

MIDAS SQUARE 공학 기술강연

# 프리팸 교량 구조를 위한 DfMA&M 기술

심창수 | 중앙대학교 교수

# CONTENTS

---

## 01 사전제작 교량 기술

- 급속시공을 위한 교량부재 및 연결부 기술
- 부재의 허용오차

---

## 02 DfMA&M 개념

- Design for Manufacturing
- Design for Assembly
- Design for Maintenance

---

## 03 프리팹 교량 구조를 위한 디지털 엔지니어링 모델

- 데이터 표준과 알고리즘
- 설계모델에서 유지관리모델로 이르는 MIDP

---

## 04 프리팹 교량을 위한 설계 및 품질관리 기술

- 프리팹 교량 구조를 위한 설계 개선
- 프리팹 교량 구조부재의 품질관리 및 사전조립성 검토

# 사전제작 교량 기술

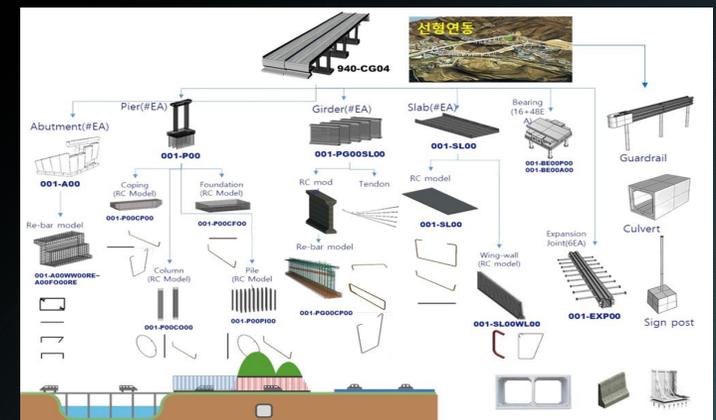
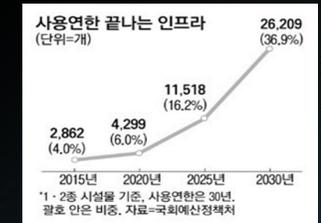
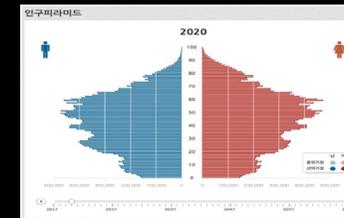
급속시공을 위한 교량 부재 및 연결부 기술

# 사전제작 교량 기술

OSC(Off-Site Construction) 확대의 의미

- 기존의 글로벌 공급체계 변화 (인력수급의 한계)
- 탄소배출 저감 등 환경이슈
- 지속가능성을 중심으로 하는 국가 인프라
- 복구탄력성이 있는 건설기술 필요 (재해 재난의 증가와 노후 시설물 증가 대응)
- 설계부터 운영 및 유지관리 단계에 이르는 새로운 서비스 시장

- 교량 건설을 구성하는 부재의 제품화  
➔ 디지털화된 설계, 제작자동화, 가설 로봇틱스



# 사전제작 교량 기술

## 급속시공을 위한 교량 부재 및 연결부 기술

### Precast vs Prefabrication

- 설계의 정형화 및 모델 기반 설계 기술
- 제작자동화 혹은 최적화를 고려한 설계 (DfM)
- 연결부 기술의 범용화 및 디지털화된 허용오차 관리/사전조립성 검토 기술 (DfA)
- 지속적인 기술 피드백 (MIDP)

신규교량 급속시공



기존교량 급속교체 및 복구



# 사전제작 교량 기술

부재의 허용오차

# 사전제작 교량 기술

완전 프리캐스트 교량 가설을 고려한 형상 품질관리 기준

- 부재별 허용오차 설정: 교량 시스템별로 조립성 확보 가능 허용값 설정
- 3차원적인 형상 오차 검측과 이를 활용한 preassembly 기술

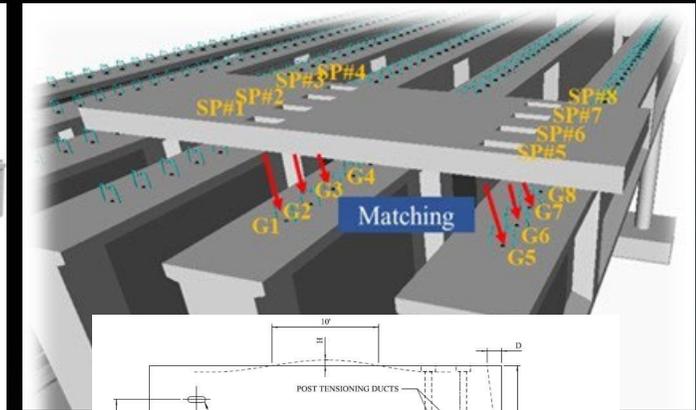
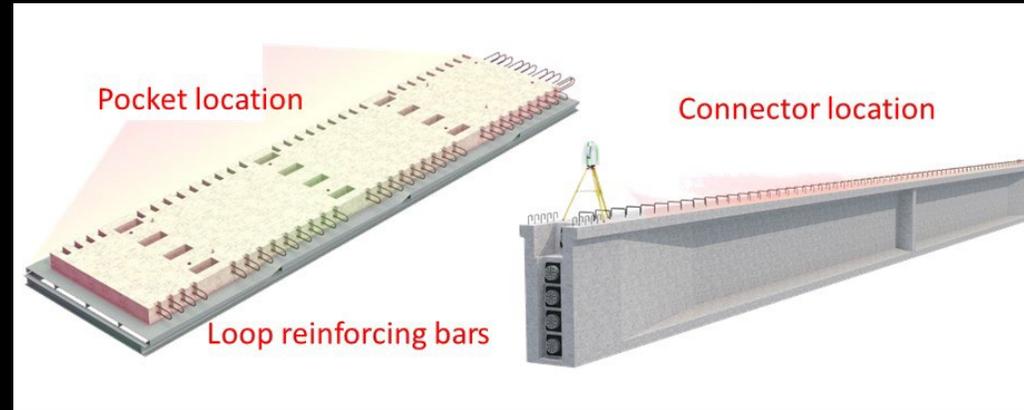
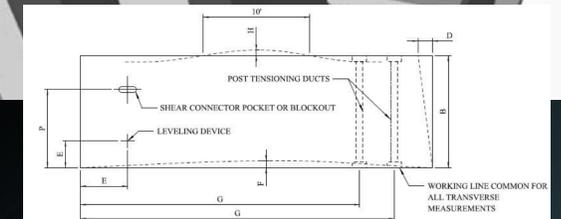


표 3.1-1 전단면 프리캐스트 패널 제작 시의 허용오차 EXCS 24 10 25 : 2021

구분		허용오차
패널 길이		설계치수의 $\pm 1\%$ 또는 $\pm 30$ mm 중에서 작은 값
패널 폭		설계치수의 $\pm 1\%$ 또는 $\pm 30$ mm 중에서 작은 값
패널 두께		+10 ~ -5 mm
전단포켓 위치		$\pm 5$ mm
철근 간격	수평 순간격	$\pm 10$ mm
	수직 순간격	$\pm 5$ mm
쉬스 간격, 높이		$\pm 5$ mm



NCHRP Project 12-98

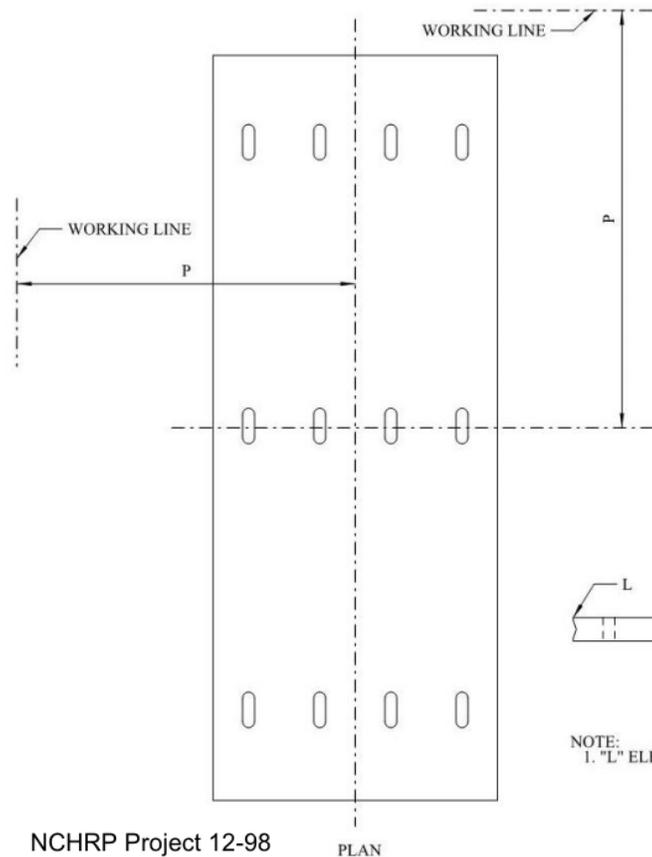
A = LENGTH	$\pm 1/4"$
B = WIDTH	$\pm 1/4"$
C = DEPTH	$\pm 1/8"$
D = VARIATION FROM SPECIFIED PLAN END SQUARENESS OR SKEW	$\pm 1/4"$
E = LOCATION OF LEVELING DEVICE	$\pm 1"$
F = SWEEP	$\pm 1/4"$
G = DISTANCE FROM COMMON WORKING POINT TO CENTER OF ANY PT DUCT	$\pm 1/8"$
H = LOCAL SMOOTHNESS OF ANY SURFACE	$\pm 1/4"$ IN 10 FEET
J = CAMBER VARIATION FROM DESIGN CAMBER	$\pm 1/4"$
K = CENTER OF PT DUCT AT EDGE OF SLAB	$\pm 1/8"$
P = LOCATION OF SHEAR CONNECTOR POCKET OR BLOCKOUT	$\pm 1/2"$

# 사전제작 교량 기술

## 부재의 허용오차

가설시 허용오차

- 수직 및 수평 가설시의 최종 접합면 정합성과 구조거동에 미치는 영향 최소화



P = Plan location from working line 6.35 mm ± 1/4"

L = Top elevation from nominal top elevation

Thick overlay

Maximum Low

Maximum High

6.35 mm 1/4"  
6.35 mm 1/4"

Thin overlay or bare deck combined with grinding

Maximum Low

Maximum High

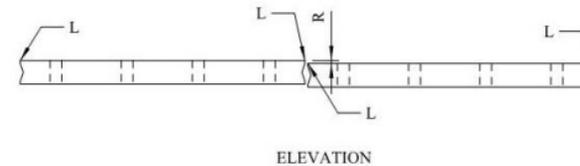
3.175 mm 1/8"  
3.175 mm 1/8"

R = Differential top elevation

Thick overlay

Thin overlay or bare deck combined with grinding

6.35 mm 1/4"  
3.175 mm 1/8"



NOTE:  
1. "L" ELEVATION IS TYPICALLY SPECIFIED AT EACH CORNER.

