



### 6.3 FRP스트럿 MSS박스거더교

FRP피복 RC스트럿 구조는 콘크리트 스트럿의 미관불량, 강관스트럿의 부식, 유지관리의 어려움 및 연결 용접부의 피로 문제 등을 개선한 형태이다. 채색이 가능한 FRP 피복을 적용함으로써, 미관 향상, 부식방지 및 내구성 증진을 도모할 수 있다.

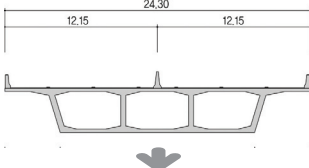
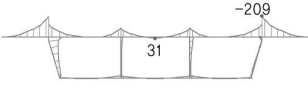
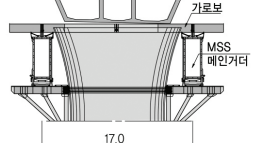
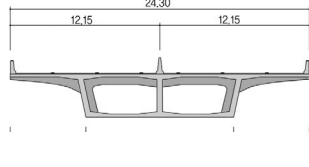
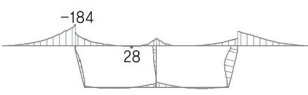
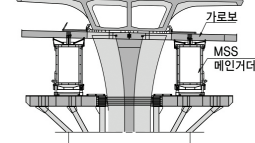
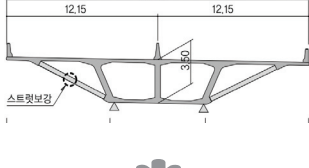
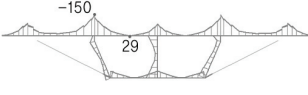
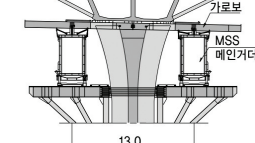
#### 1. FRP스트럿 MSS박스거더교의 배경 및 제원

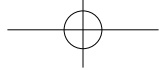
PSC Box Girder의 주형단면 형상을 결정하기 위해 구조성, 경제성, 경관성 및 시공성 측면에서 전반적인 검토가 수행되었다. 검토결과, 캔틸레버부의 처짐제어 및 횡방향 효율성이 우수하고, 상부 및 하부구조의 경량화, 슬림화한 주형연출이 가능하고 MSS(Movable Scaffolding System) 공법에 의한 상부 일괄시공으로 시공의 단순화를 꾀할 수 있는 FRP스트럿 MSS박스거더를 채택하였다.

#### > FRP스트럿 MSS박스거더교 제원

교량명	위치	연장 (m)	지간구성	폭원(m)	비고
본선	STA.0+029 - 1+408	1,437	57+23@60	송도/영종방향 각 12.15m	3공구
본선 - 접속교	STA.0+230 - 0+997	600	10@60	서울/영종방향 각 12.15m	4공구

#### > 타 공법과의 비교

비 교 안	구조효율 / 경제성	경관성 / 시공성
제1안 : 1주형 박스거더(기존) 	 • 자중: 433kN • 하부규모 큼	 • 특색없는 면의 연속으로 단조로움 • 상부중량이 무겁고 박스폭이 넓어 MSS 거더규모 커짐
제2안 : 리브부착 박스거더(기존) 	 • 자중: 416kN • 리브설치로 횡방향 효율성 증대, 하부 규모 작음	 • 리브의 반복으로 리듬감 연출 • MSS가설시 횡리브의 돌출 구조로 내부거푸집 운영복잡
제3안 : 스트럿부착 박스거더(혁신) 	 • 자중: 388kN • 스트럿 설치로 횡방향 효율성 증대, 하 부규모작음	 • 스트럿의 반복으로 리듬감 및 주형의 슬림한 이미지 연출 • 스트럿 설치공정 일괄시공 가능

