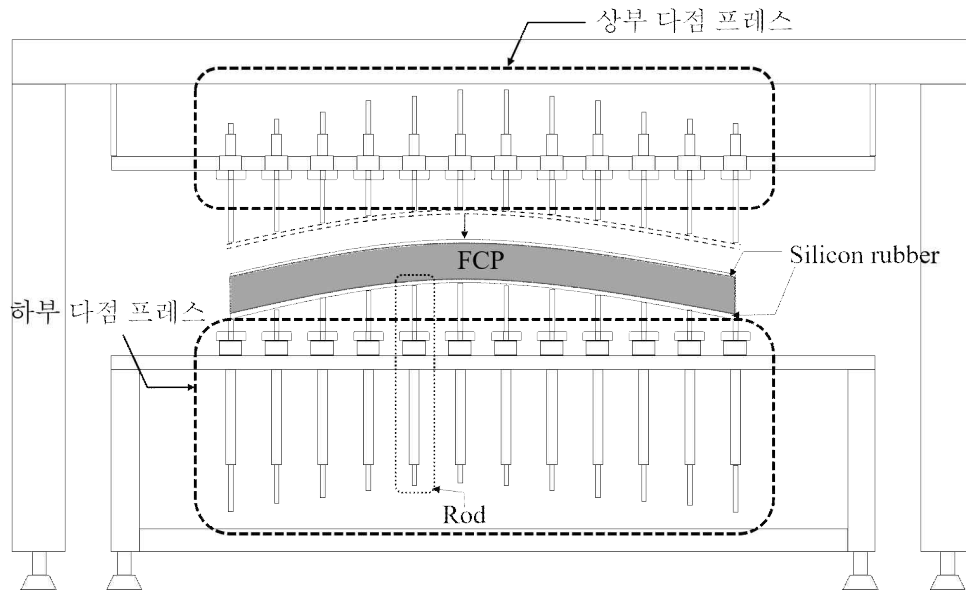
2. 연구 내용

가. 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’

(1) 개발개념

(가) 장비의 개념

- FCP는 상·하부면에 동일한 형태의 곡률을 갖기 때문에 상하부의 곡면을 구현할 수 있는 기술이 필요하다. 본 연구의 연구책임자가 개발한 기존의 CNC(Computer Numerical Control) machine은 하부면의 곡률을 형성하는 기술로 FCP를 생산하기에는 한계가 있다. 그러나 본 연구에서 개발한 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’는 하부 성형 기술인 CNC machine을 상부에도 적용한 양면 다점 프레스 기술로 FCP의 상·하부면의 곡률을 구현할 수 있다.
- 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’는 <그림 2-2-1>과 같이 하부 다점 프레스 장비와 상부 다점 프레스 장비로 구성된다. 각각의 다점 프레스 장비는 여러 개의 Rod와 이와 결합된 Silicon rubber로 구성된다.
- Rod는 컴퓨터 조작으로 상하이동이 가능하여 높낮이가 조절된다. 이때 Silicon rubber는 Rod와 결합되어 있어 Rod의 이동에 따라 높이차가 발생하여 곡률을 형성하는 거푸집으로 구현된다. 구현된 거푸집(Silicon rubber) 안에 콘크리트를 주입하여 FCP를 생산하는 방식이다.



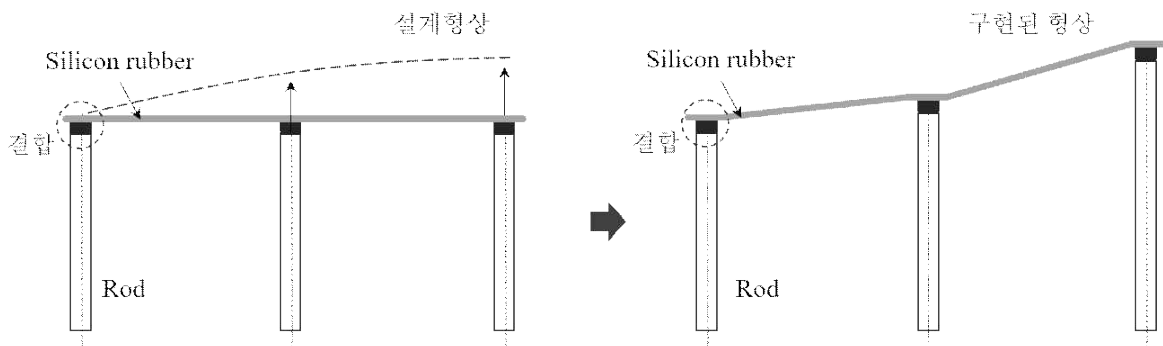
<그림 2-2-1> 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터' 개념도

(나) 요구성능 분석

- 모두 다른 형태를 갖는 FCP의 상·하부면의 곡률을 구현하는 것은 중요한 기술 중 하나이다. 이를 고려하여 FCP를 정확하게 제작하기 위한 기술 개발이 필요하다. 기술 개발을 위해 앞서 제시한 장비의 개념도를 토대로 기술 개발의 요구성능을 분석하였다.

① 정밀성

- 하나의 FCP를 제작할 때 상부면과 하부면의 곡률은 동일하다. 하부면의 곡률을 구현할 수 있는 기술은 개발되고 있으나 상·하부면의 곡률을 동시에 구현할 수 있는 기술이 없다. 따라서 본 장비는 하부면뿐만 아니라 상부면의 곡률을 구현할 수 있어야 한다.
- 상·하부면의 곡률을 구현할 수 있어도 정확하게 구현하는 것을 필요로 한다. <그림 2-2-2>와 같이 결합된 Rod와 Silicon rubber를 통해 FCP의 곡률을 구현할 때, Rod의 높이차에 의해 결합된 Rubber는 자연스러운 곡선을 표현할 수 없다. 이는 FCP를 정확하게 제작할 수 없으며 오차가 발생한다. 따라서 본 장비는 오차를 최소화하여 설계형상의 곡선을 정밀하게 표현할 수 있어야 한다.

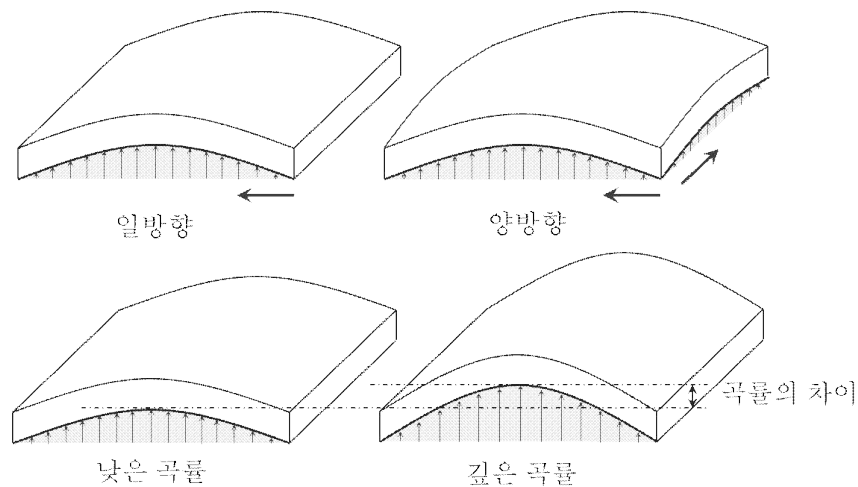


<그림 2-2-2> 곡률 구현의 한계

- Rod의 높이차로 곡률을 구현하기 위해 상·하부의 수많은 Rod가 움직인다. 그러나 기존 연구와 같이 Rod를 하나씩 상승시킬 경우 곡률 구현 시간이 증가하며 이는 FCP 제작시간을 증가시키게 된다. 또한, Rod는 Silicon rubber와 결합되어 있어 강한 Tension으로 인해 Rod의 움직임에서 미세한 오차가 발생할 수 있으며 Rod의 높이차로 인해 고장의 우려가 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 새로운 Rod 제어 기술이 필요하다.

② 다양성

- 건축물을 이루는 곡면에 따라 분할되는 FCP의 형상은 다양성을 갖는다. <그림 2-2-3>과 같이 평면상의 형태 이외에도 곡률을 이루는 방향에 따라 일방향, 양방향 패널로 구분된다. 또한, 곡률의 깊이에 따라 완만한 곡률이나 깊은 곡률 등 패널의 형상이 모두 다르다. 따라서 본 장비는 곡률의 종류에 따라 다양한 형상의 FCP를 정확하게 제작할 수 있어야 한다.



<그림 2-2-3> 곡률의 다양성

③ 성형성(마감성)

- 기존 기술에 따라 FCP를 제작하는 경우 콘크리트의 성형을 위해 인력이 투입된다. 그러나 본 장비는 자동제작의 목표에 따라 콘크리트의 자동성형이 필요하다. 패널의 형태에 따라 구현된 거푸집 안에 주입된 콘크리트가 일정하게 채워져야 하며 성형 후 상부면의 마감을 위해 미장, 양생법을 고려해야 한다.

(2) 개발상세

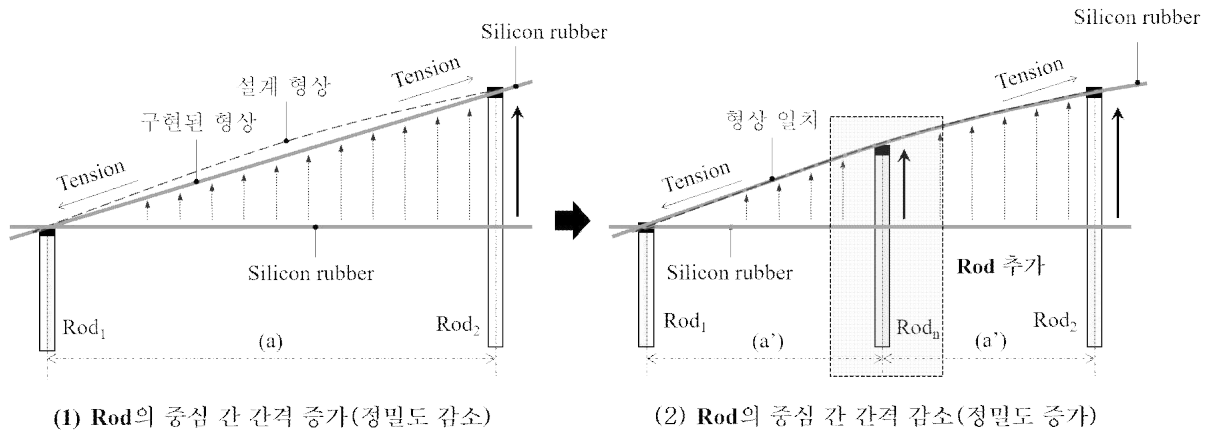
(가) 상하부 곡률 형성 기술

① 곡률 형성 기술

㉔ Rod 중심 간 간격

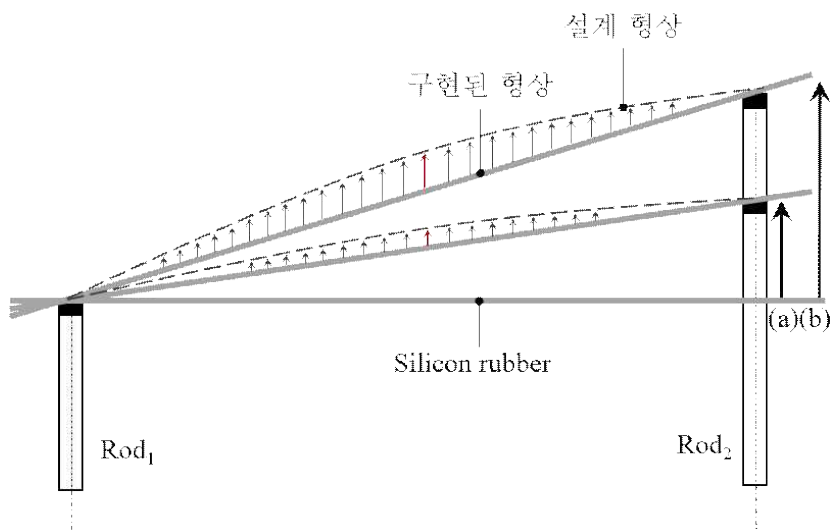
- 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’는 정밀한 형상 구현 능력이 요구된다. Rod는 Silicon rubber와 함께 결합되어 Rod의 움직임으로 FCP의 상·하부 곡면을 구현한다. 그러나 Silicon rubber는 강한 탄성으로 인해 Rod의 이동에 따라 늘어나면서 설계형상을 정확하게 구현할 수 없다. <그림 2-2-4>의 (1)과 같이 Rod가 상승하면서 Silicon rubber는 탄성으로 인해 직선으

로 구현되어 설계형상과의 오차가 발생한다. 이와 같이 구현된 형상에 콘크리트를 타설하면 정확한 형상의 FCP를 제작할 수 없다. 이를 해결하기 위해서는 <그림 2-2-4>의 (2)와 같이 Rod 간의 간격을 줄여야 한다. Rod₁과 Rod₂ 사이에 추가적으로 Rod를 배치할 경우 Silicon rubber로 구현된 형상은 설계형상과 일치하는 것을 확인할 수 있다.



<그림 2-2-4> Rod 중심 간 간격에 따른 형상의 정밀도

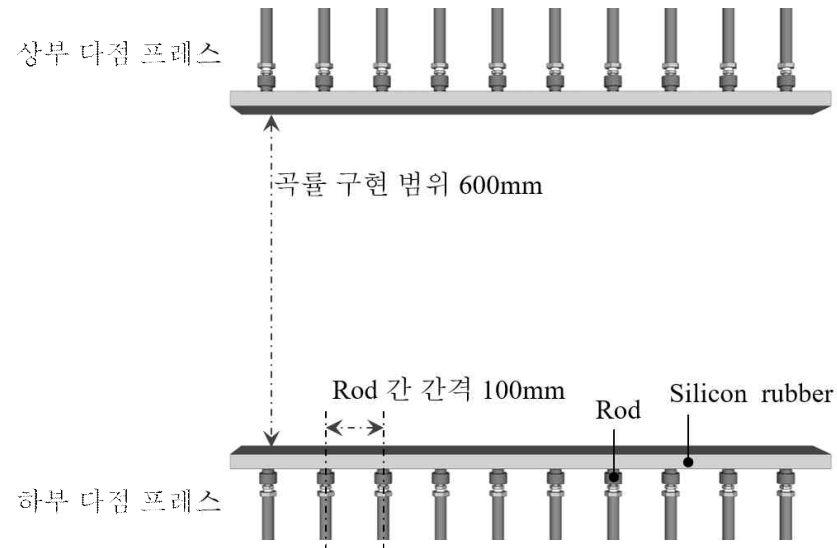
- Rod의 간격에 따라 정밀도가 증가하나 정확하게 일치하는 것은 불가능하다. 다만, 형상의 오차를 최소화하는 것은 가능하다. 그러나 Rod의 간격이 감소하여도 곡률의 크기에 따라 오차가 크게 나타날 수 있다. 예를 들어, <그림 2-2-5>와 같이 일정한 간격의 Rod를 사용하여 곡률을 구현할 때 작은 곡률(a)은 오차가 작지만 큰 곡률(b)은 오차가 더 많이 발생한다. 즉, 동일한 간격에서 Rod간의 높이차가 커질수록 오차가 커진다. 따라서 오차를 최소화하기 위해 구현할 수 있는 형상의 곡률 범위에 따라 Rod의 간격을 지정하는 것이 중요하다.



<그림 2-2-5> 곡률에 따른 오차 발생 크기

- 이를 고려하여 본 연구에서는 그림 <2-2-6>과 같이 오차를 최소화할 수 있는 FCP의 곡률

구현 범위를 600mm로 한정하였으며 Rod간 간격을 상부 150mm, 하부 100mm로 지정하였다.



<그림 2-2-6> 양면 다점 프레스의 Rod 간 간격 및 곡률 구현 범위

㉠ Rod의 Bearing

- Rod 간의 간격을 조절하여 설계형상과 구현형상 간의 오차를 최소화할 수 있다. 그러나 본 장비는 Rod와 Silicon rubber의 결합으로 인해 곡률 구현의 한계가 있다. Rod와 Rubber의 결합부가 서로 수직으로 되어 있어 Rod의 높이차로 곡률을 구현할 때, Rubber가 뒤틀리게 되면서 자연스러운 곡선이 구현되지 않는다. 이에 따라 보다 곡선에 가까운 형상을 구현하기 위해 <그림 2-2-7>과 같이 Rod의 끝부분에 Bearing을 적용하여 Rod가 회전할 수 있는 구조로 개발하였다. 곡률의 형태는 모든 방향에서 발생하기 때문에 Silicon rubber가 뒤틀리는 것을 방지하기 위해 360° 회전이 가능하도록 하였다.

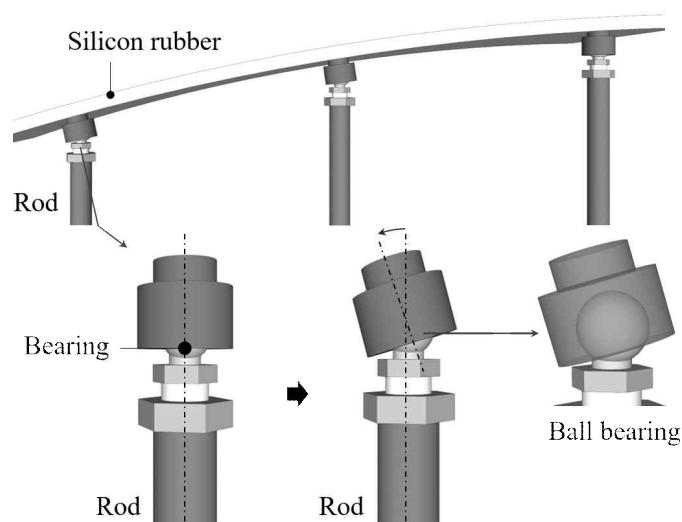
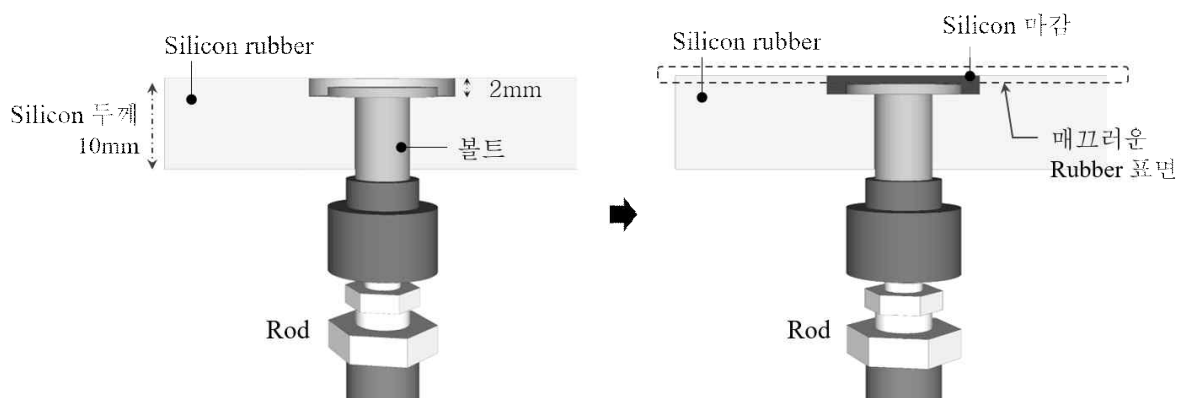


그림 <2-2-7> 로드 끝 Bearing 적용

㉔ Rod와 Silicon rubber의 결합

- 앞서 설명한 바와 같이 Rod와 Silicon rubber는 결합되어 상·하부의 곡률을 형성한다. Rod와 Silicon rubber 연결부의 결합방식은 기존 CNC 연구에서 적용한 것과 같이 볼트접합으로 고정한다. 이 방식은 Rod와 Rubber를 강하게 고정할 수 있으나 결합 시 볼트가 Rubber 위로 돌출되어 있는 경우 FCP를 제작할 때 정밀한 형상을 구현할 수 없다. 볼트가 돌출되지 않도록 결합하여도 볼트와 닿는 FCP 곡면을 매끄럽게 구현하는 것은 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 연구는 볼트접합과 Silicon 마감을 사용한다. <그림 2-2-8>과 같이 Silicon 두께 10mm 중 마감을 위해 2mm의 간격을 두고 볼트로 고정한다. 고정 후 남은 부분에 실리콘을 주입하여 마감한다. 이는 거푸집 역할을 하는 상·하부 Rubber의 표면을 매끄럽게 구현할 수 있다.

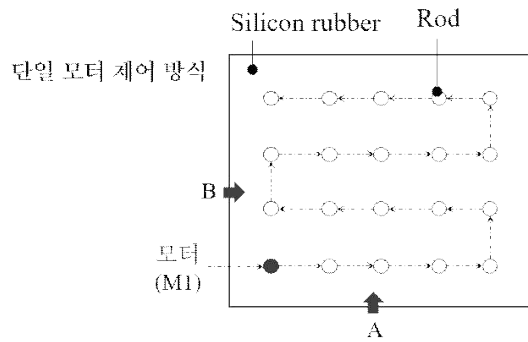


<그림 2-2-8> Rod와 Silicon rubber의 결합방식

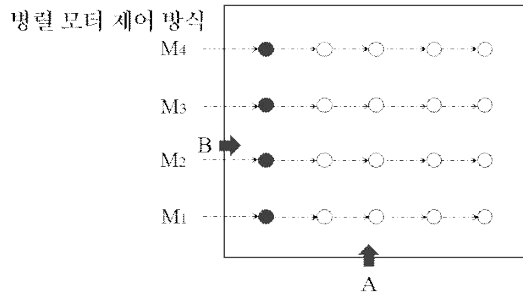
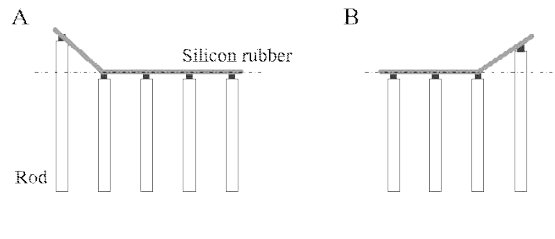
② Rod 제어 기술

㉕ Rod의 개별 제어

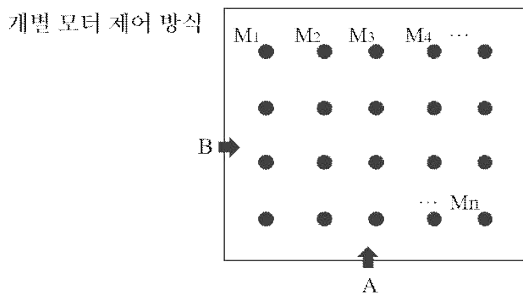
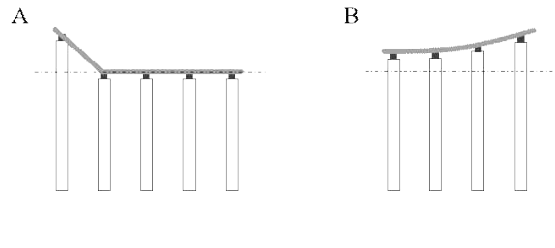
- 본 연구에서 양면 다점 프레스에 적용하는 Rod 제어 기술은 개별 모터 제어 방식이다. <그림 2-2-9>는 제어 방식에 따른 FCP 곡률 구현 시간과 정밀성을 나타낸 것이다. 단일 모터 제어 방식은 모터 1개가 각각의 Rod를 작동 시키는 것이다. 이러한 방식은 Rod를 하나씩 작동시키기 때문에 곡률 구현의 한계와 고장의 우려가 있다. 병렬 모터 제어 방식은 한 열에 1개의 모터가 배치되는 것으로 한 열마다 모터가 있어 동력을 전달하면서 순차적으로 Rod를 작동시키는 방식이다. 이 방식의 경우 B 방향은 동시에 매끄러운 곡률을 구현하나 A 방향에서는 단일 모터 제어 방식과 같이 곡률 구현의 한계가 있다. 개별 모터 제어 방식은 Rod마다 개별적으로 제어할 수 있는 모터가 있어 모든 Rod가 동시에 상승한다. 이 방식은 모든 방향에서 Rod가 동시에 상승하기 때문에 정밀한 곡률 구현과 고장의 우려가 없다. Rod의 상승시간을 10sec라고 가정하였을 때 단일 모터 제어 방식은 20개의 Rod가 각각 작동하므로 200sec, 병렬 모터 제어 방식은 한 열당 5개 또는 4개로 50sec 또는 40sec, 개별 제어 방식은 모든 Rod가 동시에 상승하므로 10s가 소요된다고 할 수 있다. 즉, 곡률 구현의 한계가 없으며 FCP 제작 시간을 단축시킬 수 있는 제어방식은 개별 모터 제어 방식이다.



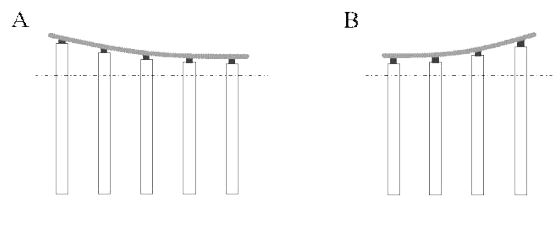
- 모터 1개 곡률 구현 시간: $10\text{sec} \times \text{Rod } 20\text{개} = 200\text{sec}$



- 모터 4개 곡률 구현 시간: $10\text{sec} \times \text{Rod} \text{ 열 } 4\text{개} = 40\text{sec}$



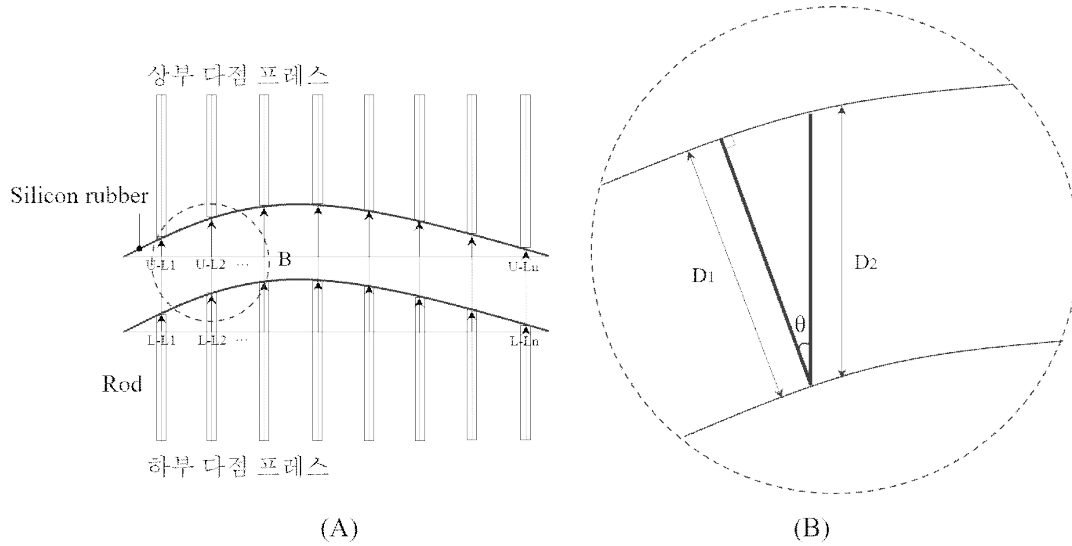
- 모터 20개 곡률 구현 시간: $10\text{sec} \times \text{개별 모터 } 1\text{개} = 10\text{sec}$



<그림 2-2-9> Rod 제어 방식

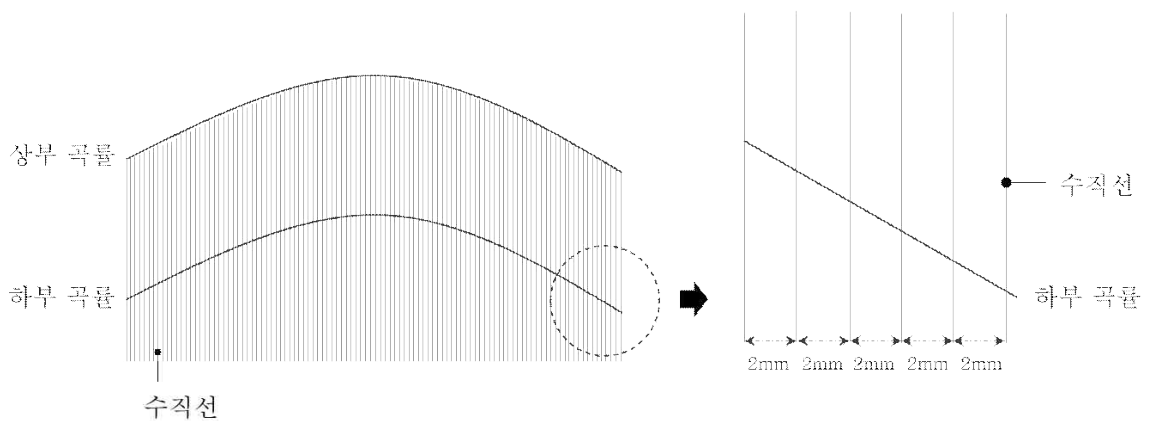
㉔ FCP 두께 유지

- 양면 다점 프레스로 FCP를 제작할 때 FCP의 두께는 상·하부 Rod의 움직임으로 구현된다. 상부 다점 프레스와 하부 다점 프레스의 Rod는 같은 방향으로 움직인다. 이와 같은 방법으로 제작되는 FCP의 두께는 <그림 2-2-10>의 D1과 같이 곡선의 접선과 수직인 지점을 기준으로 측정한다. 이 때 일정한 두께의 패널은 모든 구간의 D1 값이 동일해야 한다. 그러나 본 장비로 제작되는 패널의 두께는 상·하부 Rod 사이의 수직거리인 D2이다. 이는 D1과 D2 사이의 각도가 증가할수록 커진다.
- FCP는 비정형 건축물의 외부 디자인을 추출하여 각기 다른 형태의 FCP로 분할되어 제작되므로 형태가 매우 다양하다. FCP가 일정한 두께를 갖기 위한 Rod의 거리 값을 3D BIM 도면으로부터 추출하기 위해 데이터 수집이 필요하며 눕혀진 상태에서 제작되기 때문에 패널을 눕히는 각도에 따라 Rod의 거리 값이 변한다. 하부 Rod의 구동을 통해 FCP의 하부 거푸집이 구현되었을 경우 일정한 두께를 유지하기 위한 상부 Rod의 이동거리를 알기 어려워 거푸집(Silicon rubber)의 형태를 완벽히 구현할 수 없다. 따라서 정밀한 FCP 제작을 위해 패널의 형태에 따른 이동거리 데이터를 수집해야 한다.



<그림 2-2-10> FCP의 두께와 상·하부 Rod 간 거리의 차이

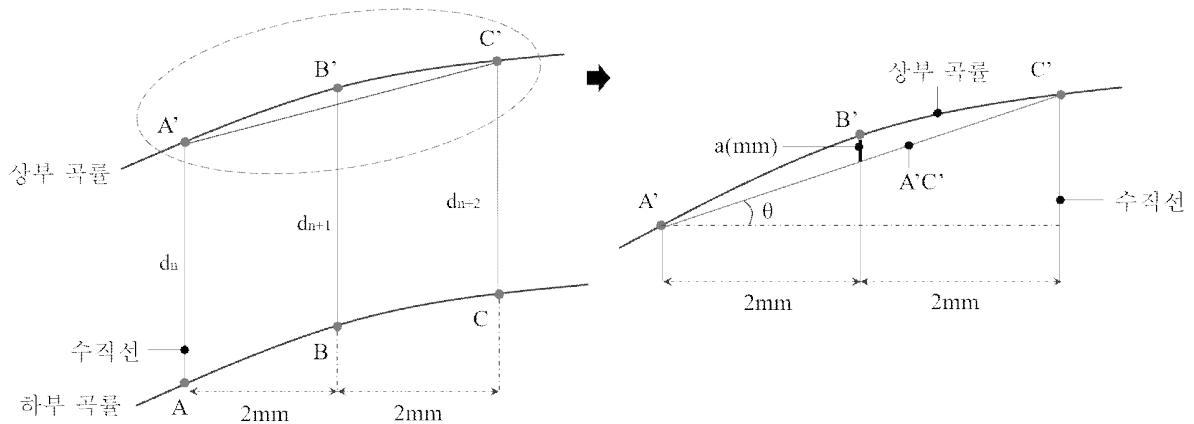
- Rod의 이동거리 데이터 수집방법은 다음과 같다. 다양한 곡률을 갖는 FCP의 설계형상을 통해 데이터 구간을 선정한다. 이 구간은 FCP의 곡률이 상승 및 하강하는 부분과 곡률의 각도가 '0'이 되는 구간을 포함한다. FCP의 곡률을 정밀하게 분석하기 위해 <그림 2-2-11>과 같이 패넬의 하부곡률에 따라 2mm 간격으로 수직선을 그어 데이터를 수집한다.



<그림 2-2-11> FCP의 곡률 분할

- 수집된 데이터를 측정하는 방법은 <그림 2-2-12>와 같다. 수직선과 하부곡률이 만나는 점은 A, B, C이며 수직선과 상부곡률이 만나는 지점은 A', B', C'이다. A와 A' 사이의 거리는 $d_n(\text{mm})$ 이며 B와 B' 사이의 거리는 $d_{n+1}(\text{mm})$ 이다. 같은 방식으로 C와 C' 사이의 거리는 $d_{n+2}(\text{mm})$ 이다. 또한 B'와 K 사이의 거리는 $a(\text{mm})$ 이며 A'C'선분과 점 A'에서 그은 수평선이 이루는 각도는 θ 이다. 구간별로 $a(\text{mm})$, $d(\text{mm})$, θ 값을 수집하며 $a(\text{mm})$ 와 θ 값의 변화에 따라 구간별 $d(\text{mm})$ 값의 변화량을 분석한다. 본 연구에서 개발하는 'FCP 제작용 3D 프린팅 장비'로 FCP의 형상을 구현하는데 있어서 곡률을 자동으로 유추하기 위해 데이터 수집이 필요하다. FCP의 하부면의 곡률을 우선적으로 구현하고 분석된 데이터를 통해 상부면의 곡률을

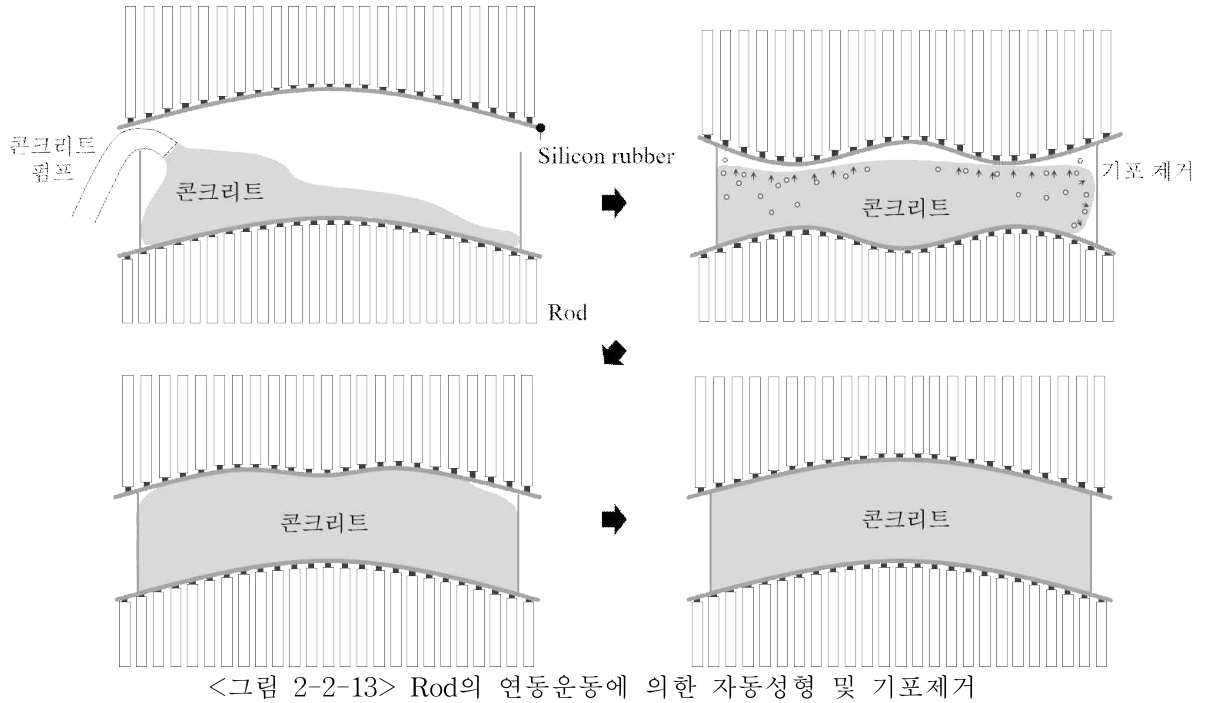
자동으로 유추할 수 있어야 한다.



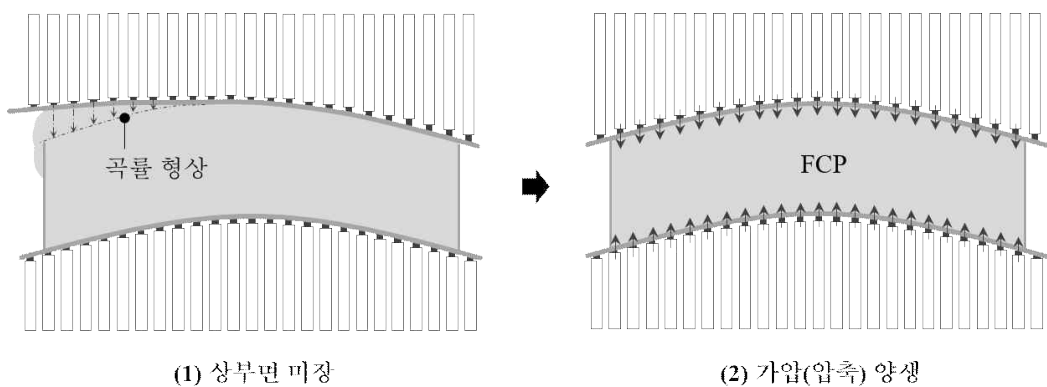
<그림 2-2-12> FCP의 곡률 분할

(나) 연동운동 기술

- 상·하부의 모든 Rod와 Silicon rubber로 구현된 거푸집에 콘크리트를 주입한다. 주입한 콘크리트는 사람의 미장 없이 정확한 형상의 FCP로 구현되어야 한다. 콘크리트의 원활한 시공을 위해 타설 중에도 완전한 형태가 되도록 끊임없이 믹싱한다. 또한, 모서리나 좁은 공간 등 콘크리트가 채워지기 어려운 부분이 있는 경우 진동, 충격을 가하면서 채워지도록 한다. FCP의 제작에서도 주입된 콘크리트가 완전한 형상을 나타내기 전까지 콘크리트의 지속적인 움직임과 성형이 필요하다. 본 연구에서 적용한 개별 모터 제어 방식은 Rod의 자유로운 움직임으로 정밀한 형상구현 뿐만 아니라 거푸집 내 주입된 콘크리트의 성형을 위한 연동운동이 가능하다.
- <그림 2-2-13>과 같이 본 장비로 구현된 거푸집에 콘크리트를 주입한다. 주입되는 콘크리트가 빈 공간에 채워지도록 상·하부에 있는 Rod를 반복적으로 움직인다. 상부 Rod가 내려오면 하부 Rod가 올라가고 반대로 상부 Rod가 올라가면 하부 Rod가 내려가 콘크리트를 빈 공간으로 이동시킨다. 즉, Rod의 연동운동으로 콘크리트가 거푸집 내부에 모두 채워지면서 정확한 형상을 구현한다. 또한, 연동운동을 통해 Rod의 움직임으로 콘크리트 또는 모르타르 속에 있는 기포를 제거할 수 있다.