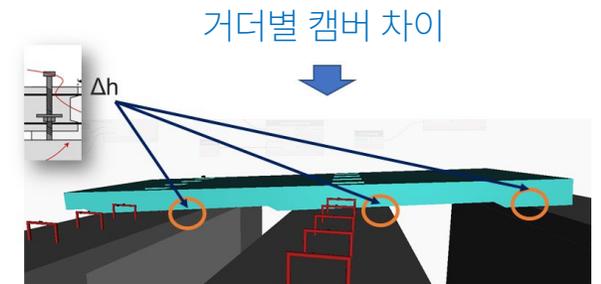
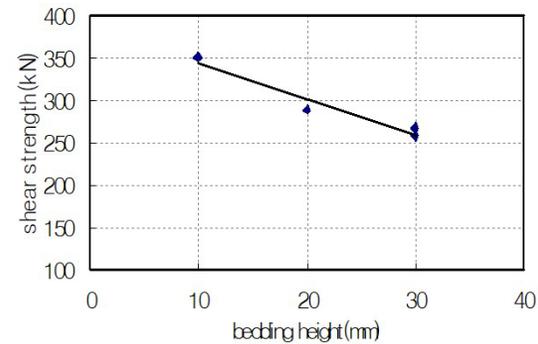
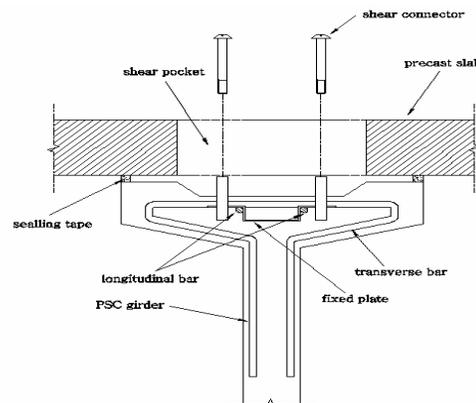
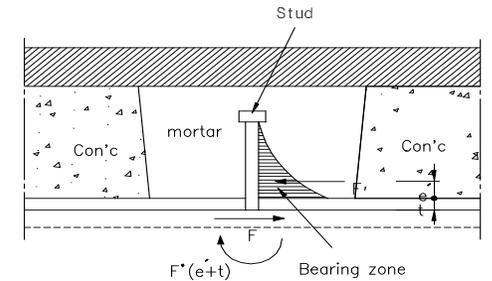
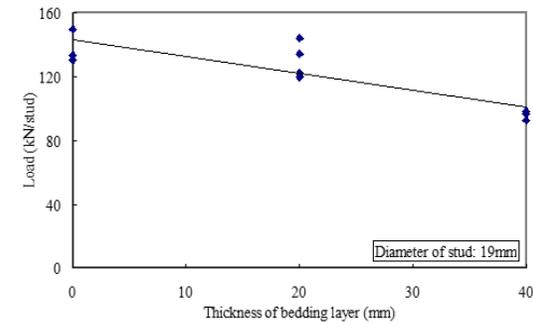
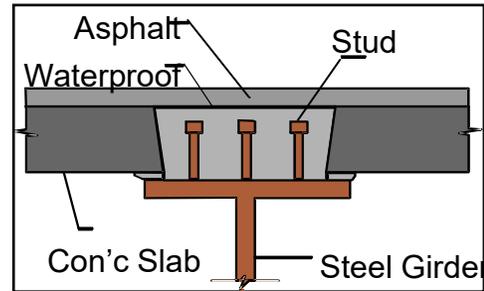


# 사전제작 교량 기술

## 부재의 허용오차

가설시 허용오차

- 연결부 거동에 미치는 제작 및 가설 오차의 영향 (현재 시방규정 미비점)
- 장기적인 교량의 사용수명에 미치는 영향
- 형상품질관리의 중요성 부각



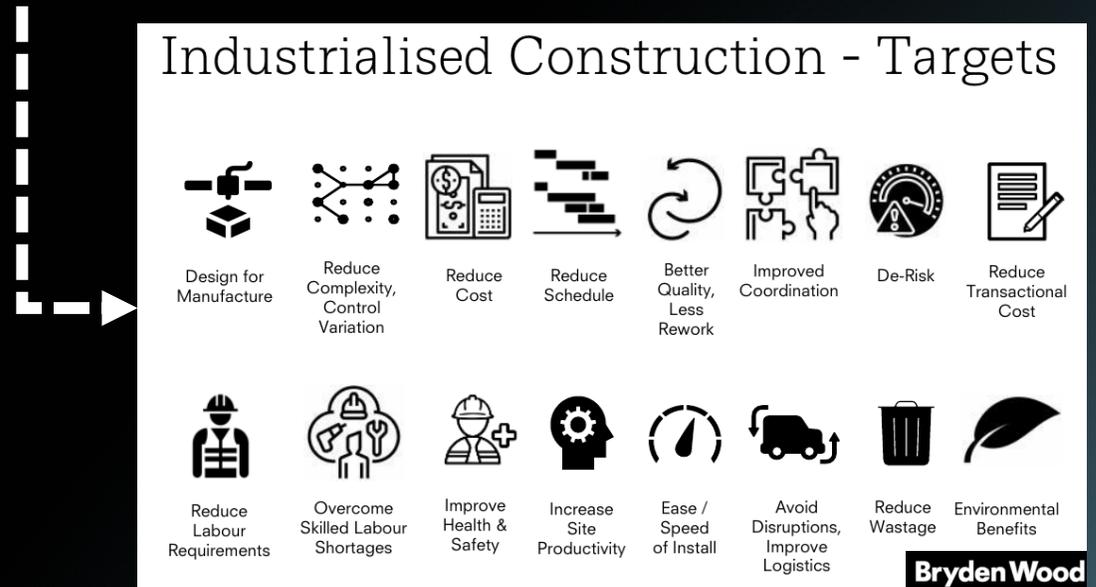
# DfMA&M 개념

Design for Manufacturing

# DfMA&M 개념

## DfMA

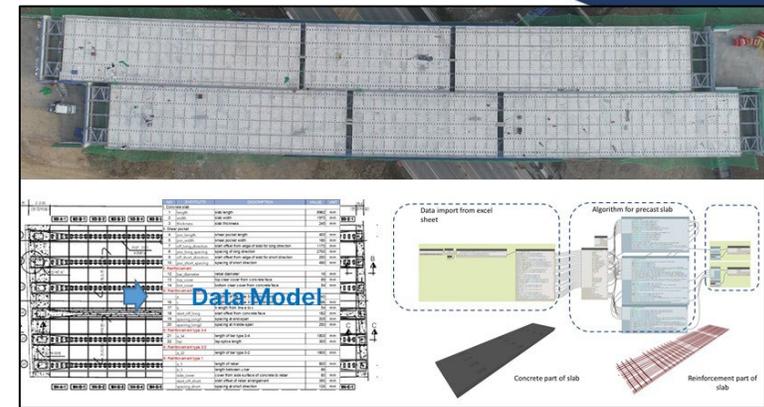
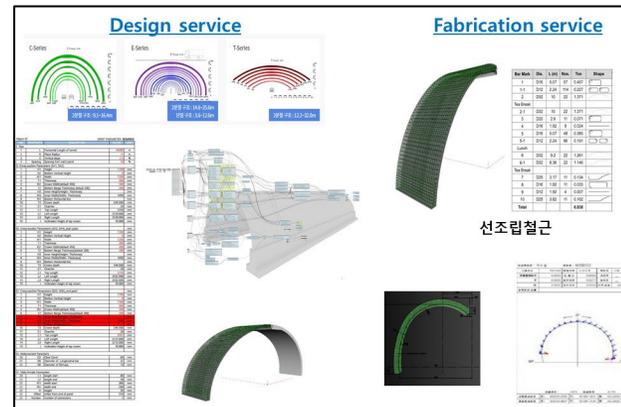
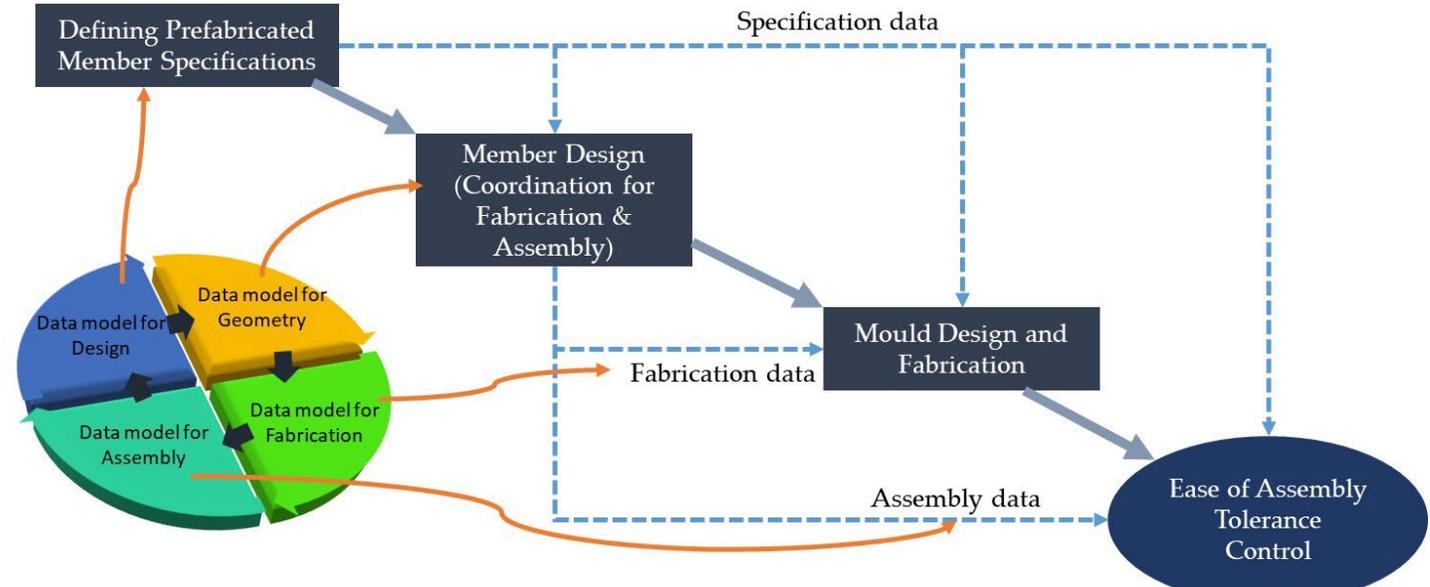
- Simple Design
- Reduce part count and part types
- Use standard parts
- Easy and efficient fasteners
- Design parts to be self-aligning and self-locating
- Be aware of process limitations
- Use suitable tolerances
- Minimise system complexity