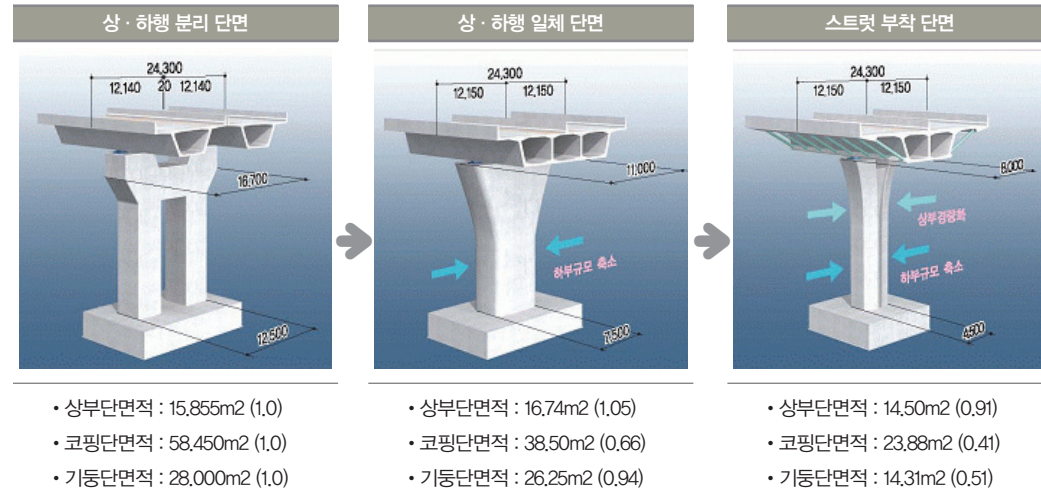


## 2. FRP스트럿 MSS박스거더교의 공법특징

### 1) 단면 효율성

상하행선 분리단면에 비해 상부구조의 경량화(9%), 하부구조 단면축소(49%)의 효과가 있었으며 이에 따른 내진성능 및 횡방향 효율성의 증가, 하부 개방감 향상에 의한 하부 공간이용 및 경관 개선의 효과를 꾀할 수 있었다.

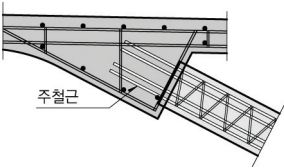
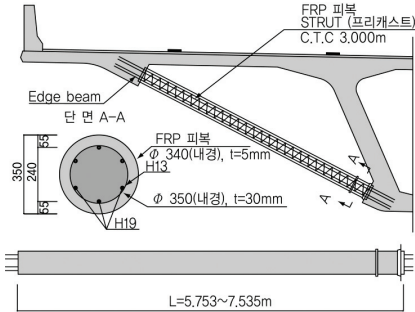
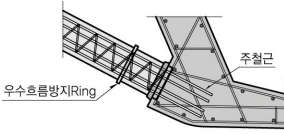
#### > 형식별 상·하부 단면 효율성 비교



### 2) FRP 피복 스트럿 구조의 특징

FRP 피복 스트럿 구조는 철근콘크리트 스트럿의 미관불량, 강관 스트럿의 부식 및 유지관리의 어려움, 연결 용접부의 피로문제 등을 효과적으로 개선하기 위해 채색이 가능한 FRP 피복을 적용함으로써 스트럿의 미관 향상, 부식방지, 내구성 증진을 통한 유지관리비용 절감의 효과를 기대할 수 있다.

#### > FRP스트럿-본체 연결 형식 및 스트럿 단면도

본체-스트럿 연결 특징		FRP 피복 스트럿 단면도
상 단		
하 단		
특 징	<ul style="list-style-type: none"><li>• 상부 연결중 철근강결안은 접합이 쉽고 Conc 스트럿 연결 실적이 많음</li><li>• 일괄타설인 경우 적합한 연결구조</li></ul>	



3) 실물재하시험 및 FRP관의 성능 평가

국내 최초로 적용된 FRP피복 RC스트럿 PSC 박스거더교의 구조적 안전성을 확보하기 위한 검증 연구가 요구되었다. 이에 따라, FRP관의 품질시험, 실물모형 재하실험등을수행하여 사용성, 안전성 등 제반의 구조적 성능을 평가, 검증하였다.