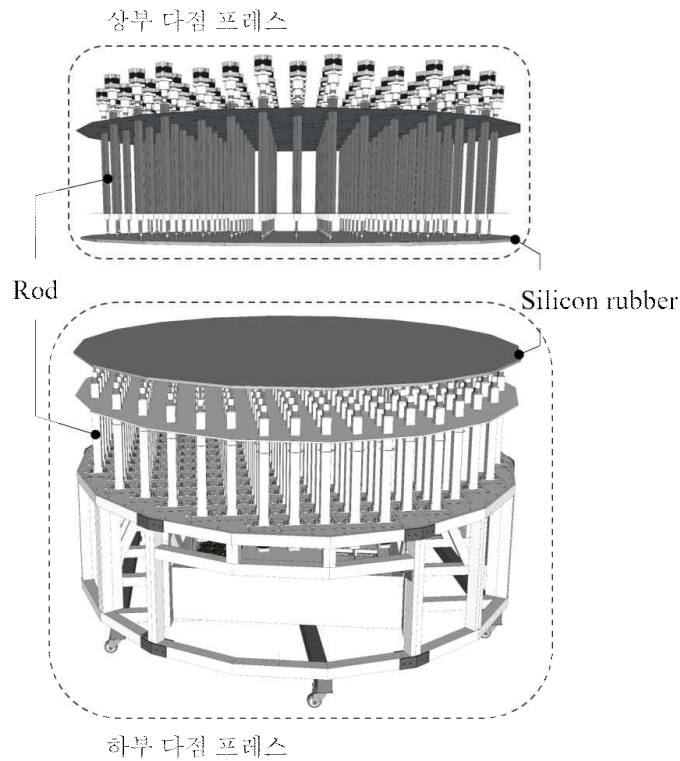


○ FCP의 하부면은 중력으로 인해 콘크리트가 안정적으로 채워지며 거푸집에 의해 매끄러운 곡면이 형성된다. 그러나 상부면의 경우 마감을 하지 않으면 표면이 부풀거나 일정하지 않은 형태로 인해 매끄러운 곡면을 구현할 수 없다. 또한, 패널의 상부면이 곡률이 없는 평면으로 구현될 수 있다. 본 장비의 상부 다점 프레스 장비는 Rod의 개별적인 움직임으로 상부면을 마감한다. Rod의 연동운동에 의해 콘크리트를 자동성형한 후, <그림 2-2-14>와 같이 상부 Rod는 곡률 형상에 따라 상부면을 미장한다. 마지막으로 완전한 형상이 제작된 콘크리트를 양생시키기 위해 각 Rod의 압축할 수 있는 적정 이동값을 입력하여 가압 양생한다.



<그림 2-2-14> 상부 곡면 미장 및 가압 양생

○ 전술한 기술들을 적용하여 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터'를 개발하였으며 상세도는 <그림 2-2-15>와 같다. 본 장비의 구성은 <그림 2-2-47>에서 설명한다.

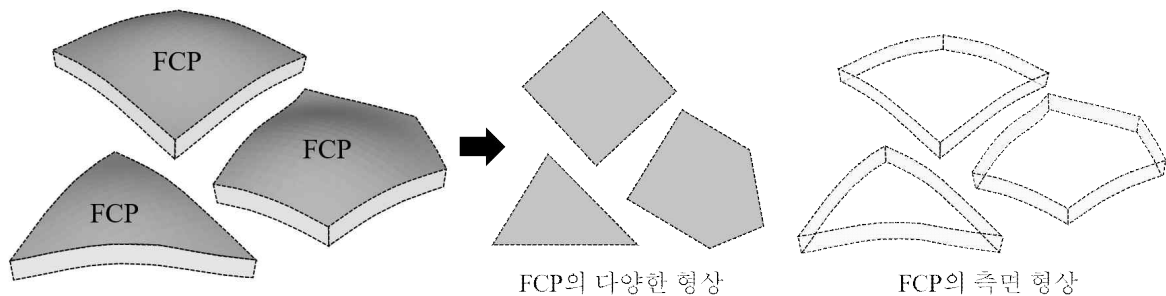


<그림 2-2-15> 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터' 상세도

나. 측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술

(1) 개발개념

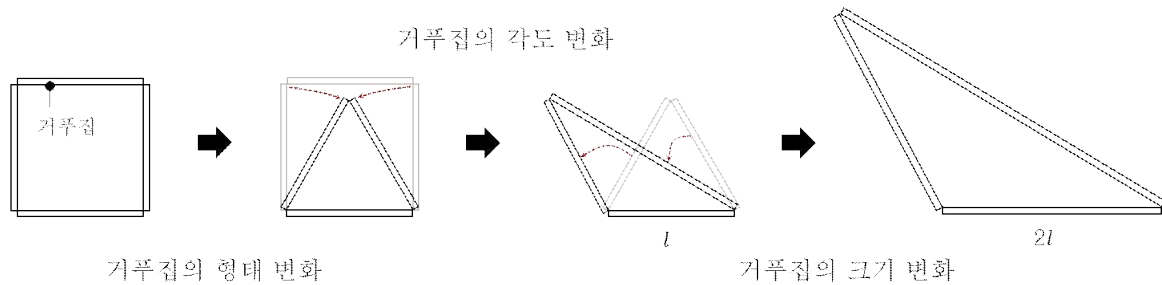
- <그림 2-2-16>과 같이 FCP(Free-form Concrete Panel)는 삼각형, 사각형, 다각형 등의 다양한 형상과 곡선 형태의 측면 형상을 갖는다. 본 연구에서 개발한 측면형상 제어기술은 FCP의 다양한 형상과 측면 형상을 구현할 수 있는 기술이며 본 기술은 측면형상 제어장비와 가변형 측면 거푸집으로 구성된다. 본 연구에서는 측면형상 제어기술 개발을 위해 각각의 요구성능을 도출하였으며 장비의 개념은 다음과 같다.



<그림 2-2-16> FCP의 형상의 특징

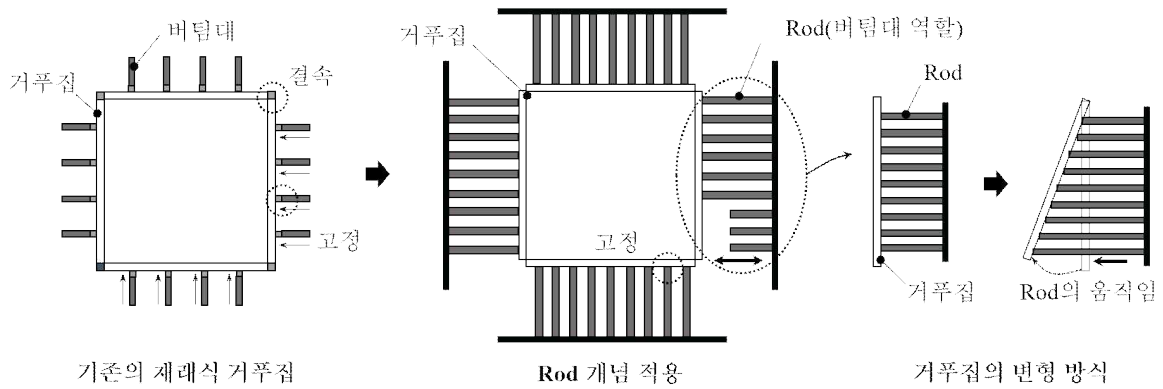
(가) 측면형상 제어장비의 요구성능 및 개념

- 측면형상 제어장비 개발을 위한 요구성능은 <그림 2-2-17>과 같다. 측면형상 제어장비는 거푸집의 형태를 변화시킬 수 있어야 한다. 이 외에도 측면형상 제어장비는 여러 형태의 패널을 제작하기 위해 거푸집의 변형이 가능해야 한다. 같은 다각형의 패널이지만 각도에 따라 패널의 형태가 다를 수 있다. 삼각형은 이루는 각도에 따라 정삼각형, 예각 삼각형, 둔각 삼각형으로 나뉘어진다. 이는 같은 삼각형이지만 각도가 모두 다르기 때문에 패널의 형태가 같지 않다. 따라서 측면형상 제어장비는 거푸집의 각도 변화가 가능해야 한다. 또한, 곡면을 표현하기 위해 사용되는 FCP는 건축물 또는 곡면을 구현하는 위치마다 요구되는 크기가 다를 수 있다. 따라서 FCP의 형태와 각도가 동일하더라도 크기 변화를 고려하여 구현할 수 있어야 한다. 이에 본 연구에서는 FCP의 형태, 각도, 크기에 따라 유연하게 거푸집을 변화시킬 수 있는 측면형상 제어장비를 개발하였다.



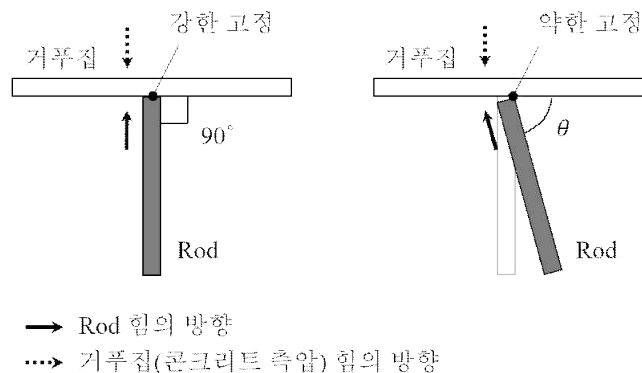
<그림 2-2-17> FCP 거푸집의 형태, 각도, 크기 변화(요구성능)

- <그림 2-2-18>과 같이 기존의 재래식 방식은 제작하기 위한 패널의 형태에 맞춰 거푸집을 형성하고 이를 틀어지지 않도록 결속하여 버팀대로 고정시키며 단순히 거푸집을 고정시켜 움직이지 않도록 한다. 그러나 이러한 방식은 버팀대의 유동적인 움직임이 없기 때문에 다양한 형태의 거푸집을 구현할 수 없다. 또한, FCP를 생산하는 경우 각각의 FCP 형상에 따라 매번 다른 형태의 거푸집을 제작해야 하며 이를 재사용할 수 없다. 이는 많은 인력투입을 필요로 하며 다량의 건설폐기물을 발생시키는 요인이다. 따라서 거푸집의 자유로운 변형과 재사용을 위해서는 버팀대의 움직임이 필요하다.
- 본 연구에서는 이러한 움직임을 구현하기 위한 기술적·기계적인 요소로 측면 Rod를 적용하였다. 측면 Rod는 거푸집을 고정시키는 버팀대의 역할을 하며 다수의 측면 Rod들은 움직임을 통해 거푸집의 형태를 다양하게 구현한다. 이를 통해 다양한 형태의 FCP 거푸집을 제작할 수 있다.



<그림 2-2-18> Rod 개념 적용

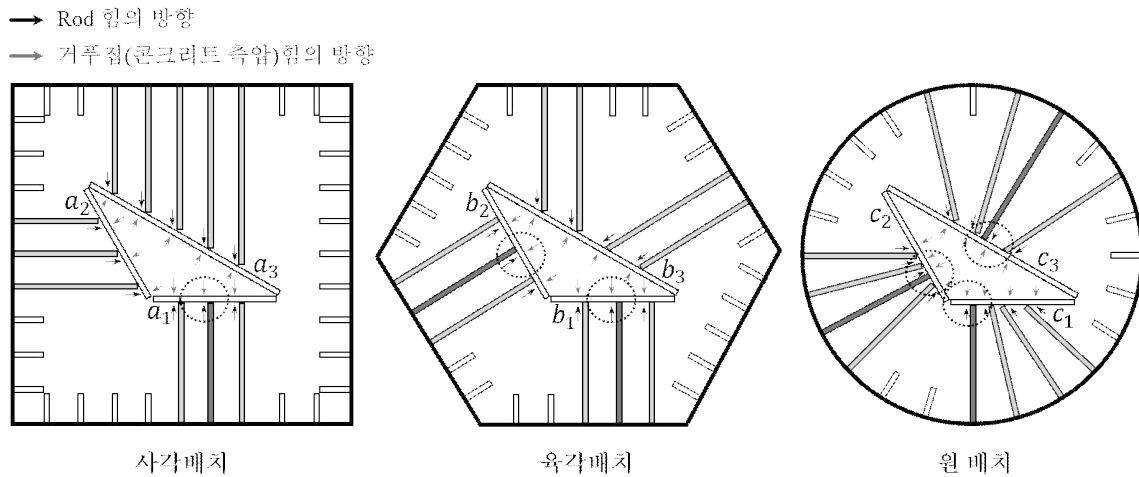
- Rod의 개념을 적용할 경우 측면 Rod의 배치는 장비 개발의 중요한 요구성능 중 하나이다. 측면 Rod는 움직임을 통해 거푸집을 변형시킨다. 이때 측면 Rod와 거푸집이 이루는 각도에 따라 측압에 대응하는 힘이 변화하며 측면 Rod와 거푸집의 강한 고정을 방해한다. <그림 2-2-19>와 같이 측면 Rod와 거푸집이 이루는 각도가 90° 인 경우 힘의 방향이 수평으로 작용하여 측면 Rod가 거푸집을 강하게 고정시킨다. 그러나 측면 Rod와 거푸집이 이루는 각도가 90° 에서 멀어질수록 측면 Rod가 측압에 대응하는 힘이 감소하여 거푸집을 고정하는 힘이 작아진다. 따라서 패널의 형태에 따라 거푸집을 어느 위치에서도 정확하게 고정시킬 수 있는 측면 Rod의 적절한 배치가 필요하다.



<그림 2-2-19> Rod와 거푸집의 각도에 따른 힘의 작용

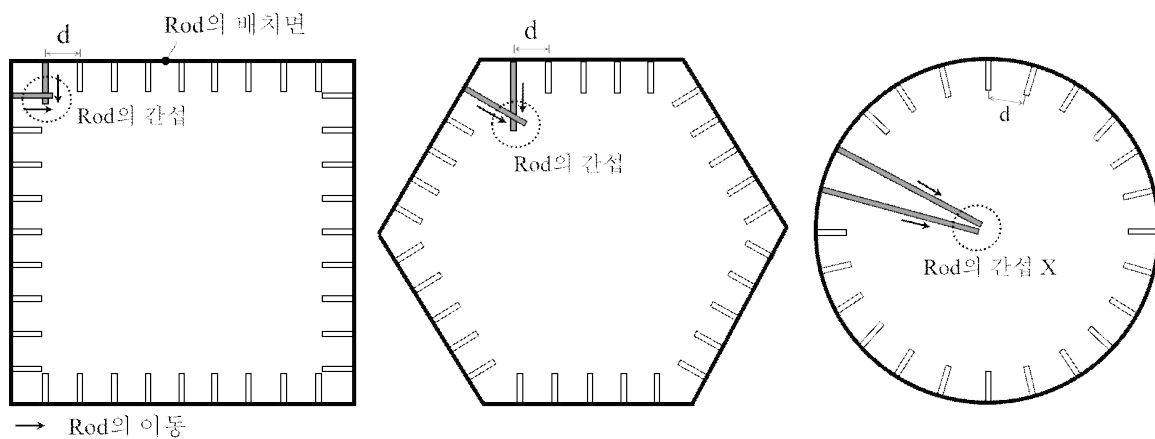
- 거푸집을 고정시키기 위해서는 Rod의 힘의 방향과 거푸집의 힘의 방향이 수평으로 작용해야 한다. 예를 들어, <그림 2-2-20>과 같이 FCP를 삼각형으로 제작하는 경우 Rod는 삼각형 거푸집의 세 면을 고정해야 한다. 여러 개의 Rod는 각각의 거푸집을 고정시키며 강한 고정을 위해 최소 한 개 이상의 Rod가 거푸집과 수직으로 고정되어야 한다. 이를 고려하여 Rod의 배치 형식을 선정하기 위해 Rod를 사각, 육각, 원으로 배치하였다.
- 사각 배치의 경우 거푸집을 수직으로 고정시키는 Rod는 세 개이다. 그러나 a_2 와 a_3 은 거푸집을 수직으로 고정시키는 Rod가 없다. 육각 배치는 b_1 과 b_2 를 수직으로 고정시키는 Rod가 한 개 이상 존재하지만 b_3 을 수직으로 고정시키는 Rod가 없다. 원의 배치는 c_1 , c_2 , c_3 을 수

직으로 고정시키는 Rod가 최소 한 개씩 존재한다. 이는 Rod가 거푸집을 견고하게 고정시키며 콘크리트의 측압에 의한 뒤틀림 현상을 방지할 수 있다. 따라서 Rod를 원형으로 배치하는 것이 본 장비에 가장 적합한 배치이다.

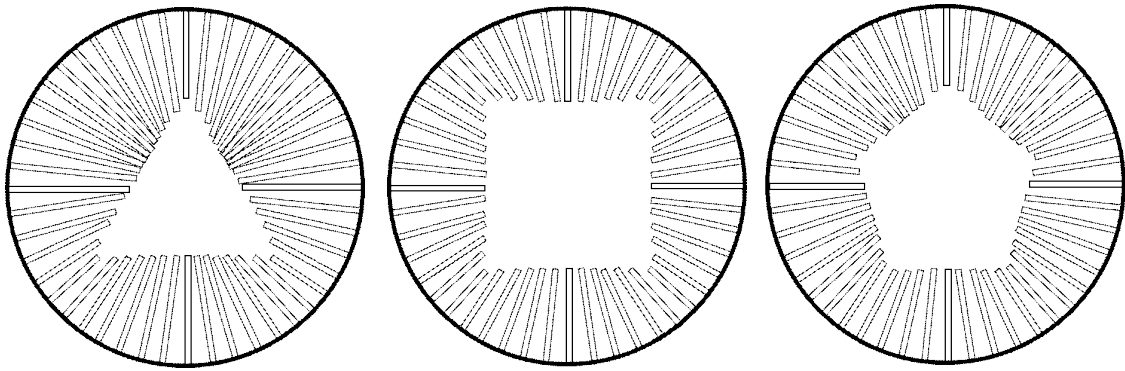


<그림 2-2-20> Rod와 거푸집의 힘의 방향

- Rod의 원형 배치는 Rod의 간섭이 없다. <그림 2-2-21>과 같이 배치 형식마다 배치면이 이루는 각도에 의해 Rod의 간섭이 발생한다. Rod를 배치면에 동일한 간격(d)로 배치하고 배치면이 접한 부분에 이웃한 Rod를 이동시킬 때 Rod의 간섭을 확인할 수 있다. 사각 배치와 육각 배치는 배치면이 이루는 각도로 인해 적은 Rod의 이동에도 Rod의 간섭이 발생한다. 그러나 원형 배치는 배치면이 이루는 각이 존재하지 않으며 Rod의 이동으로 인한 간섭이 발생하지 않는다. 따라서 Rod의 원형 배치는 본 장비에 가장 적합한 배치 형식이다.

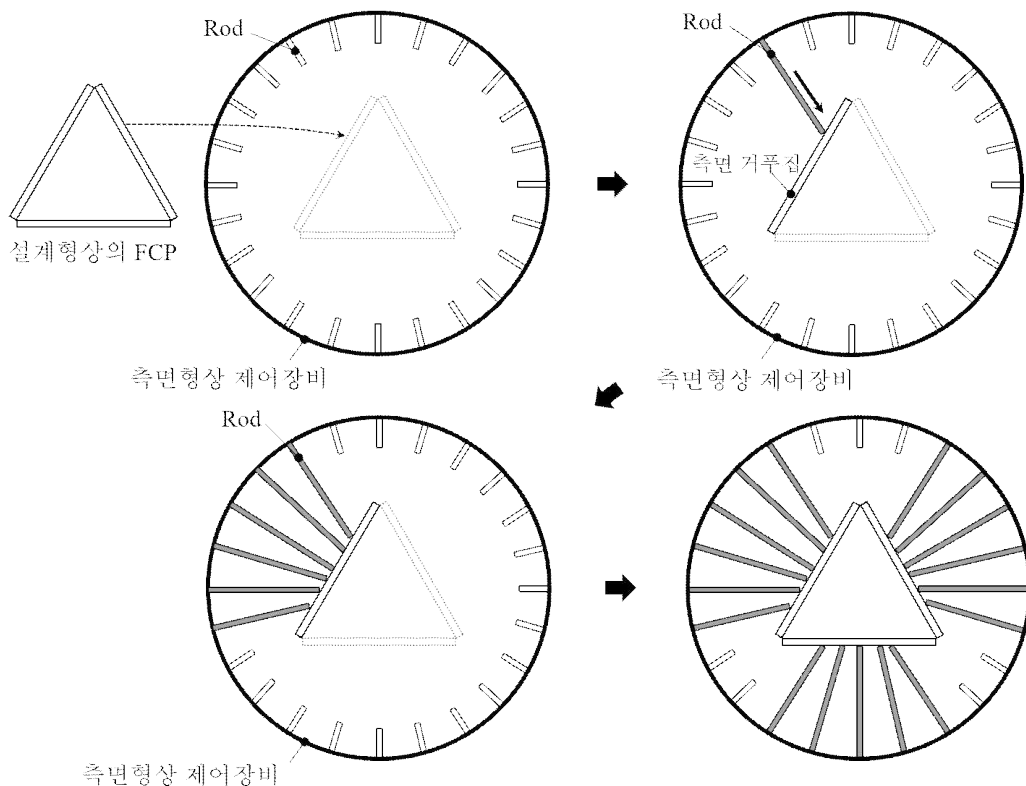


<그림 2-2-21> Rod의 간섭

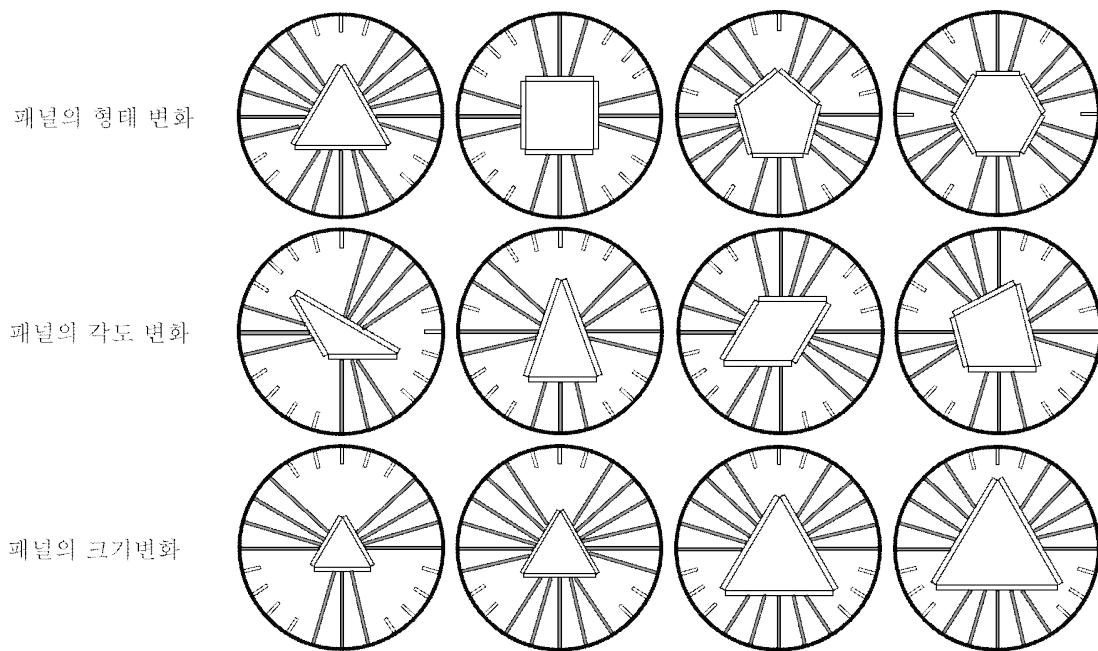


<그림 2-2-22> 원형배치의 형상구현

- 원형으로 배치된 Rod는 <그림 2-2-22>와 같이 자동적인 Rod의 이동만으로 다양한 형태를 구현할 수 있기 때문에 거푸집의 재사용을 가능하게 한다. 원형배치 형식의 측면형상 제어장비는 <그림 2-2-23>과 같은 과정을 통해 FCP의 형상을 구현한다. 제작하기 위한 FCP의 설계형상을 측면형상 제어장비에 입력한다. 입력된 설계형상을 고정할 수 있는 Rod의 이동거리를 확인하여 이동시킨다. 이를 반복하여 설계형상의 모든 거푸집을 고정하기 위한 Rod를 모두 이동시킨다. 이는 거푸집의 형태 변화가 가능하며 각도, 크기 변화가 가능하다. 따라서 FCP의 모든 요구사항을 만족하며 <그림 2-2-24>와 같이 다양한 FCP를 제작할 수 있다.



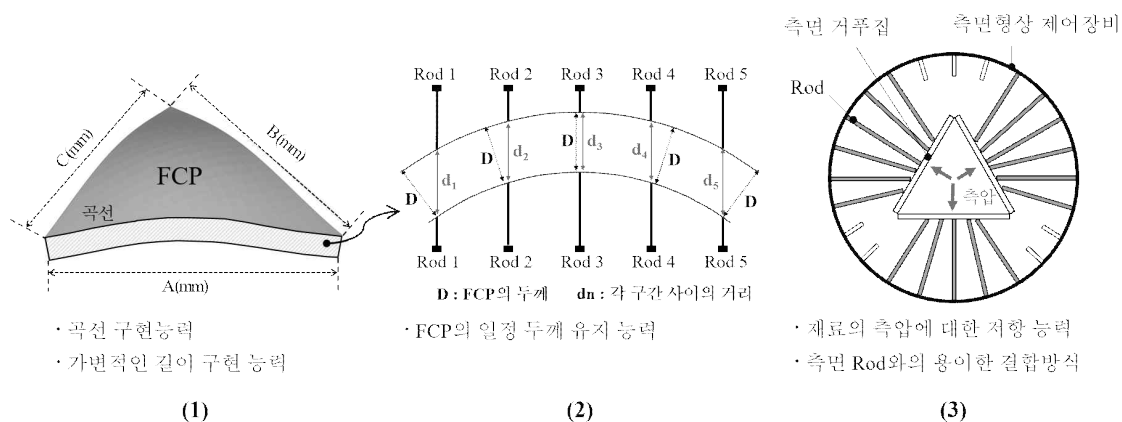
<그림 2-2-23> 측면형상 제어장비의 개념



<그림 2-2-24> 다양한 FCP 제작 가능성

(나) 가변형 측면 거푸집의 요구성능 및 개념

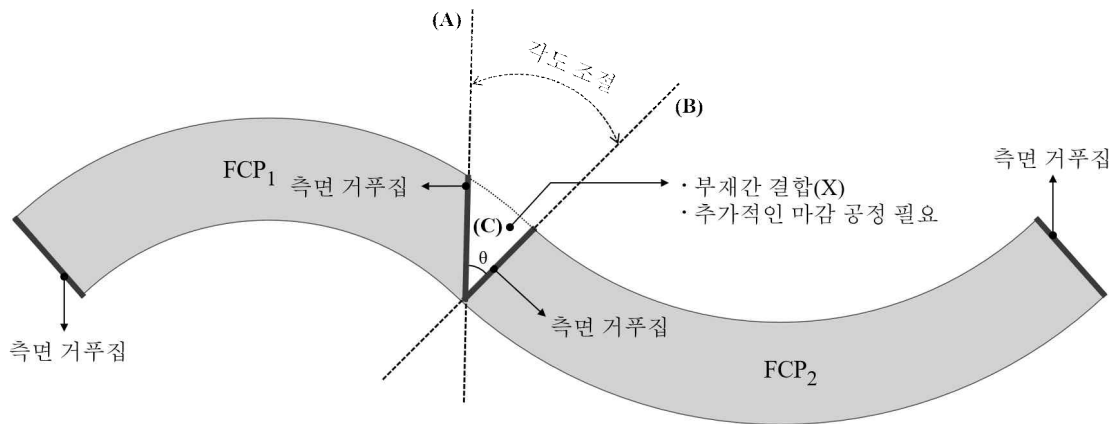
- 가변형 측면 거푸집은 측면형상 제어장비의 측면 Rod와 결합되며 최종적으로 재료의 타설면이 되어 FCP의 측면 형상을 구현하는 핵심적인 요소이다. 본 연구에서는 이러한 가변형 측면 거푸집을 개발하기 위해 요구성능을 도출하였으며 가변형 측면 거푸집의 개념은 다음과 같다.
- <그림 2-2-25>의 (1)과 같이 FCP는 각 측면 길이가 모두 다르며 측면 형상은 곡선으로 이루어져 있다. 또한, 변의 길이와 곡선은 각각의 FCP마다 모두 다르게 나타나며 이를 하나의 거푸집으로 모두 구현할 수 있어야 한다. 따라서 측면 거푸집의 길이는 FCP의 측면 길이에 따라 가변적이어야 하며 자유롭게 곡선을 구현할 수 있어야 한다.
- <그림 2-2-25>의 (2)와 같이 측면 거푸집은 우수한 품질의 FCP를 생산하기 위해 FCP의 일정한 두께를 구현할 수 있어야 한다. FCP는 구간별로 일정한 두께(D)를 가지며 상·하부 Rod는 일정한 두께(D) 확보를 위해 적정 d_n 값을 구현한다. 또한, 측면 거푸집은 그림 (2)와 같은 FCP의 측면 형상을 동일하게 구현할 수 있어야 하며 이를 위해 구간별 일정한 두께(D)를 유지할 수 있어야 한다.
- <그림 2-2-25>의 (3)과 같이 가변형 측면 거푸집은 모르타르 또는 콘크리트와 같은 재료의 측압에 저항할 수 있어야 한다. 따라서 가변형 측면 거푸집은 측압에 저항할 수 있도록 충분한 강성이 필요하다. 또한, FCP의 형상 구현 시 효율적인 장비 운영을 위해 가변형 측면 거푸집과 측면 Rod는 쉽게 결합될 수 있어야 한다.



○ 본 연구에서는 앞서 기술한 가변형 측면 거푸집의 요구성능을 바탕으로 기초적인 거푸집의 개념을 디자인하였으며 이는 <그림 2-2-26>과 같다. 설계형상의 FCP 측면 곡률은 완전한 곡선의 형태이므로 이를 자유롭게 구현하는 것은 거의 불가능하다. 완전한 형태에 가까운 곡선을 구현하기 위해서는 직선과 직선의 결합으로 구현되어야 하며 이때 직선의 길이가 짧아질수록 구현되는 곡선의 정밀도는 매우 높다. 따라서 본 연구에서는 <그림 2-2-26>의 (2)와 같이 형상판(A)의 연속적인 결합을 통해 설계형상의 측면 곡률을 구현할 수 있는 거푸집을 개발하였다.

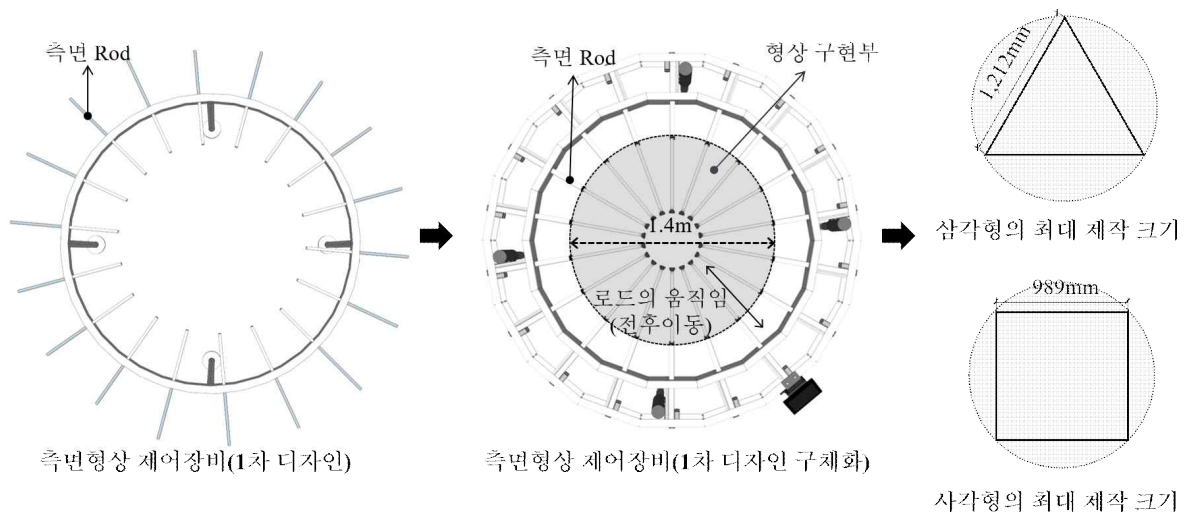
<그림 2-2-26> 가변형 측면 거푸집의 개념

(2) 개발상세



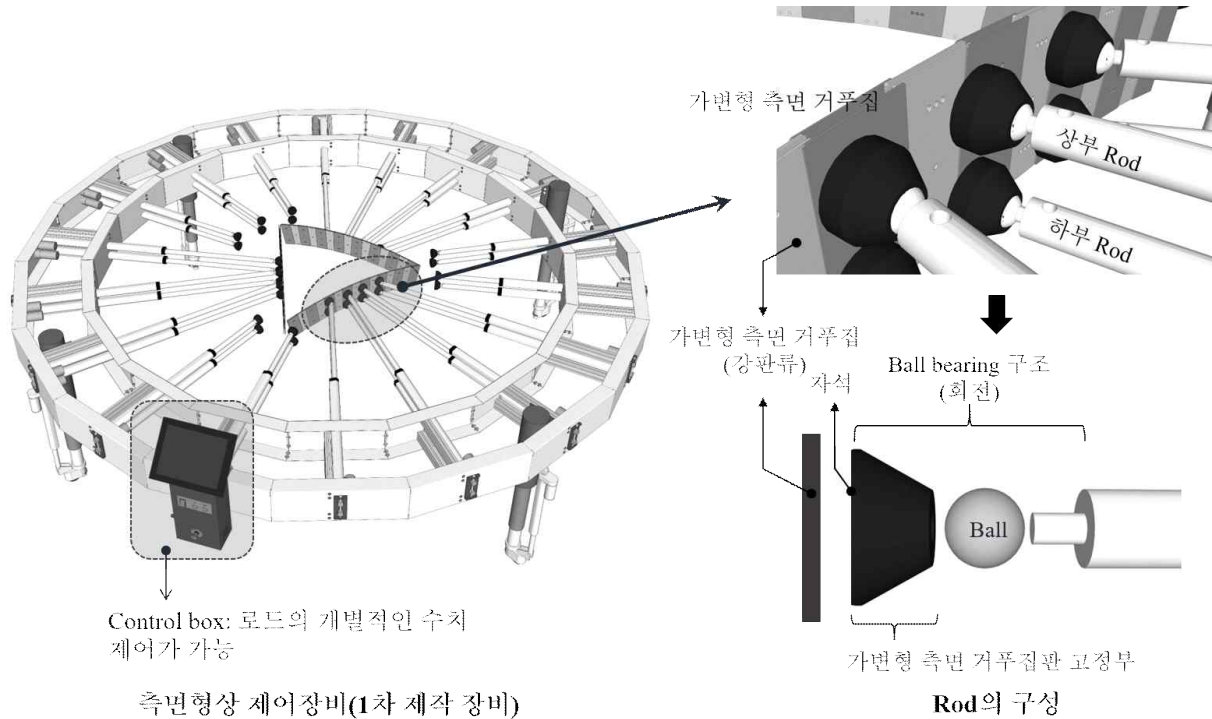
<그림 2-2-27> FCP 측면 각도 조절의 필요성

- 본 연구에서는 FCP 측면각도 조절하기 위해 <그림 2-2-28>과 같이 측면형상 제어장비의 1차 디자인을 구체화하여 이를 개발하였다. 구체화한 측면형상 제어장비는 측면 Rod가 총 18개소에 배치되어 있다. 또한, 거푸집면을 수직으로 고정하는 Rod가 최소 1개 이상 필요한 것을 고려하였을 때 삼각형 FCP의 최대 제작 크기는 한 면의 길이가 1,212mm이며, 최소 제작 크기는 한 면의 길이가 691mm로, 삼각형 FCP의 제작범위는 691~1,212mm이다. 사각형 FCP의 경우 최대 제작 크기는 한 면의 길이가 989mm이며, 최소 제작 크기는 한 면의 길이가 400mm로 사각형 FCP의 제작범위는 400~989mm이다.



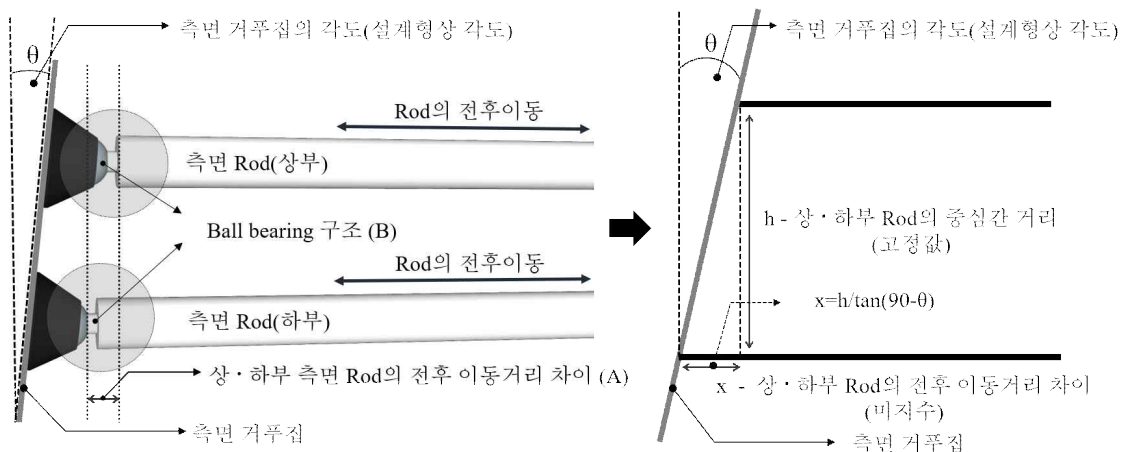
<그림 2-2-28> 측면형상 제어장비(1차 제작 장비)의 규격 및 FCP 제작 크기

- 본 연구에서 FCP 측면각도를 조절하기 위해 구체화한 개발사항은 ‘측면 Rod의 구성’,과 ‘측면 Rod의 상·하부 배치’이며 내용은 다음과 같다. <그림 2-2-29>와 같이 측면 Rod는 한 개소당 상·하부로 배치되어있으며 총 36개의 측면 Rod로 구성하였다. 또한, 측면 Rod는 Ball bearing 구조이며 고정부에는 자석이 부착되어 있어 강판류인 가변형 측면 거푸집과 결합된다.