# DfMA&M 개념

## Design for Manufacturing

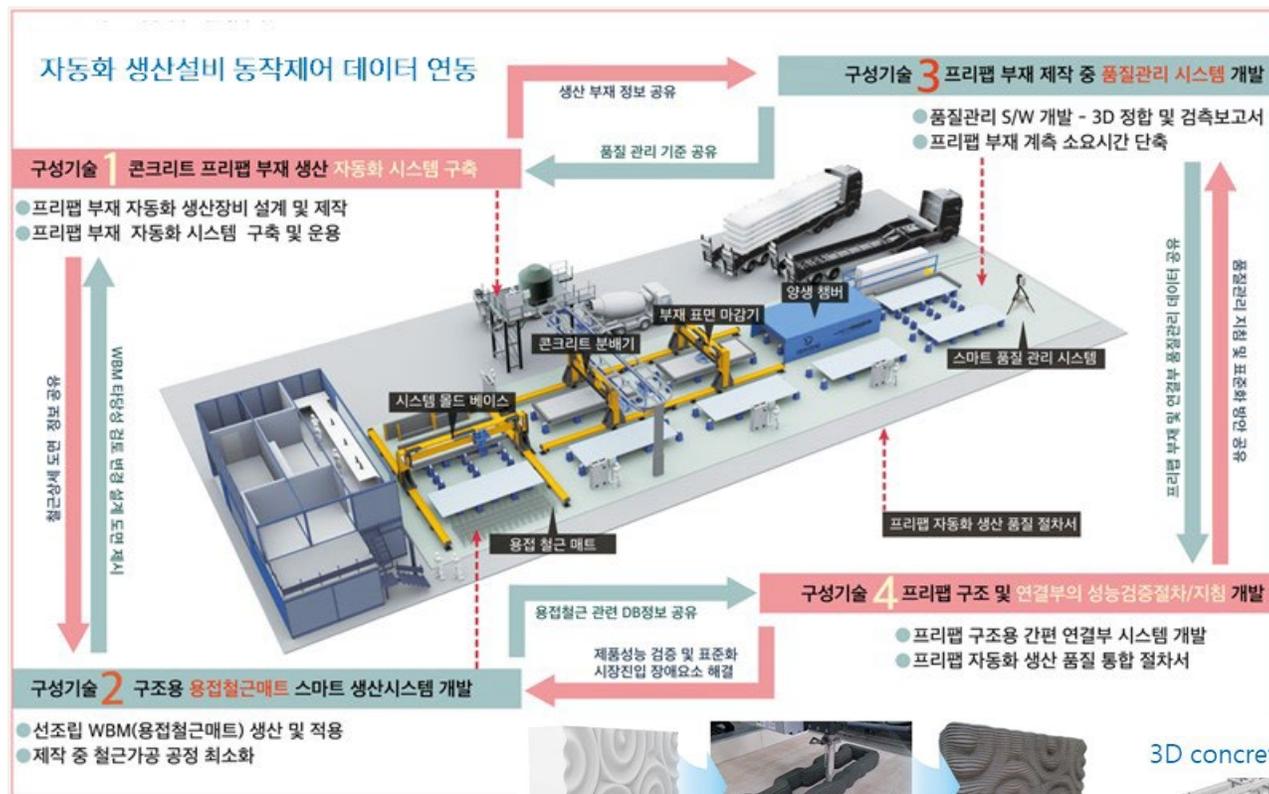
- 프리패브 구조 부재의 생산시 거푸집의 종류 최소화를 위한 설계
- 구성 요소의 생산/운송/제작 비용 최소화



# DfMA&M 개념

## Design for Manufacturing

### 부재의 자동화 생산 연계 설계기술



로봇 생산 장비 및 3차원 프린팅 제작 한계 반영한 설계

**3D concrete printer**

**Robot arm**

**Fabrication Info.**

Mix design, Nozzle Speed, Path (thickness and with of a layer)	Reference point Tool path Tool change
----------------------------------------------------------------	---------------------------------------------

# DfMA&M 개념

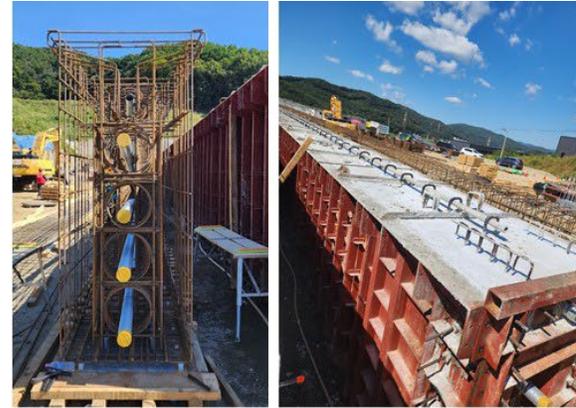
Design for Assembly

# DfMA&M 개념

## Design for Assembly

- 프리팹 비율 증가에 따른 조립성을 위한 허용오차 축소 → 설계 상세 변화 필요
- 부재 제작 후 형상 검측을 통해 조립 계획 수립 절차 : Preassembly
- 연결부, 면과 면 접합, 회전 등의 예측 어려운 변형 대응 상세

- 기준 좌표 (관리주체)
- 형상 검측 데이터의 전달/공유
- 허용제작오차 (3차원적 검토)
- 사전조립성 검토 (누가?)



거더 제작

- 검측항목이 프리팹 정도가 높을수록 3차원 조립성 보장에 부족
- 통합적인 형상품질관리 절차 부재
- 시공 이력 데이터화 필요



가로보 가설



바닥판 가설

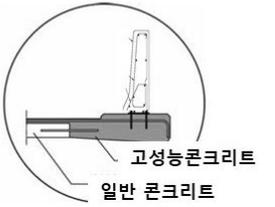
# DfMA&M 개념

Design for Maintenance

# DfMA&M 개념

## Design for Maintenance

- 프리팸 제품 성능 보증 개념 필요
- 제작과 가설조립, 이후의 유지관리 과정에서 데이터 피드백으로 설계 개선
- 교량의 사용수명 연장과 유지관리 비용절감 기술을 설계에 반영 (Realistic LCC)

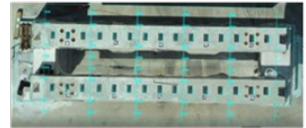


**Added Data**

- Tested material properties (concrete, rebar, strand, products)
- Tensioning and camber

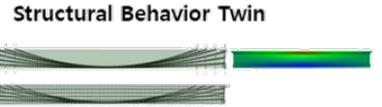
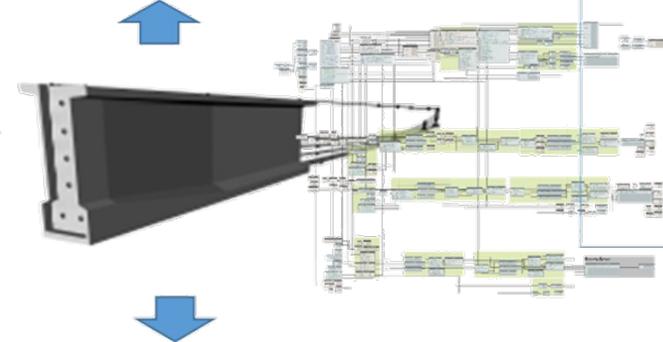
**Performance Data update**

- Stiffness (I)
- Flexural strength
- Shear strength
- Max. stress by Moment(input)



- Geometry error
- Real material properties
- Deformation by prestress or long-term deformation (camber, lateral deformation length change by Temperature)

Data  
Update



**Update**

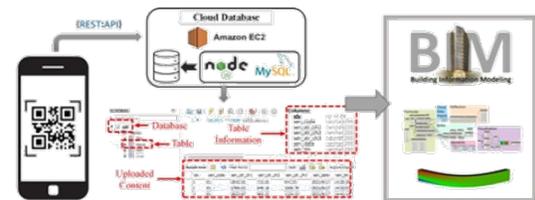
- Stress
- Deflection

By given M

Interaction with sensors

**Data for preassembly**

- Control points coordinates (center of sole plates, connectors, pockets etc)