> 단면성능시험 항목 및 시험방법

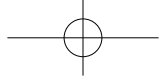
시험 항목	시험 목적	시험 방법
FRP 시편 인장시험	재료의 탄성계수, 강도, 포아송비, 파단연신률 등의 FRP 재료 특성 확보	ASTM Standard D2290-04에 의한 split-disk 시험 수행
FRP 스트럿 콘크리트 충전체 일축압축시험	FRP 피복에 의한 횡방향 구속의 기여정도 측정	φ300x600mmx5mm의 FRP 피복관에 콘크리트를 충전하여 일축압축강도측정시험
실물모형 재하시험	유한요소해석 결과와 상호 비교하여 상부슬래브의 거동, 엷지빔의 거동, 스트럿 본체의 안전성 검증	실물크기의 시험체를 종방향 길이 5.0m로 제작하여 1축, 2축 하중을 재하하여 구조물의 거동 측정
스트럿-본체 접합부 피로시험	본체-스트럿 연결접합부의 피로에 대한 사용성 검증	피로시험체(LxHxB=2.0mx1.2mx1.3m)를 제작하고 피로하중(P=0.5 ~ 10.5tonf)으로 200만회 반복재하 하여 접합부 및 스트럿의 변위 측정
FRP 스트럿 철근콘크리트 충전체 압축, 휨시험	FRP 피복 스트럿의 안전성에 대한 정량적 평가를 수행하고 RC 충전 FRP 스트럿의 전용 해석/설계 프로그램 개발을 위한 기초 데이터 수집	시험체의 직경과 높이, FRP 피복의 두께를 변화시켜 철근콘크리트로 충전하여 제작된 공시체의 일축압축 및 휨시험

가) FRP관의 성능평가



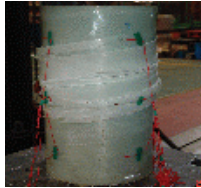
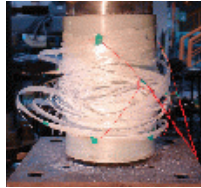
실물시험에 앞서 FRP 피복관의 제작을 위한 제작시방의 제시와 생산제품에 대한 품질을 확인하기 위한 기초성능평가시험을 수행하였다.

> 설계에 적용된 FRP 관의 단면 구성

단면의 구성 및 제원				
	구 조	기 능	두 께	재 료
	최내층	콘크리트 알칼리에 대한 FRP의 내화학성	0.5mm	에폭시 수지
	중간층	형상유지, 내력저항	3.0mm	유리섬유+에폭시 수지
	최외층	UV차단, 내후/내화성, 차후 보수/보강대비	1.5mm	UV차단포+유리섬유+에폭시 수지
	도장층	내후성, 미관	≥ 60μ	불소도장(유색)



> 시편의 파괴양상

			
(a) 에폭시 수지	(b) 폴리에스터 수지	(a) 에폭시 수지	(b) 폴리에스터 수지
인장시험(FRP관)		압축시험(콘크리트충진 FRP관)	

당 현장에 적용될 최종 제품의 검증을 위하여, 설계시 적용된 제원을 갖는 FRP 관을 제작하여 실험을 실시하였다. 실험 결과, 적용 FRP 관은 충분한 콘크리트 구속효과를 나타내어 인장강도, 인장탄성계수 그리고 압축탄성계수 모두 설계요구값을 만족하였다.