<그림 2-2-29> 측면형상 제어장비의 구성

- <그림 2-2-30>의 (1)과 같이 측면 Rod와 측면 거푸집이 결합 시 Ball bearing 구조(B)를 통해 Rod의 고정부가 회전하여 설계형상의 측면 거푸집의 각도를 조절할 수 있다. 상부의 측면 Rod와 하부의 측면 Rod는 설계형상의 측면 거푸집 각도(θ)를 구현하기 위해 (A)와 같은 전후 이동거리의 차이를 발생시킨다. 이때 발생하는 거리 차이(A)는 <그림 2-2-30>의 (2)와 같이 식 $x=h/\tan(90-\theta)$ 로 산출되며 고정값(h, θ)를 통해 x를 도출할 수 있다. 이러한 데이터를 통해 측면 Rod를 정확한 위치로 이동시킬 수 있다. 본 연구에서는 <그림 2-2-29>와 같이 측면 Rod를 상·하부로 구성하여 FCP의 측면 각도를 조절하는 기술을 개발하였다.



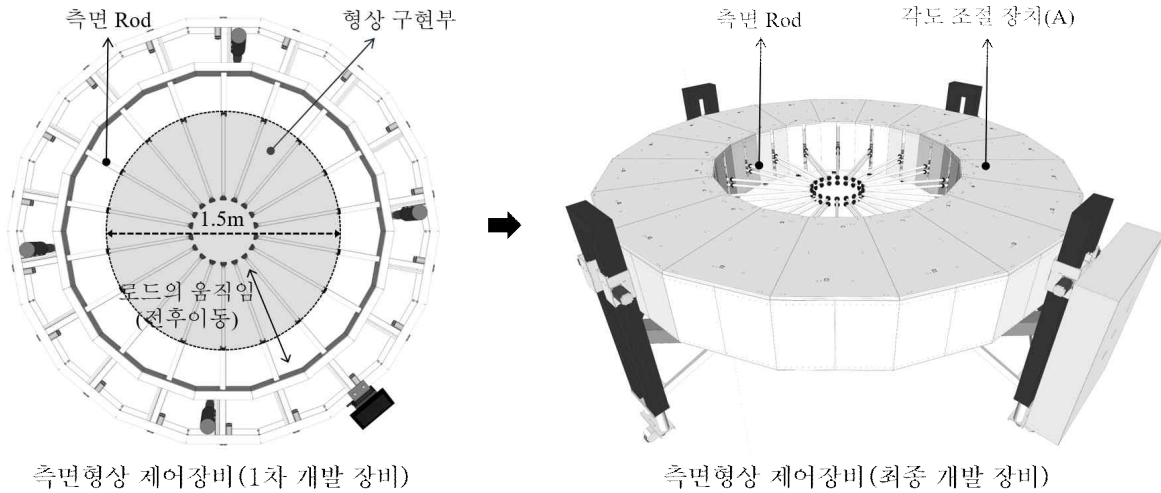
(1) 측면 Rod(상·하부)를 통한 각도 조절 방식

(2) Rod의 이동거리 값 산출 방식

<그림 2-2-30> 측면 Rod(상·하부)를 통한 FCP의 측면 각도 조절 개념

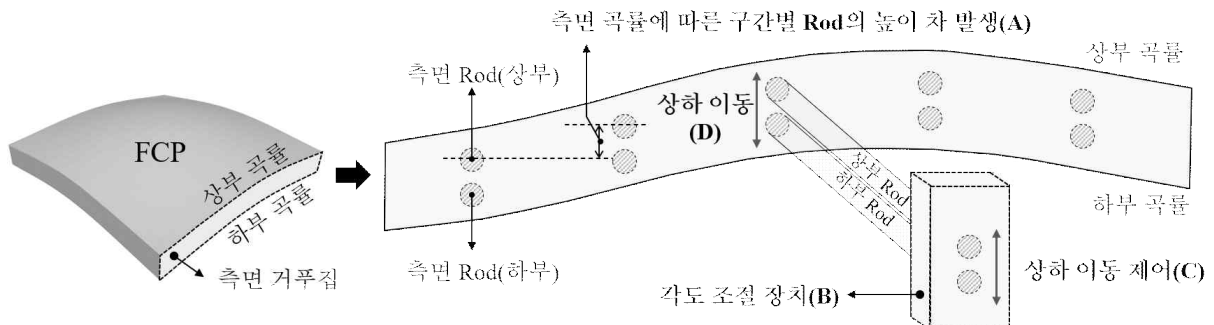
(나) 측면 거푸집지지 및 고정 기술

- 본 연구에서 개발하는 측면형상 제어장비는 측면 거푸집을 지지 및 고정할 수 있는 능력이 요구된다. 이를 고려하여 본 연구에서는<그림 2-2-31>과 같이 1차 개발 장비의 디자인을 수정하여 측면형상 제어장비를 최종 개발하였다. 최종 개발한 측면형상 제어장비는 1차 개발 장비와는 다르게 가변형 측면 거푸집을 안정적으로 지지하기 위한 각도 조절 장치(A)로 구성되어 있으며 그 내용은 다음과 같다.



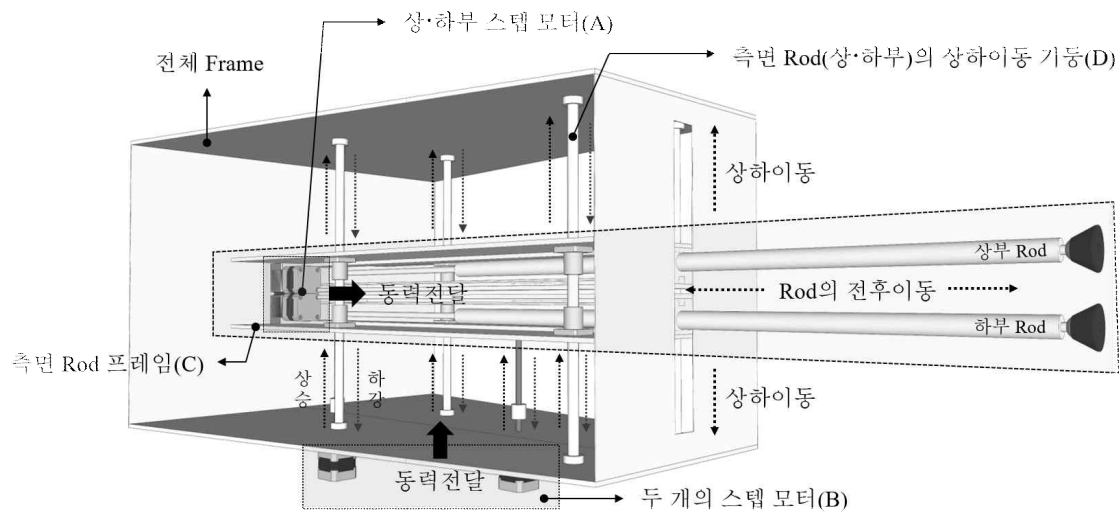
<그림 2-2-31> 측면형상 제어장비의 1차 개발과 최종 개발 비교

- <그림 2-2-32>와 같이 측면 거푸집은 FCP 측면 형상의 상·하부 곡률과 동일하게 구현된다. 이에 측면 Rod(상·하부)와 측면 거푸집 결합 시 안정적인 지지를 위해 (A)와 같은 구간별 Rod의 높이 차이가 발생한다. 따라서 측면 Rod(상·하부)는 측면 거푸집을 안정적으로 지지하기 위해 측면 거푸집의 곡률에 따라 상하로 이동할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 (C)와 같은 측면 Rod의 상하 이동을 제어하기 위해 각도 조절 장치(B)를 개발했으며 이는 (D)와 같이 Rod의 높이를 정밀하게 제어한다. 이를 통해 측면 Rod는 곡률에 따라 변화하는 측면 거푸집을 안정적으로 지지한다. 또한, 설계 형상의 곡률을 구현하는 측면 거푸집을 안정적으로 지지함으로써 정밀한 형상의 FCP를 생산할 수 있다.



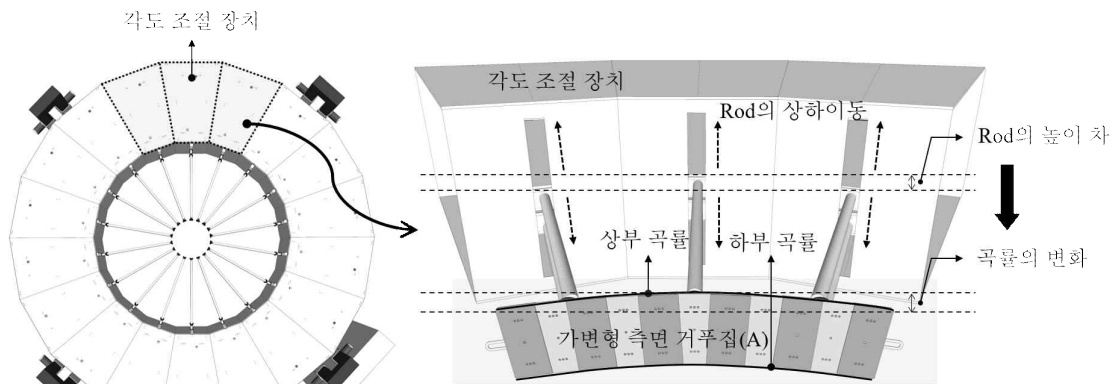
<그림 2-2-32> FCP의 측면형상 및 측면 Rod(상·하부)의 상하 이동 제어 필요성

- 본 연구에서 개발한 측면형상 제어장비의 측면 각도 조절 장치는 <그림 2-2-33>과 같으며 총 18개의 각도 조절 장치가 방사형으로 배치되어 FCP의 형상을 구현한다. 측면 각도 조절 장치는 측면 Rod를 포함하며 이를 전후로 이동시키는 상·하부로 구성된 두 개의 스텝 모터(A)와 측면 Rod 프레임(C)를 상하로 이동시키는 두 개의 스텝 모터(B)를 포함한다. 이때 측면 Rod 프레임(C)은 총 4개의 상하이동 기둥(D)를 통해 상하로 이동한다. 측면 각도 조절 장치는 위와 같은 방식으로 측면 Rod를 정밀하게 제어하여 측면 거푸집을 안정적으로 지지할 수 있다.



<그림 2-2-33> 측면형상 제어장비의 각도 조절 장치

- 측면형상 제어장비의 각도 조절 장치를 통한 측면 거푸집의 지지 및 측면 곡률 구현의 예는 <그림 2-2-34>와 같다. 측면 Rod는 가변형 측면 거푸집을 안정적으로 지지하고 설계형상의 측면 곡률을 구현하기 위해 상하로 이동하여 측면 Rod들 간의 높이차를 형성한다. 이는 각각의 측면 Rod가 가변형 측면 거푸집의 상·하부 곡률의 변화를 완전히 구현할 수 있도록 하며 콘크리트 타설 시 발생하는 측압에 저항하는 버팀대 역할을 할 수 있다.

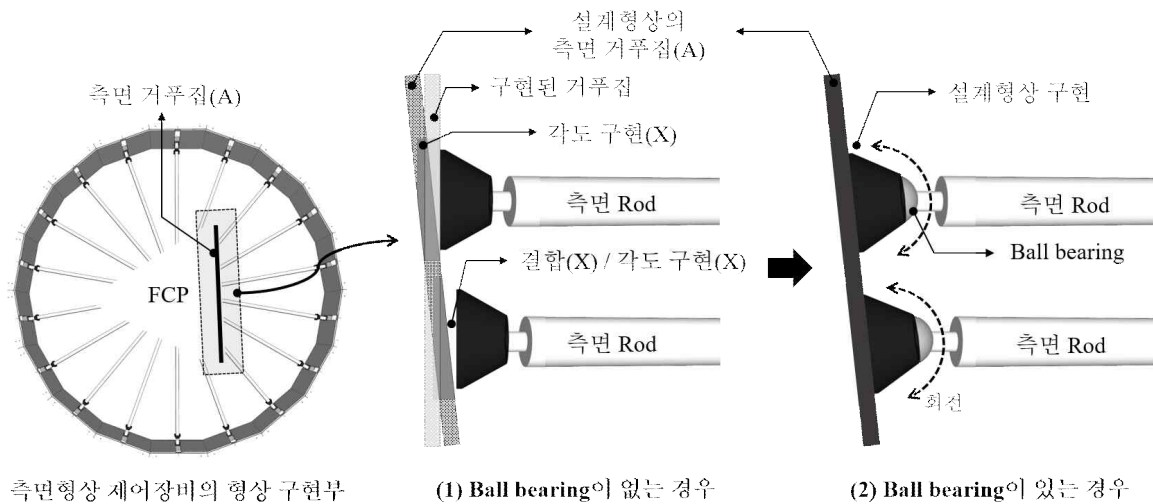


측면형상 제어장비(평면도)

Rod 상하이동 제어를 통한 측면 곡률 구현의 예

<그림 2-2-34> 측면형상 제어장비의 각도 조절 장치의 형상 구현 예시

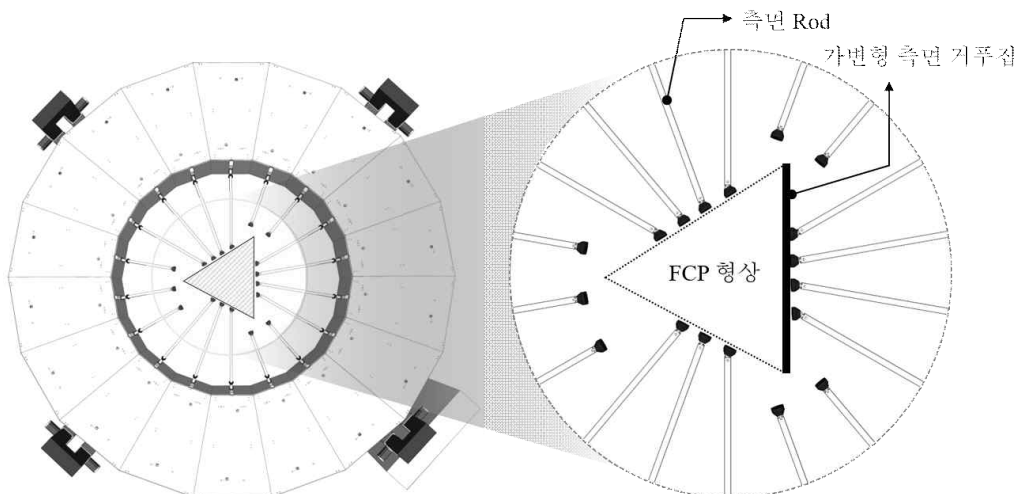
- 또한, 측면 Rod의 Ball bearing 구조를 통해 콘크리트 타설시 측압에 대한 거푸집 지지가 가능하다. 그 예로 <그림 2-2-35>와 같이 설계형상의 측면 거푸집(A)을 구현할 때 Ball bearing 구조가 없는 경우(1) 설계형상의 측면 거푸집을 강하게 고정할 수 없어 측압에 대한 저항이 불가능하다. 또한, Rod와 거푸집의 완전한 결합이 불가능하며 설계형상의 각도를 만족할 수 없다. 그러나 <그림 2-2-35>의 (2)와 같이 Ball bearing 구조를 적용할 경우, 측면 Rod 고정부의 회전을 통해 측면 Rod와 측면 거푸집을 완전하게 결합할 수 있다.



<그림 2-2-35> 볼 베어링을 통한 측면 거푸집 지지 및 고정

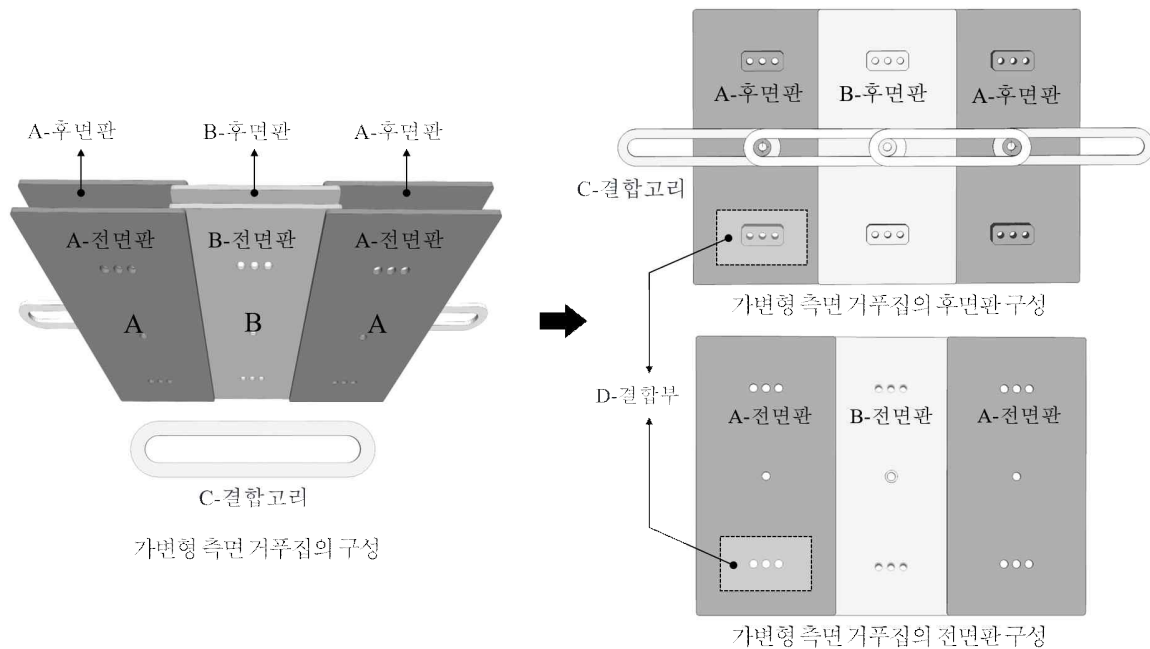
(다) 가변형 측면 거푸집

- 본 연구에서 개발한 가변형 측면 거푸집의 개발 상세는 다음과 같다. <그림 2-2-36>과 같이 가변형 측면 거푸집은 측면형상 제어장비의 측면 Rod와 결합되며 최종적으로 콘크리트의 타설면이 되어 FCP의 측면 형상을 구현하는 핵심적인 요소이다.

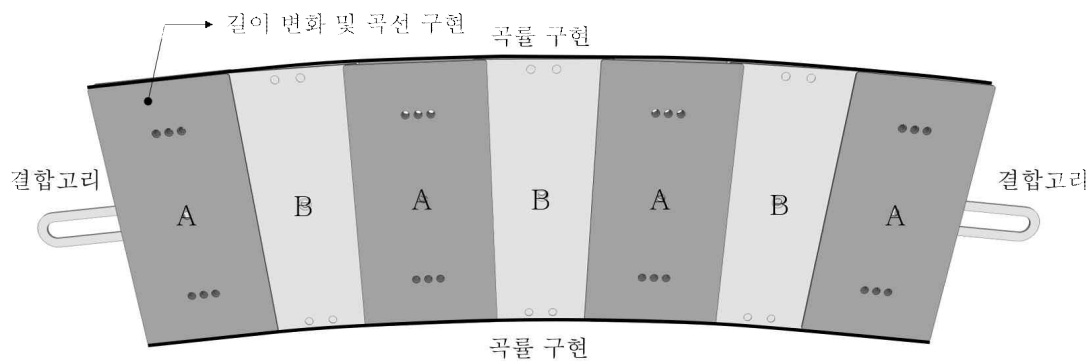


<그림 2-2-36> 가변형 측면 거푸집의 역할

- 본 연구에서는 앞서 <그림 2-2-25>에서 도출한 요구성능을 토대로 <그림 2-2-37>과 같은 가변형 측면 거푸집을 개발하였다. 가변형 측면 거푸집은 A판, B판, A판, ..순으로 결합고리(C)를 통해 연결되며 연결하는 판의 수에 따라 거푸집의 길이를 조절할 수 있다. 또한, 가변형 측면 거푸집의 각 판은 전면판과 후면판으로 구성되며 각 판의 전면판과 후면판은 결합부(D)를 통해 결합된다. 이와 같은 구성에 따라 가변형 측면 거푸집은 <그림 2-2-38>과 같이 측면의 상하부 곡률을 구현할 수 있다.

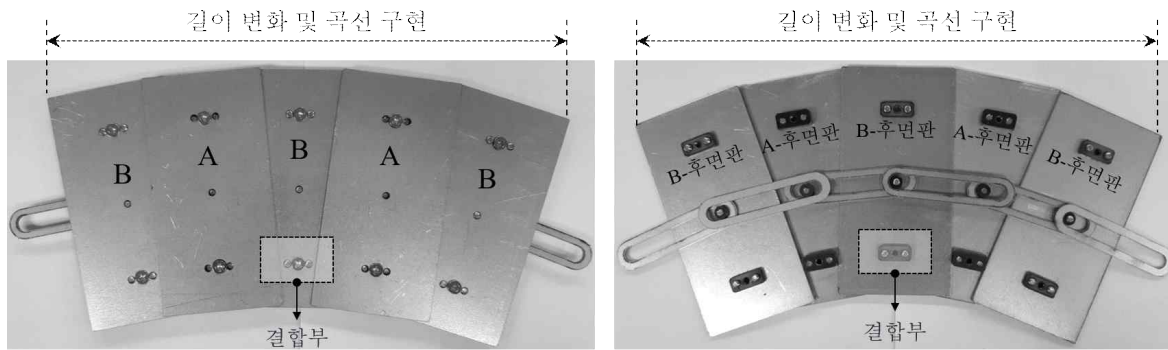


<그림 2-2-37> 가변형 측면 거푸집의 구성



<그림 2-2-38> 가변형 측면 거푸집의 곡률구현 개념

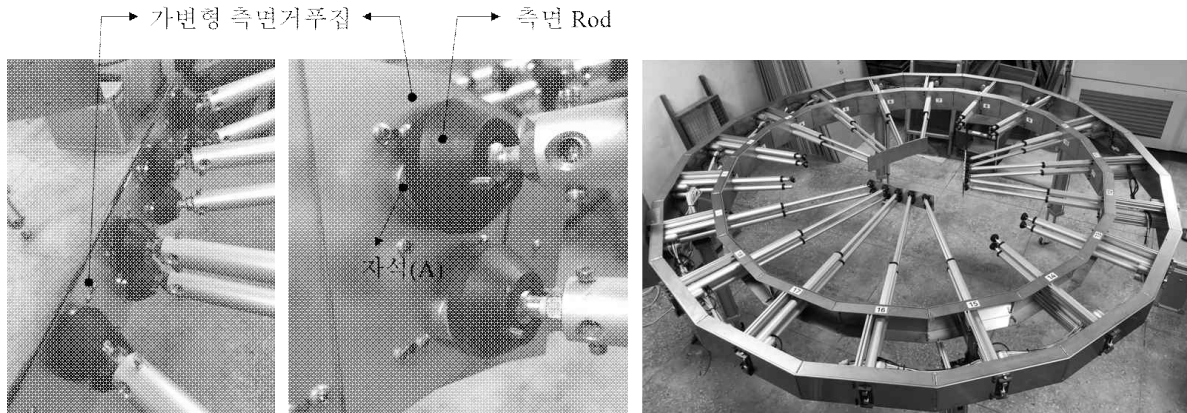
- 본 연구에서는 <그림 2-2-39>와 같이 가변형 측면 거푸집의 시작품을 제작하였다. 이는 <그림 2-2-37>과 같은 구성을 통해 거푸집의 길이와 상·하부 곡선을 구현할 수 있다. 또한, <그림 2-2-40>과 같이 강판류로 제작되어 측압에 저항할 수 있는 충분한 강성을 가지며 자석(A)를 통해 측면 Rod와 탈부착방식으로 간단하게 결합된다.



다수의 판을 결합한 가변형 측면 거푸집

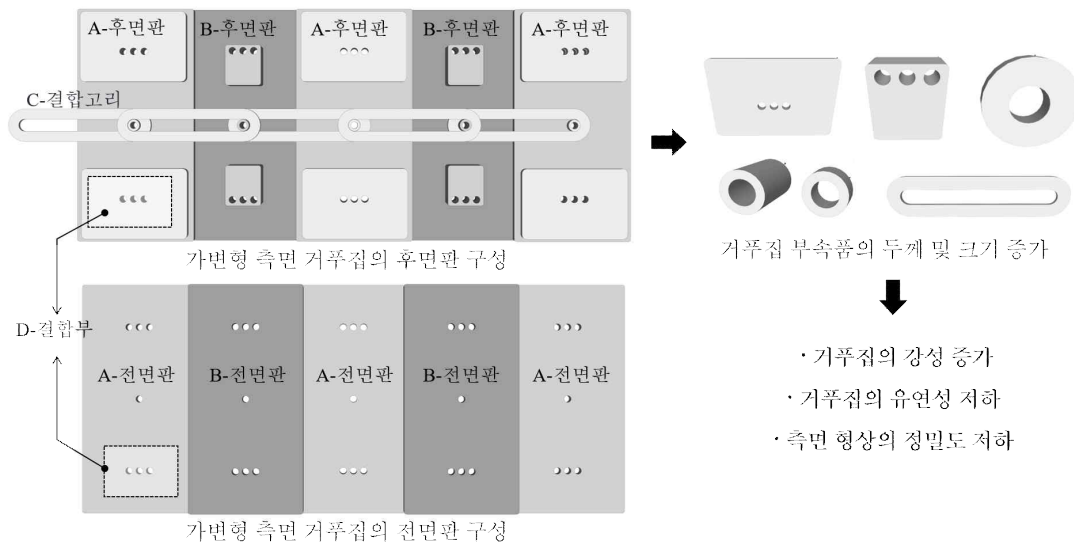
다수의 판을 결합한 가변형 측면 거푸집의 후면판 구성

<그림 2-2-39> 가변형 측면 거푸집(시작품)의 길이 변화 및 곡선 구현의 예



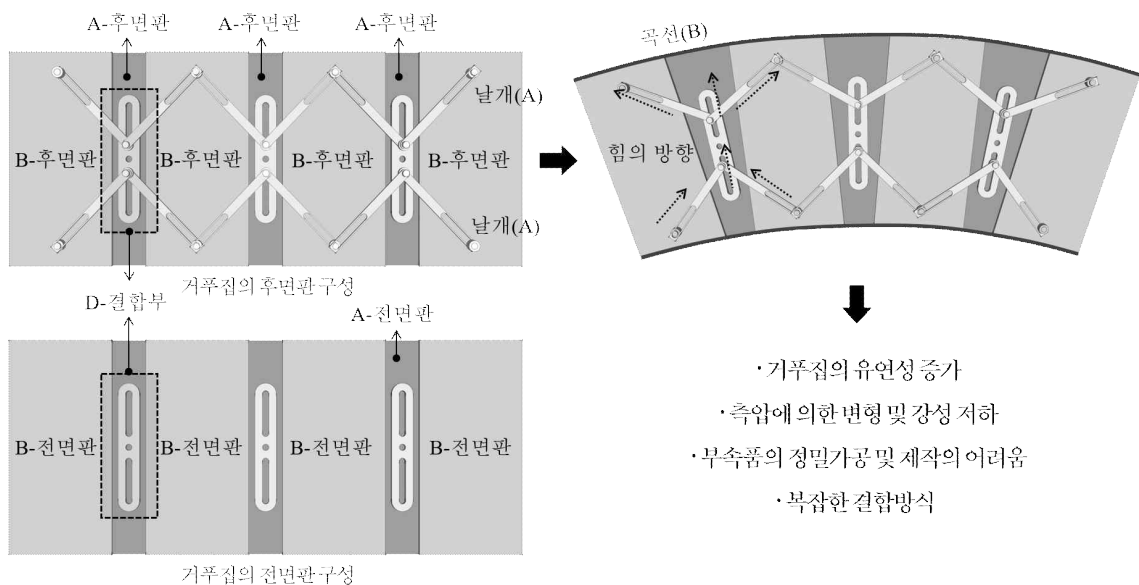
<그림 2-2-40> 가변형 측면 거푸집과 측면 Rod의 결합

- 본 연구에서는 앞서 언급한 <그림 2-2-37>과 같은 가변형 측면 거푸집 이외에도 <그림 2-2-41>, <그림 2-2-42>과 같이 다른 형태의 디자인을 도출하였다. <그림 2-2-41>의 측면 거푸집은 <그림 2-2-37>의 거푸집 형태에서 거푸집 부속품들의 두께와 크기를 증가시킨 것으로 이에 따라 거푸집의 강성이 증가하여 재료의 측압에 대한 뒤틀림과 변형이 감소한다. 하지만 부속품의 두께 및 크기가 증가함에 따라 후면판과 전면판의 마찰면이 증가하여 거푸집의 유연성을 저하시킨다. 이는 설계형상의 FCP를 제작하는 과정에서 형상의 정밀도를 저하시키는 요인으로 <그림 2-2-41>과 같은 거푸집은 FCP의 측면형상을 구현하기에 적합하지 않은 거푸집으로 판단된다.



<그림 2-2-41> 가변형 측면 거푸집 부속품의 규격을 증가시킨 디자인

○ <그림 2-2-42>의 측면 거푸집은 가변형 측면 거푸집의 유연성을 증가시키기 위해 기존의 적용한 연결고리가 아닌 날개(A)를 사용한 형태이다. 앞서 <그림 2-2-37>의 가변형 측면 거푸집의 연결고리는 중앙에 배치된 형태이며 이로 인해 급격한 곡률 구현 시 상·하부의 곡률이 끊기는 현상이 발생한다. 하지만 <그림 2-2-42>의 측면 거푸집은 연결고리가 아닌 날개(A)가 위아래로 배치되어 있어 곡률의 끊김 현상을 억제하며 거푸집의 유연성을 증가시킨다. 이는 앞서 개발한 측면 거푸집보다 정밀한 FCP 측면의 상·하부 곡률을 구현할 수 있지만 후면판과 전면판의 마찰면적이 매우 적으며 콘크리트의 측압에 대한 저항능력이 낮다. 또한, 결합부(D) 및 날개(A)의 형태는 복잡한 형태이며 1~3mm정도의 얇은 두께로 인해 정밀한 가공과 제작이 어렵다. 따라서 <그림 2-2-42>와 같은 측면 거푸집은 FCP의 측면형상을 구현하기에 적합하지 않은 것으로 판단된다.



<그림 2-2-42> 날개 결합 형태의 측면 거푸집 디자인

(라) FCP 형상 구현 실험

① 측면형상 제어장비를 통한 FCP 제작 실험

- 본 연구에서는 측면형상 제어장비(1차 개발)를 통해 FCP의 형상을 구현하는 실험을 진행하였다. 실험은 측면형상 제어장비의 측면 거푸집지지 및 고정능력과 설계형상의 FCP를 제작하는 능력을 검증하기 위해 사각형 제작 범위 내에서 가로, 세로 600mm의 정사각형 패널을 두께 100mm로 설계하여 FCP를 제작하였다.
- 실험과정은 <그림 2-2-43>과 같다. 설계형상에 맞게 측면 Rod를 이동시킨 후 측면 거푸집과 결합한다. 그 다음으로 구현된 거푸집에 박리제를 바르고 모르타르를 타설하여 양생과정을 거친다. 이 과정에서 본 실험은 FCP의 W/C 40%의 모르타르를 사용하였다. 양생과정을 마친 후 거푸집을 탈형하고 3D 스캐너(GO!SCANS PARK)를 통해 제작된 FCP를 스캔하였다. 그 다음으로 FCP가 설계형상대로 정확하게 제작되었는지 확인하기 위해 품질검사 프로그램(VXModel, VXInspect)를 통해 설계형상을 바탕으로 스캔 데이터의 오차를 비교하였다.
- 기존의 FCP는 품질 기준이 없기 때문에 본 연구에서는 패널 측면의 각도와 오차를 기준으로 품질검사를 실시하였다. FCP 품질기준은 설계형상 기준 제작된 FCP 각도는 1° 이내이며, FCP의 측면오차는 $\pm 3\text{mm}$ 이내로 설정하였다. 이때 FCP의 측면 각도 오차는 설계형상 평면과 스캔 데이터 평면의 각도를 비교하였다. 또한, FCP가 정밀하게 제작되었는지 확인하고자 제작된 FCP의 표면 면적의 오차율을 확인하였다.



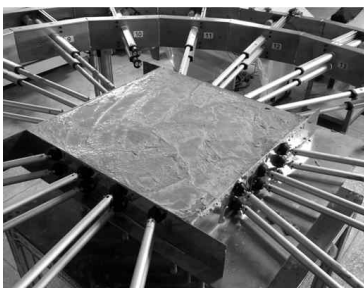
측면형상 제어장비(1차 개발)



(1) 거푸집 결합



(2) 모르타르 타설



(3) 양생



(4) 거푸집 탈형



(5) FCP 3D 스캔

<그림 2-2-43> 측면형상 제어장비를 통한 FCP 제작과정

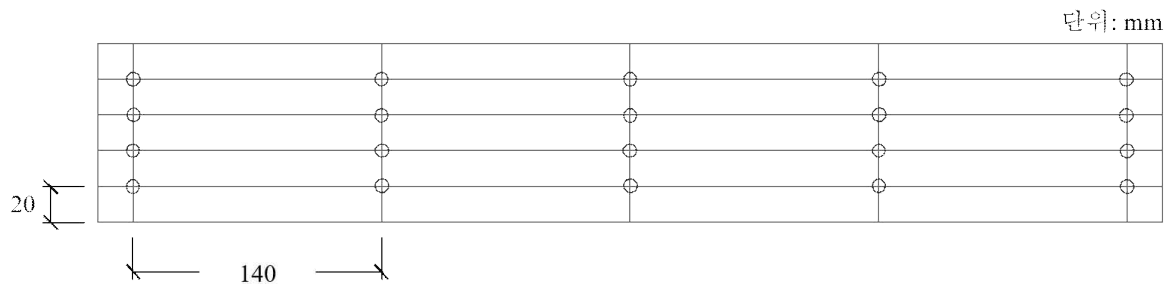
- <표 2-2-1>과 같이 패널 측면의 모든 XY, XZ, YZ 평면의 각도와 이를 모두 고려한 전체 각도를 분석한 결과 제작된 FCP의 네 측면의 최대 각도는 0.037° 로 본 연구에서 제시한 품질기준 각도인 1° 이내를 만족하였다.

<표 2-2-1> FCP의 측면 각도 오차

	측면1	측면2	측면3	측면4
∠XY평면	0.004	0.003	0.001	0.001
∠XZ평면	0.001	0.005	0.021	0.000
∠YZ평면	0.010	0.001	0.000	0.037
∠전체	0.010	0.003	0.021	0.037

(단위: °)

- 다음으로, 패널의 측면오차를 분석하였다. <그림 2-2-44>와 같이 측면마다 20개씩 네 면, 총 80개의 노드를 지정하고 설계형상을 기준으로 제작된 FCP 측면오차를 측정하였다.



<그림 2-2-44> 패널 측면의 표면오차 노드 지정

- 분석된 오차는 방향성을 갖는다. 오차는 설계형상면을 기준으로 바깥 방향의 벡터값(+a)을 갖거나 설계면 안쪽 방향의 벡터값(-a)을 갖는다. 따라서 <표 2-2-2>의 최소값은 설계면 안쪽 방향의 최대오차를 나타내며, 최대값은 설계면 바깥 방향의 최대오차를 나타낸 것이다. 오차 측정 결과 최소오차는 -2.471, 최대오차는 4.957mm로 측면 1에서 나타났다.

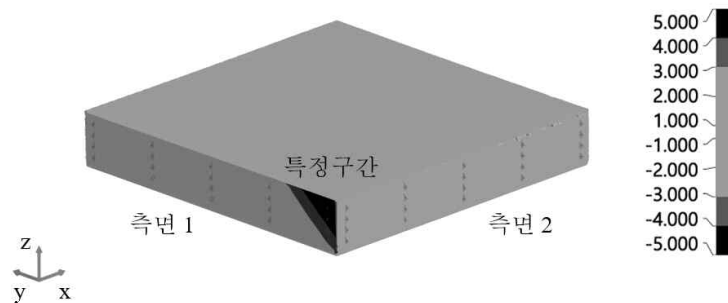
<표 2-2-2> FCP 측면의 표면오차

	측면1	측면2	측면3	측면4	전체	특정구간 제외한 측면오차
Min.	-2.471	-1.367	-0.797	-1.429	-2.471	-2.471
Max.	4.957	1.135	1.278	1.472	4.957	1.472
Mean	0.342	-0.086	0.143	0.095	0.123	-0.084
S.D.	2.128	0.917	0.766	0.921	1.313	0.964

(단위: mm)

- 최대 오차는 본 연구에서 제시한 오차범위를 벗어났는데, 이는 <그림 2-2-45>와 같이 실험 중 측면형상 제어장비의 수평을 완전히 잡지 못하여 측면1과 측면2가 만나는 모서리로 미세하게 모르타르가 흘러 오차가 발생한 것으로 분석되었다. 이 구간을 제외한 측면오차는 최소오차 -2.471mm, 최대오차 1.472mm로, 이는 ±3mm 이내이므로 본 연구에서 제시한 품질기준을 만족하였다.
- 제작된 FCP의 형상오차를 확인하기 위해 설계형상에 따른 FCP 표면 면적의 오차율을 분석하였다. 제작된 FCP의 표면 면적은 35,709,220mm²로 설계형상 36,000,000mm² 대비 형상 오차율은 0.81%로 분석되었다. 이는 1% 이내로 매우 미세한 차이이며 형상의 오차는 거의 없다고 볼

수 있다.