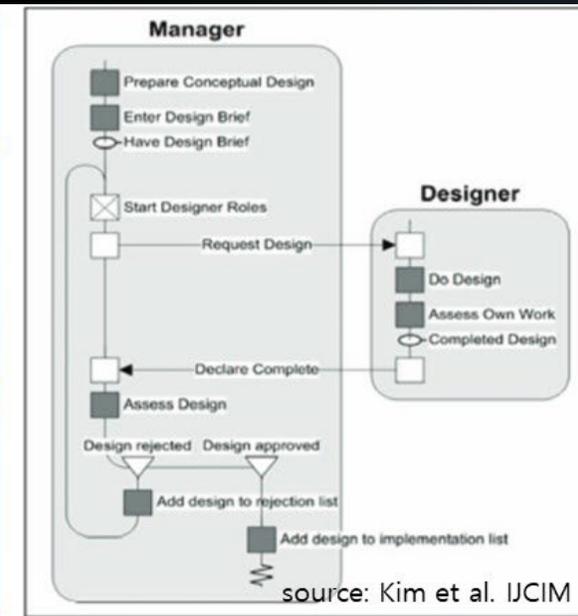
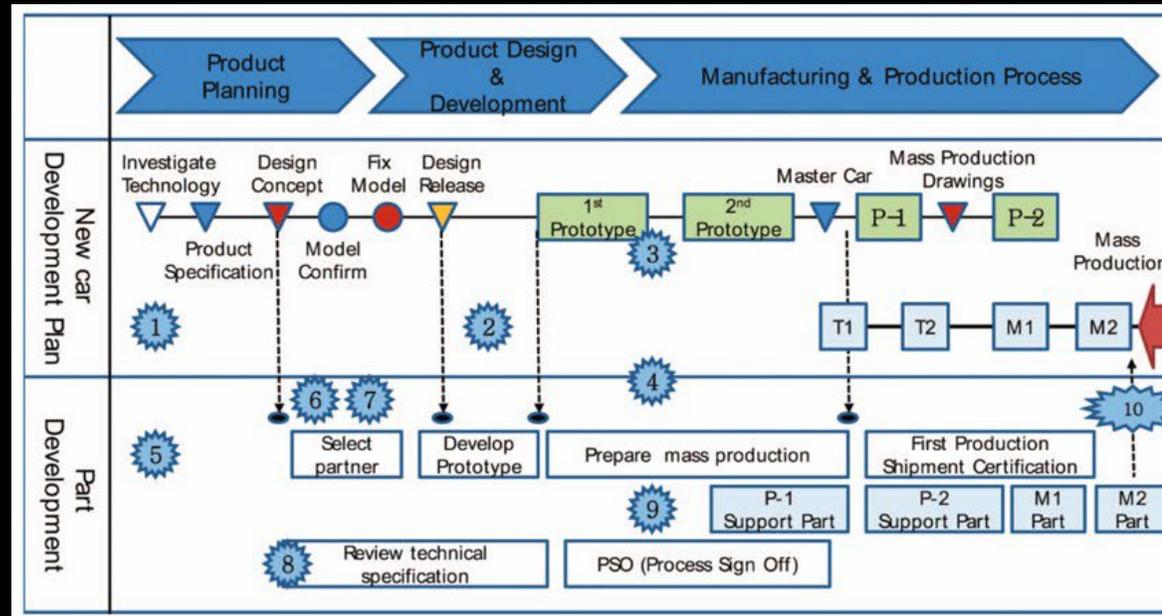
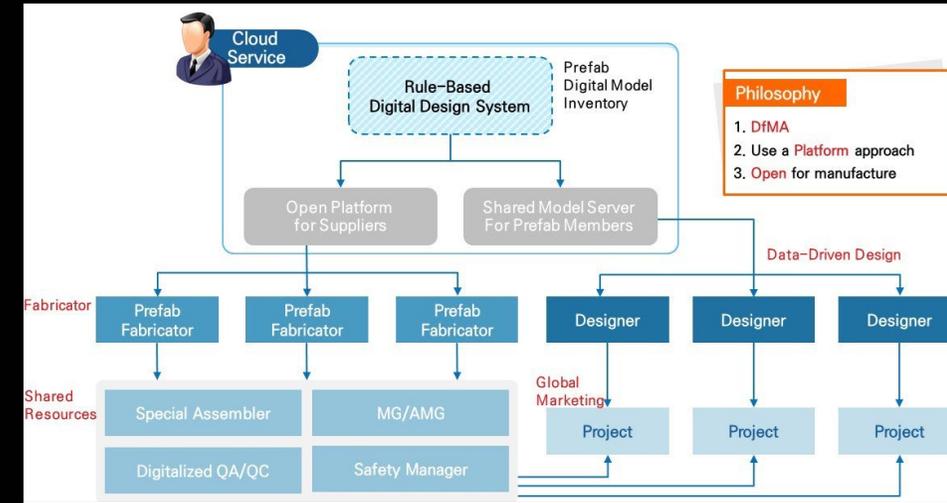


# 프리팸 교량 구조를 위한 디지털엔지니어링 모델

데이터 표준과 알고리즘

# DEM for Prefab. Members

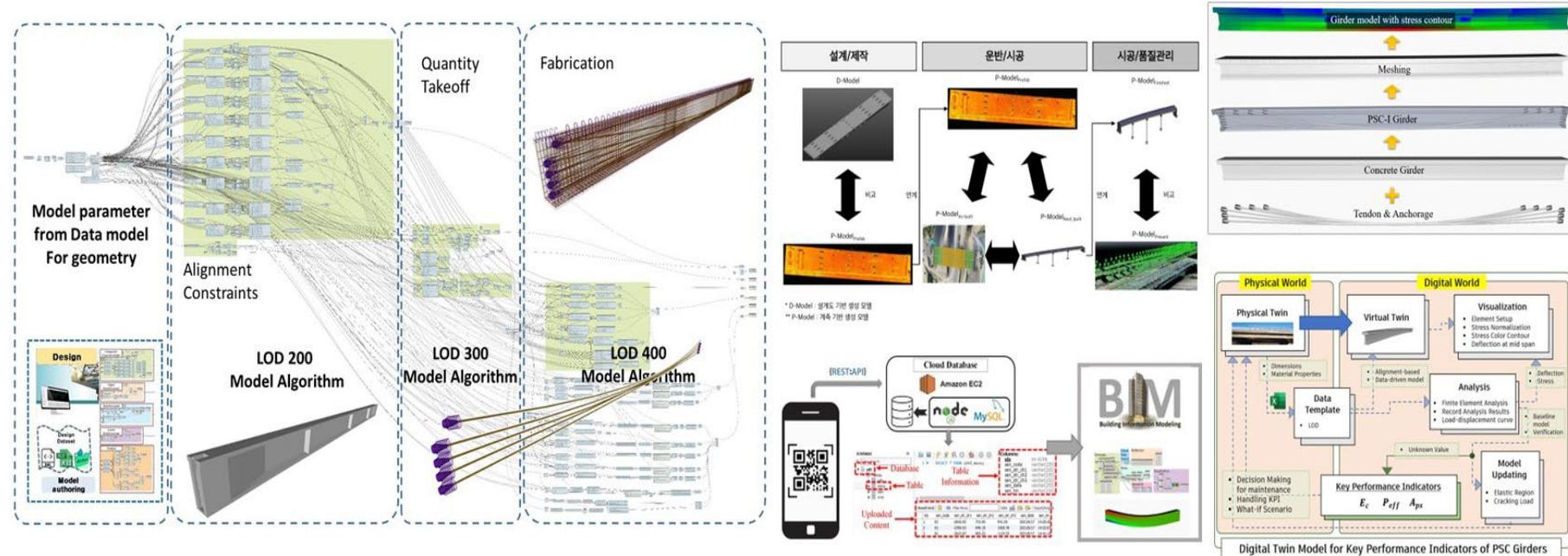
- 프리팹 모듈 공급자와 설계자간의 협업 필수
- 상시적인 피드백을 위한 데이터 표준
- 새로운 기술서비스 공급체계
- BIM SW 의존성을 최소화하는 데이터와 알고리즘 기술에 의한 협업



# DEM for Prefab. Members

## 데이터 표준과 알고리즘

- 설계업무에서 생산되는 데이터와 직접 연동되는 디지털엔지니어링 모델 생성 기술
- 제작자동화, 디지털 검측, 사전조립성 검토, 준공 데이터로 연결되는 데이터 표준
- 생애주기 거동 데이터 축적 (유사 제품군)을 통한 디지털 트윈 서비스
- 장기적으로 성능 평가 및 예측 기능 부여



# 프리팸 교량 구조를 위한 디지털엔지니어링 모델

설계모델에서 유지관리모델에 이르는 MIDP

# DEM for Prefab. Members

## MIDP

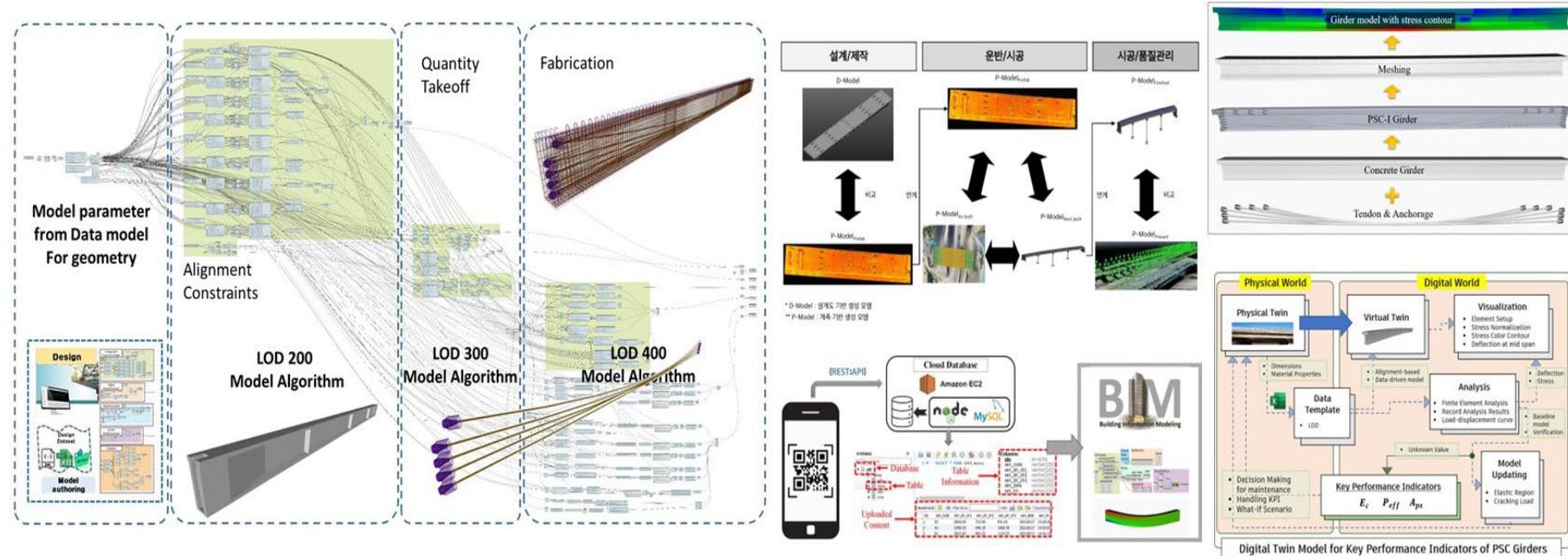
- 프리팹 제품군에 대한 Master Information Delivery Plan
- 제품 공급자가 제시하고 발주자가 승인
- 형상모델과 데이터가 함께 업데이트되면서 실제 현황 반영