> 설계 FRP관 제품의 성능평가결과

구분		파괴하중 (tonf)	파괴응력 (MPa)	평균파괴 변형률 ( $10^{-6}$ )	탄성계수 (GPa)
인장실험	실험값(평균)	15.27	585.8	15,117	45.60
	설계 요구값	—	370.0	—	30.00
압축실험	실험값(평균)	44.64	80.0	9,959	9.98
	설계 요구값	—	—	—	6.00

> 설계 FRP관의 파괴양상

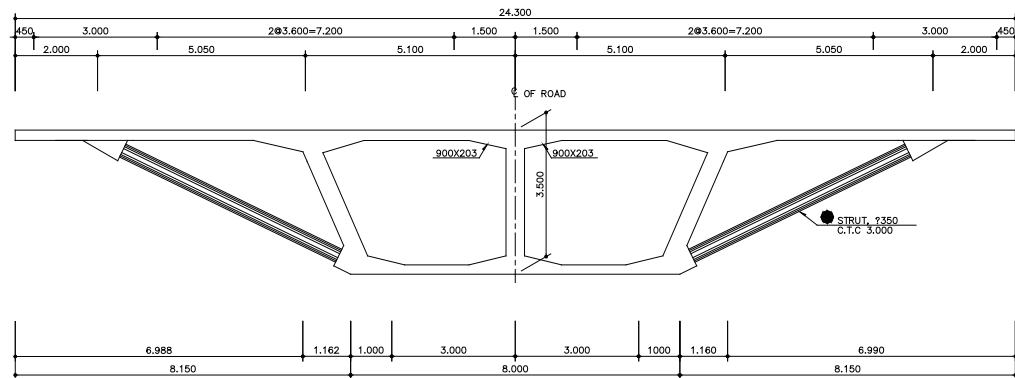
		
인장시험(FRP관)		압축시험(FRP관)



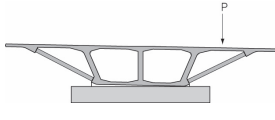
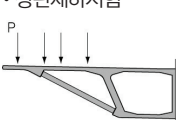
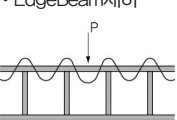
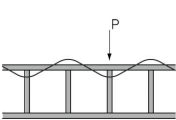
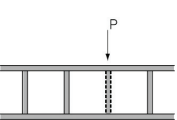


#### 나) 실물재하시험

FRP피복 RC스트럿 PSC 박스거더의 실물재하시험을 수행하기 앞서 사전 구조해석을 실시하여 재하시험 전 대상구조물의 거동특성을 파악하고, 모형시험체 제원, 센서 부착위치 및 종류, 하중재하방법 및 위치, 재하장치 구성 및 설계 등 현장 실물 모형시험과 관련된 제반사항을 검토하였다.



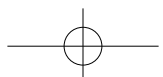
#### > 시험체 적용 단면 및 실물재하시험 개요

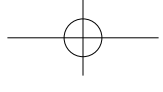
개 요	시 험 내 용		검토내용 및 효과
	• 상판재하시험 	• EdgeBeam재하 	<ul style="list-style-type: none"><li>• 스트럿 지지된 상판 및 Edgebeam 구조안 전성 검증</li><li>• 설계하중에 의한 내구성 문제</li><li>• 스트럿 본체의 좌굴 안정성 검토</li><li>• 3차원 FEM해석 결과와 비교</li><li>• 스트럿 연결부 피로검토</li><li>• 스트럿 파손시 구조안정성 검토</li><li>• 실물시험을 통한 구조적 안정성 검증</li></ul>
• 시험종류 : 상판 재하시험Edge Beam 재하시험접합부 및 본체재 하시험파손시 검토	• 접합부,본체재하 	• 파손시 검토 	

반력상판 및 실험 장비 등 실험에 필요한 제반 부대시설의 규모 등을 고려하여, 모형실험체의 길이는 5m로 계획하고, 스트럿은 양쪽에 2개씩 배치하였으며, 모든 제원은 실제 교량과 동일하게 적용하였다.