<그림 2-2-45> 설계형상 기준 FCP의 측면 오차

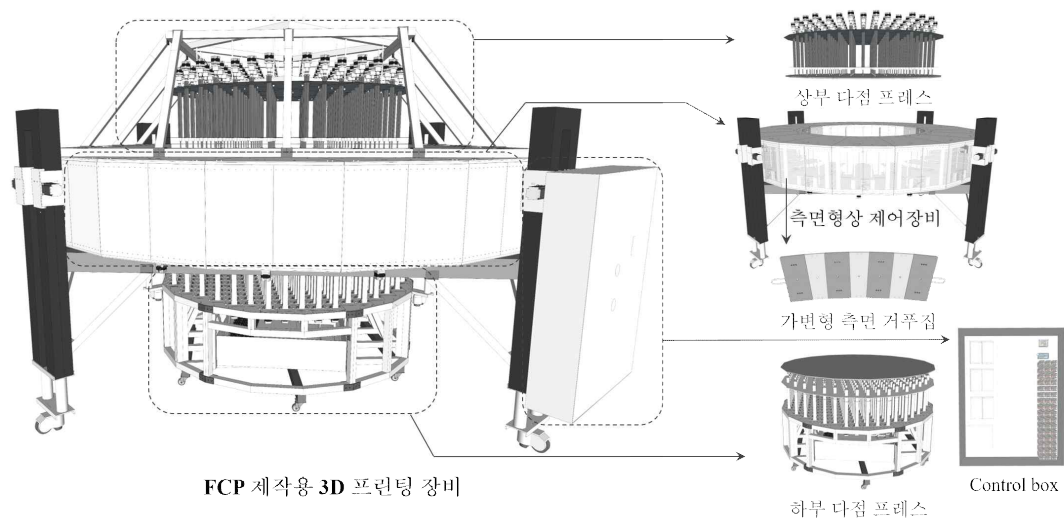
② 측면형상 제어장비 실험 결과

- 본 실험에서는 측면형상 제어장비의 측면 거푸집지지 및 고정능력과 설계형상의 FCP를 제작하는 능력을 검증하였다. 비정형 건축공사의 특성상 FCP를 완벽하게 일치하도록 제작하는 것은 불가능하기 때문에 어느 정도의 오차는 수용해야 한다. 또한, 본 실험에서는 기존의 FCP 제작 기준이 없기 때문에 FCP의 품질기준을 설계형상 기준 제작된 FCP의 측면각도가 1° 이내이며 측면오차는 $\pm 3\text{mm}$ 이내로 설정하였다. 형상 분석 결과 FCP의 측면각도는 최대 0.037° 로 본 연구에서 제시한 각도를 만족하였다. 다음으로, 패널의 측면오차 검사 결과는 특정 구간을 제외하면 측면오차는 최소 -2.471mm , 최대 1.472mm 로 본 연구에서 제시한 오차범위를 만족하였다. 따라서 측면형상 제어 장비를 통해 제작된 FCP는 품질기준을 만족하였다. 이와 같은 실험결과를 통해 측면형상 제어장비의 FCP 제작능력과 오차범위를 만족함으로써 측면 거푸집 지지 및 고정능력을 검증하였다. 이러한 결과를 통해 본 연구에서 개발한 측면형상 제어장비는 FCP 생산 분야에서의 혁신적이고 높은 경쟁력을 갖는 장비가 될 것으로 판단된다.

다. FCP(Free-form Concrete Panel) 제작용 3D 프린팅 장비

(1) 장비의 구성

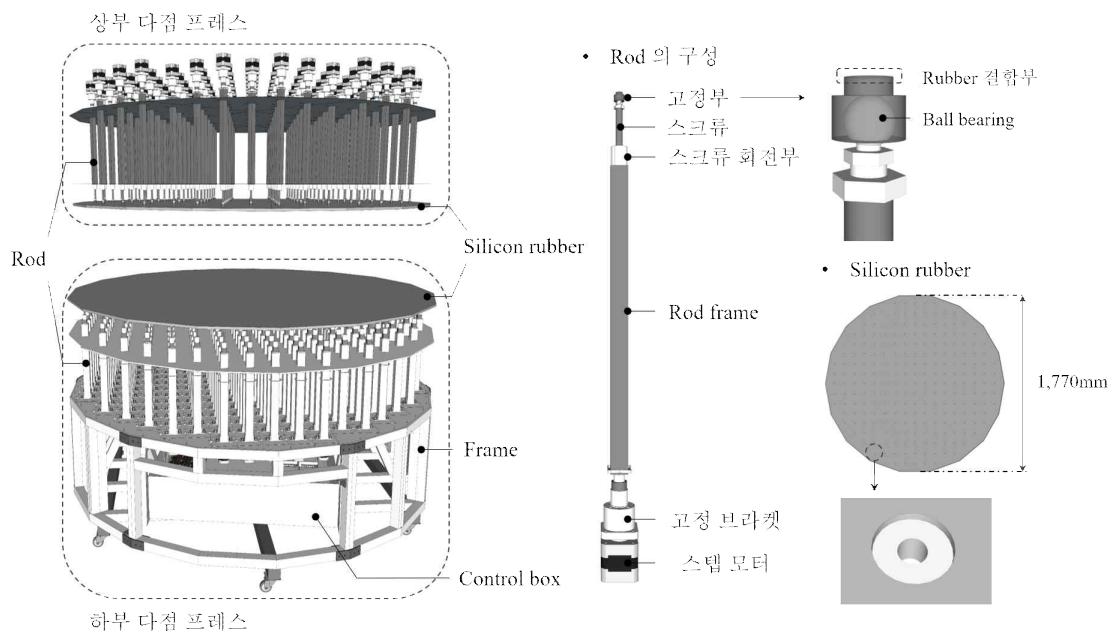
- 본 연구에서 개발한 FCP(Free-form Concrete Panel) 제작용 3D 프린팅 장비는 <그림 2-2-46>과 같이 양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터와 측면형상 제어장비로 구성된다. 양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터는 FCP의 상부면과 하부면의 곡률을 구현하는 장비로 상부 다점 프레스와 하부 다점 프레스로 구성된다. 측면형상 제어기술은 FCP의 다양한 형상과 측면각도를 구현하는 것으로 측면형상 제어장비와 가변형 측면 거푸집으로 구성된다.



<그림 2-2-46> FCP 제작용 3D 프린팅 장비의 구성

(가) 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’

- 양면 다점 프레스는 상부 다점 프레스와 하부 다점 프레스로 구성된다. 상세 구성은 <그림 2-2-47>과 같이 Rod, Silicon rubber, Frame, Control box이다. 본 장비에서의 Rod는 상·하 움직임으로 각 Rod의 높이차에 따라 FCP 상·하부면의 곡률을 구현한다. Rod는 상부 89개, 하부 211개로 총 310개의 Rod가 설치되며 상부 150mm, 하부 100mm의 간격으로 배치된다. 각 Rod는 결합부, 스크류, 스크류 회전부, Rod frame, 고정 브라켓, 스텝 모터로 구성된다. 모터의 회전수에 따라 Rod가 상승 또는 하강하며 최대 300mm 이동한다. Rod의 고정부는 Rubber 결합부와 Ball bearing으로 되어 있다. Silicon rubber는 지름 1,770mm로 상부와 하부에 모두 설치되며 Rod와의 볼트결합을 위해 Rod의 개수에 따라 볼트의 크기에 맞게 천공한다.

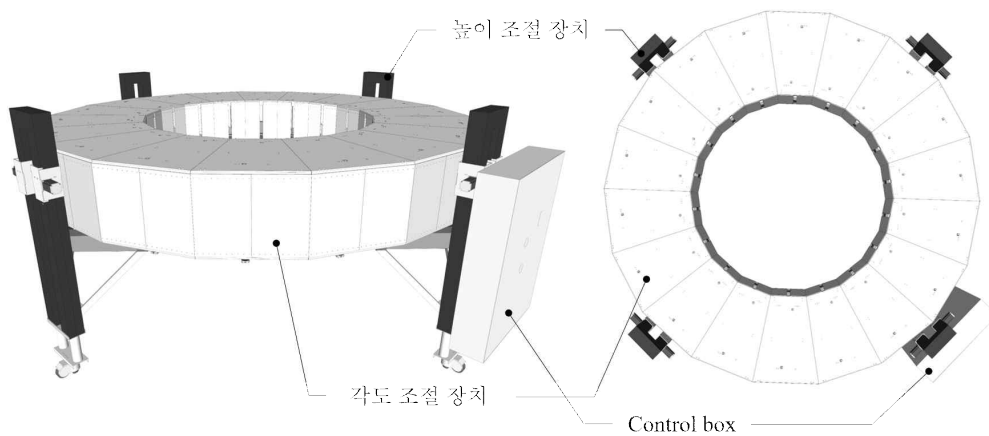


<그림 2-2-47> 양면 다점 프레스의 구성

(나) 측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술

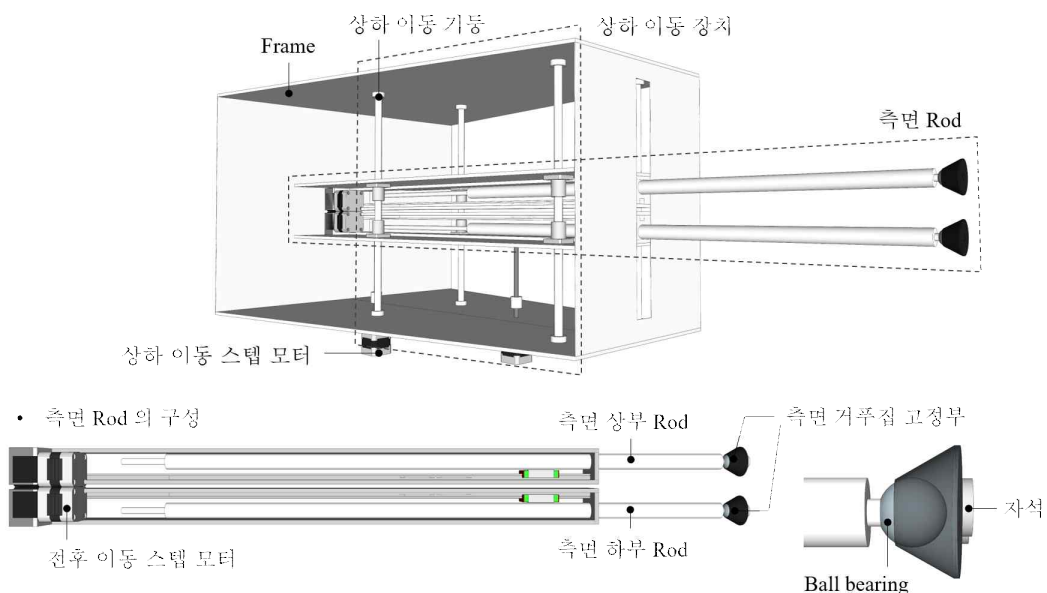
① 측면형상 제어장비

- 측면형상 제어장비는 <그림 2-2-48>과 같이 각도 조절 장치, 높이 조절 장치, Control box로 구성된다. 각도 조절 장치는 총 18개이며 방사형으로 배치된다. 높이 조절 장치는 최대 500mm 상승할 수 있다.



<그림 2-2-48> 측면형상 제어장비의 구성

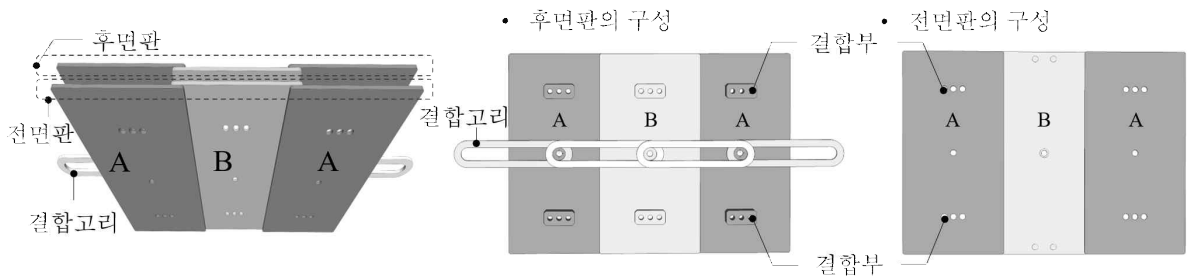
- 각도 조절 장치는 <그림 2-2-49>와 같이 측면 Rod, 상하 이동 장치, Frame으로 구성된다. 측면 Rod는 전후 이동 스텝 모터, 측면 상부 Rod, 측면 하부 Rod, 측면 거푸집 고정부로 구성된다. 측면 거푸집 고정부는 Ball bearing과 자석으로 구성된다. 상하 이동 장치는 4개의 상하 이동 기둥과 상하 이동 스텝 모터로 구성된다. 측면 Rod는 최대 650mm 전후 이동하며 상하 이동 장치는 최대 300mm 상하 이동한다. 측면형상 제어장비는 각도 조절 장치가 상·하부 Rod 2개씩 18개가 방사형으로 배치되어 있어 총 36개의 Rod로 구성된다.



<그림 2-2-49> 각도 조절 장치의 구성

② 가변형 측면 거푸집

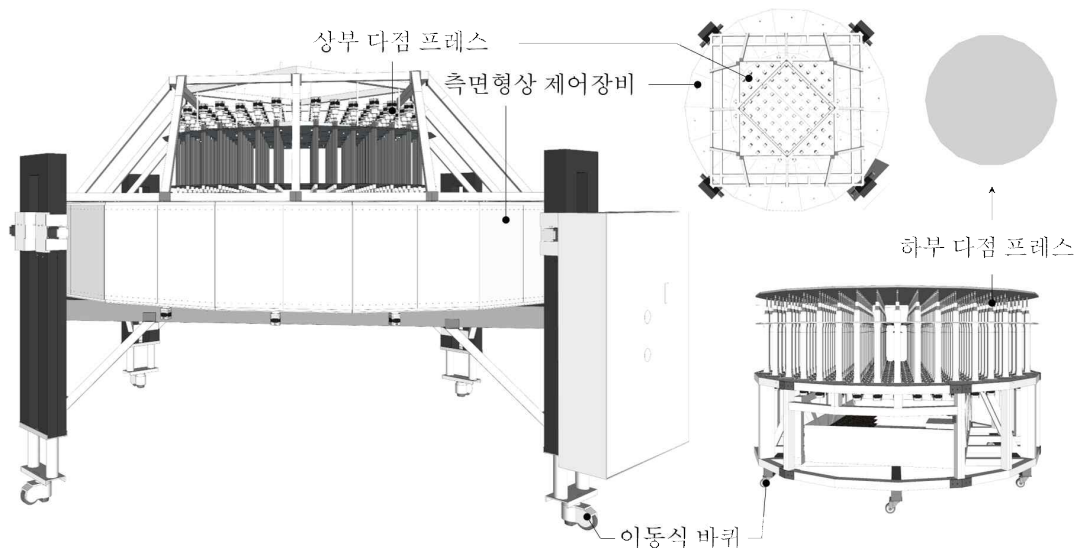
- 가변형 측면 거푸집은 <그림 2-2-50>과 같이 A판, B판, 결합고리로 구성된다. A판과 B판의 규격은 50mm*100mm로 각각의 전면판과 후면판으로 구성되며 결합 시 겹침길이는 5mm이다. 거푸집판은 A, B 순으로 반복하면서 결합고리(C)를 통해 연결되며 판의 수에 따라 거푸집의 길이를 조절할 수 있다. 전면판과 후면판은 결합부에서 볼트접합으로 결합한다.



<그림 2-2-50> 가변형 측면 거푸집의 구성

(다) FCP 제작용 3D 프린팅 장비

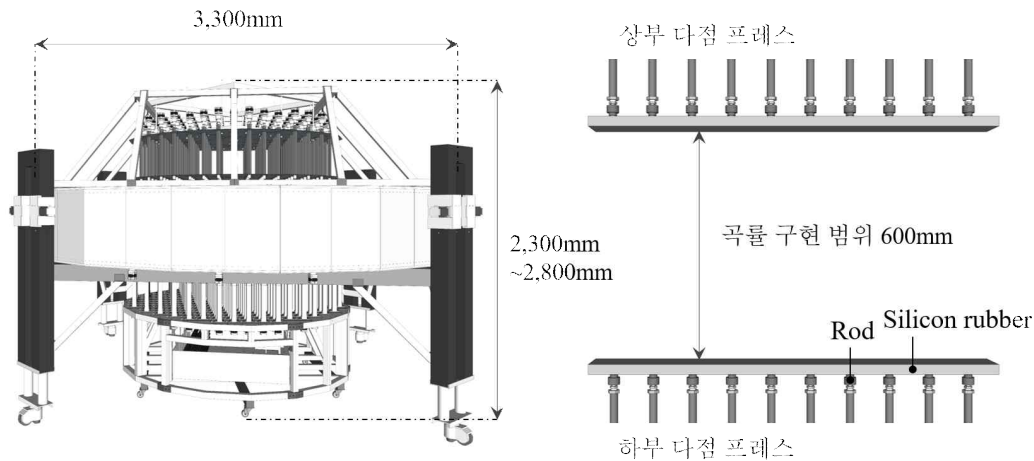
- 본 장비는 <그림 2-2-51>과 같이 상부 다점 프레스는 측면형상 제어장비에 고정되어 있다. 이는 많은 Rod로 인해 발생하는 장비의 하중을 분담하기 위해 양면 다점 프레스를 분리하였다. 상부 다점 프레스와 하부 다점 프레스는 원형으로 되어 있는 측면형상 제어장비의 형태에 따라 연계 구동을 위해 Rod를 원형으로 배치하고 Silicon rubber를 원형으로 제작하였다. 또한, 본 장비는 제작된 FCP의 운반이 용이하도록 장비의 이동을 위해 이동식 바퀴를 설치하였다.



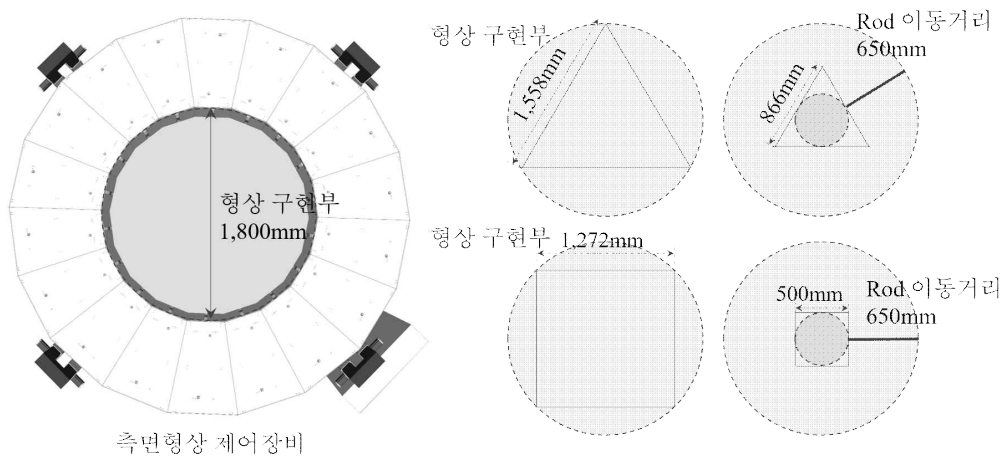
<그림 2-2-51> FCP 제작용 3D 프린팅 장비의 효율적 형태

- 본 장비의 규격은 <그림 2-2-52>와 같이 폭 3,300mm, 높이 2,300mm ~ 2,800mm이다. FCP의 제작 범위는 곡률 구현 범위와 형상 구현부로 구분할 수 있다. 곡률 구현 범위는 최대 600mm

이다. <그림 2-2-53>과 같이 측면형상 제어장비의 형상 구현부는 1,800mm이며 이에 따른 FCP의 제작범위는 다음과 같다. 정삼각형 패널의 경우 최대 제작 크기는 한 변의 길이가 1,558mm이며 최소 제작 크기는 한 변의 길이가 866mm이다. 정사각형 패널의 경우 최대 제작 크기는 한 변의 길이가 1,272mm이며 최소 제작 크기는 한 변의 길이가 500mm이다.

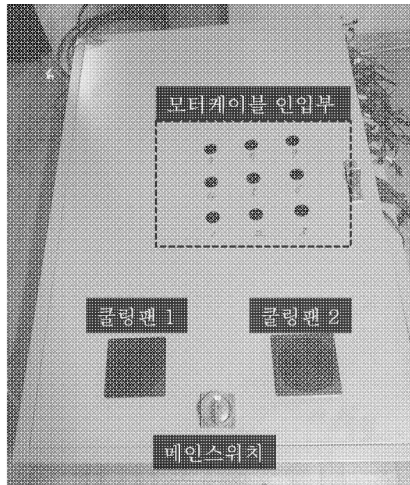


<그림 2-2-52> FCP 제작용 3D 프린팅 장비의 규격 및 곡률 구현 범위

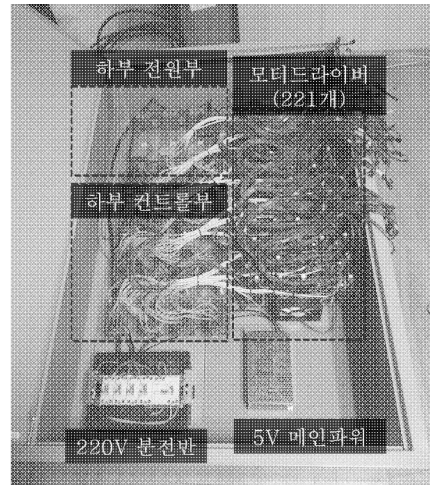


<그림 2-2-53> 형상 구현부의 FCP 제작 범위

- 본 장비를 구동하는 제어 시스템은 하부 다점 프레스용 제어 시스템과 상부 다점 프레스 및 측면형상 제어장비용 제어 시스템으로 구분된다. <그림 2-2-54>와 같이 하부 다점 프레스 제어부의 외부는 9개의 모터케이블 인입부, 3개의 쿨링팬, 메인 스위치로 구성된다. 내부는 하부 전원부, 하부 컨트롤부, 하부 모터드라이버(221개), 220V 분전반, 5V 메인파워로 구성된다. 상부 다점 프레스 및 측면형상 제어장비 제어부의 외부는 비상정지 장치, 내부온도 제어 장치, 상부·측면 전원, 메인 전원, 상승·하강 버튼으로 구성되어 있다. 제어부의 내부는 크게 메인 제어부, 상부 및 측면 제어부가 있으며 상부 모터드라이버(89개), 측면 모터드라이버(36개), 측면 전원부로 구성된다.



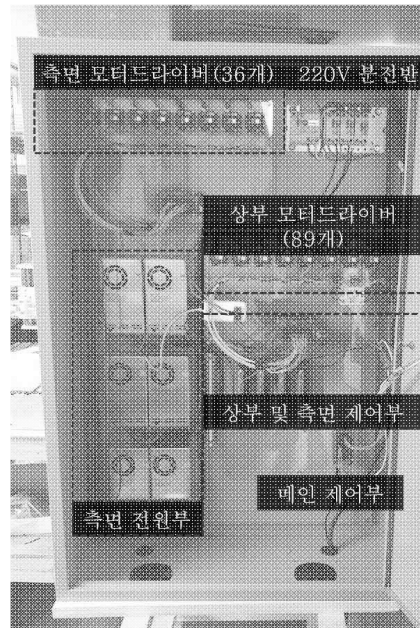
(1) 하부 다점 프레스 제어부의 외부



(2) 하부 다점 프레스 제어부의 내부



(3) 측면형상 제어장비의 제어부의 외부



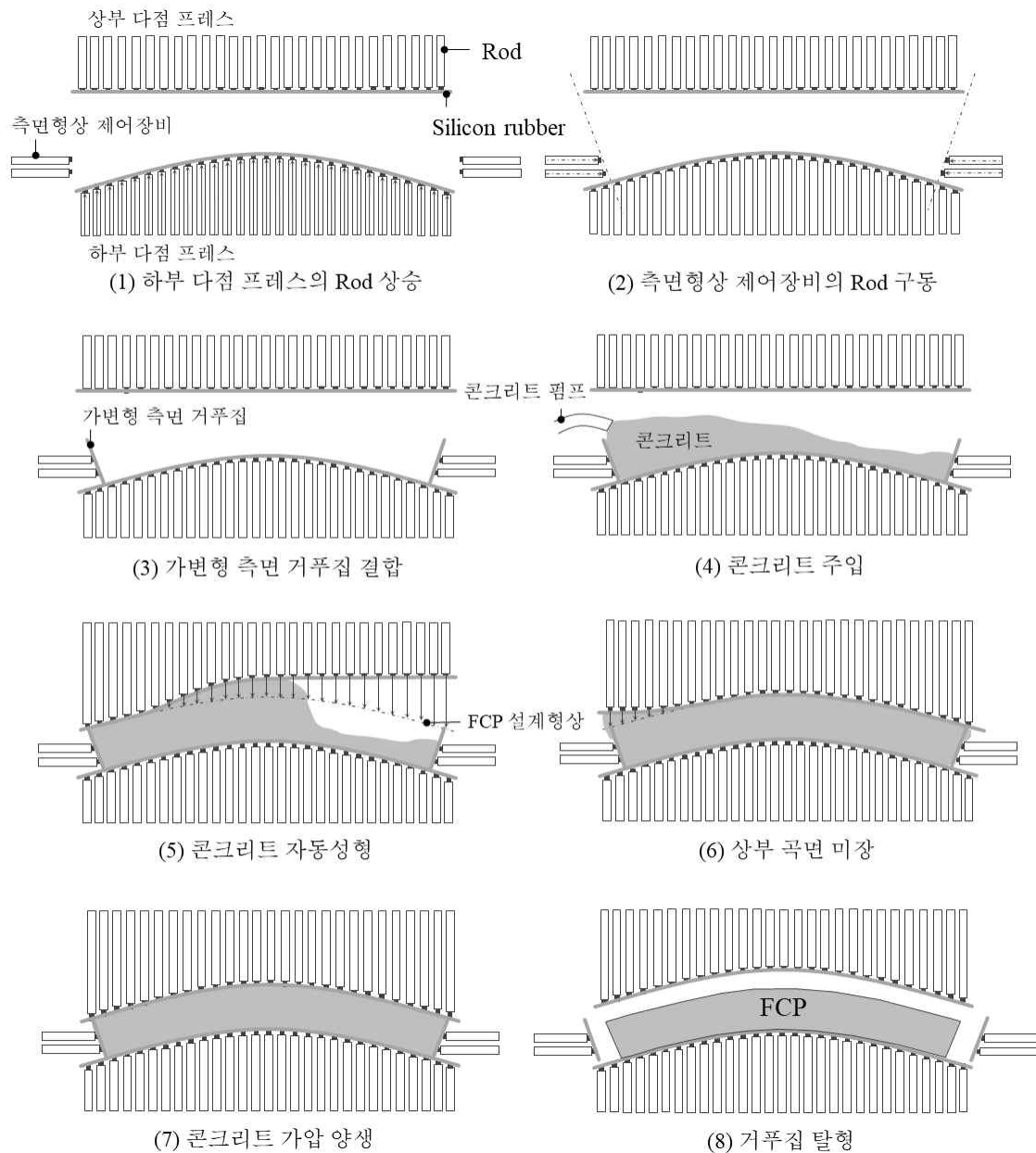
(4) 측면형상 제어장비의 제어부의 내부

<그림 2-2-54> FCP 제작용 3D 프린팅 장비의 제어시스템

(2) FCP 제작방식

- 본 연구에서 개발한 FCP 제작용 3D 프린팅 장비는 ‘압축(Press)형’ 3D 프린팅 장비이다. 기존의 압출형 3D 프린팅 기술과 달리 본 장비는 거푸집 형상을 구현하고 주입된 콘크리트를 압축하여 FCP를 출력하는 방식이다. 거푸집의 형상은 Rod의 움직임을 통해 자동으로 구현되며 주입된 콘크리트 또한, Rod의 자동적인 움직임으로 압축하여 FCP를 출력한다.
- <그림 2-2-55>는 본 장비의 FCP 제작과정으로 8단계로 나누어진다. 먼저, 하부 다점 프레스의 Rod가 상승하여 FCP 하부면의 곡률을 구현한다. 다음으로 FCP의 형상과 측면 각도에 따라 측면형상 제어장비의 Rod가 움직여 FCP의 형상을 구현한다. Rod에 구현된 형상과 하부면의 곡률에 따라 가변형 측면 거푸집을 결합시킨다. 하부면과 측면의 거푸집이 구현되면 콘크리트 펌프를 통해 콘크리트를 주입한다. 주입된 콘크리트는 상부 다점 프레스 Rod의 움직임을

통해 설계형상대로 자동성형한다. 자동성형 후, 상부 곡면을 미장하고 콘크리트를 가압 양생한다. 마지막으로 양생이 완료된 콘크리트의 거푸집을 탈형하여 FCP를 생산한다.

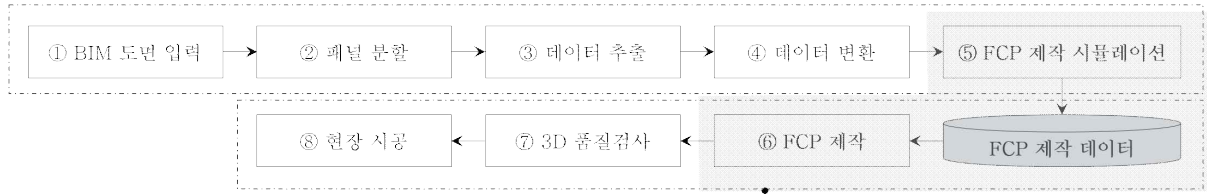


<그림 2-2-55> FCP의 제작과정

(3) FCP 생산 프로세스

○ FCP 제작용 3D 프린팅 장비를 활용한 FCP 생산 프로세스는 <그림 2-2-56>과 같이 제작 데이터 추출단계와 FCP 제작 및 시공 단계로 나누어진다. 제작 데이터 추출 단계는 BIM 도면 입력, 패널 분할, 데이터 추출, 데이터 변환, FCP 제작 시뮬레이션 순으로 패널을 제작하기 위한 데이터를 추출한다. FCP 제작 및 시공 단계는 FCP 제작, 3D 품질검사, 현장시공 순으로 FCP 제작 데이터를 본 장비에 입력하여 패널을 제작하고 시공한다. 또한, FCP 생산 프로세스에서 본 장비의 적용 범위는 <그림 2-2-56>의 C와 같다.

Process A. 제작 데이터 추출 단계



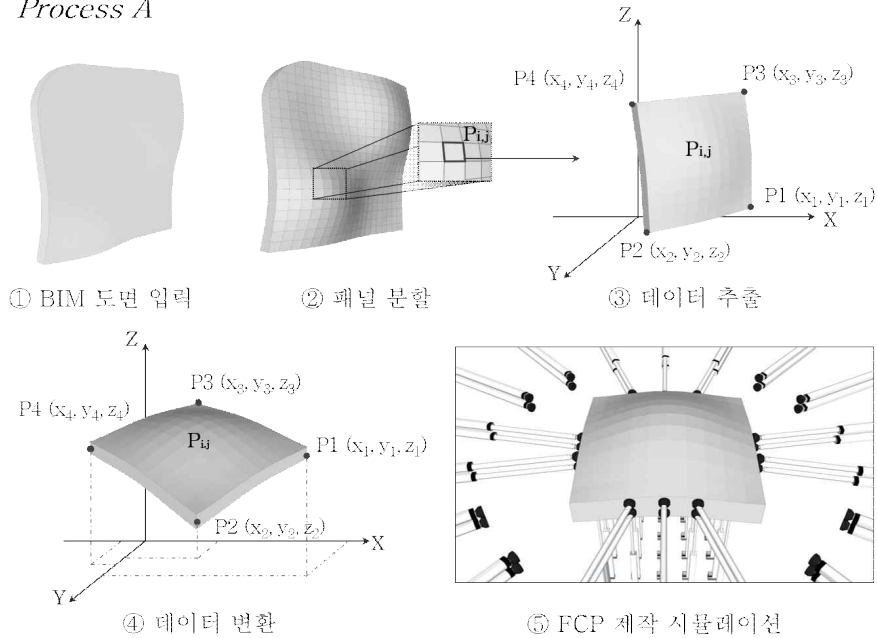
Process B. FCP 제작 및 시공 단계

C. FCP 제작용 3D 프린팅 장비의 적용 범위

<그림 2-2-56> FCP 생산 프로세스

- <그림 2-2-57>은 제작 데이터 추출단계이다. 비정형 건축물의 BIM 설계도면을 입력하여 본 장비로 생산할 수 있는 FCP의 크기, 각도, 곡률을 고려하여 가상의 그리드를 설정하고 건축물 외피를 분할한다. 분할된 패널은 각각의 데이터를 추출하고 패널을 회전하면서 본 장비로 제작하기 쉬운 위치 좌표값을 찾아 데이터를 변환한다. 이 때 변환값은 각 좌표의 z축 값의 합이 가장 작은 값으로 변환한다. FCP를 제작하기 전, 가상의 시뮬레이션을 통해 기계 작동을 위한 데이터 값을 추출한다.

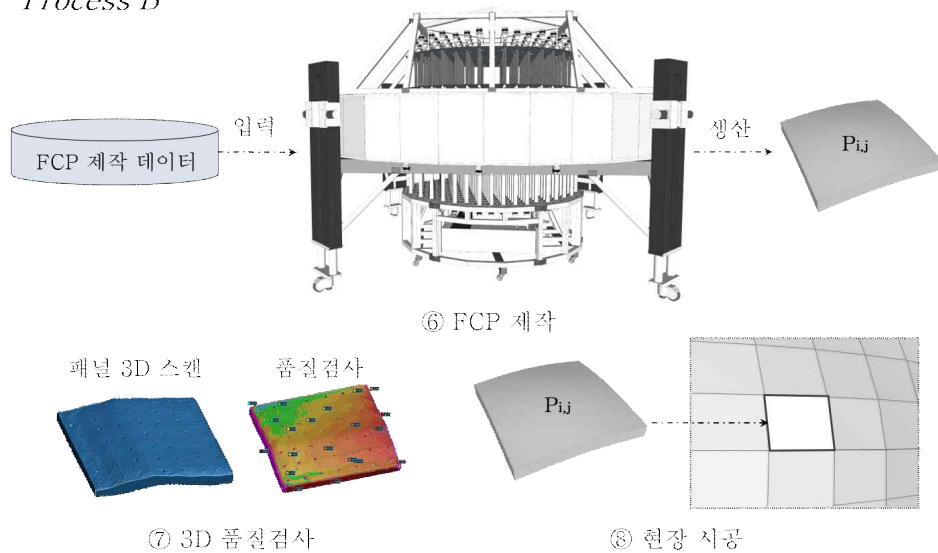
Process A



<그림 2-2-57> 제작 데이터 추출 단계

- <그림 2-2-58>은 FCP 제작 및 시공 단계이다. 시뮬레이션에서 추출한 FCP 제작 데이터를 본 장비에 입력하여 그림 2-56과 같이 FCP를 제작한다. 제작된 FCP는 분할된 패널의 형상과 일치하는지 확인하기 위해 제작된 패널을 3D 스캔하여 품질검사를 실시한다. 품질검사가 완료되면 FCP의 위치에 맞게 이를 시공한다.

Process B



<그림 2-2-58> FCP 제작 및 시공 단계

(4) FCP 형상 오차율 검증을 위한 방법론

- 본 장비를 통해 제작된 FCP의 다양한 곡률 형상에 대한 오차율을 검증하기 위해 FCP의 형상 오차 측정방법을 사용한다. 제작된 FCP의 형상 오차를 측정하고 허용오차 범위를 만족하는지 확인한다. 그러나 국내 비정형 패널의 허용오차에 대한 정확한 규정이 없다. 이를 위해 본 연구는 건축법에 명시되어 있는 건축물관련 건축기준의 벽체두께 허용오차인 3% 이내를 FCP 제작 허용오차의 기준으로 정립하였다.
- 허용오차 3% 이내 기준에 따라 FCP의 오차 측정방식은 두께 측정 방법과 3D 스캔 방법이 있다. 두께 측정 방법은 패널 상부면에 구간별 노드를 지정하고 천공한 후 노드별 두께를 측정하여 오차를 확인하는 것이다. 3D 스캔 방법은 3D 스캐너(GO!SCANS PARK)를 통해 제작된 FCP를 스캔하고 품질검사 프로그램(VXModel, VXInspect)을 통해 설계형상을 바탕으로 스캔 데이터의 오차를 비교하는 것이다. 두께 측정 방법은 노드별 두께를 측정하기 때문에 패널을 천공해야 하며 모든 구간의 오차를 확인할 수 없다. 그러나 3D 스캔 방법은 설계형상 대비 제작된 형상을 비교하기 때문에 모든 구간에서의 오차를 확인할 수 있다. 따라서 3D 스캔 방법은 두께 측정 방법보다 정확하며 이는 오차 측정에 있어 가장 적합한 방법 및 도구인 것으로 판단된다.
- 본 연구에서 선정한 3D 스캔 방법은 다양한 곡률 형상의 오차만 확인할 수 있으며 FCP의 성능을 검증하기 위해 추가적인 평가 항목과 이에 대한 검증방법이 필요하다. 이는 비정형 건축이 점차 대중화됨에 따라 규정에 대한 기준이 형성될 것으로 판단된다.

라. FCP 및 생산용 거푸집 재료

(1) FCP 생산용 최적 콘크리트 배합비 도출

(가) FCP의 재료적 요구성능

- 비정형 건축물은 기존의 정형적인 건축물들과는 달리 곡선의 형태를 띄며 이를 구현하기 위해 고난도의 기술이 요구된다. 요구되는 곡면을 구현할 때 설계형상과 비교하여 정해진 오차율을 만족해야 한다. 특히, FCP를 시공할 경우 패널 제작의 오차로 인해 패널과 패널의 접합 부위에 결함이 발생하게 되어 다시 제작해야 하는 문제가 발생한다. 이러한 품질저하의 문제를 해결하기 위해서는 최적의 품질을 확보할 수 있는 FCP를 생산해야 한다. 따라서 본 연구에서는 고품질의 FCP 제작을 위해 최적 배합비를 도출하며 FCP 제작 시 형상의 오차를 줄이기 위한 형상실험을 수행한다.
- FCP 제작은 FCP의 다양한 형상으로 인해 거푸집의 재사용이 불가능하여 폐기물이 발생한다. 이러한 문제는 인력 투입, 공사기간, 공사비용을 증가시킨다. 본 연구는 이러한 문제점에 따라 거푸집을 재사용하기 위해 경제적인 재료인 파라핀을 선정하였으며 거푸집 및 형상 제작을 위해 CNC(Computer numerical control) machine을 사용하였다.
- 본 연구에서는 FCP 생산용 최적 콘크리트의 요구성능으로 성형성과 속경성을 선정하였으며 이를 개선하기 위한 재료를 선정하여 두 차례의 실험으로 검증을 실시한다. 검증을 통해 만족한 결과 값으로 FCP 생산용 최적 콘크리트 배합비를 도출한다.

(나) 1차 실험

① 재료 선정

- 비정형의 패널의 요구성능 중 성형성에 따른 실험을 위해 보통 포틀랜드 시멘트를 선정하였으며 잔골재를 섞지 않은 경우와 섞은 경우로 나누어 실험을 진행한다. 속경성 실험은 마그네시아 시멘트를 선정하여 초속경성을 지닌 인산나트륨을 혼합한 경우와 붕사와 인산나트륨을 혼합한 경우로 나누어 실험을 진행한다. 슬럼프 플로우 값은 시멘트 페이스트가 좋은 성형성을 갖도록 하며 배합비를 찾는 목적으로 W/B를 변화하여 실험을 진행한다. 또한, 28일에서 압축강도를 측정하며 공시체의 양생은 수중 양생으로 진행하여 흡수율을 측정한다.