# DEM for Prefab. Members

## 데이터 표준과 알고리즘

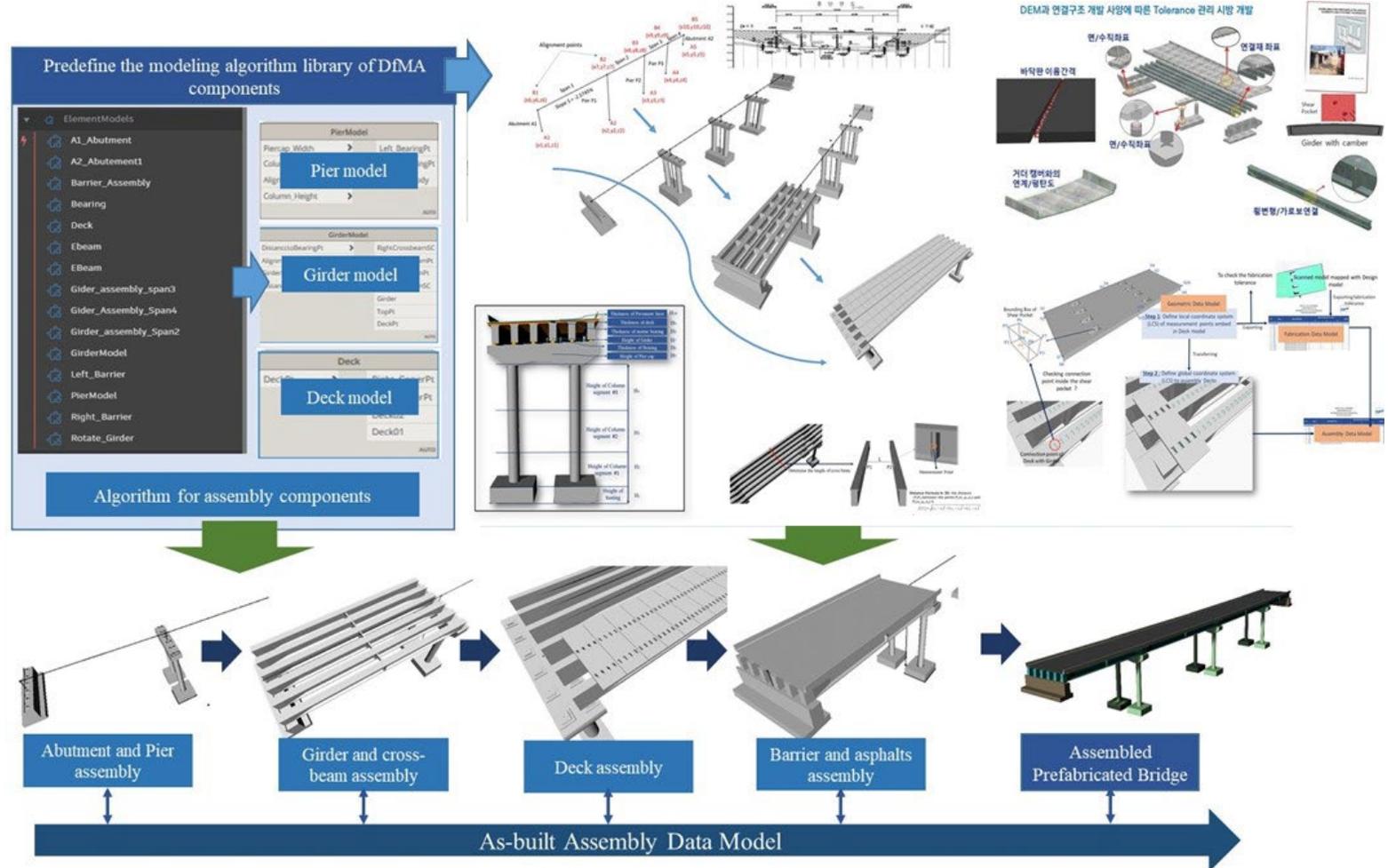
- 설계업무에서 생산되는 데이터와 직접 연동되는 디지털엔지니어링 모델 생성 기술
- 제작자동화, 디지털 검측, 사전조립성 검토, 준공 데이터로 연결되는 데이터 표준
- 생애주기 거동 데이터 축적 (유사 제품군)을 통한 디지털 트윈 서비스
- 장기적으로 성능 평가 및 예측 기능 부여



# DEM for Prefab. Members

## 설계모델에서 유지관리모델에 이르는 MIDP

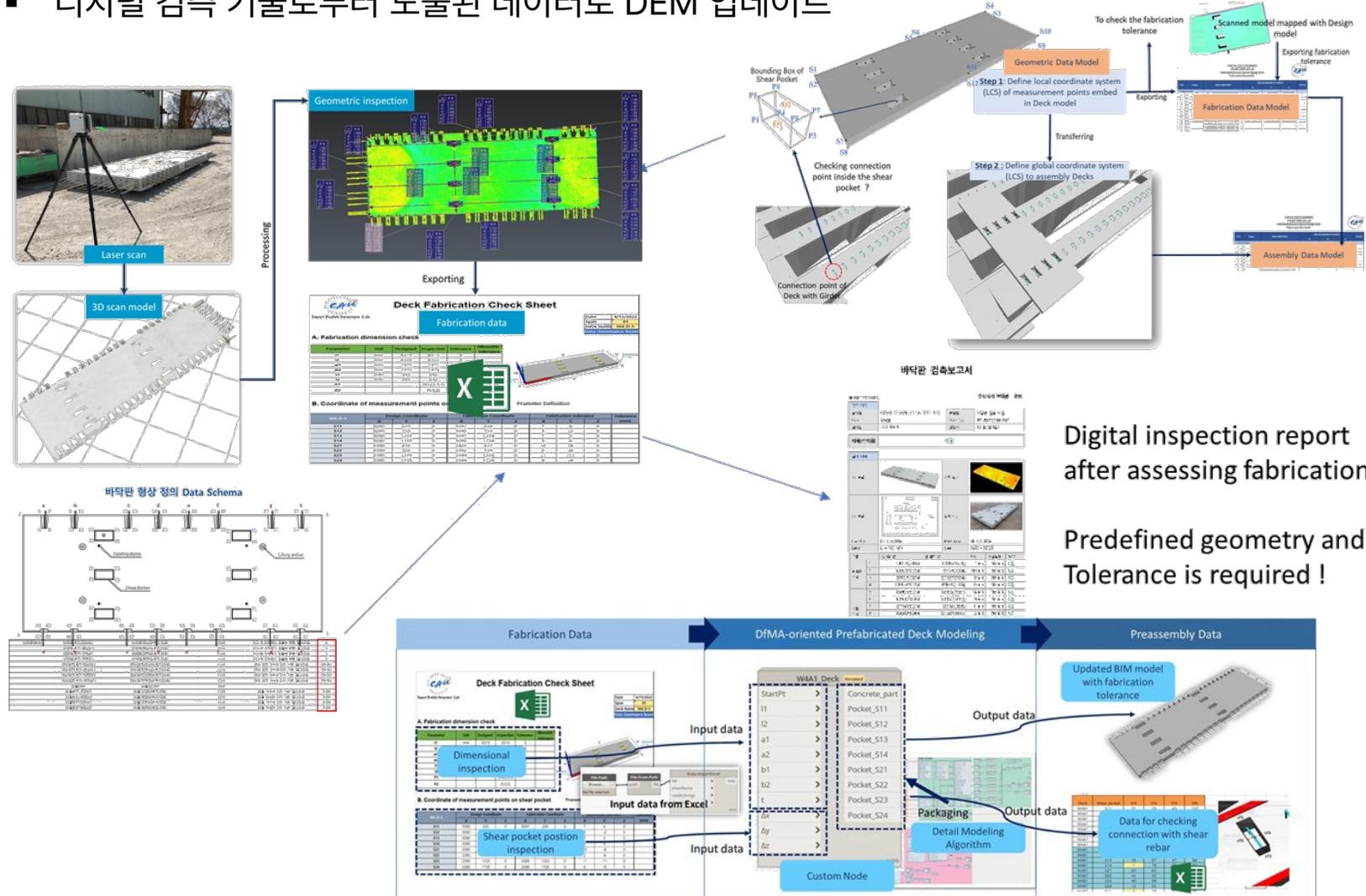
- 설계 DEM이 제작 및 가설 오차를 데이터로 반영할 수 있도록 알고리즘 개발
- 측량 및 디지털 검측데이터와 직접 연동하도록 데이터 표준 템플릿 제공



# DEM for Prefab. Members

## 설계모델에서 유지관리모델에 이르는 MIDP

- 디지털 검측 기술로부터 도출된 데이터로 DEM 업데이트



Digital inspection report after assessing fabrication error

Predefined geometry and Tolerance is required !