실물재하시험에 적용할 재하하중의 크기는 설계하중(DB-24)의 축중 및 재하방법을 고려하여 정하였으며, 재하장치는 재하판, 유압잭, 가력지그 및 강봉, 앵커볼트, 반력상판 등으로 구성하였다.

#### > 실물재하시험 시험체





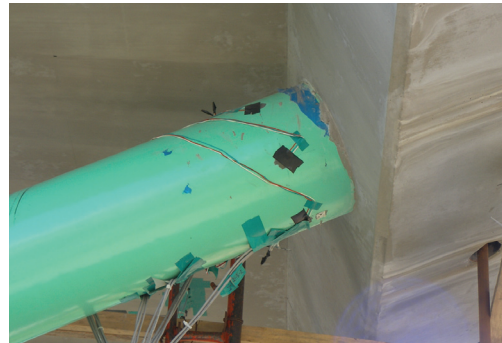
#### > 하중재하 및 계측



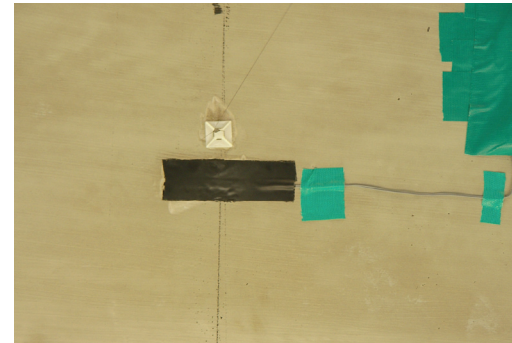
(a) 1축 재하



(b) 2축 재하



(c) 스트럿 변형률 게이지



(d) 슬래브 콘크리트 변형률 게이지

하중조건은 스트럿, 상부슬래브 및 엠티빔의 거동특성을 파악하기 위해 총 5가지를 선정하였으며, 각 하중의 경우에 대하여 1축 및 2축으로 하중을 재하하였다.

재하시험시 하중의 크기를 결정하기 위해 각 부재에 최대응력이 발생하도록 설계하중(DB-24)과 재하하중과의 관계를 해석적으로 검토한 결과, LC3(스트럿 검토)은 설계하중이 2대 재하되는 경우가 부재력이 최대이며, 1점 하중으로 환산하면 약 27.6tonf에 해당한다. LC1(상부슬래브 검토)은 10.9tonf의 하중을 가하였을 때, LC2(엠티빔 검토)는 25.3tonf 재하하는 경우, 설계하중에 의한 응력과 유사한 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 최대 재하하중은 모형교량의 파괴 혹은 파괴에 가까운 거동을 조사하기 위하여 최대 등가설계하중의 약 2배에 해당하는 하중을 적용하였다.