② 배합비 선정

- 기초실험에 따라 선정된 보통포틀랜드 시멘트 실험의 배합비는 <표 2-2-3>, <표 2-2-4>와 같다. 잔골재를 포함하지 않은 경우(A) W/B는 28%이며 잔골재를 포함한 경우(B)는 60%로 선정하였다.

<표 2-2-3> 잔골재를 사용하지 않은 배합비(A)

Division	W/B(%)	Unit mass (g)	
		W	C
Portland(28%)	28	207.2	740

<표 2-2-4> 잔골재를 사용한 시멘트 배합비(B)

Division	W/B(%)	Unit mass (g)		
		W	C	S
Portland(60%)	60	90	150	450

- 마그네시아 시멘트 실험은 초속경 반응의 인산나트륨을 혼합하여 실험을 진행한다. 본 배

합은 구조적 강성이 중요하지 않은 패넌을 제작하기 위한 것으로 5시간 이내 탈형이 가능하다. 그러나 이러한 속경성은 경화시간이 빨라져 작업시간이 감소하므로 이를 조절하기 위해 지연제인 붕사를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우로 나누어 실험을 진행한다. 이 때 붕사의 첨가율은 1%로 한다. 본 실험 또한 기초실험에 따라 선정된 결과 <표 2-2-5>와 같이 붕사를 첨가하지 않은 경우(C)의 W/B는 20%, 50%이며 <표 2-2-6>과 같이 붕사를 첨가한 경우(D)의 W/B는 50%이다.

<표 2-2-5> 붕사를 첨가하지 않은 배합비(C)

Division	W/B(%)	Unit mass (g)		
		D-MgO	W	Sodium phosphate
MgO(20)	20	138.3	27.66	4840.5
MgO(50)	50		69.15	

<표 2-2-6> 붕사를 첨가한 배합비(D)

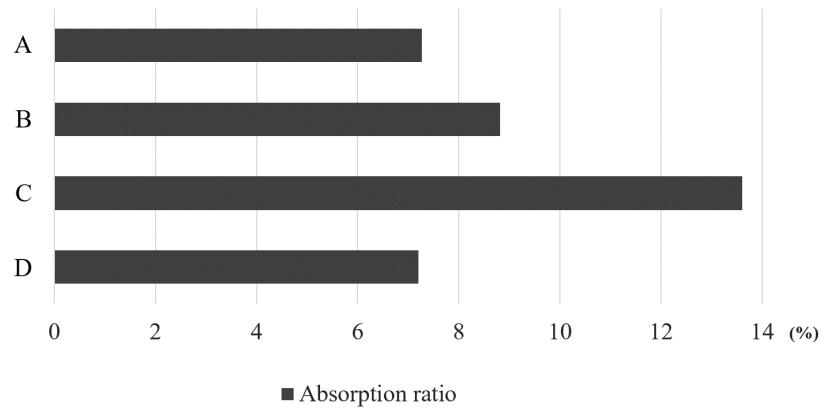
Division	W/B(%)	Unit mass (g)				
		D-MgO	W	Sodium phosphate	Borax	Fine aggregate
Mgo(50)	50	138.3	69.15	4840.5	13.83	414.9

③ 압축강도 실험

- 압축강도 실험은 7일, 14일, 28일의 강도를 측정하였으며 총 네 개 배합비의 28일 압축강도는 다음과 같다.
- 보통포틀랜드 시멘트 실험에서 잔골재를 사용하지 않은 W/B 28%는 73.35MPa이며 시간이 지남에 따라 증가하는 경향을 보였다. 잔골재를 사용한 W/B 60%는 29.83MPa로 잔골재를 추가하지 않은 경우보다 감소하였으나 점차 증가하는 경향을 보였다.
- 마그네시아 시멘트 실험에서 붕사를 첨가하지 않은 경우는 W/B 20%와 W/B 50%로 나뉘어 압축강도를 측정한다. 28일 기준 W/B 20%는 40.42MPa이며 W/B 50%는 24.73MPa이다. 잔골재와 붕사를 포함한 W/B 50%의 압축강도는 13.24MPa이다.

④ 흡수율 실험

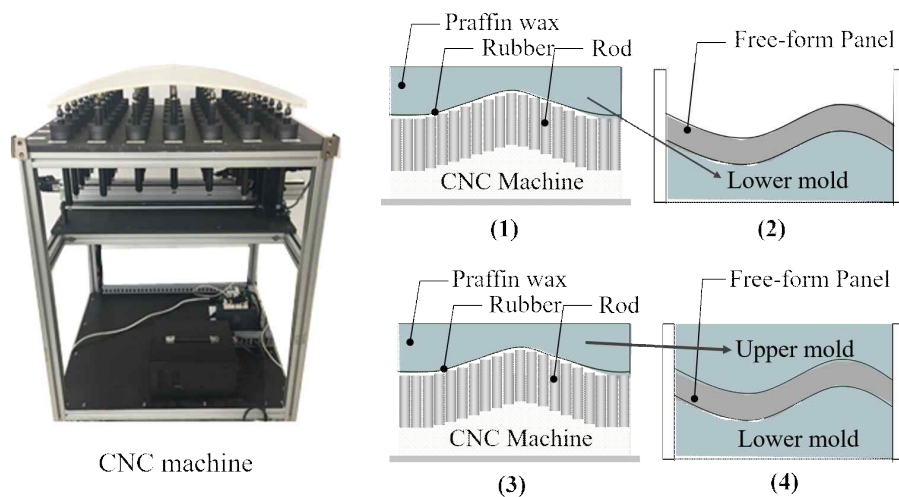
- <그림 2-2-59>는 <표 2-2-3~6>에서 선정된 실험 A~D의 배합을 토대로 흡수율을 측정한 결과 값을 나타낸 그래프이다. A의 W/B 28%의 평균 흡수율은 7.27%, B의 W/B 60%의 평균 흡수율은 8.82%이다. 잔골재를 첨가함으로써 흡수율이 증가한다는 사실을 확인하였다. C의 W/B 50% 평균 흡수율은 15.43%, W/B 20%의 평균 흡수율은 11.66%이다. 두 배합모두 KS F 4735의 품질기준을 만족하지 못하였으며, D의 W/B 55% 평균 흡수율은 7.20%로 품질기준에 만족한다. 초속경의 장점을 활용하며 적정한 경화속도를 확보하고자 1%의 붕사를 첨가한다. 마그네시아 시멘트와 인산염을 사용한 배합을 잔골재와 붕사를 첨가한 배합의 슬럼프 값에 따른 W/B를 변경함으로써 배합을 도출하였으며 그 결과 A, B, D는 KS F 4735의 품질기준을 모두 만족하였으나, C의 경우 품질기준을 만족시키지 못하였다. 성능실험 결과만을 고려할 경우 B가 최적의 배합이라 판단된다.



<그림 2-2-59> 잔골재의 유무에 따른 보통 포틀랜드 시멘트의 흡수율 비교

⑤ FCP 제작 및 오차율 측정 방법

- 본 연구에서 실시한 실험에서는 성형성, 숙경성에 초점을 두어 FCP를 제작하였다. 본 실험은 재활용이 가능한 경제적인 재료인 파라핀을 사용하여 거푸집 및 형상을 제작하기 위해 CNC(Computer numerical control) machine을 사용하였다. CNC machine의 노드별 변위차가 15mm이하가 되도록 각 노드를 0mm, 15mm, 30mm, 45mm, 30mm, 15mm로 설정했다. <그림 2-2-60>은 CNC machine과 이를 활용한 FCP 제작 방법이다.



<그림 2-2-60> CNC machine을 활용한 FCP 제작방법

- 오차율 실험은 제작한 FCP의 두께를 측정함으로써 오차율을 분석한다. <그림 2-2-61>은 두께 위치를 구간별로 나누어 표시한 것이다. 두께측정 방법은 제작된 패널에 CNC machine에 H₁부터 H₃₆까지 36개의 노드 위치를 표시한 뒤 전동드릴을 사용하여 구멍을 뚫는다. 그 후 구멍을 통해 두께를 측정하고 각 구간별 평균값을 계산하여 변위에 따른 두께의 변화, 양생 시 생기는 변화량을 계산한다.

Section1	Section2	Section3	Section4	Section5	Section6
 H ₁	 H ₇	 H ₁₃	 H ₁₉	 H ₂₅	 H ₃₁
 H ₂	 H ₈	 H ₁₄	 H ₂₀	 H ₂₆	 H ₃₂
 H ₃	 H ₉	 H ₁₅	 H ₂₁	 H ₂₇	 H ₃₃
 H ₄	 H ₁₀	 H ₁₆	 H ₂₂	 H ₂₈	 H ₃₄
 H ₅	 H ₁₁	 H ₁₇	 H ₂₃	 H ₂₉	 H ₃₅
 H ₆	 H ₁₂	 H ₁₈	 H ₂₄	 H ₃₀	 H ₃₆

FCP

<그림 2-2-61> CNC machine의 노드 간격

⑥ FCP의 오차율 측정

㉠ 잔골재를 사용하지 않은 보통 포틀랜드 시멘트의 오차율 측정

- <표 2-2-7>은 잔골재를 포함하지 않은 보통 포틀랜드 시멘트로 제작한 FCP의 구간별 두께를 측정한 결과의 평균값과 구간별 오차율의 평균을 나타낸 것이다. CNC machine의 설정된 변위로 실험한 결과 제작된 파라핀 거푸집의 변위는 45, 30, 15, 0, 15, 30mm이다. 패널의 두께는 50mm를 목표로 실험을 진행하였다. Section 1~6의 FCP 두께의 평균값을 측정한 결과 각각 31.3mm, 40.1mm, 45.3mm, 61.6mm, 57.0mm, 47.1mm로 측정되었다.

<표 2-2-7> 잔골재를 사용하지 않은 보통 포틀랜드 시멘트의 FCP 두께 측정 결과

	Section1	Section2	Section3	Section4	Section5	Section6
Average(mm)	31.3	40.1	45.3	61.6	57.0	47.1
Error rate(%)	18.7	9.8	4.7	11.7	7.0	2.8

㉡ 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트의 오차율 측정

- <표 2-2-8>은 잔골재를 포함한 보통포틀랜드 시멘트로 제작한 FCP의 구간별 두께측정 결과와 패널의 구간별 오차율을 나타낸 표이다. 앞서 실험한 보통포틀랜드 시멘트 패널과 같은 변위와 두께를 사용하였으며, Section 1~6의 FCP 두께의 평균값을 측정한 결과 각각 49.8mm, 51.0mm, 47.0mm, 52.1mm, 51.3mm, 44.8mm 로 측정되었다.

<표 2-2-8> 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트의 FCP 두께 측정 결과

	Section1	Section2	Section3	Section4	Section5	Section6
Average(mm)	49.8	51.0	47.0	52.1	51.3	44.8
Error rate(%)	1.5	1.0	3.0	3.2	1.3	5.2

㉢ 붕사를 첨가하지 않은 마그네시아 시멘트의 오차율 측정

- <표 2-2-9>는 붕사를 첨가하지 않은 마그네시아 시멘트의 FCP 두께 측정 결과와 구간별 오차율을 나타낸 것이다. 앞서 실험한 보통포틀랜드 시멘트와 같은 변위 및 두께를 사용하

였으며, Section 1~6의 FCP 두께 평균값은 각각 45.8mm, 51.3mm, 50.8mm, 45.5mm, 49.3mm, 47.3mm 이다.

<표 2-2-9> 붕사를 첨가하지 않은 마그네시아 시멘트의 두께 측정 결과

	Section1	Section2	Section3	Section4	Section5	Section6
Average(mm)	45.8	51.3	50.8	45.5	49.3	47.3
Error rate(%)	4.8	2.3	0.8	4.5	2.3	2.7

㉔ 붕사를 첨가한 마그네시아 시멘트의 오차율 측정

- <표 2-2-10>은 붕사를 첨가한 마그네시아 시멘트로 제작한 FCP의 구간별 두께측정 결과와 패널의 구간별 오차율을 나타낸 것이다. 변위 및 두께는 앞서 실험한 것과 같으며, Section 1~6의 FCP 두께 평균값은 각각 45.3mm, 47.3mm, 47.3mm, 52.3mm, 51.8mm, 49.1mm 이다.

<표 2-2-10> 붕사를 첨가한 마그네시아 시멘트의 두께 측정 결과

	Section1	Section2	Section3	Section4	Section5	Section6
Average(mm)	45.3	47.3	47.3	52.3	51.8	49.1
Error rate(%)	4.7	2.7	2.7	2.5	2.2	1.2

⑦ 1차 실험 분석

- 성능 실험에서의 압축강도를 측정한 결과 압축강도는 잔골재를 사용하지 않은 보통 포틀랜드 시멘트의 경우(A) 73.35MPa, 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트의 경우(B) 29.83MPa, 붕사를 첨가하지 않은 마그네시아 시멘트의 경우(C) 40.42MPa, 붕사를 첨가한 마그네시아 시멘트의 경우(D) 13.24MPa로 측정되었다. 이는 잔골재를 사용하지 않은 경우가 가장 높은 값을 가지며 그 이유는 W/B가 가장 낮으며 시멘트만 사용한 배합이기 때문이라 판단된다.
- 성능 실험에서의 흡수율을 측정한 결과 A는 7.2%, B는 8.8%, C는 13.6%, D는 7.2%로 측정되었다. 측정 결과 붕사를 첨가하지 않은 마그네시아 시멘트(C)를 제외한 모든 배합은 KS F 4735의 기준을 만족한다. C는 사소 마그네시아가 다른 재료에 비해 흡수율이 높아 KS 기준에 만족하지 못한 것이라 판단된다.
- 흡수율과 오차율 실험 결과 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트 배합(B)의 흡수율이 KS 기준에 만족하며 오차율이 가장 적으므로 FCP 형상 구현에 있어 최적의 배합이라 판단된다.

(다) 2차 실험

- 1차 실험을 통해 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트(모르타르)가 가장 좋은 배합비를 가진다는 결과를 도출하였다. 이에 본 연구에서는 1차 실험을 통해 도출된 배합비를 바탕으로 혼화재료를 첨가하여 최적의 배합비를 도출하며 FCP를 제작하여 오차율을 측정한다.

① 배합비 및 재료 선정

- 본 연구에서는 슬럼프 플로우 600mm 이상의 유동성을 갖는 배합비를 목표로 하였으나 이를 적용하여 본 장비로 FCP를 제작한 결과 고유동성으로 인해 패널의 곡률 구현이 불가능하였다. 따라서 본 장비에 적용할 수 있는 적정 슬럼프 값은 160mm 이상을 만족하는 배합비를 도출하는데 목표를 두었다. 본 연구에서 선정한 모르타르 배합은 1차 실험에서의 가장 좋은 배합인 모르타르 배합과 다음으로 좋은 시멘트 페이스트 배합을 선정하였으며 이를 토대로 슬럼프 값을 측정하였다. 측정 결과 <표 2-2-11>과 같이 시멘트 페이스트의 슬럼프 값은 160mm로 측정되었으며 모르타르의 슬럼프 값은 <표 2-2-12>와 같이 164mm로 측정되었다. 이후 정해진 배합비를 적용하여 28일 압축강도를 측정하였다. W/B 28% 시멘트페이스트의 압축강도는 59.48MPa이며 W/B 60% 모르타르의 압축강도는 24.02MPa로 측정되었다.

<표 2-2-11> 시멘트페이스트 배합비 및 슬럼프

Division	W/B(%)	Unit Mass(kg/m ³)		Slump(mm)
		w	c	
portland(28%)	28	224	800	160

<표 2-2-12> 모르타르 배합비 및 슬럼프

Division	W/B(%)	Unit Mass(kg/m ³)			Slump(mm)
		w	c	s	
portland(60%)	60	108	180	540	164

② 첨가제 실험

- 첨가제 실험에서는 혼합 시멘트 페이스트 배합과 혼합 시멘트 모르타르 배합으로 두 가지 배합을 도출하며 플라이 애시 40% 첨가를 고정한 후 W/B를 변경하여 배합비를 도출하는 방법으로 실험을 진행하였다. 또한, 앞서 수행한 기초실험과 마찬가지로 성형성을 위해 슬럼프 값 160mm를 만족하는 배합비를 도출하였으며 각각의 배합비별 압축강도를 측정하였다. 본 첨가제 실험을 통해 얻어진 배합비는 W/B 30%의 혼합 시멘트 페이스트 배합과 유동화제 1%의 혼합 모르타르 배합이다. <표 2-2-13>은 혼합 시멘트 페이스트 배합이며 <표 2-2-14>는 혼합 시멘트 모르타르 배합비 및 슬럼프를 나타낸 것이다.

<표 2-2-13> 혼합 시멘트 페이스트 배합비 및 슬럼프 값

Division	W/B(%)	Unit Mass(kg/m ³)			Slump(mm)
		w	c	FA(40%)	
Portland(30%)	30	240	480	320	162

<표 2-2-14> 혼합 시멘트 모르타르 배합비 및 슬럼프 값

Division	W/B(%)	Unit Mass(kg/m ³)					Slump(mm)
		w	c	FA(40%)	s	pva(3%)	
Superplasticizer(0.5%)	60	120	120	80	600	3.6	157
Superplasticizer(0.8%)							161
Superplasticizer(1%)							170
Portland (30%)							

- 혼합 시멘트 페이스트의 경우 플라이 애시 첨가에 따라 슬럼프 값을 만족시키기 위해 W/B를 변경하였다. 그러나 혼합 시멘트 모르타르의 경우 플라이 애시를 첨가하였을 때 160mm를 만족하는 W/B 값으로 변경할 수 없어 유동화제를 추가하여 W/B를 선정하였다.
- 혼합 시멘트 모르타르의 슬럼프 값을 만족시키기 위해 0.5%, 0.8%, 1.0% 순으로 유동화제를 첨가하여 실험한 결과 0.8%의 유동화제는 실험과정에서 다량의 배합재료가 들어갈수록 적정 슬럼프 값을 측정하기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 슬럼프 값을 만족시키며 재료량의 변화에 영향이 없는 유동화제 1% 배합비를 선정하였다.

③ FCP 제작 및 오차율 측정 방법

- FCP 제작 및 오차율 측정 실험에서는 혼합 시멘트 페이스트 W/B 30%의 배합과 혼합 모르타르 유동화제 1%의 배합으로 FCP 제작 실험을 진행한다. FCP를 제작하기 위해 1차 실험과 동일한 CNC machine을 사용한다. <표 2-2-15>와 <표 2-2-16>은 혼합 시멘트 페이스트 배합비와 혼합 모르타르 배합비로 FCP 제작을 위한 것이다.

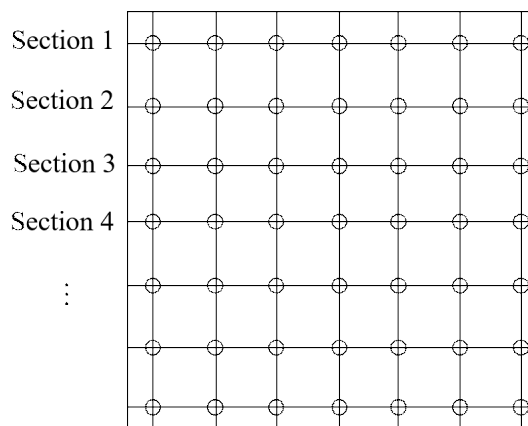
<표 2-2-15> 혼합시멘트 페이스트의 배합비

Division	W/B(%)	Unit Mass(kg/m ³)		
		w	c	FA(40%)
Portland (30%)	30	8280	16560	11040

<표 2-2-16> 혼합 모르타르 배합비

Division	W/B(%)	Unit Mass(kg/m ³)				
		w	c	FA(40%)	s	PVA (3%)
Superpla Sticizer (1%)	60	6480	6480	4320	32400	194

- 두께 측정 방법은 1차 실험과 같으며 <그림 2-2-62>와 같이 1차 실험보다 정밀한 측정을 위해 FCP에 하나의 Section당 7개의 구멍을 내고 레이저레벨기로 두께를 측정한다. FCP 두께 측정을 위한 노드는 49개소의 위치를 표현하여 각 구간마다 측정되는 결과 값을 이용해 구간별 오차율을 분석한다.



<그림 2-2-62> CNC machine의 노드 구역

④ FCP의 오차율 측정

- 혼합 시멘트 페이스트 FCP의 제작 두께는 일반적으로 사용되어지고 있는 50mm로 실험을 진행하였으며 오차율은 3%를 목표로 하였다. Section 1 ~ 7까지 FCP 두께의 평균값을 측정한 결과 각각 49mm, 54.8mm, 56mm, 55.7mm, 54.8mm, 51.8mm, 48.9mm 로 측정되었다. FCP의 두께는 변위가 생기는 Section 3과 Section 4에서 오차율이 평균 5%로 높게 측정되었다. <표 2-2-17>은 패널의 구간별 오차율 측정값을 나타낸 표이다.

<표 2-2-17> 혼합 시멘트 페이스트 FCP의 두께 측정 결과(mm)

	Section							All
	1	2	3	4	5	6	7	
Min.	0.0	4.0	3.0	5.0	4.0	0.0	0.0	0.0
Max.	3.0	6.0	8.0	7.0	6.0	5.0	3.0	8.0
Avg.	1.6	4.9	6.0	5.7	4.9	1.9	1.4	3.8
V.	4.2	0.6	0.1	0.2	0.6	3.7	4.5	1.9
S.D.	2.1	0.8	0.3	0.5	0.8	1.9	2.1	1.2

- 혼합 모르타르의 FCP를 제작하여 CNC machine의 구간별 변위 차 및 측정 방법은 앞선 실험과 동일한 방식으로 진행하였다. 제작된 FCP의 구간별 평균값을 측정한 결과 <표 2-2-18>과 같이 Section 1 ~ 7까지 각각 48.6mm, 52.6mm, 53.7mm, 53.9mm, 52.6mm, 51.7mm, 49.9mm로 측정되었다. 앞서 수행한 혼합 시멘트 페이스트 FCP의 오차율 실험과 달리 양생과정에서 차이를 두었으며 결과적으로 오차율이 대체로 3% 이내로 측정되었다.

<표 2-2-18> 혼합 모르타르 FCP의 두께 측정 결과(mm)

	Section							All
	1	2	3	4	5	6	7	
Min.	1.0	2.0	3.0	4.0	3.0	0.0	0.0	0.0
Max.	1.0	3.0	4.0	5.0	3.0	0.0	1.0	5.0
Avg.	1.4	2.7	3.7	4.0	1.4	1.6	0.6	2.2
V.	4.5	2.6	1.6	1.3	4.5	4.2	5.8	3.5
S.D.	2.1	1.6	1.3	1.1	2.1	2.0	2.4	1.8

⑤ 2차 실험 분석

- 2차 실험에서는 1차 실험에서 수행한 배합비를 바탕으로 혼합 시멘트 페이스트와 혼합 모르타르 유동화제 1% 배합을 선정하였다. 두 배합은 모두 압축강도와 흡수율을 만족하였다. 또한, FCP 제작 및 두께의 오차율 측정 결과 혼합 시멘트 페이스트의 경우 오차율이 5% 내외이며 혼합 모르타르 유동화제 1%의 경우 오차율이 3% 이내로 측정되었다. 이를 통해 FCP 제작 시 오차율은 사용재료의 특성과 재료들 간의 화학적 특성뿐만 아니라 FCP를 양생하는 방법이 보다 중요한 것으로 판단된다.

(라) FCP 최적 콘크리트 배합비의 검증 방법론 및 도구

- 본 연구의 기술 수준은 실험실 성능평가 단계로 연구실에서 실험이 가능한 수준이므로 완전한 최적 배합비를 도출할 수 없다. 본 연구에서는 FCP의 성형성을 고려하여 실험단계의 최적 콘

크리트 배합비를 도출하였다. 그러나 본 최적 콘크리트 배합비의 신뢰성을 검증하기 위한 구체적인 시험방법 및 규정이 없다. 본 연구는 이를 위한 검증방법으로 성형성을 확인하기 위해 FCP의 형상오차 측정방법을 사용한다. 제작된 FCP의 형상을 비교하여 오차를 측정하고 허용 오차 범위를 만족하는지 확인한다. 그러나 국내 비정형 패널의 허용오차에 대한 정확한 규정이 없다. 이를 위해 본 연구는 건축법에 명시되어 있는 건축물관련 건축기준의 벽체두께 허용 오차인 3% 이내를 FCP 제작 허용오차의 기준으로 정립하였다.

- 허용오차 3% 이내 기준에 따라 FCP의 오차 측정방식은 두께 측정 방법과 3D 스캔 방법이 있다. 두께 측정 방법은 패널 상부면에 구간별 노드를 지정하고 천공한 후 노드별 두께를 측정하여 오차를 확인하는 것이다. 3D 스캔 방법은 3D 스캐너(GO!SCANSARK)를 통해 제작된 FCP를 스캔하고 품질검사 프로그램(VXModel, VXInspect)을 통해 설계형상을 바탕으로 스캔 데이터의 오차를 비교하는 것이다. 두께 측정 방법은 노드별 두께를 측정하기 때문에 패널을 천공해야 하며 모든 구간의 오차를 확인할 수 없다. 그러나 3D 스캔 방법은 설계형상 대비 제작된 형상을 비교하기 때문에 모든 구간에서의 오차를 확인할 수 있다. 따라서 3D 스캔 방법은 두께 측정 방법보다 정확하며 이 방법은 오차 측정에 있어 가장 적합한 방법 및 도구인 것으로 판단된다.
- 본 연구에서 선정한 3D 스캔 방법은 형상의 오차만 확인할 수 있으며 FCP의 성능을 검증하기 위해 추가적인 평가 항목과 이에 대한 검증방법이 필요하다. 이는 비정형 건축이 점차 대중화됨에 따라 규정에 대한 기준이 형성될 것으로 판단된다.

(2) FCP 생산을 위한 거푸집 재료

(가) 거푸집에 사용되는 재료 선정

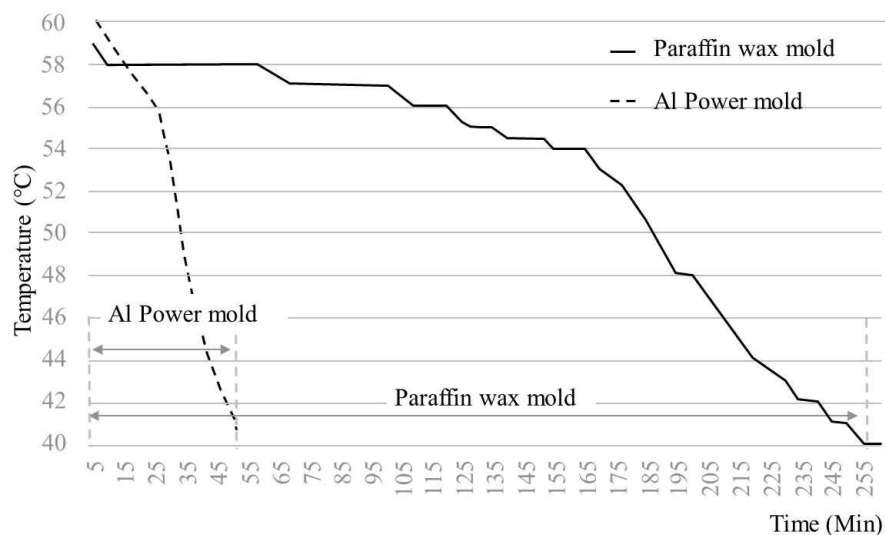
- 두 차례의 배합 실험 결과 비정형 콘크리트 패널의 거푸집에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다. 비정형 거푸집은 기존에 사용되는 거푸집보다 3~10배 높은 가격이 소비된다. 이는 FCP의 형상이 모두 다르며 거푸집을 제작하기 위해 금속, 목재 및 합성수지 등 다양한 재료가 쓰이며 제작 과정이 복잡하기 때문이다. 또한, 재사용이 불가능하여 사용된 거푸집은 폐기물이 되기 때문에 이는 처리하는 과정에서 CO₂의 배출량이 크다. 따라서 친환경 건축을 실현하기 위해 새로운 FCP 거푸집이 요구된다. 본 연구는 이러한 필요성에 따라 PCM 소재의 거푸집 제작을 해결방안으로 제시한다.
- PCM 거푸집은 다양한 형태로 생산될 수 있으나 PCM 거푸집은 이를 냉각하기 위해 오랜 시간과 많은 에너지가 필요하며 강도가 낮기 때문에 콘크리트를 타설할 때 거푸집이 찌그러지거나 가라앉을 수 있다. 이는 FCP의 정밀한 형상 구현을 어렵게 한다. 따라서 PCM 거푸집의 성능을 향상시키기 위해 열전도율이 뛰어나며 가벼운 알루미늄 파우더를 재료로 선택하였다.
- 본 연구에서는 알루미늄 파우더와 PCM인 파라핀 왁스를 혼합하여 FCP 거푸집을 개발하였다. 알루미늄 파우더 거푸집은 가열된 상태에서는 액체 상태이기 때문에 CNC machine에 사용할 경우 모든 FCP의 형상 구현이 가능하다. 이 후 액체 상태에서 냉각될 시 고체상태로 바뀌며 견고한 거푸집이 된다. 알루미늄 파우더 거푸집은 열전도율이 높아 이전의 높은 냉각 에너지 소비와 긴 냉각시간 문제점을 해결하였다.
- <표 2-2-19>와 같이 알루미늄 파우더는 열전도율이 높기 때문에 높은 냉각 에너지 소비와 긴 냉각시간의 문제점을 해결할 수 있다.

<표 2-2-19> 거푸집의 재료적 특성

Materials	Characteristics
Paraffin wax	- 결정화 효과로 인하여 냉각 시 에너지 소비 및 냉각 시간의 증가
	- 콘크리트 타설로 인한 압축으로 변형의 발생
	- 자유로운 형태의 제작이 가능하며 동결 후 이동이 가능
Powder (sand, minerals, etc)	- 용융이나 냉각이 필요 없기 때문에 에너지 소비가 거의 없음
	- 거푸집을 반영구적으로 재사용이 가능
	- 형태는 쉽게 부서지거나 변형됨
Powder + Paraffin wax	- 거푸집의 이동이 불가
	- 거푸집을 반영구적으로 재사용이 가능
	- 자유로운 형태의 제작이 가능하며 동결 후 이동이 가능
	- 콘크리트 타설로 인한 압축으로 변형의 발생이 없음
	- 용융 및 냉각에는 에너지가 필요함

(나) 거푸집의 온도변화량 비교 분석

- <그림 2-2-63>과 같이 파라핀 왁스 거푸집과 알루미늄 파우더 거푸집의 온도 그래프에는 차이가 있다. 가열된 60°C의 냉각 시간을 파라핀 왁스가 응결된 온도(40°C)와 비교했을 때 냉각 단계에서 분말 기반 재료와 파라핀 왁스는 약 5배 이상 차이가 났다. 이러한 결과는 CNC machine이 기존 방식 보다 동일한 시간 내에 5배 더 많은 거푸집을 만들 수 있다는 것을 보여준다.



<그림 2-2-63> 거푸집의 온도 변화량

(다) 거푸집의 에너지 효율 및 CO₂ 배출량 비교 분석

- PCM 거푸집 1m²를 가열하려면 3.96kWh가 필요하다. 냉각기의 효율이 67%이고 열 손실

이 50%라고 가정하였을 때, 이 공정은 40°C에서 150L의 PCM 거푸집을 냉각하는데 11.88kWh의 전력이 필요하다. 동일한 방법을 사용하여 알루미늄 파우더 거푸집 1m²를 가열 및 냉각하는 데 필요한 에너지는 각각 3.43kWh 및 13.71kWh이다. 따라서 PCM 거푸집에 비해 알루미늄 파우더 거푸집은 약 2.1kWh의 에너지 절감 효과가 있는 것으로 도출되었다.

- 본 연구에서는 PCM 및 알루미늄 파우더 거푸집과 기존 방법의 에너지 소비량과 비교하여 거푸집 제작 전 과정의 CO₂ 배출량을 평가했다. PCM 거푸집은 반영구적으로 사용이 가능하여 CO₂ 배출량은 150ℓ의 파라핀 왁스를 기준으로 산정했다. 또한, 1m²의 FCP가 생산될 때마다 150ℓ의 파라핀 왁스를 80°C까지 가열하고 40°C로 냉각하는 과정을 반복하였다. 이러한 과정에서 총 전기 에너지를 분석한 결과 PCM 거푸집은 총 1,584kWh, 알루미늄 파우더 거푸집은 1,371kWh의 전력이 사용되었다. 0.424kg-CO₂ / kWh의 계수를 사용하여 PCM 거푸집 및 알루미늄 파우더 거푸집에 대해 각각 1069.6kg-CO₂ 및 1065.83kg-CO₂인 총 CO₂ 배출량을 추정하였다. 이는 기존 거푸집과 비교하여 배출량을 50 % 미만으로 감소하였다.
- 알루미늄 파우더 거푸집은 열전도율이 높아 냉각 에너지를 절약하며 시간을 단축할 수 있다. 알루미늄 파우더 거푸집의 표면을 냉각한 다음 응결시켜 열차단을 방지하여 냉각 에너지 소비를 줄일 수 있다. 파라핀 왁스만으로 만든 거푸집은 총 1,584kWh의 전력이 필요하며 알루미늄 거푸집은 1,371kWh의 전력이 필요하다. 이는 전력 소비를 14.3 % 줄였다. PCM 거푸집과 알루미늄 파우더 거푸집의 CO₂ 배출량은 각각 1069.6kg-CO₂ 및 1065.83kg-CO₂이며 이는 기존의 목재 거푸집(2226kg-CO₂) 사용에 비해 50 % 감소한 것을 나타낸다. 일회용 목재 거푸집을 제거한 후 발생하는 폐기물을 고려할 때 폐기물을 발생시키지 않는 알루미늄 파우더 거푸집의 CO₂ 배출량이 더 감소하였다. 알루미늄 파우더 거푸집은 기존 거푸집에 비해 에너지 소비와 CO₂ 배출량을 줄일 수 있다. 본 연구에서 개발한 알루미늄 파우더 기반 거푸집은 비정형 콘크리트 건물 건설의 경제적 타당성을 높이고 에너지 소비와 CO₂ 배출량을 줄이는 데 사용될 수 있으며 이는 다양한 건물 설계를 실현하고 가치를 창출하는 데 도움이 될 것이다.

3. 연구 개발 성과

가. 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’

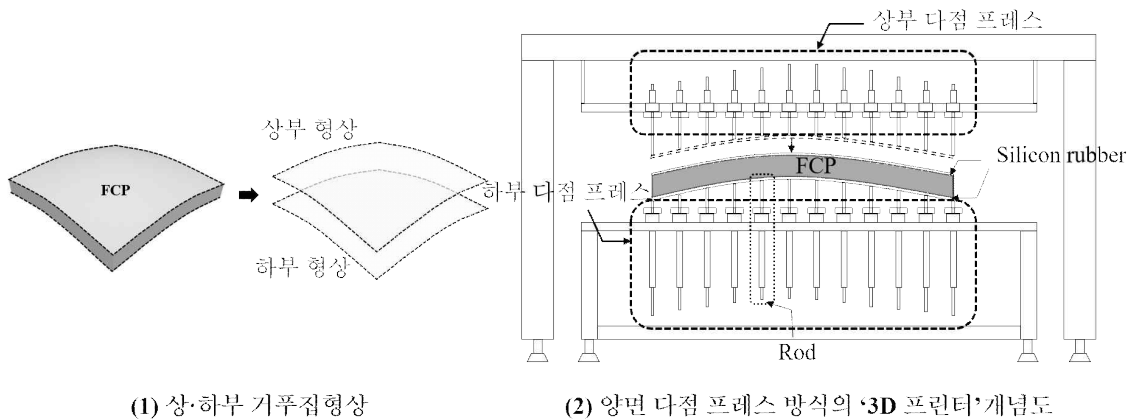
(1) 기술 요약 정보

(가) 핵심 개념

- 본 연구에서 개발한 ‘양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터’의 핵심적인 개념은 <그림 2-3-1>의 (1)과 같은 FCP의 상·하부 형상을 구현하기 위해 그림 (2)와 같은 양면 다점 프레스 방식으로 형상을 구현하는 개념이다. 본 연구의 연구책임자가 개발한 기존의 CNC(Computer Numerical Control) machine은 하부면의 곡률을 형성하는 기술로 FCP를 생산하기에는 한계가 있다. 반면에 본 연구에서 개발한 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’는 하부 성형 기술

인 CNC machine을 상부에도 적용한 기술로 FCP의 상·하부면의 곡률을 구현할 수 있다. 또한, 본 개발 장비는 기존의 장비 보다 정밀성, 다양성, 성형성이 우수한 품질의 FCP를 구현할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터'는 기존의 장비 및 기술의 한계를 해결할 수 있는 높은 진보성과 우월성을 갖추었으며 FCP 생산 분야에서의 독보적인 기술로써 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

(양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터'의 진보성, 우월성)



<그림 2-3-1> 산학 협력 계획

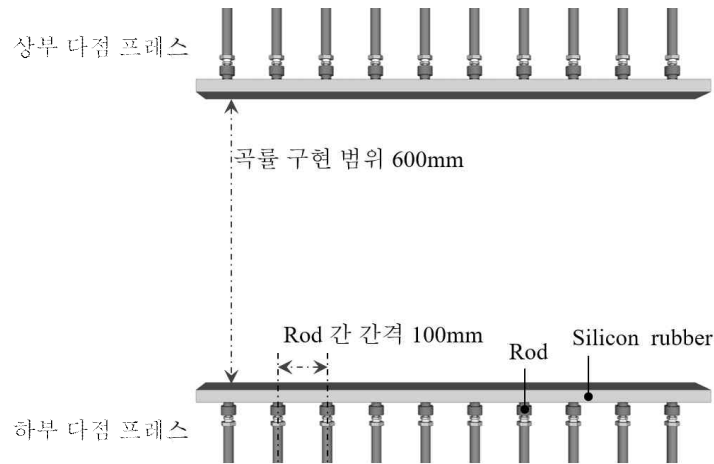
(나) 핵심 기술

- 본 연구에서 개발한 '양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터'의 핵심적인 기술은 크게 '① 상·하부 곡률 형성 기술'과 '② 연동운동 기술'로 구분되며 '① 상·하부 곡률 형성 기술'은 '㉠ 곡률 형성 기술', '㉡ Rod 제어 기술'로 구분된다.