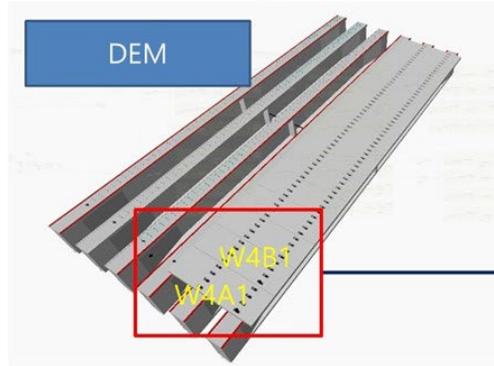
# DEM for Prefab. Members

## 설계모델에서 유지관리모델에 이르는 MIDP

- 가설시 조정되는 형상 반영한 준공 데이터 확보

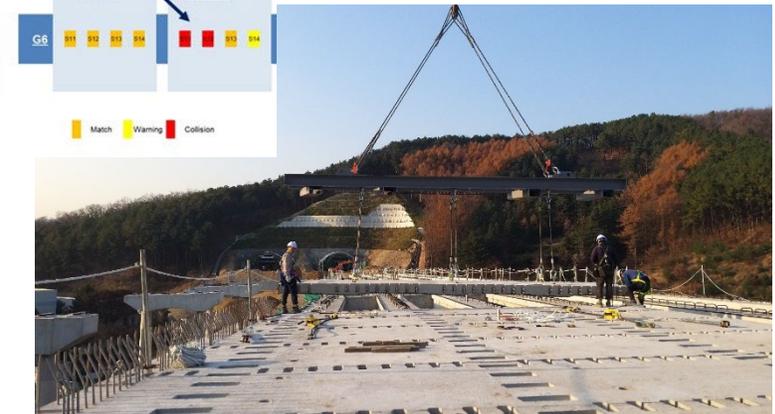
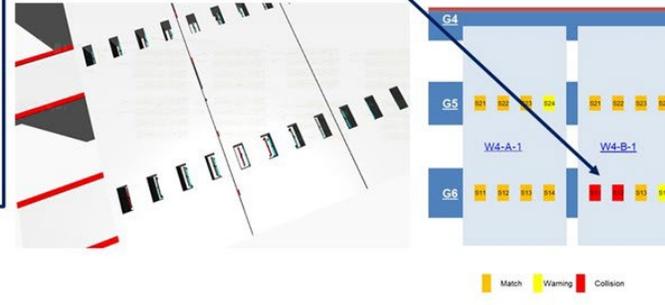
No.	Name	L1	L2	A1	A2	B1	B2	t
1	W4A1	6325	6311	1235	1221			245
2	W4B1	6337	6325	1247	1235	247	235	245
3	W4B2	6347	6337	1257	1247	257	247	245
4	W4B3	6355	6347	1285	1257	265	257	245
5	W4B4	6361	6355	1271	1265	271	265	245
6	W4B5	6365	6361	1275	1271	275	271	245
7	W4B6	6367					275	245
8	W4B7	6367					277	245
9	W4B8	6365					277	245
10	W4C1	6362					275	245
11	W4D1	6356	6362	1266	1272	233	239	245
12	W4D2	6349	6356	1259	1266	226	233	245
13	W4D3	6340	6349	1250	1259	217	226	245
14	W4D4	6328	6340	1238	1250	205	217	245
15	W4D5	6315	6328		1238	192	205	245
16	W4E1	6300	6315		1225		192	245

Geometric Data



Deck-girder preassembly check

Deck	Shear pocket	Sf3	Sf4	Sf5	Sf6
W4A1	S11	22	33	43	102
W4A1	S12	22	74	42	60
W4A1	S13	15	50	48	83
W4A1	S14	17	42	45	91
W4A1	S21	40	80	23	54
W4A1	S22	25	54	38	80
W4A1	S23	49	25	13	107
W4A1	S24	8	64	54	89
W4B1	S11	29	-8	35	151
W4B1	S12	7	0	56	133
W4B1	S13	9	47	66	
W4B1	S14	79	56	54	
W4B1	S21	22	62	42	72
W4B1	S22	42	2	21	102
W4B1	S23	40	69	23	63
W4B1	S24	12	63	50	70
W4B7	C11	8	38	7	04

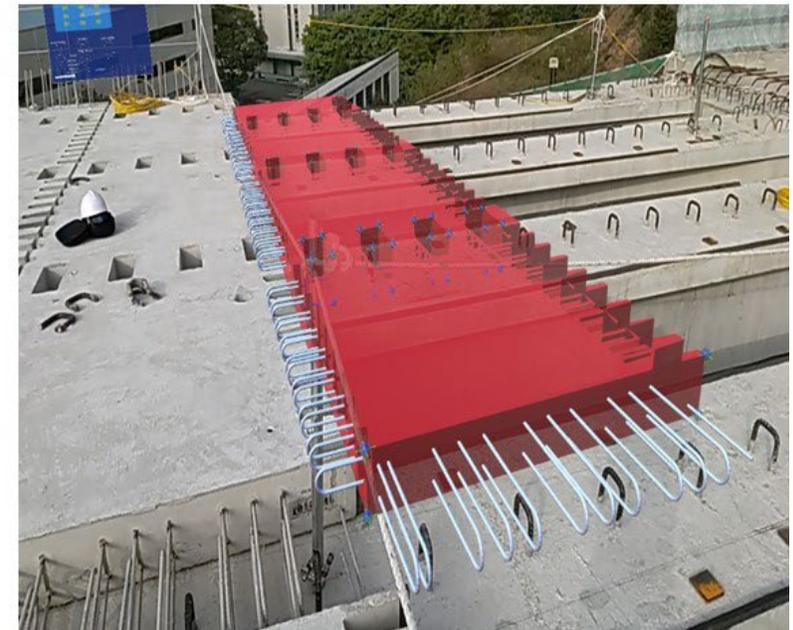
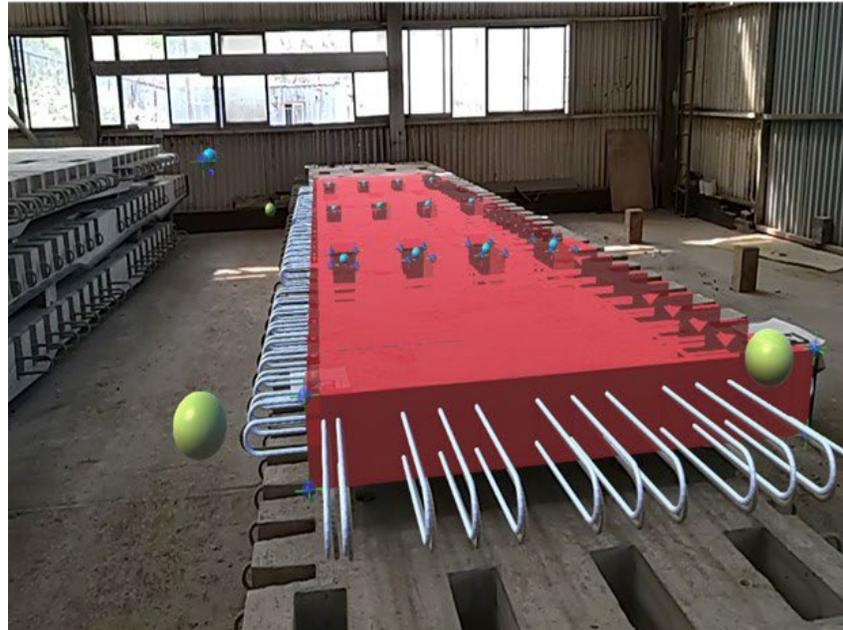