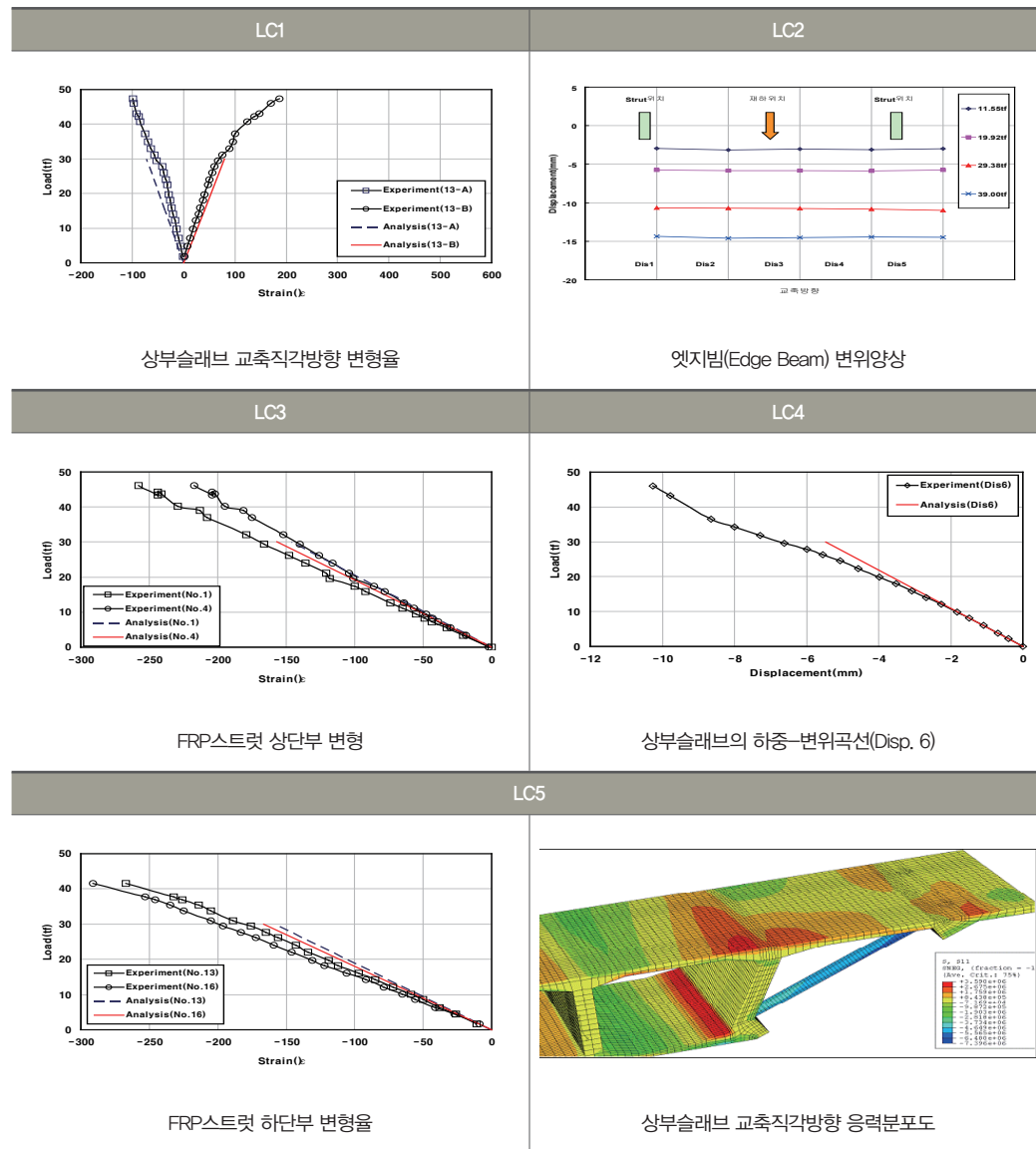
#### > 하중경우별 주요 검토내용

구 분	주요 분석 내용	비 고
LC 1	상부 슬래브의 교축 및 교축직각방향 거동	1점 재하
LC 2	엠티빔의 교축방향 거동	
LC 3	스트럿 본체의 압축 및 휨 거동	
LC 4 LC 5	LC2와 LC3에 대응하는 차량 축하중 모사	2점 재하

실험결과와 해석결과의 비교를 위해서 구조물의 거동을 대표할 수 있는 부위의 계측결과를 이용하였다. 변위계는 거더 길이(5m)의 중앙부에 설치된 Dis6, Dis9, Dis12를 고려하였으며, 변형률 게이지 역시 상부 슬래브의 중앙부에 위치한 9번 변위계(Dis9) 위치의 상하부에 위치한 철근에 부착된 변형률 게이지(8-A/B, 13-A/B)를 고려하였다. FRP 스트럿의 거동을 고찰하기 위하여 스트럿의 상단 및 하단, 그리고 내부철근에 부착한 변형률 게이지의 축방향 변형률을 비교하였다.