① 상·하부 곡률 형성 기술

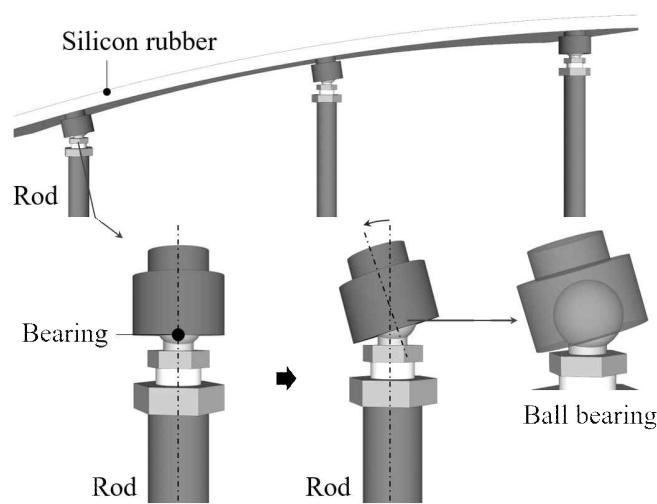
㉠ 곡률 형성 기술

- 본 연구에서는 '양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터' 장비를 통해 설계형상의 곡률을 정밀하게 구현하기 위한 기술 개발 연구를 수행하였다. 개발한 세부 기술은 'Rod 중심 간 간격 조절', 'Rod의 Bearing 결합구조', 'Rod와 Silicon rubber의 결합'이며 내용은 다음과 같다.
- '**Rod 중심 간 간격 조절**' 기술은 FCP의 오차를 최소화하기 위한 기술이다. 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터 장비'의 Rod는 Silicon rubber와 함께 결합되어 Rod의 움직임을 통해 FCP의 상·하부 곡면을 구현한다. 하지만 이 과정에서 Rod와 결합된 Silicon rubber는 재료적인 탄성이 강하여 완전한 설계형상의 곡선을 구현할 수 없는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 Rod간 간격을 줄여 오차를 최소화해야 한다. 하지만 Rod의 간격이 감소하여도 곡률의 크기에 따라 오차가 크게 나타날 수 있으며 이에 따라 적절한 Rod의 간격 선정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 이와 같은 연구 결과를 바탕으로 <그림 2-3-2>와 같이 적절한 Rod의 간격(100mm)과 FCP의 곡률 구현 범위(600mm)를 선정하였다.

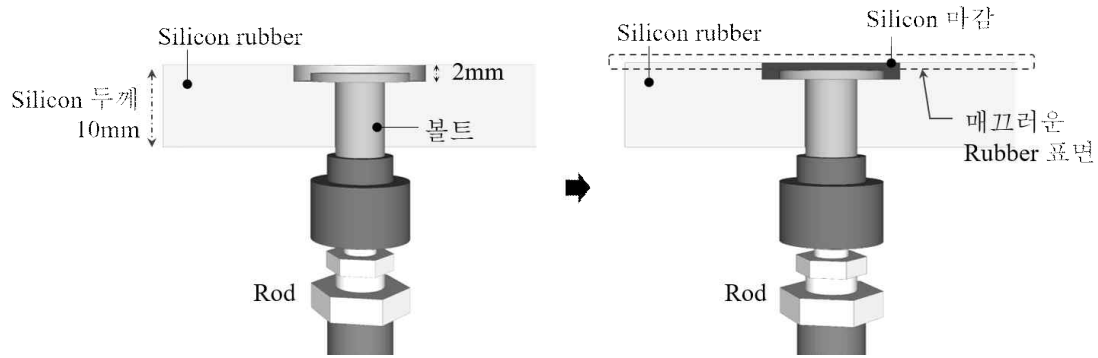


<그림 2-3-2> 양면 다점 프레스의 Rod간 간격 및 곡률 구현 범위

- ‘**Rod의 Bearing 결합구조**’ 기술은 FCP의 상·하부 형상 구현 시 자연스러운 곡선을 구현할 수 있는 기술이다. Rod는 Silicon rubber와 결합된 상태로 이동하면서 FCP의 상·하부 곡면을 구현한다. 그러나 Rod와 Rubber의 결합부가 수직으로 되어있어 Rod가 동작할 경우 Rubber가 뒤틀리면서 자연스러운 곡선을 구현할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 <그림 2-3-3>과 같이 Rod의 끝 부분에 Bearing을 적용하여 Rod가 회전할 수 있는 구조로 개발하였다.
- ‘**Rod와 Silicon rubber의 결합**’ 기술은 FCP 생산 시 매끄러운 곡면을 구현하는 기술이다. Rod와 Silicon rubber의 결합방식은 볼트접합으로 이는 기존 CNC machine에 사용되었던 방식이다. 그러나 결합 시 볼트가 Rubber위로 돌출되며 이는 FCP의 정밀한 형상을 구현하기 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 <그림 2-3-4>와 같이 볼트접합 방식에 Silicon 마감을 사용하였다. 본 연구에서 지정한 Silicon의 두께는 10mm이며 볼트접합 후 빈 공간을 Silicon으로 채우는 방식이다. 이를 통해 거푸집 역할을 하는 상·하부 Rubber의 표면을 매끄럽게 구현할 수 있다.



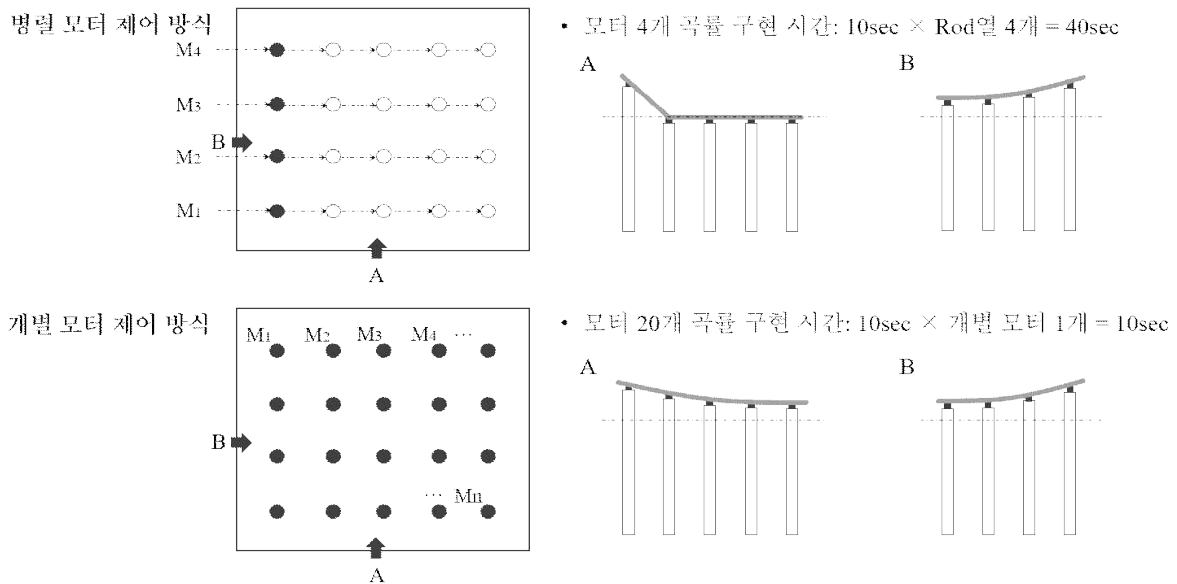
<그림 2-3-3> Rod의 Bearing 결합구조



<그림 2-3-4> Rod와 Silicon rubber의 결합

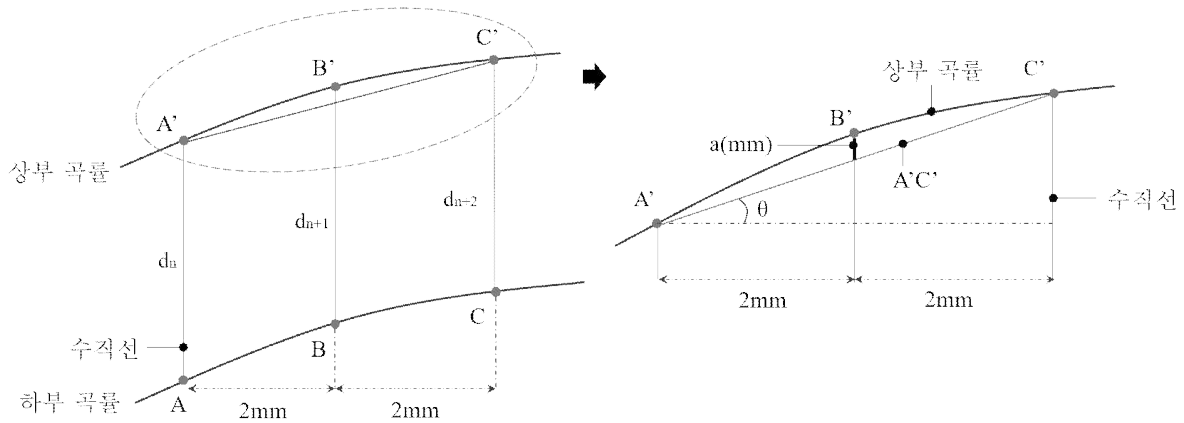
㉞ Rod 제어 기술

- 본 연구에서는 FCP의 설계형상 곡률을 정밀하게 구현하기 위해 Rod 제어 기술을 개발하였다. 세부 기술은 ‘Rod의 개별 제어 기술’과 ‘FCP 두께 유지 기술’이며 연구 내용은 다음과 같다.
- ‘**Rod의 개별 제어**’ 기술은 FCP의 제작 시간 단축과 형상 정밀도를 향상시키기 위한 기술이다. 기존의 CNC machine에 적용된 Rod 제어 기술은 병렬 모터 제어 방식으로 <그림 2-3-5>와 같이 한 열에 1개의 모터가 배치되는 것으로 열마다 모터가 동력을 전달하면서 순차적으로 Rod를 작동시키는 방식이다. 이러한 방식은 <그림 2-3-5>와 같이 형상구현 과정에서 Rod의 고장을 유발할 수 있으며 곡률 구현 시 긴 시간이 소요된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 개별 모터 제어방식을 적용하여 FCP 제작 시간을 획기적으로 단축하고 Rod의 고장을 사전에 방지할 수 있다.

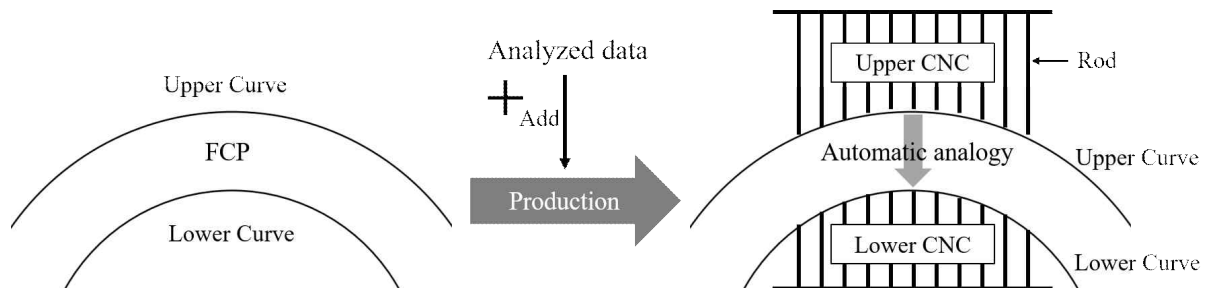


<그림 2-3-5> Rod의 개별 제어 기술

- ‘FCP 두께 유지’ 기술은 FCP의 제작 시간 단축과 형상 정밀도를 향상시키기 위한 기술이다. 이러한 기술 개발을 위해 본 연구는 <그림 2-3-6>과 같이 FCP의 일정한 두께를 유지하기 위한 데이터 수집방법을 제안하였다. FCP의 곡률을 따라 2mm간격으로 수직선을 그어 데이터를 수집하여 $a(\text{mm})$ 값과 $d_{n+1}(\text{mm})$ 값의 변화량을 분석한다. 이러한 방식을 통해 곡률에 따른 구간별 Rod의 정확한 이동거리 값 데이터를 얻을 수 있으며 <그림 2-3-7>과 같이 상부면의 곡률을 자동으로 유추할 수 있을 것으로 판단된다.



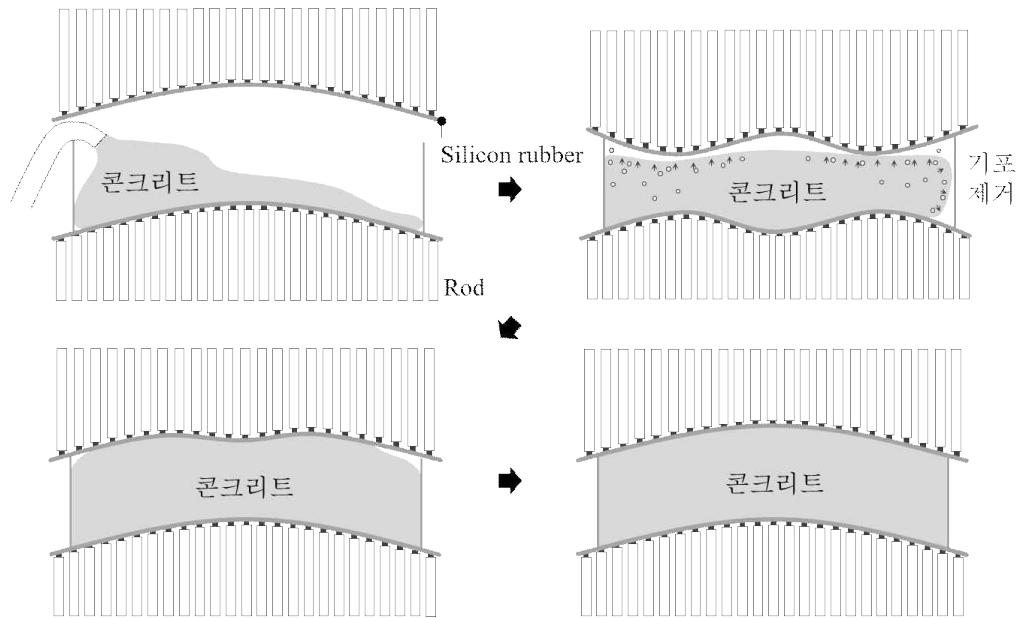
<그림 2-3-6> Rod의 FCP 두께 유지



<그림 2-3-7> FCP 곡률 Data의 자동 측정 방법

② 연동운동 기술

- 본 연구에서는 콘크리트 또는 모르타르 속에 있는 기포를 제거하며 진동, 충격을 통해 거푸집 내의 모든 공간에 재료가 잘 채워질 수 있도록 하는 연동운동 기술을 개발하였다. 연동운동 기술은 앞서 언급한 Rod의 개별제어방식을 통해 <그림 2-3-8>과 같은 과정으로 이루어진다. 추가적으로 이러한 연동운동을 통해 상부면의 미장을 할 수 있으며 Rod를 통해 적절한 압력을 주어 가압 양생할 수 있다.



<그림 2-3-8> Rod의 연동운동에 의한 자동성형 및 기포제거

(2) 논문 게재 성과

- 본 연구에서는 ‘양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터’의 기술개발 연구에 대한 성과 중 일부를 논문으로 작성하여 해외 저널에 게재하였다. 본 논문은 FCP의 일정한 두께를 유지하기 위한 데이터 수집방안을 제안하는 연구이며 상부면의 곡률을 자동으로 유추할 수 있는 기술의 개발에 핵심적인 역할을 할 수 있는 연구이다. 따라서 본 논문은 본 연구의 핵심적인 성과이다.

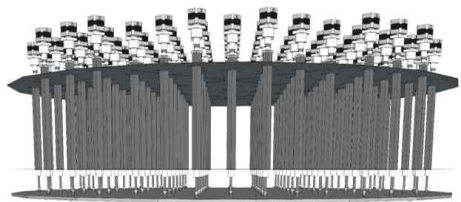
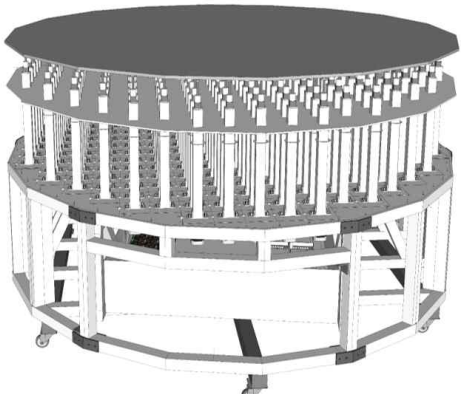
<표 2-3-1> 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’ 논문 게재 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	권/호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	Development of Operation Technology and Two-Sided Multi-Point Press Equipment for Improving Accuracy of FCP	TEST Engineering & Management	정경태	83	미국	TEST Engineering & Management	SCOPUS	2020/04

(3) 특허 성과

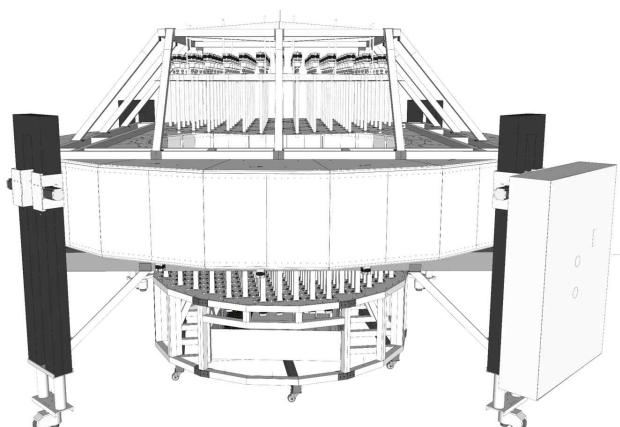
- 본 연구에서는 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’ 장비 및 기술에 관한 내용을 정리하여 특허를 출원하였으며 2021년 5월 특허등록 예정이다.

<표 2-3-2> 특허 출원 - 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’

특허출원일자	2020.11.12	
특허출원번호	10-2020-0150846	
발명의 명칭	비정형 콘크리트 패널 제작용 양면다점프레스장비	
출원인	한밭대학교 산학협력단	
출원국	대한민국	

- 본 연구에서는 개발하는 최종장비(FCP 제작용 3D 프린팅 장비)의 기술과 FCP 제작방법을 정리하여 특허를 출원하였으며 ‘특허등록’이라는 성과를 달성하였다.

<표 2-3-3> 특허 출원 - FCP 제작용 3D 프린팅 장비

특허출원일자	2020.09.08	
특허출원번호	10-2020-0114329	
발명의 명칭	비정형 패널 자동 제조장치 및 그의 제조방법	
출원인	한밭대학교 산학협력단	
출원국	대한민국	

○ 본 연구에서는 FCP 제작 시 FCP의 형상데이터 입력을 통해 자동으로 제작 데이터를 추출하고 Rod를 구동시키는 일련의 프로세스 개발에 관한 추가적인 연구를 수행하였다. 본 연구진은 이에 대한 기술을 정리하여 특허를 출원하였으며 2021년 5월 특허등록 예정이다.

<표 2-3-4> 특허 출원 - 비정형 콘크리트 패널 제작을 위한 수치추출 방법

특허출원일자	2020.11.12	FCP 제작을 위한 수치추출 프로세스	
특허출원번호	10-2020-0150818		
발명의 명칭	비정형 콘크리트 패널 제작을 위한 수치추출방법		
출원인	한밭대학교 산학협력단		
출원국	대한민국		

(4) 시작품 제작 성과

○ 본 연구에서는 <그림 2-3-9>와 같이 상·하부 다발 형태로 구성된 Rod를 통해 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터' 장비를 시작품으로 구현하였다. 본 연구진은 장비의 작동실험과 측면형상 제어장비와 연계구동을 고려한 FCP 제작 실험 계획을 수립하고 있다. 또한 본 연구진은 과제종료 이후에도 지속적인 후속 연구를 수행할 계획이다. 이를 통해 본 개발 장비의 기술 성숙도를 향상시킬 수 있으며 기존 장비들과는 다른 독보적인 기술을 갖춤으로써 비정형 건축 분야에서의 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.



<그림 2-3-9> 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터'

나. 측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술

(1) 핵심 기술 요약 정보

(가) 측면형상 제어장비

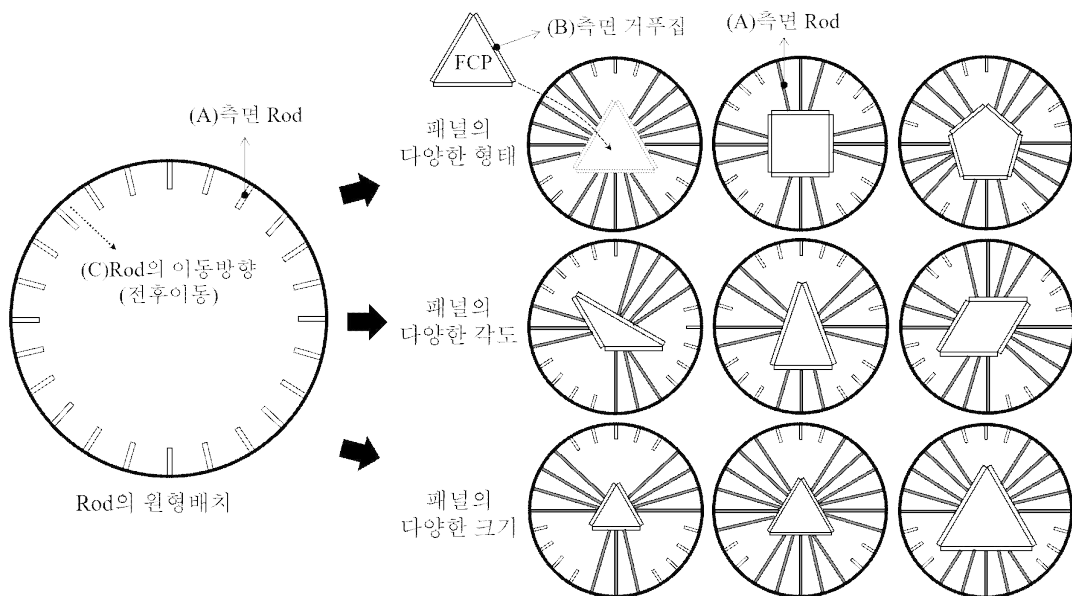
① 핵심 개념

- 본 연구에서 개발한 ‘측면형상 제어장비’의 핵심적인 개념은 <그림 2-3-10>과 같이 측면형상 구현을 위해 측면 Rod(A)를 원형으로 배치한 개념이다. 원형으로 배치된 측면 Rod(A)는 (C)와 같이 전후방향으로 이동하게 되며 이를 통해 삼각형, 사각형 등 다양한 형태를 갖는 FCP의 형상을 구현할 수 있다. 이후 측면 Rod가 구현한 형상에 맞게 측면 거푸집(B)이 부착되며 최종적으로 아래와 같은 삼각형 형태의 FCP 거푸집을 구현할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 측면형상 제어장비의 핵심 개념은 그 자체로 본 연구의 핵심적인 성과이다.

(측면형상 제어장비의 핵심 개념)

- 또한, 기존의 FCP(Free-form Concrete Panel)를 제작하기 위해 개발된 장비들은 단순히 FCP의 상·하부형상만을 구현할 수 있었다. 하지만 본 연구에서 개발한 측면형상 제어장비는 FCP의 측면형상을 정밀하게 구현할 수 있는 장비로 기존 장비들보다 진보성, 우월성을 갖는다. 따라서 본 연구에서 개발된 측면형상 제어장비는 FCP 생산 분야에서의 기초원천기술이 될 수 있으며 독보적인 기술로써 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

(측면형상 제어장비의 진보성, 우월성)

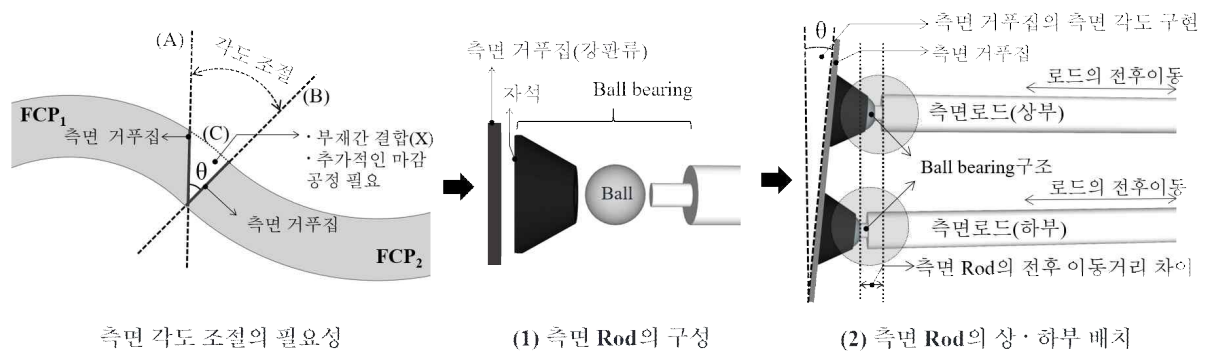


<그림 2-3-10> 측면형상 제어장비의 핵심개념

② 핵심 기술

㉓ FCP의 측면 각도 조절 기술

- 측면형상 제어장비의 핵심기술 중 하나인 ‘FCP의 측면 각도 기술’은 생산한 FCP 간의 완전한 결합을 가능하게 하는 기술이며 기술의 필요성 및 내용은 다음과 같다.
- <그림 2-3-11>과 같이 FCP₁과 FCP₂는 생산 후에 시공 시 결합되어야 한다. 하지만 FCP 생산 시 측면각도를 고려하지 않고 그림 3의 (A), (B)와 같이 다른 각도로 생산된다면 (C)와 같은 빈 공간이 발생하게 된다. 이로 인해 부재 간 결합을 완전하게 할 수 없으며 완전한 결합을 위한 추가적인 마감공정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 FCP 생산 시 사전에 FCP의 측면 각도를 조절할 수 있는 기술을 개발하였으며 이는 ‘측면 Rod의 구성’과 ‘측면 Rod의 상·하부 배치’를 통해 구현된다.
- 첫째로 본 연구에서는 <그림 2-3-11>의 (1)과 같이 측면 Rod의 끝 부분을 Ball bearing 구조와 자석이 부착된 구조로 설계하였다. Rod 끝 부분에 부착된 자석을 통해 강판인 측면 거푸집과 결합될 수 있으며 Ball bearing의 회전으로 측면 거푸집의 각도를 변화시킬 수 있다. 하지만 하나의 측면 Rod만으로는 측면 거푸집의 각도를 정밀하게 구현할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 <그림 2-3-11>의 (2)에 나타난 바와 같이 측면 Rod를 상·하부 배치한 형태로 설계하였다. 이를 통해 측면의 상·하부 Rod간의 이동거리의 차이를 발생시킬 수 있으며 측면 거푸집의 각도를 설계형상대로 정밀하게 구현할 수 있다.



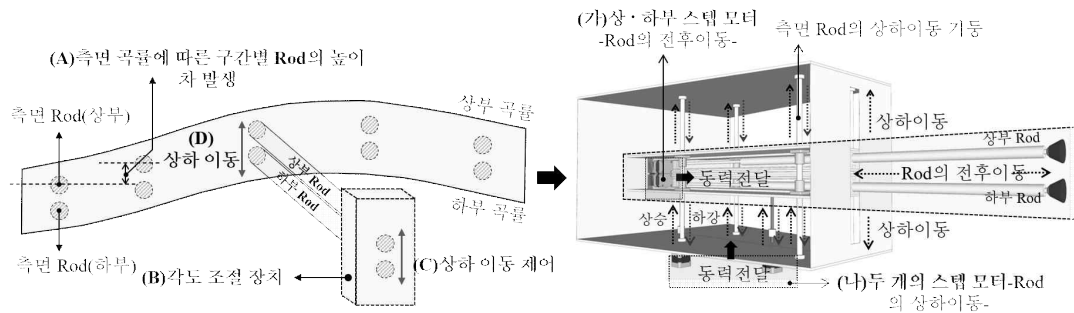
<그림 2-3-11> FCP의 측면 각도 조절 기술

㉔ 측면 거푸집지지 및 고정 기술

- 측면형상 제어장비의 핵심기술 중 하나인 ‘측면 거푸집지지 및 고정 기술’은 FCP의 측면 곡률에 따라 거푸집을 안정적으로 지지하고 고정하는 기술이며 기술의 필요성 및 내용은 다음과 같다.
- <그림 2-3-12>와 같이 FCP의 측면은 상·하부 곡률이 존재하기 때문에 측면 Rod(상·하부)와 측면 거푸집 결합 시 콘크리트의 측압에 대해 구간별로 측면 거푸집을 안정적으로 지지할 수 있어야 한다. 하지만 측면 거푸집을 안정적으로 지지하기 위해 <그림 2-3-12>의 (A)와 같은 구간별 Rod의 높이 차이가 발생한다. 따라서 측면 Rod(상·하부)는 측면 거푸집의 곡률에 따라 (D)와 같이 상하이동이 가능해야 한다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 <그림 2-3-12>의 (1)과 같이 측면 Rod의 상하 이동을 제어할 수 있는 각도 조절 장치(B)를 개

발하였다.

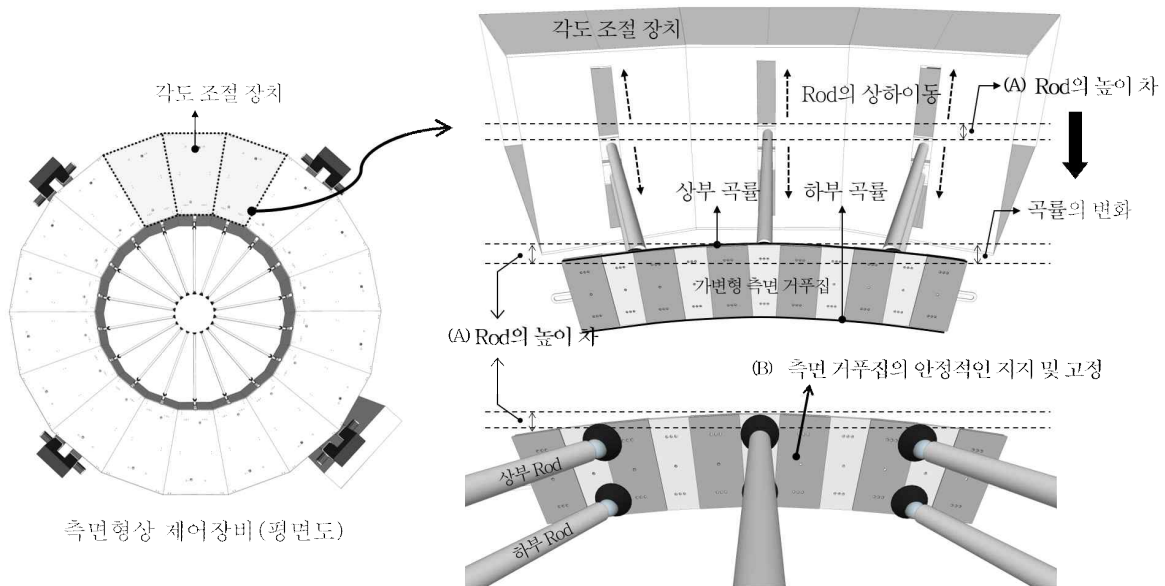
- 각도 조절 장치는 상·하부 Rod를 포함하며 이를 전후 이동시키는 (가)와 같은 상·하부 스텝 모터와 상하 이동 시키는 (나)와 같은 두 개의 스텝모터로 구성되어 있다. 이러한 스텝 모터를 통해 정밀하게 Rod를 제어할 수 있으며 <그림 2-3-13>의 (A)와 같은 Rod의 높이 차를 통해 측면 거푸집을 안정적으로 지지 및 고정 할 수 있다.



측면 거푸집 지지 및 고정의 필요성

(1) 각도조절장치 개발

<그림 2-3-12> 측면 거푸집지지 및 고정 기술



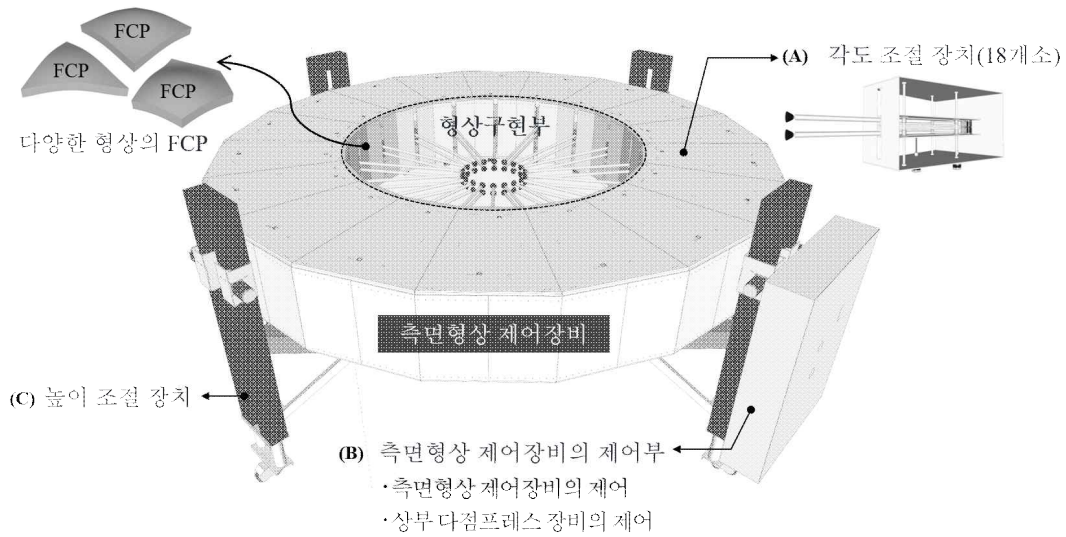
Rod 상하이동 제어를 통한 측면 곡률 구현의 예

<그림 2-3-13> 각도조절 장치의 측면 거푸집지지 및 고정의 예

③ 측면형상 제어장비의 구성

- 본 연구에서 개발한 측면형상 제어장비의 구성은 <그림 2-3-14>와 같다. 측면형상 제어장비는 18개의 각도 조절 장치(A)가 방사형으로 배치되어 있는 형태이며 장비의 높이를 조절할 수 있는 높이 조절 장치(C)와 측면형상 제어장비 및 상부 다점 프레스 장비를 제어하는 제어부로 구성되어 있다. 이러한 구성을 통해 측면형상 제어장비는 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린

터'와 연계구동하여 형상구현부에서 다양한 형상의 FCP를 생산할 수 있다.

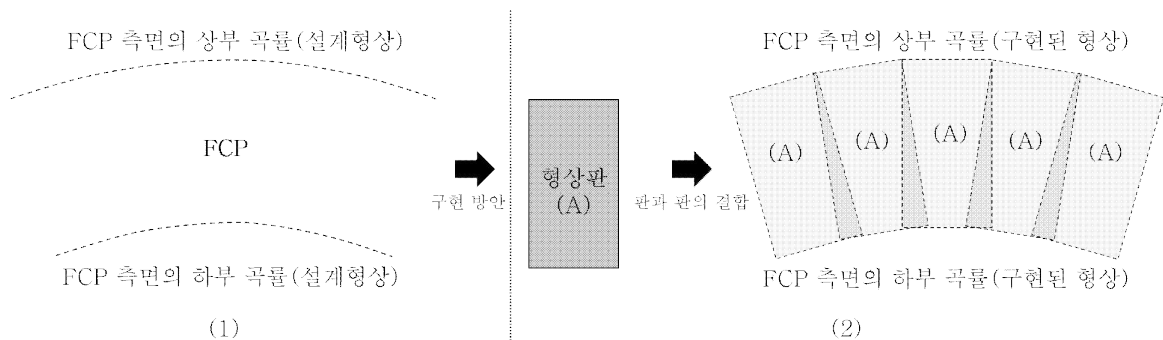


<그림 2-3-14> 측면형상 제어장비의 구성

(나) 가변형 측면 거푸집

① 핵심 개념 및 거푸집의 구성

- 본 연구에서 개발한 '가변형 측면 거푸집'의 핵심적인 개념은 <그림 2-3-15>의 (1)과 같은 상·하부 곡률을 구현하기 위해 직선 형태의 형상판(A)을 결합하여 곡률을 구현하는 개념이다.



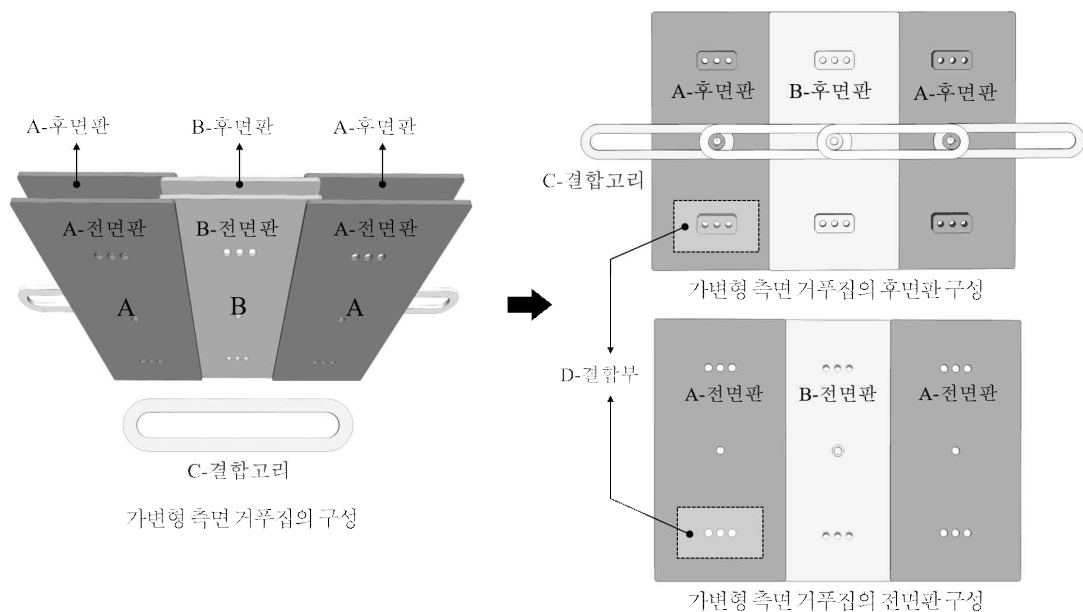
<그림 2-3-15> 가변형 측면 거푸집의 개념

- 본 연구에서는 이러한 개념을 구체화하여 <그림 2-3-16>과 같이 설계하였으며 이를 토대로 시작품을 제작하였다. 가변형 측면 거푸집은 A판, B판, A판, ..순으로 결합고리(C)를 통해 연결되며 연결하는 판의 수에 따라 거푸집의 길이를 조절할 수 있다. 또한, 가변형 측면 거푸집의 각 판은 전면판과 후면판으로 구성되며 각 판의 전면판과 후면판은 결합부(D)를 통해 결합된다. 가변형 측면 거푸집은 이와 같은 구성을 통해 <그림 2-3-17>과 같이 FCP 측면의 상·하부 곡률을 구현할 수 있다. 이러한 가변형 측면 거푸집의 핵심 개념과 구체화한 설계도, 시작품은 본 연구의 핵심적인 성과이다.