Preassembly 과정에서 조정 방안 도출 후  
 작업지시서 작성 : 레벨링볼트 & 간격재 & 이음간격

# DEM for Prefab. Members

## 설계모델에서 유지관리모델에 이르는 MIDP

- 현장 활용 가능한 새로운 서비스 제공
- 증강현실 장비에 모델 및 데이터 탑재
- 실시간 부재 검측
- 현장에서 검측된 부재 사전 가설

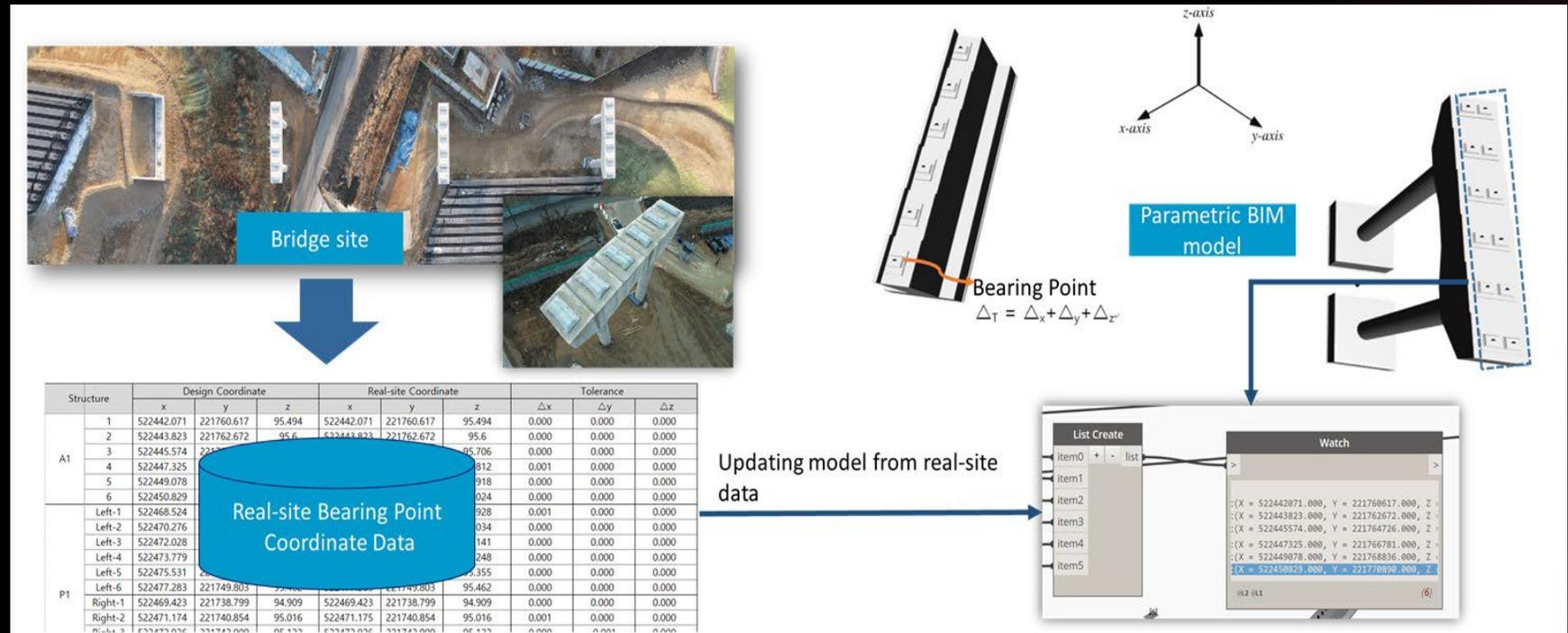


# 프리팸 교량을 위한 설계 및 품질관리 기술

프리팸 교량 구조를 위한 설계 개선

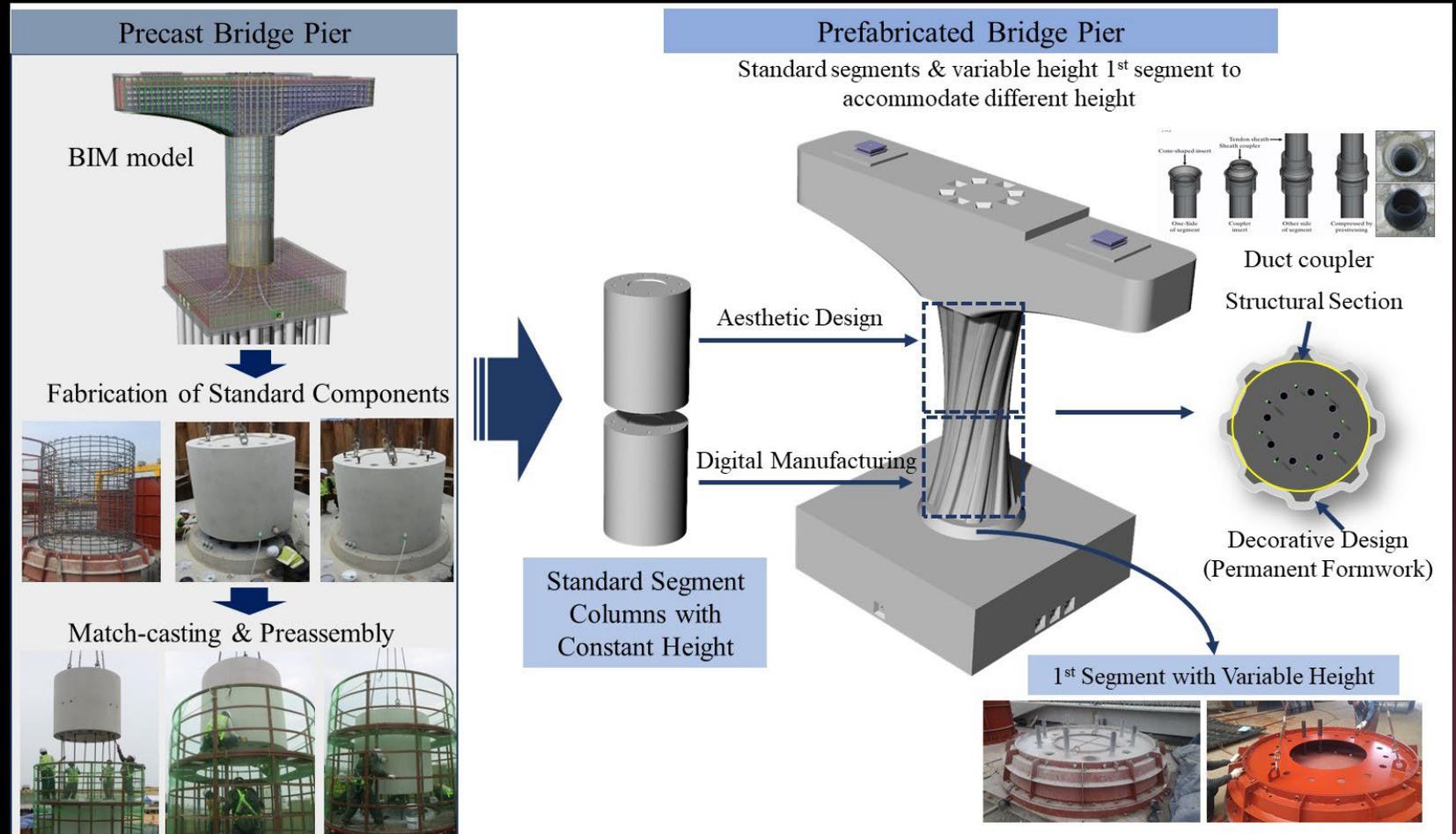
# 설계 및 품질관리 기술

- 다수의 프리팹 가설팀을 위한 사업현장 좌표 관리
- 기준점을 사전조립성 검토를 위해 설정하고 이를 모델 알고리즘에 반영
- Model-driven Design에서 기준선, 기준면, 기준점 설정
- 가상현장을 기반으로 하는 설계



# 설계 및 품질관리 기술

- 이음부 내구성 이슈를 해결하기 위한 상세 설계 반영 : 덕트 커플러 및 면 경사
- 시공시 연결 철근 및 면 접합 용이성을 고려한 설계 : 가이드 상세

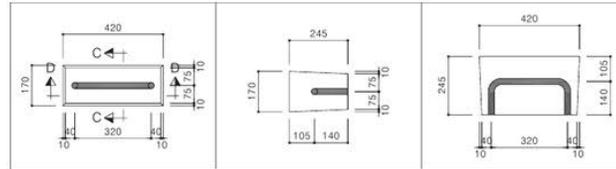


# 설계 및 품질관리 기술

## 프리패브 교량 구조를 위한 설계 개선

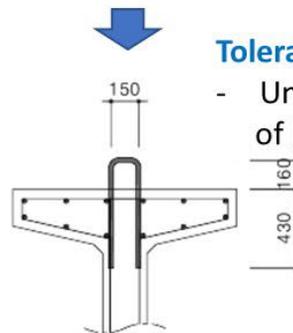
- 시간에 따른 변형이 있는 프리패브 거더 부재로 인한 조립성 어려움 해소 상세 개선
  - 솟음 및 횡만곡 변동성 대응 필요
- 전단연결재 폭 감소로 허용오차 확대 및 작업자 안전 개선
- 연결되는 부재간 설계 데이터 표준 설정으로 조립 용이성 확보

### Detail Change for DfA



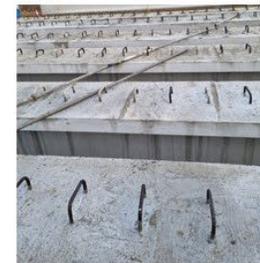
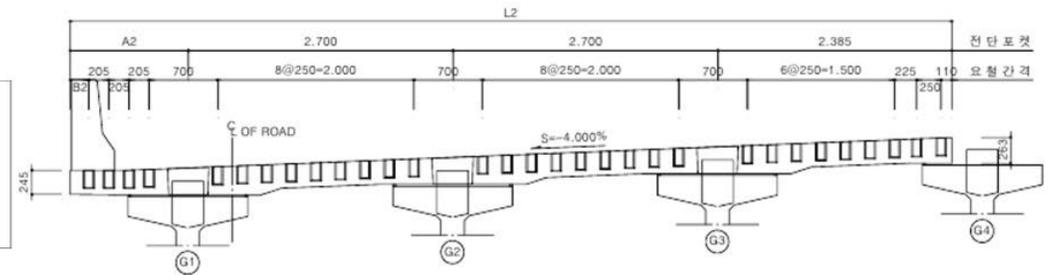
Common practice of shear reinforcement

➔ Tolerance in transverse direction : 40mm



Tolerance limit : 210mm

- Unexpected lateral deformation of long prefab girders



Improved detail of connectors



# 프리팹 교량을 위한 설계 및 품질관리 기술

프리팹 교량 구조부재의 품질관리

# 설계 및 품질관리 기술

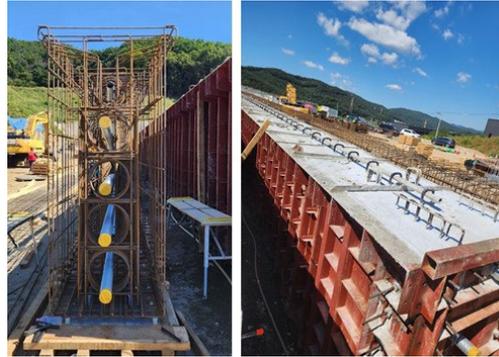
- 프리캐스트 부재의 적재 및 운반 중 품질관리 절차
- 현장에서 타설되는 재료에 대한 관리 및 품질 균질성 확보 기술 (에폭시, 채움재료)