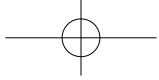


### > 하중재하별 시험결과



실물재하시험과 유한요소해석 결과의 비교 · 검토를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재하실험 결과, PSC 박스거더 및 FRP 스트럿은 설계하중 하에서 강도 및 사용성 측면에서 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.
- 2) FEM 해석결과는 전반적으로 실험결과에 근접하였으며, 실제 설계하중과 등가의 재하하중에 대한 실험 및 해석결과 모두 안전측의 결과를 나타내었다.
- 3) 재하실험 결과, 상부 슬래브는 재하하중 28ton까지 선형거동을 나타내며, 설계하중조건과 등가의 재하하중 10.9tonf에 대하여 충분한 내하성능을 나타내었다.
- 4) 엣지빔의 경우, 중앙부 하면에서는 상대적으로 큰 응력이 발생되나 등가설계하중 25.3tonf 보다 큰 38.8tonf 부근에 이르러야 균열응력을 초과하는 것으로 나타나므로 설계하중에서 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 5) FRP 스트럿은 전체적으로 압축응력이 발생하였으며, 60tonf의 하중에서도 스트럿 및 연결부의 손상이 없으므로, 내하성능을 충분히 확보하는 것으로 판단된다.



### 3. FRP스트럿 MSS박스거더교의 시공방법

#### > FRP스트럿 MSS박스거더의 시공절차

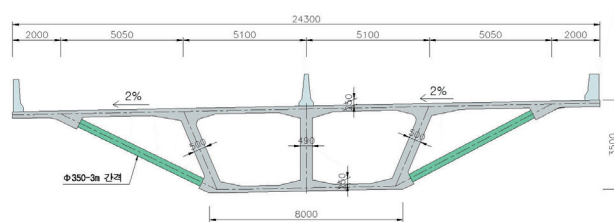
MSS 장비 Setting (Camber 적용)
스트럿 설치
Joint Formwork 설치
바닥스래브 폼보재 설치 완료
통합함 수거함, 인화장치 설치 및 함안 단면
Inner Formwork 이송 및 설치
이송 구간 상부구조물 설치 완료 및 반크리프 부착
상부슬래브 폼보재 설치
통합함 수거함, 인화장치 설치 및 함안 단면
반크리프 부착 및 압출
폼다이 제거 및 Inner Formwork 이송
1st Post-tensioning (전체 Tendon 수량의 50%)
1st LOWERING (약 50mm)
2nd Post-tensioning (나머지 50%)
2nd LOWERING (약 500mm)
Outer Formwork 및 매입거더 통합함 이송
통합함 감성 긴장작업
MSS 장비 Launching

#### > FRP스트럿 MSS박스거더의 공정표

공종	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	비고
1. MSS Launching																										
2. Form Setting/Camber 정																										
3. Strut 철																										
4. Bottom/Web 폼보재 AGE 철																										
5. K-TYPE 용접																										
6. 용접																										
7. 용접																										
8. 용접																										
9. 용접																										
10. 용																										
11. 용접/용접																										
12. MSS LOWERING / 용접																										
※ Bottom/Web 용접																										
※ 용접																										
※ Pier Bracket 용																										