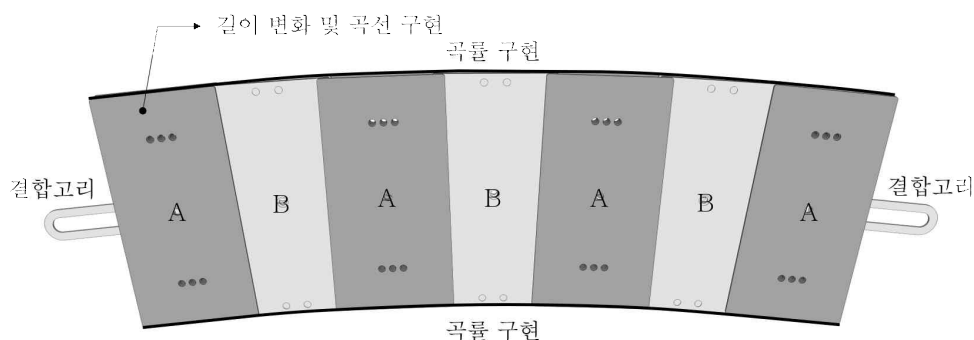
(가변형 측면 거푸집의 핵심 개념 및 구성)

- 본 연구에서 개발한 가변형 측면 거푸집은 기존의 재활용이 불가능한 목재, 스티로폼 등을 사용하는 비정형 거푸집과는 다르게 재활용이 가능한 거푸집이다. 따라서 가변형 측면 거푸집의 사용은 비정형 건축 공사에서 발생할 수 있는 건설폐기물과 거푸집 제작에 소요되는 인력의 낭비를 획기적으로 줄일 수 있으며 그에 따른 공사비를 절감할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 가변형 측면 거푸집이 측면형상 제어장비와 함께 사용되지만 곡선을 구현할 수 있는 특징이 있어 본 개발의 용도 이외의 비정형 건축 공사 등 다양한 건축 공사에 활용도가 상당히 높을 것으로 기대된다.

(가변형 측면 거푸집의 진보성, 재활용성, 활용성)



<그림 2-3-16> 가변형 측면 거푸집의 구성



<그림 2-3-17> 가변형 측면 거푸집의 개념

(2) 논문 게재 성과

(가) 측면형상 제어장비

- 본 연구에서는 ‘측면형상 제어장비’의 핵심적인 개념과 1차 개발 연구를 논문으로 작성하였다. 현재 JCEM(SCI)에 제출하여 검토완료 후 수정 중에 있으며 2021년 게재예정이다. 본 논문은 FCP의 다양성, 거푸집 재사용 가능성의 요구성능을 만족시킬 수 있는 측면형상 제어장비의 개발에 관한연구이며, 이를 검증하기 위해 1차 개발 장비를 통해 형상 구현 실험을 진행하여 FCP 형상 오차 기준을 만족하였다. 따라서 본 논문은 본 연구의 핵심적인 성과이다.

<표 2-3-5> 측면형상 제어장비의 논문 게재 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	권/호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	Development of Side Mold Control Equipment for Producing Free-form Concrete Panels	Journal of Civil Engineering and Management(JCEM)	윤지영	-	미국	American Society of Civil Engineers(ASCE)	SCI	예정

(나) 가변형 측면 거푸집

- 본 연구에서는 ‘가변형 측면 거푸집’의 기술개발 연구에 대한 성과 중 일부를 논문으로 작성하였으며 국내 학술발표대회에 참가하여 본 논문을 발표하였다. 본 논문은 FCP의 측면 형상 구현을 위한 가변형 측면 거푸집의 요구사항을 분석한 연구이며 가변형 측면 거푸집의 개발에 핵심적인 역할을 한 연구이다. 따라서 본 논문은 본 연구의 핵심적인 성과이다.

<표 2-3-6> 측면형상 제어장비의 논문 게재 성과

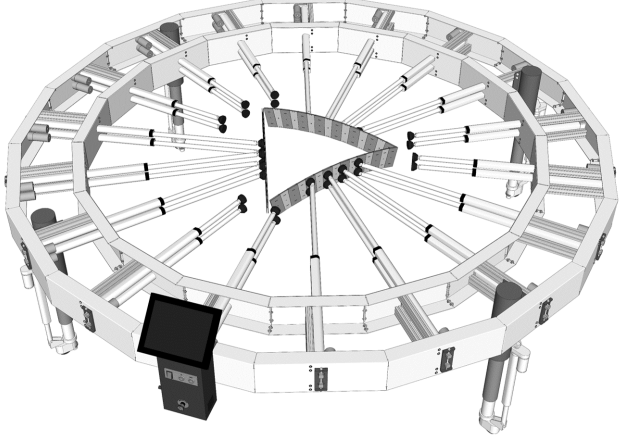
번호	논문명	학술지명	주저자명	권/호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	FCP(Free-form Concrete Panel)생산 장비용 측면 거푸집 개발을 위한 요구사항 분석연구	한국건축시공학회 학술발표대회 논문집	정경태	20(2)	대한민국	한국건축시공학회	비 SCI	2020/11

(3) 특허 성과

(가) 측면형상 제어장비

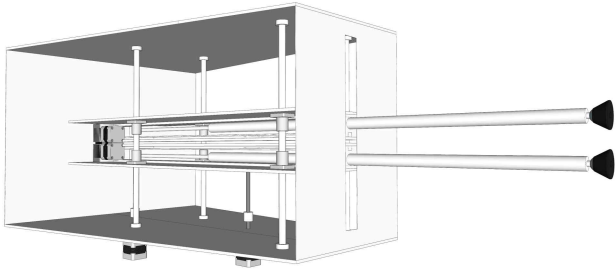
- 본 연구에서는 1차 개발한 측면형상 제어장비(1차 제작 장비)의 기술을 정리하여 특허를 출원하였으며 2021년 5월 특허등록 예정이다.

<표 2-3-7> 특허 출원 - 측면형상 제어장비(1차 제작 장비)

특허출원일자	2020.11.12	
특허출원번호	10-2020-0150832	
발명의 명칭	비정형 콘크리트 패널 측면형상 구현장치	
출원인	한밭대학교 산학협력단	
출원국	대한민국	

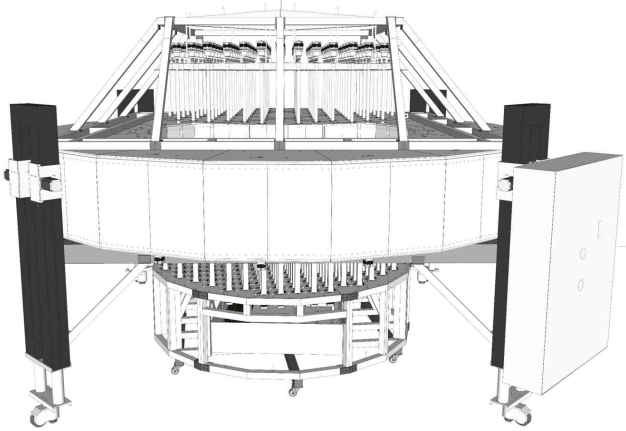
- 본 연구에서는 최종 개발한 측면형상 제어장비(최종 제작 장비)의 구성요소인 측면 각도 조절 장치의 기술을 정리하여 특허를 출원하였으며 ‘특허등록’이라는 성과를 달성하였다.

<표 2-3-8> 특허 출원 및 등록 - 측면 각도 조절 장치

특허출원일자	2020.06.24	
특허출원번호	10-2020-0077335	
특허등록일자	2020.12.04	
특허등록번호	10-2189419	
발명의 명칭	측면 거푸집의 각도 조절장치 및 그의 조립체	
출원인	한밭대학교 산학협력단	
출원국	대한민국	

- 본 연구에서는 개발하는 최종장비(FCP 제작용 3D 프린팅 장비)의 기술과 FCP 제작방법을 정리하여 특허를 출원하였으며 ‘특허등록’이라는 성과를 달성하였다.

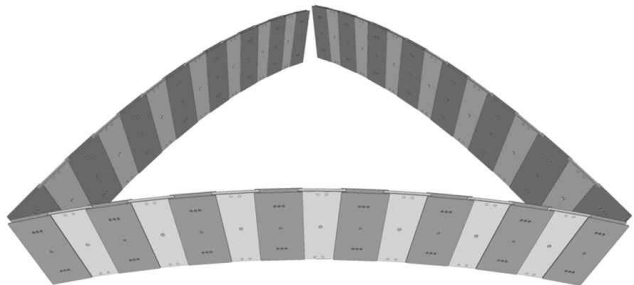
<표 2-3-9> 특허 출원 - FCP(Free-form Concrete Panel)제작용 3D 프린팅 장비(전체 장비)

특허출원일자	2020.09.08	
특허출원번호	10-2020-0114329	
발명의 명칭	비정형 패널 자동 제조장치 및 그의 제조방법	
출원인	한밭대학교 산학협력단	
출원국	대한민국	

(나) 가변형 측면 거푸집

- 본 연구에서는 개발한 가변형 측면 거푸집의 기술을 정리하여 특허를 출원하였으며 2021년 4월 특허 등록을 통해 본 발명에 대한 독점권을 획득하고 원천기술에 대한 지식재산권을 보호할 예정이다. 이러한 특허 출원을 통해 본 발명을 일반에 공개함으로써 비정형 건축 구현기술 발전에 큰 이바지를 할 것으로 기대된다.

<표 2-3-10> 특허 출원 - 가변형 측면 거푸집

특허출원일자	2020.06.22	
특허출원번호	10-2020-0075634	
발명의 명칭	가변형 측면 거푸집	
출원인	한밭대학교 산학협력단	
출원국	대한민국	

(4) 시작품 제작 성과

(가) 측면형상 제어장비

① 측면형상 제어장비(1차 제작)

- 본 연구에서는 측면 Rod를 원형으로 배치하는 개념의 적용성 및 실현가능성을 확인하기 위해 측면형상 제어장비를 1차 제작하였다. 본 연구진은 1차 제작한 장비를 통해 FCP를 시험 제작하였으며 그 결과 제작된 FCP는 3% 이내의 형상 오차율을 만족하였다. 또한 실험결과를 토대로 측면형상 제어장비의 개선사항을 도출하였으며 그에 따른 추가적인 기술 개발 연구 등을 수행하였다. 이처럼 본 연구에서는 측면형상 제어장비를 1차 제작함으로써 장비 개념에 대한 검증과 추가적인 기술개발 성과를 달성할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 1차

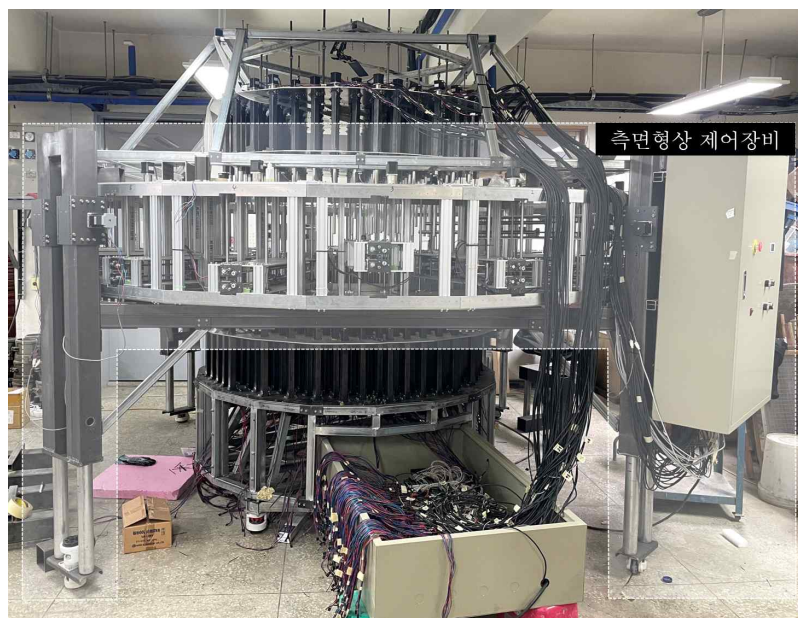
개발한 측면형상 제어장비는 본 연구의 핵심적인 연구 성과이다.



<그림 2-3-18> 측면형상 제어장비(1차 제작)

② 측면형상 제어장비(최종 제작)

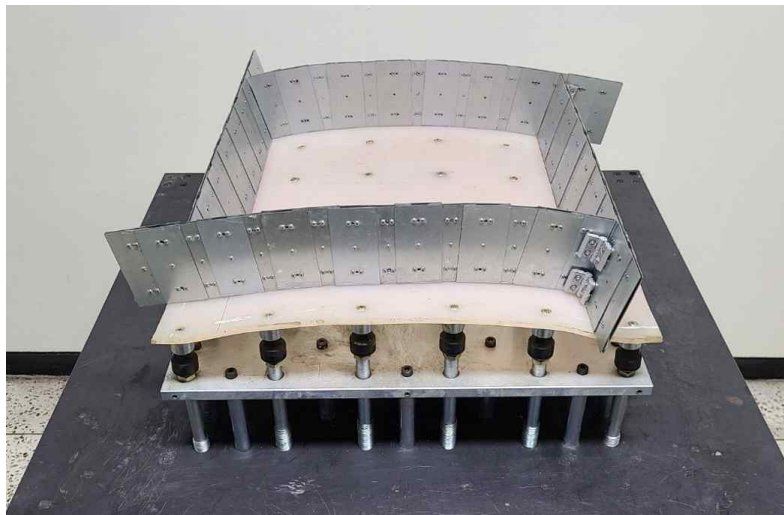
- 본 연구에서는 1차 제작한 측면형상 제어장비를 바탕으로 <그림 2-3-19>와 같은 측면형상 제어장비를 시작품으로 최종 구현하였으며 개발 장비는 사진 중앙부의 흰색 프레임으로 구분하였다. 본 연구진은 최종 제작한 측면형상 제어장비를 통한 FCP 제작 실험 계획을 수립하고 있다. 본 연구진은 과제종료 이후에도 측면형상 제어장비의 FCP 제작 실험 연구를 지속적으로 수행할 계획이다. 이를 통해 측면형상 제어장비에 관한 지속적인 기술개발이 이루어질 것이며 기존 장비들과는 다른 독보적인 기술을 갖추으로써 비정형 건축 분야에서의 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.



<그림 2-3-19> 측면형상 제어장비(최종 제작)

(나) 가변형 측면 거푸집

- 본 연구에서는 FCP의 측면 거푸집 형상을 구현할 수 있는 ‘가변형 측면 거푸집’을 제작하였다. 가변형 측면 거푸집은 측면형상 제어장비의 Rod와 결합되어 콘크리트 또는 모르타르 등 재료의 직접적인 타설면이 되는 측면 거푸집이다. 본 연구에서는 가변형 측면 거푸집을 사용하여 FCP 제작 실험을 진행하고 있으며 제작된 FCP의 오차를 측정하여 측면 거푸집의 형상구현능력을 검토할 계획이다. 본 연구진은 과제종료 이후에도 가변형 측면 거푸집 실험 연구를 지속적으로 수행할 계획이며 이러한 연구 결과를 통해 FCP의 완전한 측면 형상을 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 가변형 측면 거푸집은 곡선을 구현할 수 있는 특징이 있어 본 개발용도 이외의 비정형 건축 공사 등 다양한 건축 공사에서도 그 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다.



<그림 2-3-20> 가변형 측면 거푸집

다. FCP 및 생산용 거푸집 재료

(1) 핵심 연구 내용

(가) FCP 생산용 최적 콘크리트 배합비 도출

① FCP의 재료적 요구성능

- FCP를 시공할 경우 패널 제작의 오차로 인해 패널과 패널의 접합 부위에 결함이 발생하게 되어 다시 제작해야 하는 문제가 발생한다. 이러한 품질저하의 문제를 해결하기 위해서는 최적의 품질을 확보할 수 있는 FCP를 생산해야 한다. FCP 제작은 FCP의 다양한 형상으로 인해 거푸집의 재사용이 불가능하여 폐기물이 발생하여 공사기간, 공사비용을 증가시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구는 거푸집을 재사용할 수 있는 거푸집의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고품질의 FCP 제작을 위해 최적 배합비를 도출하며 FCP 제작 시 형상의 오차를 줄이기 위한 형상실험을 수행하며 재사용이 가능한 거푸집을 개발하였다.

(FCP 생산용 최적 콘크리트 배합비의 요구성능 - 성형성, 숙경성)

- 본 연구에서는 FCP 생산용 최적 콘크리트의 요구성능으로 성형성과 숙경성을 선정하였으며

이를 개선하기 위한 재료를 선정하여 두 차례의 실험으로 검증을 실시하였다. 검증을 통해 만족한 결과 값으로 FCP 생산용 최적 콘크리트 배합비를 도출하였다.

② 1차 실험

㉔ 재료 및 배합비 선정

- 성형성 실험은 잔골재를 사용하지 않은 보통 포틀랜드 시멘트(A)와 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트(B)의 배합비로 수행한다. 숙경성 실험은 붓사를 첨가하지 않은 인산나트륨 마그네시아 시멘트(C)와 붓사를 첨가한 인산나트륨 마그네시아 시멘트(D)의 배합비로 수행한다. A, B, C, D의 배합비는 <표 2-3-10>과 같다.

<표 2-3-10> 선정된 재료의 배합비

Division		W/B(%)	Unit mass (g)					
A	Portland(28%)	28	W			C		
			207.2			740		
B	Portland(60%)	60	W	C	S			
			90	150	450			
C	MgO(20)	20	D-MgO	W	Sodium phosphate			
			138.3	27.66	4840.5			
	MgO(50)	50		69.15				
D	Mgo(50)	50	D-MgO	W	Sodium phosphate	Borax	Fine aggregate	
			138.3	69.15	4840.5	13.83	414.9	

㉕ FCP 두께 측정 실험 및 오차율 분석

- 본 연구에서 실시한 실험에서는 성형성, 숙경성에 초점을 맞춰 FCP를 제작하였다. 본 실험은 경제적인 거푸집을 사용하기 위해 파라핀을 선정하여 CNC machine을 통해 거푸집을 제작하였다. CNC machine 변위의 경우 노드별 변위차가 15mm이하가 되도록 각 노드를 0mm, 15mm, 30mm, 45mm, 30mm, 15mm로 설정하였다.
- 오차율 실험은 제작한 FCP의 두께를 측정함으로 오차율을 분석한다. 두께측정 방법은 제작된 패널에 CNC machine에 36개 노드별 위치를 표시한 뒤 구멍을 뚫고 이를 통해 두께를 측정한 후 각 구간별 평균값을 계산하여 변위에 따른 두께 변화값을 측정한다.
- <표 2-3-11>은 잔골재를 사용하지 않은 보통 포틀랜드 시멘트(A), 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트(B), 붓사를 사용하지 않은 인산나트륨 마그네시아 시멘트(C), 붓사를 사용한 인산나트륨 마그네시아 시멘트(D)의 압축강도, 흡수율, 제작된 FCP의 두께 측정 오차율의 평균값을 나타낸 것이다.
- 흡수율과 오차율을 보았을 때 A,B,D는 KS F 4735의 기준을 만족한다. C는 다른 재료에 비해 흡수율이 높아 KS 기준을 만족하지 못한 것이라 판단된다. 모든 배합의 압축강도, 흡수율, 오차율을 비교하였을 때, B의 배합이 흡수율 KS기준을 만족하며 오차율이 가장 적으므로 콘크리트 형상 구현 성능이 가장 좋은 배합이라 판단된다.

<표 2-3-11> 배합별 실험 결과

	Compressive strength(MPa)	Absorption rate(%)	Error rate(%)
A	73.35	7.2	9.1
B	29.83	8.8	2.5
C	40.42	13.6	2.9
D	13.24	7.2	2.6

③ 2차 실험

㉔ 재료 및 배합비 선정

- 1차 실험을 통해 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트(모르타르)가 가장 좋은 배합비를 가진다는 결과를 도출하였다. 이에 본 연구에서는 1차 실험을 통해 도출된 배합비를 바탕으로 혼화재료를 첨가하여 최적의 배합비를 도출하며 FCP를 제작하여 오차율을 측정한다.
- 본 연구에서는 FCP 제작을 위한 적정 슬럼프 값 160mm를 만족하는 배합비를 도출하는데 목표를 두었으며 이를 토대로 실험을 진행했다. 본 연구에서 선정한 모르타르 배합은 1차 실험에서의 가장 좋은 배합인 모르타르 배합과 다음으로 좋은 시멘트 페이스트 배합을 선정하였다. 혼합 시멘트 페이스트의 경우 플라이 애시 첨가에 따라 슬럼프 값을 만족시키기 위해 W/B를 변경하였다. 그러나 혼합 시멘트 모르타르의 경우 플라이 애시를 첨가하였을 때 160mm를 만족하는 W/B 값으로 변경할 수 없어 유동화제를 추가하여 W/B를 선정하였다. 본 연구에서는 혼합 시멘트 모르타르의 슬럼프 값을 만족시키며 재료량의 변화에 영향이 없도록 하기 위해 유동화제 1% 첨가하여 배합비를 도출하였다.
- 각 배합에 따라 슬럼프 값을 측정한 결과 혼합 시멘트 페이스트(A)는 162mm로, 혼합 모르타르는 170mm로 측정되어 본 연구에서 제시한 기준을 만족하였다. <표 2-3-12>는 혼합 시멘트 페이스트(A)와 혼합 모르타르(B)의 배합비 및 슬럼프 값을 나타낸 것이다.

<표 2-3-12> 혼합시멘트 페이스트 및 혼합 모르타르의 배합비 및 슬럼프 값

Division		W/B(%)	Unit Mass(kg/m ³)					Slump(mm)
A	Portland(30%)	30	w	c	FA(40%)			162
			8280	16560	11040			
B	Superplaticizer(1%)	60	w	c	FA(40%)	s	pva(3%)	170
	Portland(30%)		6480	6480	4320	32400	194	

㉕ FCP 두께 측정 실험 및 오차율 분석

- 1차 실험보다 정밀한 측정을 위해 제작된 FCP에 49개소의 노트를 표시하고 레이저레벨기로 두께를 측정한다. 49개소의 위치를 표현하는 방식으로 각 구간마다 측정되는 결과 값을 이용하여 구간별 오차율을 분석한다. 혼합 시멘트 페이스트와 혼합 모르타르의 FCP 두께는 50mm로 실험을 진행하였으며 오차율의 기준은 3% 이내로 설정하였다.
- 2차 실험에서는 1차 실험에서 수행한 배합비를 바탕으로 혼합 시멘트 페이스트와 혼합 모르타르 유동화제 1% 배합을 선정하였다. 두 배합은 모두 압축강도와 흡수율을 만족하였다. 또한, FCP 제작 및 두께의 오차율 측정 결과 혼합 시멘트 페이스트의 경우 오차율이 5% 내외이며 혼합 모르타르 유동화제 1%의 경우 오차율이 3% 이내로 측정되었다. 이를 통해 FCP

제작 시 오차율은 사용재료의 특성과 재료들 간의 화학적 특성뿐만 아니라 FCP를 양생하는 방법이 보다 중요한 것으로 판단된다. <표 2-3-13>은 혼합 시멘트 페이스트(A)와 혼합 시멘트 모르타르(B)의 FCP 두께 측정 결과를 나타낸 것이다.

<표 2-3-13> 혼합 시멘트 페이스트와 혼합 시멘트 모르타르의 FCP 두께 측정 결과(mm)

		Section							
		1	2	3	4	5	6	7	All
A	Min.	0.0	4.0	3.0	5.0	4.0	0.0	0.0	0.0
	Max.	3.0	6.0	8.0	7.0	6.0	5.0	3.0	8.0
	Avg.	1.6	4.9	6.0	5.7	4.9	1.9	1.4	3.8
	V.	4.2	0.6	0.1	0.2	0.6	3.7	4.5	1.9
	S.D.	2.1	0.8	0.3	0.5	0.8	1.9	2.1	1.2
B	Min.	1.0	2.0	3.0	4.0	3.0	0.0	0.0	0.0
	Max.	1.0	3.0	4.0	5.0	3.0	0.0	1.0	5.0
	Avg.	1.4	2.7	3.7	4.0	1.4	1.6	0.6	2.2
	V.	4.5	2.6	1.6	1.3	4.5	4.2	5.8	3.5
	S.D.	2.1	1.6	1.3	1.1	2.1	2.0	2.4	1.8

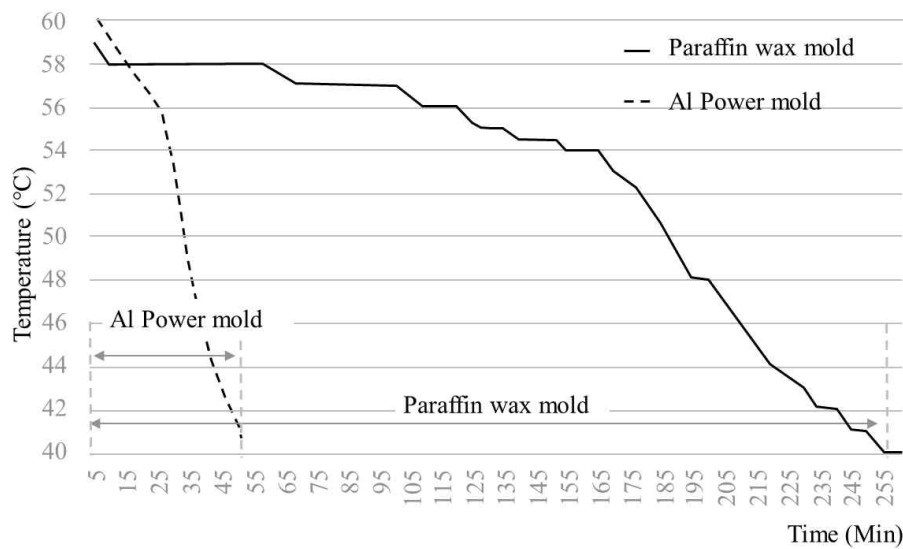
(가) FCP 생산을 위한 거푸집 재료

① 거푸집에 사용되는 재료 선정

- 두 차례의 배합 실험 결과 비정형 콘크리트 패널의 거푸집에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다. 비정형 거푸집은 기존에 사용되는 거푸집보다 3~10배 높은 가격이 소비된다. 이는 FCP의 형상이 모두 다르며 거푸집을 제작하기 위해 금속, 목재 및 합성수지 등 다양한 재료가 쓰이며 제작 과정이 복잡하기 때문이다. 또한, 재사용이 불가능하여 사용된 거푸집은 폐기물이 되기 때문에 이는 처리하는 과정에서 CO₂의 배출량이 크다. 따라서 친환경 건축을 실현하기 위해 새로운 FCP 거푸집이 요구된다. 본 연구는 이러한 필요성에 따라 PCM 소재의 거푸집 제작을 해결방안으로 제시한다.
- PCM 거푸집은 다양한 형태로 생산될 수 있으나 PCM 거푸집은 이를 냉각하기 위해 오랜 시간과 많은 에너지가 필요하며 강도가 낮기 때문에 콘크리트를 타설할 때 거푸집이 찌그러지거나 가라앉을 수 있다. 이는 FCP의 정밀한 형상 구현을 어렵게 한다. 따라서 PCM 거푸집의 성능을 향상시키기 위해 열전도율이 뛰어나며 가벼운 알루미늄 파우더를 재료로 선택하였다.

② 거푸집의 온도변화량 비교 분석

- <그림 2-2-63>과 같이 파라핀 왁스 거푸집과 알루미늄 파우더 거푸집의 온도 그래프에는 차이가 있다. 가열된 60°C의 냉각 시간을 파라핀 왁스가 응결된 온도(40°C)와 비교했을 때 냉각 단계에서 분말 기반 재료와 파라핀 왁스는 약 5배 이상 차이가 났다. 이러한 결과는 CNC machine이 기존 방식 보다 동일한 시간 내에 5배 더 많은 거푸집을 만들 수 있다는 것을 보여준다.



<그림 2-3-21> 거푸집의 온도 변화량

③ 거푸집의 에너지 효율 및 CO₂ 배출량 비교 분석

- 본 연구에서는 PCM 및 알루미늄 파우더 거푸집과 기존 방법의 에너지 소비량과 비교하여 거푸집 제작 전 과정의 CO₂ 배출량을 평가했다. PCM 거푸집은 반영구적으로 사용이 가능하여 CO₂ 배출량은 150ℓ의 파라핀 왁스를 기준으로 산정했다. 또한, 1m²의 FCP가 생산될 때마다 150ℓ의 파라핀 왁스를 80°C까지 가열하고 40°C로 냉각하는 과정을 반복하였다. 이러한 과정에서 총 전기 에너지를 분석한 결과 PCM 거푸집은 총 1,584kWh, 알루미늄 파우더 거푸집은 1,371kWh의 전력이 사용되었다. 이는 기존 거푸집과 비교하여 배출량을 분석한 결과 50 % 미만으로 감소하였다.
- 파라핀 왁스만으로 만든 거푸집은 총 1,584kWh의 전력이 필요하며 알루미늄 거푸집은 1,371kWh의 전력이 필요하다. 이는 전력 소비를 14.3% 줄였다. PCM 거푸집과 알루미늄 파우더 거푸집의 CO₂ 배출량은 각각 1069.6kg-CO₂ 및 1065.83kg-CO₂이며 이는 기존의 목재 거푸집(2226kg-CO₂) 사용에 비해 50 % 감소한 것을 나타낸다. 일회용 목재 거푸집을 제거한 후 발생하는 폐기물을 고려할 때 폐기물을 발생시키지 않는 알루미늄 파우더 거푸집의 CO₂ 배출량이 더 감소하였다. 알루미늄 파우더 거푸집은 기존 거푸집에 비해 에너지 소비와 CO₂ 배출량을 줄일 수 있다. 본 연구에서 개발한 알루미늄 파우더 기반 거푸집은 비정형 콘크리트 건물 건설의 경제적 타당성을 높이고 에너지 소비와 CO₂ 배출량을 줄이는 데 사용될 수 있으며 이는 다양한 건물 설계를 실현하고 가치를 창출하는 데 도움이 될 것이다.
- 두 차례의 실험을 통해 FCP 제작시 설계 형상을 구현할 수 있는 최적의 배합비를 도출하였다. 1차 실험에서 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 흡수율과 오차율의 실험값이 가장 작으며 FCP의 형상 구현 성능이 좋은 최적의 배합으로 판단되었다. 2차 실험에서는 혼합 시멘트 페이스트와 혼합 모르타르의 슬럼프 값을 만족하기 위해 유동화제를 첨가하여 배합비를 도출하였다. 두 배합 모두 강도적인 측면이나 성형성면을 만족하는 결과 값을 보였다.
- 배합비는 성형성을 만족하여 요구되는 FCP의 곡면을 구현할 수 있다. 배합비가 FCP 생산을

위해 연구되었지만 성형성을 요구하는 비정형 분야에서도 활용될 것으로 기대된다.

(2) 논문 게재 성과

- FCP의 요구성능인 성형성과 속경성을 만족하는 재료를 선정하여 비정형 패널의 형상과 품질확보를 위한 적정 배합비를 도출한다. 재료를 선정하여 성능 시험으로 배합비를 도출하며 오차율 분석 실험을 진행하여 최적의 배합비를 도출하였다. 본 연구에서는 최적의 배합비로 잔골재를 사용한 보통 포틀랜드 시멘트 배합비가 도출되었다. 이는 비정형 패널을 제작하는 건설현장에서 활용될 것으로 기대되며, 여러재료가 FCP에 활용될 것으로 기대된다.
- FCP의 요구성능인 성형성을 만족하기 위하여 기존에 사용되는 시멘트 페이스트와 모르타르에 플라이 애시, 유동화제 등 혼화재료를 혼합하여 배합비를 도출하였다. 오차율 분석 실험을 통해 두 재료 모두 KS기준을 만족하였으며 FCP 생산 시 본 배합비가 다양하게 활용될 것으로 기대된다.
- 기존에 비정형 거푸집의 문제점들을 파악하여 보완된 PCM 거푸집이 있다. 하지만 이는 냉각 과정에서 오랜 시간이 소요되어 많은 에너지가 필요하며 강도가 낮기 때문에 콘크리트 타설 중 파손될 우려가 있다. 본 연구는 이를 보완하기 위해 알루미늄 파우더를 혼합하여 알루미늄 파우더 거푸집을 개발하였다. 이는 CO₂의 방출량을 저감시키며 열전도율이 높은 알루미늄 사용으로 에너지 소모량이 낮아 적은 에너지로도 활용 가능하다. 또한, CO₂ 방출량 저감 및 에너지 절감으로 친환경 건축에서 활용되며 다양한 건물 설계를 실현하고 가치를 창출하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

<표 2-3-14> FCP 및 생산용 거푸집 재료의 논문 게재 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호*
1	비정형 패널의 형상품질확보를 위한 적정배합비 도출	JKIBC	김민식	19(5)	대한민국	한국건축시공학회	비 SCI	2019	2233-5706
2	비정형 형상구현을 위한 혼합모르타르 패널의 오차율 분석 연구	JKIBC	오영근	20(2)	대한민국	한국건축시공학회	비 SCI	2020	2233-5706
3	Energy and CO ₂ Reduction of Aluminum Powder Molds for Producing Free-Form Concrete Panels	Technology and Management for Sustainable Buildings and Infrastructures	이동훈	12(22)	스위스	MDPI	SCI	2020	2071-1050

4. 연구 결과

가. 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’

- 본 연구에서는 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’ 개발연구를 수행하였으며 연구의 성과 및 결과는 표 1에 나타낸 바와 같다.

<표 2-4-1> 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’ 연구의 개발 결과

연구 성과		연구 결과(성과의 의의)
양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’		본 연구에서는 FCP의 상·하부 형상을 구현할 수 있는 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’ 장비를 개발하였다. 기존에 본 연구의 연구책임자가 개발한 CNC(Computer Numerical Control) machine은 FCP 하부면의 형상만을 구현할 수 있는 장비로 한계가 있다. 하지만 본 개발 장비는 이러한 한계를 해결할 수 있어 기존의 장비보다 높은 진보성과 우월성을 갖추었다. 따라서 본 개발 장비는 FCP 생산 분야에서의 독보적인 기술로써 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.
기술 개발	곡률형성기술	본 연구에서 개발한 곡률 형성 기술은 FCP의 상·하부 형상을 정밀하게 구현할 수 있는 핵심적인 기술이다. 본 연구에서는 설계형상의 곡률을 형성하기 위한 기술로써 ‘Rod 중심 간 적정 간격’, ‘Rod의 Bearing 결합구조’, ‘Rod와 Silicon rubber의 결합구조’를 개발 및 적용하였다. 본 기술의 개발을 통해 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’는 FCP의 상·하부 형상을 정밀하게 구현할 수 있다.
	Rod 제어 기술	본 연구에서 개발한 Rod 제어 기술은 FCP의 제작시간을 단축하며 FCP의 상·하부 형상을 정밀하게 구현할 수 있는 기술이다. 본 연구에서는 Rod 제어 기술 개발을 위해 ‘Rod의 개별 제어’기술을 장비에 적용하였으며 FCP의 제작시간 단축과 일정한 두께 유지를 위한 데이터 수집 방안을 제안하였다. 이러한 성과를 통해 FCP의 제작시간을 단축할 수 있으며 설계형상의 FCP를 구현할 수 있다.
	연동운동 기술	본 연구에서 개발한 연동운동 기술은 콘크리트 또는 모르타르 속에 있는 기포를 제거하며 진동, 충격을 통해 거푸집 내의 모든 공간에 재료가 잘 채워질 수 있도록 하는 개념이다. 이러한 개념은 더 나아가 상부면의 미장을 가능하게 하며 Rod의 적정한 압력을 통한 가압양생이 가능하다. 이러한 이유로 본 기술은 그 개념자체로 본 연구의 핵심적인 연구결과이다.
논문 성과(1건)		본 연구에서는 FCP의 일정한 두께를 유지하기 위한 데이터 수집방안에 관한 논문을 작성하여 해외 저널에 게재하였다. 본 논문은 FCP의 형상 오차를 최소화하기 위한 Rod 정확한 이동거리 데이터 추출 연구이다. 본 연구는 두께 유지 방안을 제시하는 수준의 기초적인 연구이지만 후속연구를 통해 상부면의 곡률을 자동으로 유추할 수 있는 기술의 개발에 핵심적인 역할을 할 수 있는 연구이다.

특허 출원 성과(3건)	비정형 콘크리트 패널 제작용 양면 다점프레스 장비(출원 1건)	본 연구에서는 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터' 장비 및 기술에 관한 내용을 정리하여 특허를 출원하였으며 2021년 5월 특허 등록을 통해 본 발명에 대한 독점권을 획득하고 원천기술에 대한 지식재산권을 보호할 예정이다. 이러한 성과를 통해 본 발명을 일반에 공개함으로써 비정형 건축 구현기술 발전에 큰 이바지를 할 것으로 기대된다.
	비정형 패널 자동 제조장치 및 그의 제조방법 (출원 1건)	본 연구에서는 개발하는 최종장비(FCP 제작용 3D 프린팅 장비)와 FCP 제작방법을 정리하여 특허를 출원하였으며 '특허등록'이라는 성과를 달성하였다. 본 건에는 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터' 장비를 포함한 '측면형상 제어장비', '가변형 측면 거푸집'의 기술과 FCP 제작방법에 관한 내용이 포함되어있다. 이러한 성과를 통해 본 발명을 일반에 공개함으로써 비정형 건축 구현기술 발전에 큰 이바지를 할 것으로 기대된다.
	비정형 콘크리트 패널 제작을 위한 수치추출방법 (출원 1건)	본 연구에서는 FCP 제작 시 FCP의 형상데이터 입력을 통해 자동으로 제작 데이터를 추출하고 Rod를 구동시키는 일련의 프로세스 개발에 관한 추가적인 연구를 수행하였으며 이에 대한 기술을 정리하여 특허를 출원하였다. 본 건은 추후 FCP 생산 시 FCP 생산 프로세스의 구축과 공장 생산화를 위한 핵심적인 기술이며 2021년 5월 특허 등록을 통해 본 발명에 대한 독점권을 획득하고 원천기술에 대한 지식재산권을 보호할 예정이다. 이러한 성과를 통해 본 발명을 일반에 공개함으로써 비정형 건축 구현기술 발전에 큰 이바지를 할 것으로 기대된다.
시작품 제작 성과(1건)		본 연구에서는 FCP의 상·하부 형상을 구현할 수 있는 양면 다점 프레스 방식의 '3D 프린터' 장비를 제작하였다. 본 연구진은 장비의 작동실험과 측면형상 제어장비와 연계구동을 고려한 FCP 제작 실험 계획을 수립하고 있다. 또한 본 연구진은 과제종료 이후에도 지속적인 후속 연구를 수행할 계획이다. 이를 통해 본 개발 장비의 기술 성숙도를 향상시킬 수 있으며 기존 장비들과는 다른 독보적인 기술을 갖추으로써 비정형 건축 분야에서의 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술

- 본 연구에서는 측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술 개발연구를 수행하였으며 연구의 성과 및 결과는 <표 2-4-2~4>와 같다.