# 설계 및 품질관리 기술

## 프리팹 교량 구조부재의 품질관리

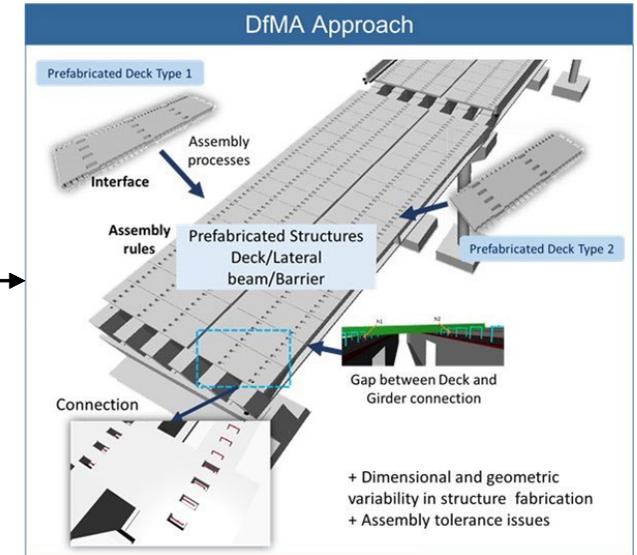
- 형상 품질관리 : 현재 시방규정 이외의 중점관리 대상 형상 지정 및 허용 오차 재설정
- 제품화 정도에 따른 품질관리 간소화 : 공장인증 혹은 제품 보증



- 텐던 배치 대칭성
- 연결재 위치
- 시간에 따른 변형

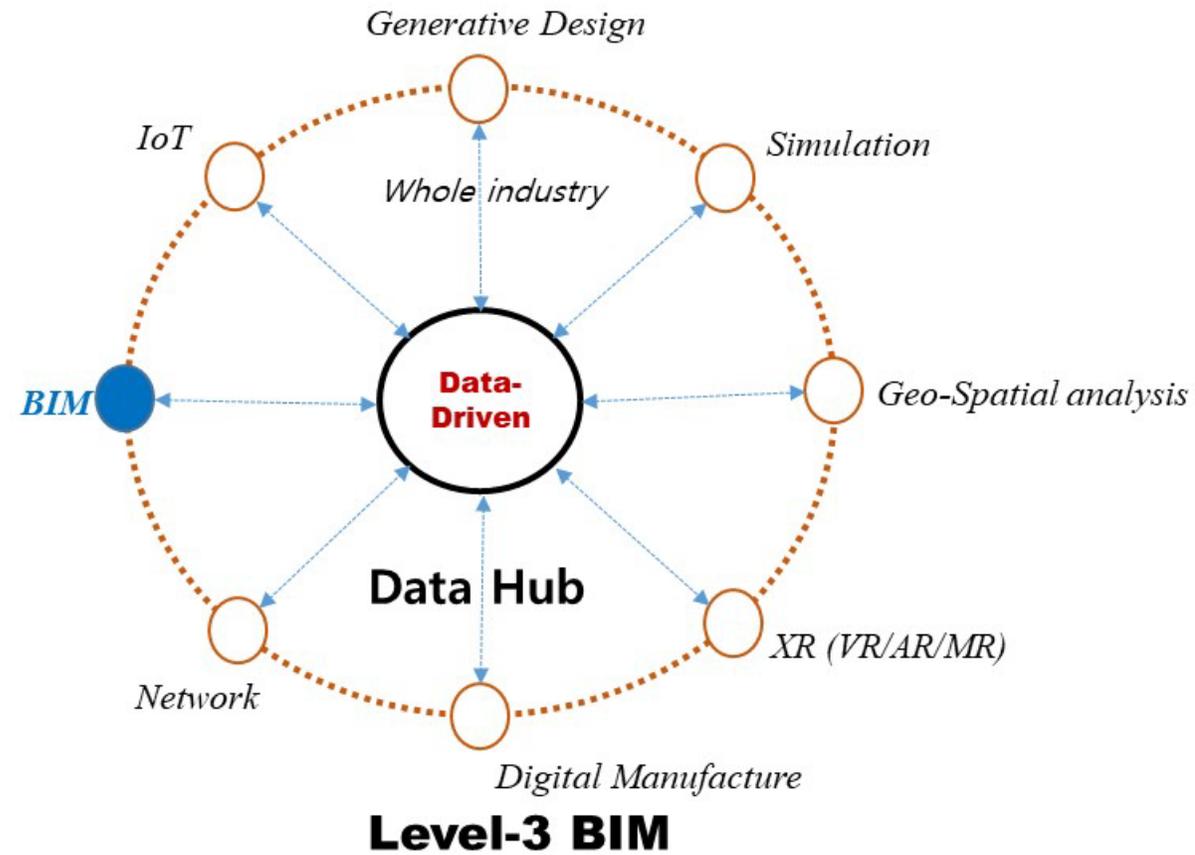
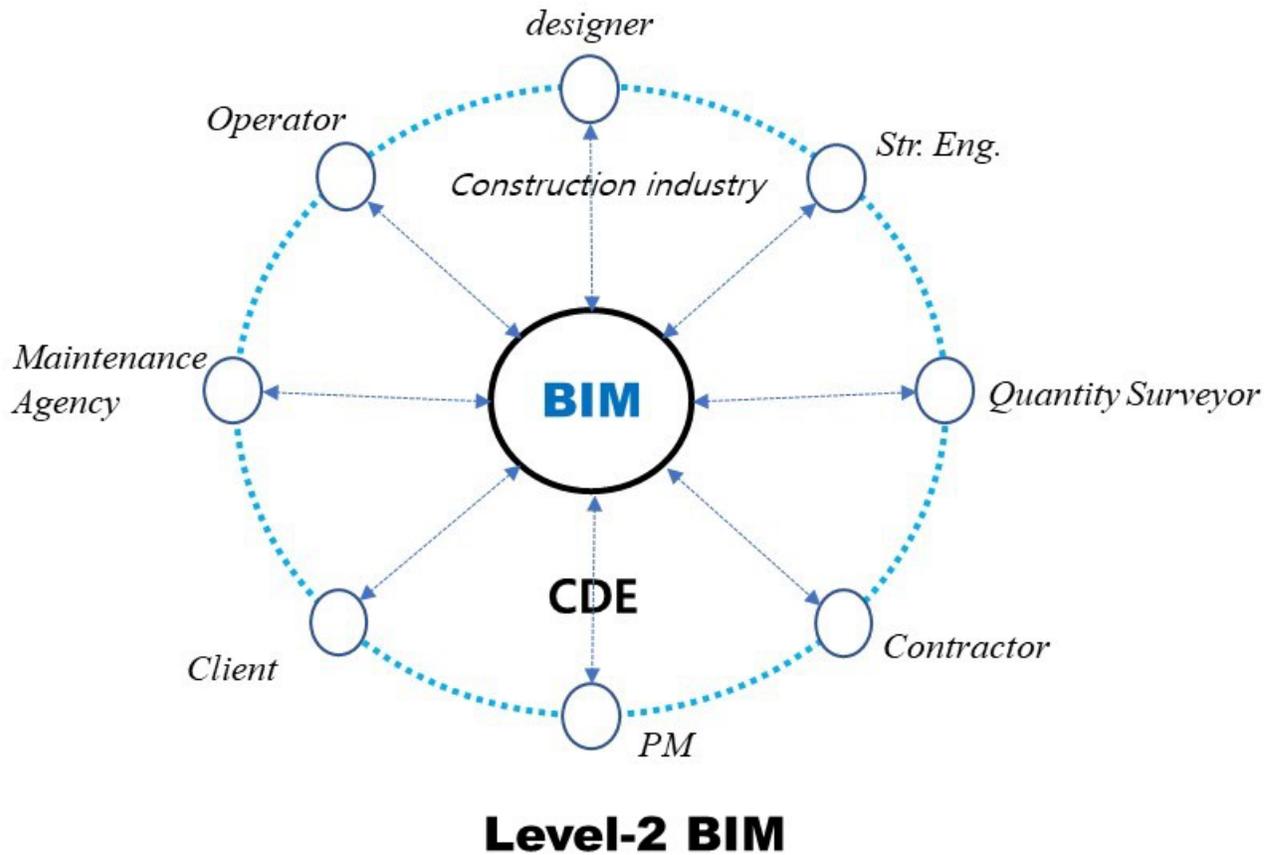
- 전단포켓의 위치
- 돌출 철근
- 바닥판 면 변형

- 길이 조정 가능
- 면 회전 대응



# 마무리

프리팸 교량 설계 기술의 핵심은 데이터 관리



# 기술강연 소개글 작성양식

## "프리팸 교량 구조를 위한 DfMA 기술"

본 강연은 건설산업에서 추구하는 Off-Site Construction을 확대하기 위해 필요한 기술 혁신을 다루는 자리입니다. 이 강연에서는 교량구조의 Prefabrication을 디지털화하기 위해 필요한 DfMA(Design for Manufacturing and Assembly) 기술을 BIM 데이터 관점에서 논의할 것입니다. 설계자가 제작 및 조립가설의 용이성을 고려한 설계를 어떻게 개선할 수 있는지와 건설 사업 전 과정에서 BIM 데이터를 공유함으로써 얻을 수 있는 협업의 성과를 실제 사례를 통해 구현합니다. 프리팸 구조는 디지털 기술로 인해 현재의 사전제작 구조 부재들의 품질을 높이고 설계의 유연성과 시설물의 장기적인 가치를 높일 수 있습니다. 이 강연을 통해 스마트건설기술개발사업에서의 프리팸 교량 구조를 대상으로 하는 시범 적용 사례를 고찰합니다.

## 심창수 교수, 중앙대학교 사회기반시스템공학부

중앙대학교 구조공학 전공 교수로 합성구조의 연결부에 관한 연구를 시작으로 다양한 프리캐스트 및 합성구조에 대한 연구를 진행해왔고 이 과정에서 BIM을 국내에 토목분야에 도입하기 위해 노력하였으며 한국BIM학회 학회장을 역임하였다. 현재 스마트건설기술개발 사업에서 도로구조물의 디지털 모델링 기술에 기반한 프리팸 구조에 관한 설계-제작-시공 지원 기술 개발을 총괄하고 있다.

**프로필 사진은 녹화당일에 촬영할 예정이므로 보내주시지 않으셔도 됩니다.**

## 강연 제목을 작성해 주세요.

강연 소개글을 이곳에 작성해 주시기 바랍니다.

## 성함 직책, 소속을 작성해주세요.

강연자 소개글을 이곳에 작성해 주시기 바랍니다.