<표 2-4-2> 측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술 연구의 개발 결과

연구 성과		연구 결과(성과의 의의)
측면 형상 구현을 위한 형상 제어 기술	측면형상 제어장비	본 연구에서는 FCP의 측면 형상을 정밀하게 구현할 수 있는 측면형상 제어장비를 개발하였다. 본 개발 장비는 측면 Rod가 원형으로 배치되어 있어 다양한 형태의 FCP 형상을 구현할 수 있다. 반면 기존의 장비 및 기술은 단순히 FCP의 상·하부 형상만을 구현할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 측면형상 제어장비는 기존의 장비 및 기술 보다 높은 진보성과 우월성을 갖추었으며 이를 바탕으로 FCP 생산 분야에서 독보적인 기술로써 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
	가변형 측면 거푸집	본 연구에서 개발한 가변형 측면 거푸집은 기존의 재활용이 불가능한 목재, 스티로폼 등을 사용하는 비정형 거푸집과는 다르게 재활용이 가능한 거푸집이다. 따라서 가변형 측면 거푸집의 사용은 비정형 건축 공사에서 발생할 수 있는 건설폐기물과 거푸집 제작에 소요되는 인력의 낭비를 획기적으로 줄일 수 있으며 그에 따른 공사비를 절감할 수 있다. 또한 본 연구에서는 가변형 측면 거푸집이 측면형상 제어장비와 함께 사용되지만 곡선을 구현할 수 있는 특징이 있어 본 개발의 용도 이외의 비정형 건축 공사 등 다양한 건축 공사에 활용도가 상당히 높을 것으로 기대된다.

<표 2-4-3> 측면형상 제어장비 연구의 개발 결과

연구 성과			연구 결과(성과의 의의)
측면 형상 제어 장비	기술 개발	FCP의 측면 각도 조절 기술	본 연구에서 개발한 FCP의 측면 각도 조절 기술은 FCP 생산 후 FCP 간의 완전한 결합을 가능하게 하는 기술로 측면 형상 제어장비의 핵심기술 중 하나이다. 본 성과를 통해 FCP 생산 후 시공 단계에서의 문제점을 해결할 수 있으며 이는 본 연구의 핵심적인 연구결과이다.
		측면 거푸집지지 및 고정 기술	본 연구에서 개발한 측면 거푸집지지 및 고정 기술은 콘크리트 또는 모르타르 타설 시 가변형 측면 거푸집과 측면 Rod의 확실한 고정을 통해 측압에 대한 안정적인 지지가 가능한 기술이다. 본 성과를 통해 FCP 생산 시 거푸집을 안정적으로 지지함으로써 우수한 품질을 갖는 FCP를 생산할 수 있다.
	특허	측면 거푸집의 각도	본 연구에서는 최종 개발한 측면형상 제어장비(최종 제작 장

	출원 성과 (출원 2건, 등록 1건)	조절장치 및 그의 조립체 (출원1건, 등록1건)	비)의 구성요소인 측면 각도 조절 장치의 기술을 정리하여 특허를 출원하였으며 ‘특허등록’이라는 성과를 달성하였다. 이를 통해 본 발명에 대한 독점권을 획득하였으며 원천기술에 대한 지식재산권을 보호하였다. 이러한 특허 등록을 통해 본 발명을 일반에 공개함으로써 비정형 건축 구현기술 발전에 큰 이바지를 할 것으로 기대된다.
		비정형 콘크리트 패널 측면형상 구현장치 (출원 1건)	본 연구에서는 1차 개발한 측면형상 제어장비(1차 제작 장비)의 기술을 정리하여 특허를 출원하였으며 2021년 5월 특허 등록을 통해 본 발명에 대한 독점권을 획득하고 원천기술에 대한 지식재산권을 보호할 예정이다. 이러한 성과를 통해 본 발명을 일반에 공개함으로써 비정형 건축 구현기술 발전에 큰 이바지를 할 것으로 기대된다.
		비정형 패널 자동 제조장치 및 그의 제조방법 (출원 1건)	본 연구에서는 개발하는 최종장비(FCP 제작용 3D 프린팅 장비)와 FCP 제작방법을 정리하여 특허를 출원하였으며 ‘특허등록’이라는 성과를 달성하였다. 본 건에는 양면 다점 프레스 방식의 ‘3D 프린터’ 장비를 포함한 ‘측면형상 제어장비’, ‘가변형 측면 거푸집’의 기술과 FCP 제작방법에 관한 내용이 포함되어있다. 이러한 성과를 통해 본 발명을 일반에 공개함으로써 비정형 건축 구현기술 발전에 큰 이바지를 할 것으로 기대된다.
	시작품 제작 성과 (2건)	1차 제작	본 연구에서는 측면 Rod를 원형으로 배치하는 개념의 적용성 및 실현가능성을 확인하기 위해 측면형상 제어장비를 1차 제작하였다. 본 연구진은 1차 제작한 장비를 통해 FCP를 시험 제작하였으며 그 결과 제작된 FCP는 3% 이내의 형상 오차율을 만족하였다. 또한 실험결과를 토대로 측면형상 제어장비의 개선사항을 도출하였으며 그에 따른 추가적인 기술 개발 연구 등을 수행하였다. 이처럼 본 연구에서는 측면형상 제어장비를 1차 제작함으로써 장비 개념에 대한 검증과 추가적인 기술개발 성과를 달성할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 1차 개발한 측면형상 제어장비는 본 연구의 핵심적인 연구 성과이다.
		최종 제작	본 연구에서는 1차 제작한 측면형상 제어장비를 바탕으로 측면형상 제어장비를 최종 제작하였다. 본 연구진은 최종 제작한 측면형상 제어장비를 통한 FCP 제작 실험 계획을 수립하고 있다. 본 연구진은 과제종료 이후에도 측면형상 제어장비의 FCP 제작 실험 연구를 지속적으로 수행할 계획이다. 이를 통해 측면형상 제어장비에 관한 지속적인 기술개발이 이루어질 것이며 기존 장비들과는 다른 독보적인 기술을 갖추으로써 비정형 건축 분야에서의 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

<표 2-4-4> 가변형 측면 거푸집 연구의 개발 결과

연구 성과		연구 결과(성과의 의의)
가변형 측면 거푸집	논문 성과 (학술발표 1건)	본 연구에서는 ‘가변형 측면 거푸집’의 기술개발 연구에 대한 성과 중 일부를 논문으로 작성하였으며 국내 학술발표대회에 참가하여 논문을 발표하였다. 본 논문은 FCP의 측면 형상 구현을 위한 가변형 측면 거푸집의 요구사항을 분석한 연구이며 가변형 측면 거푸집의 개발에 핵심적인 역할을 하였다. 따라서 본 논문은 본 연구의 핵심적인 성과이다.
	특허 성과(1건)	본 연구에서는 개발한 가변형 측면 거푸집의 기술을 정리하여 특허를 출원하였으며 2021년 4월 특허 등록을 통해 본 발명에 대한 독점권을 획득하고 원천기술에 대한 지식재산권을 보호할 예정이다. 이러한 성과를 통해 본 발명을 일반에 공개함으로써 비정형 건축 구현 기술 발전에 큰 이바지를 할 것으로 기대된다.
	시작품 제작 성과(1건)	본 연구에서는 FCP의 측면 거푸집 형상을 구현할 수 있는 ‘가변형 측면 거푸집’을 제작하였다. 가변형 측면 거푸집은 측면형상 제어 장비의 Rod와 결합되어 콘크리트 또는 모르타르 등 재료의 직접적인 타설면이 되는 측면 거푸집이다. 본 연구에서는 가변형 측면 거푸집을 사용하여 FCP 제작 실험을 진행하고 있으며 제작된 FCP의 오차를 측정하여 측면 거푸집의 형상구현능력을 검토할 계획이다. 본 연구진은 과제종료 이후에도 가변형 측면 거푸집 실험 연구를 지속적으로 수행할 계획이며 이러한 연구 결과를 통해 FCP의 완전한 측면 형상을 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 가변형 측면 거푸집은 곡선을 구현할 수 있는 특징이 있어 본 개발용도 이외의 비정형 건축 공사 등 다양한 건축 공사에서도 그 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다.

다. FCP 및 생산용 거푸집 재료

- 본 연구에서는 FCP 및 생산용 거푸집 재료 개발연구를 수행하였으며 연구의 성과 및 결과는 <표 2-4-5>와 같다.

<표 2-4-5> FCP 및 생산용 거푸집 재료 연구의 개발 결과

연구 성과		연구 결과(성과의 의의)
FCP 생산용 최적 콘크리트 배합비 도출	속경성 개선	본 연구에서는 FCP의 속경성을 개선하기 위한 실험을 진행하였다. 마그네시아 시멘트와 인산나트륨은 속경성을 지닌 재료로 패널의 속경성 확보를 위해 사용되었지만 FCP가 요구하는 KS 기준을 만족하지 못하였다. 하지만 본 연구에서는 봉사 1%를 첨가하여 경화속도를 조절한 배합비를 도출하였다. 이는 KS 기준을 만족하며 FCP의 속경성을 개선하였다. 따라서 본 연구에서 도출한 배합비는 속경성을 개선하는 연구에 기초가 될 것으로 기대된다.
	성형성 개선	본 연구에서는 FCP의 성형성을 개선하기 위해 모르타르와 시멘트 페이스트에 플라이 애쉬, 유동화제를 첨가하였다. 본 연구의 결과로 혼합시멘트 페이스트와 혼합모르타르의 배합비를 도출했다. 도출된 배합비를 통해 실험 패널을 제작하였으며 제작된 패널의 오차율은 3% 이내의 결과값을 가진다. 따라서 본 연구에서는 FCP의 성형성을 개선하였으며 도출한 배합비는 비정형 패널 생산 분야에서 경쟁력을 확보할 것으로 기대된다.
FCP 생산을 위한 거푸집 재료		비정형 거푸집은 패널의 형상이 각기 달라 재사용이 불가능하다. 이는 건설폐기물이 되며 처리 과정에서 CO2를 배출한다. 이러한 문제를 PCM(Phase Change Material) 거푸집을 통해 해결한다. 하지만 PCM 거푸집은 냉각하는 오랜 시간과 많은 에너지가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 열전도율이 뛰어나며 가벼운 알루미늄 파우더를 파라핀 왁스와 혼합하여 새로운 비정형 거푸집을 개발한다. 본 연구에서 개발한 거푸집은 실험을 통해 기존 거푸집 보다 CO2 방출량과 에너지가 기존 거푸집보다 절약되는 것으로 확인되었다. 이러한 성과를 통해 기존 PCM 거푸집을 개선하였으며 친환경적인 분야에서 경쟁력을 확보할 것으로 기대된다.
논문 성과(3건)	1. 비정형 패널의 형상품질확보 를 위한 적정배합비 도출	본 연구에서는 비정형 패널의 형상품질 확보를 위한 적정 배합비를 도출하기 위해 비정형 패널의 요구성능인 속경성과 성형성에 중점을 맞추어 실험을 진행하였다. 실험을 통해 수집된 데이터를 논문으로 작성하여 국내 학회지에 게재하였다. 본 연구는 속경성을 적정한 속도를 맞추기 위한 기초적인 연구지만 지속적으로 수행된다면 신속한 FCP의 형상 품질을 확보가 가능할 것으로 기대된다.
	2. 비정형 형상구현을 위한 혼합모르타르 패널의 오차율	본 연구에서는 오차율 3%이내의 비정형 패널의 형상을 구현하고자 실험을 진행하였다. 실험에 앞서 시멘트 페이스트와 모르타르에 플라이 애쉬와 유동화제를 첨가하여 배합비를 도출하였다. 도출된 배합비를 통해 제작한 비정형 패널의 오차율이 실제로 3% 이내로 측정되었다. 본 연구는 FCP의 성형성을 확보하며 오차가 없는 비정형 패널의 생산

	분석 연구	연구에 핵심적인 역할을 할 수 있는 연구이다.
	3. Energy and CO2 Reduction of Aluminum Powder Molds for Producing Free-Form Concrete Panels	기존 비정형 거푸집의 문제점들은 CO2 방출량이 높으며 이를 보완한 PCM 거푸집도 에너지 사용량이 크다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 열전도율이 높은 알루미늄을 활용한 알루미늄 파우더 거푸집을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 알루미늄 파우더 거푸집은 기존 거푸집에 비해 에너지 소비와 CO2 배출량을 줄일 수 있다. 이를 논문으로 작성하여 SCIE 저널에 게재하였다. 알루미늄 파우더 거푸집은 다양한 건물 설계를 실현하고 가치를 창출하는 데 도움이 될 것이며 다양한 재료와 혼합 된 복합 거푸집과 관련된 연구에 핵심적인 역할을 할 수 있는 연구이다.

3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 연구개발 목표 달성도

가. 연차별 연구개발 목표 달성도

(1) 1차년도 연구개발 목표 달성도

- 본 연구과제의 목표를 달성하기 위한 세부 연구와 1차년도 연구수행기간 동안의 연구 수행 진도율은 <표 3-1-1>과 같다.
- 본 연구진은 1차년도 연구과제 수행 기간 동안 핵심성과별 세부 연구를 수행하였으며 그에 따른 진도율은 100%이다.

<표 3-1-1> 1차년도 연구개발 수행 진도율

핵심성과	연구목표	세부 연구	연구개발기간 ('19.04 ~ '19.12)									진도율 (%)
			04	05	06	07	08	09	10	11	12	
A	양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터 개발	요구 성능 분석	■	■								100
		개념 디자인 확보		■	■	■						100
	측면 형상 구현을 위한 측면 형상 제어 기술	측면 거푸집 이동장치 개발 (측면형상 제어장비)		■	■	■	■	■	■			100
		형상 각도 조절 장치 개발 (측면각도 조절장치)		■	■	■	■	■	■			100
		1차 제작 및 테스트/문제점 보완							■	■	■	100
B	FCP 제작용 콘크리트 배합비 도출	FCP 제작용 콘크리트의 성형성 확보를 위한 배합 실험	■	■	■	■	■	■	■			100

* 당초계획 : ■ 실행 : ■

(2) 2차년도 연구개발 목표 달성도

- 본 연구과제의 목표를 달성하기 위한 세부 연구와 2차년도 연구수행기간 동안의 연구 수행 진도율은 <표 3-1-2>와 같다.
- 본 연구진은 2차년도 연구과제 수행 기간 동안 핵심성과별 모든 세부 연구를 수행하였다. 다만, ‘장비제작’의 경우 COVID-19로 인한 장비의 핵심 부품(Stepping actuator)의 공급 지연의 사유로 인해 ‘장비제작’의 기간이 지연되었다. ‘양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터’의 경우에는 4개월, ‘측면 형상 제어 기술’의 경우에는 3개월이 지연되었으나 모두 12월내로 장비 제작을 완료하여 연구 성과를 달성하였다[첨부 1].

<표 3-1-2> 2차년도 연구개발 수행 진도율

핵심 성과	연구목표	세부 연구	연구개발기간 ('20.01 ~ '20.12)												진도율 (%)
			01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
A	양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터 개발	장비 제작													100
		FCP 시험 생산													100
		문제점 보완													100
	측면 형상 구현을 위한 측면 형상 제어 기술	장비 제작													100
		FCP 시험 생산													100
		최적 배합비 도출													100
B	FCP 제작용 콘크리트 배합비 도출	FCP 시험 생산													100

* 당초계획 : ■ 실행 : ■

나. 핵심성과별 연구개발 목표 달성도

(1) 핵심성과 A : FCP 제작용 3D 프린터

- 본 연구과제의 핵심성과 A에 대한 연차별 주요 연구내용과 달성도는 <표 3-1-3>과 같다.
- 본 연구진은 핵심성과 A(FCP 제작용 3D 프린터)의 주요 목표에 관한 연구를 수행하였으며 그에 따른 달성도는 모두 100%이다.

<표 3-1-3> 핵심성과 A에 대한 연차별 연구개발 목표의 달성도

연차	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	달성도(%)
1차년도	양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터 개발	3D 프린터 장비의 요구성능 분석	100
		개념디자인	100
	측면 형상 구현을 위한 측면 형상 제어 기술	측면 거푸집 이동장치(측면형상 제어장비) 개발	100
		형상 각도 조절장치(측면각도 조절장치) 개발	100
		1차 제작 및 테스트/문제점 보완	100
2차년도	양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터 개발	장비 제작	100
		FCP 시험 생산	100
		문제점 보완	100
	측면 형상 구현을 위한 측면 형상 제어 기술	장비 제작	100
		FCP 시험 생산	100

(2) 핵심성과 B : FCP 제작용 콘크리트 배합비 도출

- 본 연구과제의 핵심성과 B에 대한 연차별 주요 연구내용과 달성도는 <표 3-1-4>와 같다.
- 본 연구진은 핵심성과 B(FCP 제작용 최적 콘크리트 3D 프린터)의 주요 목표에 관한 연구를 수행하였으며 그에 따른 달성도는 모두 100%이다.

<표 3-1-4> 핵심성과 B에 대한 연차별 연구개발 목표의 달성도

연차	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	달성도(%)
1차년도	FCP 제작용 콘크리트 배합비 도출	배합실험 (FCP 제작용 콘크리트의 성형성 확보 여부)	100
2차년도	FCP 생산용 최적 콘크리트 배합비 도출	FCP 시험 생산을 통한 최적 배합비 도출	100
		FCP 시험 생산	100

2. 연구개발 성과지표 달성도

가. 1차년도 성과지표 달성도

(1) 1차년도 질적성과 성과지표 달성도

○ 본 연구과제의 1차년도 질적성과 달성도는 <표 3-2-1>과 같다.

<표 3-2-1> 1차년도 질적성과 성과지표 달성도

단위성과		질적성과		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법
A-1	양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터 기술	①	오차율	5% 이내의 오차율을 가진 FCP 생산	3% 이내	[(설계두께-제작된 패넌의 두께)/설계두께]X100	보고서
		②	장비 작동의 이상 유무	장비 작동이 원활한 장비 제작	달성	장비 시연 시 FCP 생산에 차질이 생기는지 여부 확인	동영상 증빙
A-2	자동 형상제어 측면 거꾸집 시스템	①	오차율	5% 이내의 오차율을 가진 FCP 생산	1% 이내	[(설계각도-제작된 패넌의 측면 각도)/설계각도]X100	보고서
		②	장비 작동의 이상 유무	장비 작동이 원활한 장비 제작	달성	장비 시연 시 FCP 생산에 차질이 생기는지 여부 확인	동영상 증빙
B-1	W/B를 고려한 콘크리트 배합비 도출	①	슬럼프 플로우 값	600mm 이상의 슬럼프 플로우	적정 슬럼프 160mm 이상으로 변경 및 달성	KS F 2594에 따른 슬럼프 플로우 측정	보고서

(2) 1차년도 양적성과 성과지표 달성도

○ 본 연구과제의 1차년도 양적성과 달성도는 <표 3-2-2>와 같다.

<표 3-2-2> 1차년도 양적성과 달성도

단위성과		양적성과 현황 (2020/12/31 기준)				
		양적성과	목표치	달성치 [달성 예정]	달성도(%)	최종 예정 달성도(%)
A-1	양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터 기술	논문게재 (비 SCI)	2건	1건 [1건]	50	100
A-2	자동 형상제어 측면 거푸집 시스템	논문게재 (비 SCI)	1건	1건	100	100
B-1	W/B를 고려한 콘크리트 배합비 도출	-				

○ 본 연구과제의 1차년도 양적성과 달성도는 과제종료일(2020/12/31)을 기준으로 하며 각 달성도는 단위성과 A-1의 경우 50(%), A-2의 경우 100(%)이다. 현재 단위성과 A-1의 경우 성과 1건이 부족한 상황이지만 이는 성과 미달성이 아닌 성과 지연이며 연구수행기간 종료 후 6개월 이내에 성과를 달성할 예정이다.

나. 2차년도 성과지표 달성도

(1) 2차년도 질적성과 성과지표 달성도

○ 본 연구과제 2차년도의 질적성과 성과지표 달성도는 <표 3-2-3>과 같다.

<표 3-2-3> 2차년도 질적성과 성과지표 달성도

단위성과		질적성과		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법
A-1	양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터 기술	①	오차율	5% 이내의 오차율을 가진 FCP 생산	3% 이내	[(설계두께-제작된 패넬의 두께)/설계두께]X100	보고서
		②	장비 작동의 이상 유무	장비 작동이 원활한 장비 제작	달성	장비 시연 시 FCP 생산에 차질이 생기는지 여부 확인	동영상 증빙
A-2	자동 형상제어 측면 거꾸집 시스템	①	오차율	5% 이내의 오차율을 가진 FCP 생산	1% 이내	[(설계각도-제작된 패넬의 측면 각도)/설계각도]X100	보고서
		②	장비 작동의 이상 유무	장비 작동이 원활한 장비 제작	달성	장비 시연 시 FCP 생산에 차질이 생기는지 여부 확인	동영상 증빙
B-1	WB를 고려한 콘크리트 배합비 도출	①	슬럼프 플로우 값	600mm 이상의 슬럼프 플로우	적정 슬럼프 160mm이상으로 변경 및 달성	KS F 2594에따른 슬럼프 플로우 측정	보고서
		②	경화 시간	5시간 이내에 탈형 가능한 수준의 경화	5시간 이내	탈형 가능한 수준까지의 경화 시험-콘크리트 타설 시점	보고서

(2) 2차년도 양적성과 성과지표 달성도

○ 본 연구과제 2차년도의 양적성과 성과지표 달성도는 <표 3-2-4>와 같다.

<표 3-2-4> 2차년도 양적성과 성과지표 달성도

단위성과		양적성과 현황 (2020/12/31 기준)				
		양적성과	목표치	달성치 [달성 예정]	달성도(%)	최종 예정 달성도(%)
A-1	양면 다점 프레스 방식의 3D 프린터 기술	논문게재 (SCI)	2건	1건 [1건]	50	100
		논문게재 (비 SCI)	2건	1건 [1건]	50	100
		특허 출원	3건	3건	100	100
A-2	자동 형상제어 측면 거푸집 시스템	논문게재 (SCI)	2건	0건 [2건]	0	100
		논문게재 (비 SCI)	2건	0건 [2건]	0	100
		국·내외 학술발표 대회 [추가달성]*	-	국외 1건 국내 1건	100	200 [추가달성]
		특허 출원	3건	3건	100	100
		특허 등록	1건	2건 [2건]	100	500
B-1	W/B를 고려한 콘크리트 배합비 도출	-				

○ 본 연구과제의 2차년도 양적성과 달성도는 과제종료일(2020/12/31)을 기준으로 하며 각 달성도는 단위성과 A-1, A-2의 ‘특허 출원 및 등록-달성도 100(%)’을 제외하고 모든 논문 게재 성과에서 달성도 100(%)를 만족하지 않는다. 하지만 이는 연구수행기간 종료 후 6개월 이내에 성과를 달성할 예정이다.

4장. 연구개발성과의 활용계획

1. 활용방안 및 기대효과(관련 분야 기여)

가. FCP 제작 기술의 활용

- 본 연구에서 개발된 장비는 기존 기술과 달리 FCP를 자동으로 생산할 수 있는 기계화 장비로 비정형 생산 분야에서 혁신적인 기술이 될 것이다. 이 기술을 바탕으로 다수의 장비 제작을 위한 시제품을 제작하여 장비를 제품화할 수 있다. 또한, 장비 제품화는 값싼 FCP를 제작하기 위해 FCP의 생산 공장화라는 새로운 산업 분야의 창출이 가능할 것으로 기대된다.
- FCP 제작용 3D 프린팅 장비는 FCP 자동생산 분야에서 시작품 개발의 초기 단계이기 때문에 본 연구에서 개발한 개념과 기술을 바탕으로 진보된 기술 개발이 가능할 것으로 판단된다.

나. 4차 산업 기술의 융합

- 본 연구에서 개발된 장비에 4차 산업 기술을 접목하여 보다 진보된 기술 개발이 가능할 것이다. 건설업에 적용되고 있는 ‘압출형’ 3D 프린팅 기술이 갖는 비정형 패널 제작의 한계를 극복할 수 있을 것이다. 곡면으로 쌓아올릴 수 없었던 압출능력의 한계를 보완하여 ‘FCP’와 ‘3D 프린팅’의 새로운 기술 융합이 가능해질 것으로 기대되며 현재로써는 3D 프린팅 기술로 FCP를 제작할 수 있는 유일한 방법이라고 할 수 있을 것이다.

다. 기대효과

(1) 기술적 측면

- BIM을 이용한 설계-생산 인터페이스의 구축으로 Digital design 업무의 생산성, 효율성 향상시킬 수 있다.
- 생산정보 시스템을 활용하여 다양한 형상의 FCP를 생산할 수 있으며 보다 자유로운 형상의 비정형 건축물 설계가 가능하다.
- Digital data와 CNC machine을 사용하여 설계-생산 공정을 통합 관리하는 기술을 확보할 수 있다.
- 재활용이 가능하므로 기존 기술 대비 폐기물 Zero, CO₂ 저감형 친환경 기술의 근간을 확보할 수 있다.
- 건축사업의 노동집약적인 특성을 전 공정의 자동화로 인한 자본집약적인 기술로 변화시킬 수 있으며 이를 통해 경제성 확보, 폐기물 저하, 공기 단축 등 건물 시공 분야에 큰 파급력을 일으킬 수 있다.

(2) 학문적 측면

- 비정형 건축물의 설계 및 자재생산, 시공 부분에 대한 체계적인 활용성 증진에 기여할 수 있다.
- 다양한 비정형 형태에 대한 시뮬레이션 및 최적화 연구를 통해 국제수준의 FCP 생산 기술을

학문적으로 정립할 수 있으며 비정형 건축기술 분야에서 우리나라가 국제적인 학문적 허브가 될 수 있다.

(3) 경제적·산업적 측면

- FCP 생산을 위한 추가적인 거푸집이 필요 없으며 일관된 품질과 경제성을 확보할 수 있다.
- 비정형 건축이 증가하는 해외시장에서 품질 및 원가 경쟁력을 바탕으로 새로운 시장을 개척할 수 있다.
- 비정형 건축 기술의 발달로 관광산업의 증가와, 해외 수주 및 국제적 기술 이전이 가능할 것이다.

(4) 사회적 측면

- FCP 생산 기술은 발주자, 설계자, 시공자는 물론 성능평가를 위해 일반인 및 전문가의 관심과 참여를 유발하는 혁신적인 기술이 될 수 있을 것으로 예상된다. 특히, 본 장비를 통해 축조된 비정형 건축물은 도시 사회를 미래지향적으로 발전시키는 계기가 되며 그 과정에서 축적된 DB는 다양한 전문가들이 각각의 목적에 따라 응용할 수 있다.
- 본 기술의 활용은 발주자의 경우 건축물 공사비 감소 및 비정형 건축물 구현으로 인한 미래 가치 증진이 가능할 것이다. 설계자와 시공자는 발주자가 원하는 형태의 건축물 설계, 구현에 대한 기술의 한계, 시행착오와 R&D 비용을 감소에 기여할 것으로 예상된다. 또한, 산학은 비정형 건축 부재생산 방법에 대한 연구 등 새로운 기술에 대한 학문적 기여가 이루어질 것이다.
- FCP 생산 기술에 따라 다양한 형태의 FCP를 제작함으로써 구현할 수 있는 비정형 건축물의 수가 증가하게 되며 이에 따라 건축물의 예술적 경관, 기술적 가치가 올라가게 됨으로써 도시의 사회적 가치관이 새롭게 변화될 수 있다.

2. 추가연구의 필요성

- 본 연구의 연구개발단계는 최종결과물 기술성숙도 9단계 중 4단계인 ‘실험실 성능평가 단계’이다. 즉, 시작품을 제작하기 위한 초기단계에 해당한다. 그러나 본 연구는 코로나19로 인한 장비개발의 지연으로 FCP 제작 실험을 수행하지 못하였다. 따라서 실험적 증명을 위한 FCP 제작 실험 및 장비 적용을 위한 적정 배합비 도출 등 추가적인 연구개발이 필요하다.

(FCP 제작 실험의 필요성)

- 본 연구에서는 FCP 분할, 데이터 추출 및 입력, FCP 제작, 검사, 현장 시공에 이르는 FCP 생산 프로세스의 기본 개념을 정립하여 특허를 출원하였다. 그러나 본 연구는 제작하기 위한 FCP로부터 데이터를 추출하고 장비에 입력하여 FCP를 제작하는 것으로 FCP 생산 프로세스의 일부이다. FCP 생산 분야는 완전한 생산 프로세스 및 관리 기준이 없으며 본 장비를 실제 산업에 적용하기 위한 단계별 세부적인 프로세스 및 관리기술이 반드시 필요하다.

(FCP 생산프로세스 연구의 필요성)

- FCP 제작의 실험적 증명이 완료되면 실용성 제고를 위한 비정형 부재의 구조성능 및 내구성능 평가가 필요하다. 패널 자체의 구조적 성능을 확인해야 하며 부재 시공을 위해 패널 간, 구조체-패널 간의 접합방식 개발과 이를 현장 적용하기 위한 성능평가 연구가 필요하다. 또한,

현장에서 적용되는 패널의 크기를 고려하여 대형패널을 제작할 수 있는 비정형 부재 생산 연구가 반드시 필요하다.

(FCP의 성능평가 및 현장적용 연구의 필요성)

참고 문헌

- [1] Lee, D. A Study of Construction and Management Technology of Free-Form Buildings. Ph. D. Thesis, Kyung Hee University, Seoul, Korea, 2015.
- [2] Beatriz Plaza, The Return on Investment of the Guggenheim Museum Bilbao, *International Journal of Urban and Regional Research*, Vol.30(2), 2012 pp.452-467.
- [3] Kim, G. Variations of Form Accuracy in the Process of Metal Cast Prototyping using Rapid prototype, Vacuum casting and Ceramic Mold. *The Korea Society of Precision Engineering*, Vol.24(6), 2007 pp.131-137.
- [4] Kim, Gervacio, Adjustable Forming System Continues to Inspire: System speeds production of intricate architectural precast concrete panels. *Concrete International*, Vol.34(6), 2012, pp.32-34.
- [5] Kim, K., Son, K., Kim, E. D., & Kim, S., Current trends and future directions of free-form building technology. *Architectural Science Review*, (ahead-of-print), 2014, pp. 1-14.
- [6] Juan Ignacio Prez Latorre, Construction method to build ice shells with pneumatic formwork, Vienna University of Technology Faculty of Civil Engineering, Master's thesis, 2010.
- [7] R.W.A. Verhaegh, Free Forms in Concrete fabric, Eindhoven University of Technology, MS thesis 2010.
- [8] Kim, H. Finding Solution for Construction of Non-Formal Designed Building through BIM, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.53(12), 2009, pp.92-95.
- [9] Ryu, H., Kim, S., Case Study of Concrete Surface Design and Construction Method for Freeform Building Based on BIM - Focused on Tri-Bowl, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.12(3), 2012, pp.347-357.
- [10] Lee, D., Jang, D., Kim, S., Conceptual Study of improving the Performance of PCM Mold for Free-form Buildings, *Conference of Architectural Institute of Korea*, Vol.34(2), 2014.
- [11] Sung, S., Lee, D., Kim, S., Requirements analysis for production of freeform concrete segments, *Conference of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.14(1), 2014.
- [12] Kim, G., Lee, D., Kim, S., Manufacturing Technology of Freeform Concrete Segments using Rod Type Mold, *Conference of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 14(1), 2014.
- [13] Kim, T., Lee D., Kim S., Flexible Mold Production Process for Using the PCM, *Conference of the Korea Institute of Building Construction*, *Conference of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.14(1), 2014.
- [14] Kim, K., Lee D., Kim, S., Development of Casting Technology for Freeform Concrete Segments, *Conference of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.14(1), 2014
- [15] Lee D., Kim S., Analysis of Phase Change Materials for Production of Changeable Mold for Free-form Concrete Segment, *Conference of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.14(1), 2014.
- [16] Lee D., Jang, D., & Kim S., Production Technology of Free-form Concrete Segments using Phase Change Material, CSE 2014.
- [17] Lee D., Hong W., Kim J., & Kim S., Conceptual Study of Production Technology of Free-Form Concrete Segments, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol.7(4), 2015

- [18] Bae, K., Lee, S., Jung, H., A Study on Digital design process of the materialization of Free form Design architecture, Conference of Architectural Institute of Korea, Vol.29(1), 2019, pp.221-224
- [19] Park, J., Kim, S., Lee, S., Song, H., Suggesting Solutions when Applying Building Information Modeling (BIM) to the Korean Construction Industry through Case Studies, Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol.9(4), 2009, pp.93-102
- [20] Park, J., Lee, M., A Study on the Application of BIM(Building Information Modeling) in the Field of Non-linear Forms Architecture, Conference of Architectural Institute of Korea, Vol.28(1), 2008, pp.209-212
- [21] Han, K., A Study of the Application of a BIM-based Architectural Design Process for Environmental Performance and Environmental Load, Master's Thesis, Han yang University, 2010
- [22] R.A. Buswell, R.C. Soar, A.G.F. Gibb, A., Thorpe, Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction, Automation in Construction Vol.16, 2007, pp.224 - 231
- [23] John J Orr, Anthony P Derby, Tim J Ibell, Dr Mark C Evernden, Mike Otlet, Concrete structures using fabric formwork, The Structural Engineer, Vol.89(8), 2011, pp.20-26
- [24] Kwon, W., automation and digital control technology, Journal of the Institute of Electrical Engineers, Vol.46(7), 1997, pp.84-87
- [25] Lee, H., Jo, S., Kim, D., A Study on the Tectonic Meaning of Architectural Skin by the Introduction of Digital Technology, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol.26(1), 2010, pp.3-11
- [26] Kim, K., Lim, C., Kim, S., A basic study of manufacturing technology of free-form concrete segments, Conference of the Korea Institute of Building Construction, Vol.13(1), 2013, pp.12-13
- [27] Kim, K., Son, K., Kim, E., Kim, S., Current trends and future directions of free-form building technology, Architectural Science Review, 58(3), 2015, pp.230-243
- [28] Lee, D.; Hong, W., Kim, J., Kim, S., Conceptual Study of Production Technology of Free-Form Concrete Segments. Int. J. Eng. Technol. 7(4), 2015, pp.321-325
- [29] Verhaegh, R.W.A. Free Forms in Concrete Fabric. Master's Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 2010.
- [30] Kim, T., Properties of inorganic filler adhesive utilizing dead-burn magnesia and fly ash [master's thesis]. Hanbat university; 2018. 36 p.
- [31] Won, J., Lee, C., Park, C., Durability characteristics of blended cement mortars. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers. ;45(3) May 2004 pp.41-9.
- [32] Lee, D., Lim, C., Kim, S., CO2 emission reduction effects of an innovative composite precast concrete structure, Energy and Buildings, 126, 2016, pp.36~40
- [33] Oesterle, S.; Vansteenkiste, A.; Mirjan, A. Zero Waste Free-Form Formwork. In Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork, ICFF, Bath, UK, June 2012, pp.27 - 29.
- [34] Karim, L. Barbeon, F. Gegout, P. Bontemps, A.; Royon, L. New phase-change material components for thermal management of the light weight envelope of buildings. Energy Build. 68, 2014, pp.703 - 706.
- [35] Li, D. Zheng., Y. Li, Z., Qi, H. Optical properties of a liquid paraffin-filled double glazing

- unit. Energy Build. 108, 2015, pp.381 - 386.
- [36] Lai, C.; Shuichi, H. Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM. Energy Build. 73, 2014, pp.37 - 47
- [37] Asdrubali, F.; Giorgio, B.; Francesco, B. Influence of cavities geometric and emissivity properties on the overall thermal performance of aluminum frames for windows. Energy Build. 60, 2013, pp.298 - 309.
- [38] Kang, J., Properties of radon adsorption matrix utilizing diatomite and powered active carbon to adsorbent [master's thesis] Hanbat university; 2018. 39 p.
- [39] Kim, B., Physical properties evaluation of flooring using a rigid hardening magnesia phosphate ceramics [master's thesis]. Hanbat university; 2016. 84 p.
- [40] Cho, M., A Study on the Implementation of Integrated Digital Design Process for Representation and Construction of the Exterior Surface in Free-Form Architecture, Journal of Digital Design, 2011, 11(2), pp.267-276
- [41] 정경태, 김기혁, 윤지영, 송하영, 이동훈, FCP(Free-form Concrete Panel) 제작과정에서 FC P 두께유지에 관련한 영향요인 분석, 한국건축시공학회, 52(4), 2019, pp.4 - 5
- [42] 서원석, 유상준, 동대문디자인플라자의 통한 비정형 건축물의 3D외장금속패널 시공사례를 중심으로, 대한건축학회 2016년도 추계학술발표대회논문집 제36권 제2호(통권 제66집), 2016, pp.1,525-1,528
- [43] 심준혁, 김학민, 박건우, 김찬우, 홍대회, S-LOM 공법을 이용한 비정형 콘크리트 거푸집 생산 자동화 시스템, 한국정밀공학회지, 37권 1호, 2020, pp.43-50
- [44] 안희재, 이동윤, 지우중, 이우재, 조훈희, Sloped-LOM 방식 3D 프린터를 이용한 비정형 EPS 거푸집 제작 공법 개발, 한국건축시공학회지, 20권, 2호, 2020년, pp.171-181
- [45] 이동윤, 이동민, 조훈희, 강경인, LOM 방식 3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스 및 Mock-up test, 한국건축시공학회지 제18권 제1호, 2018, pp.89-98
- [46] 이현석, 박재훈, 임종하, 서해진, 손태원, 파라핀과 초고분자량 폴리에틸렌으로 구성된 형태안정성 상 전이 물질의 제조 및 특성, 한국고분자학회, 39(1), 2015, pp.23-32
- [47] 손태원, 고재왕, 김종환. 파라핀왁스와 폴리프로펠렌으로 제조된 형태안정 PCM의 열적 특성. 한국고분자학회 학술대회 연구논문 초록집, 2009 pp.88-88
- [48] 정경태, 김기혁, 이동훈, FCP 형상구현을 위한 양면다점프레스 기술 개발, 한국건축시공학회, 제19권 1호, 통권 제36집, 2019, pp.83-84
- [49] 김기혁, 정경태, 이동훈 비정형 콘크리트 패널 생산을 위한 측면형상 제어시스템 개발, 한국건축시공학회, 제19권 1호, 통권 제36집, 2019, pp.53-54
- [50] 이동훈, 김선국, PCM을 활용한 비정형 콘크리트 거푸집 생산 프로세스 개발, 대한건축학회연합논문집, 17(1), 2015, pp.219-224
- [51] 손승현, 비정형 콘크리트 패널의 생산관리 기초연구, 한국건축시공학회 학술 기술논문발표회 논문집, 제18권 2018제1호, pp.33~34,

[첨부 1] 지연 사유서

Shenzhen Robotlinking Technology Co., Ltd.

Confirmation documents for delayed delivery	
订购产品(Order product):	Stepping actuator
数量(Quantity):	320
订购日期(Order date):	2020/8/20
订购公司(Name of contractor):	Alpha Science(South Korea)
电话号码(Phone number)	82-010-9570-0906
The cause of the delay is:	The stepping actuator that we supply to Alpha Science in Korea confirms that our manufacturing plant in Wuhan has been shut down due to coronavirus and delayed delivery of goods for 3 months.
Contract Representative	
(Name):	Shenzhen Robotlinking Technology Co., Ltd.
(Telephone number):	86 18942925116
(Date):	20201224
(Signature)	 <i>Tracy</i>