#### 1) 공종별 시공

#### > 해상표준구간 상부구조 단면도





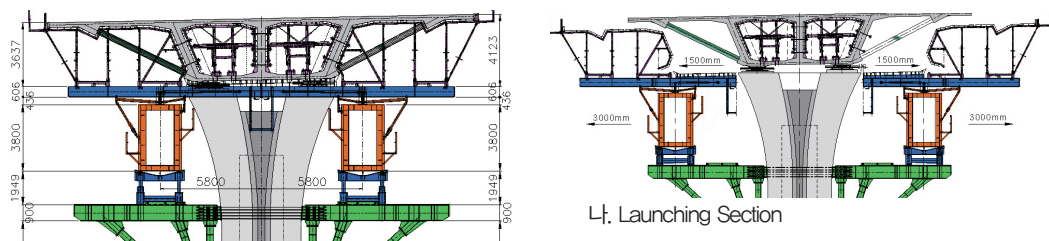


### 3.2 MSS장비 Launching

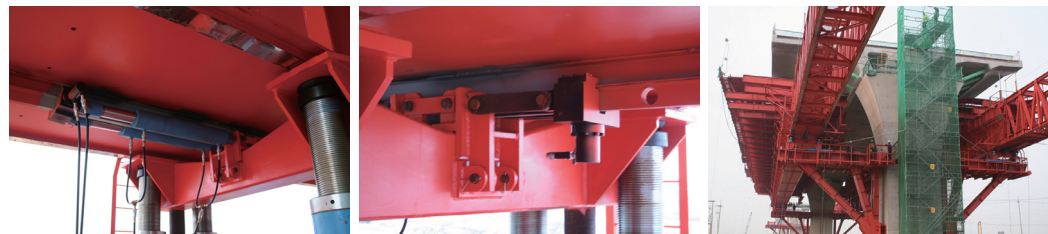
MSS 장비는 Outer Formwork 및 FRP스트럿이 서로 간섭 없이 측경간으로 이동하기 위해서 횡방향으로 충분히 움직일 필요가 있다. 즉, 메인 박스 거더를 지지하는 Lifting and Moving Unit(이하 L/M Unit)을 Transverse Jack을 이용하여 Pier Bracket 위에서 최대 3.0m까지 횡방향으로 이동시키고 이동된 메인박스 상단부에서 Cross Beam 사이의 횡방향 Jack을 이용하여 Cross Beam을 포함한 Outer Formwork 전체를 1.5m이동시켜 콘크리트 타설시의 위치(Typical Cross Section)를 기준으로 최대 4.5m 이동이 가능하도록 하였다. 이때, 메인 박스거더가 Pier Bracket 위에서 외측으로 이동됨에 따라 전도의 위험이 있으므로 현장작업이 가능한 최대풍속( $V_{max}=15m/sec$ )에서도 전도에 대한 안전율 1.0이상을 확보하고 있지만 보다 안전한 시공을 위해 풍속이 12m/sec이상일 경우 Launching 작업을 중단하도록 하였다.

MSS 장비의 종방향 이동은 L/M Unit의 Launching Jack(55tonf x 2EA)을 이용하여 메인거더 하부에 설치된 Launching Rail을 압입하여 1Stroke씩 이동하며 Launching Jack 이완시에는 장비의 종방향 미끌림 방지를 위해 자동유압식 Braking Jack을 설치하여 운영하였다.

#### > MSS 장비 Launching을 위한 횡방향 이동



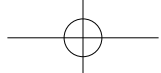
#### > MSS 장비 Launching



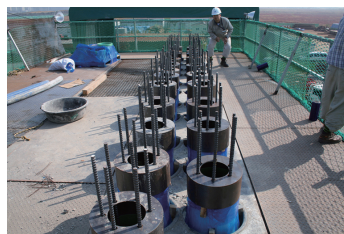
### 2. FRP 스트럿 제작 및 설치

FRP피복관은 섬유강화재를 수지혼합물과 혼합시킨 후 젖은 상태로, 회전하는 통형의 맨드릴(Mandrel)에 연속적으로 감아 제조하는 필라멘트와인딩(Filament Winding)공법으로 제작하였다. 이 제작법은 제작비는 다소 고가지만 인발성형법에 비해 횡방향구속력이 큰 효과가 있어 적용하였다.

콘크리트의 건조수축을 극복하여 FRP 피복관과의 합성단면을 얻기 위해서는 팽창시멘트를 사용하거나 콘크리트 속체 움 후 그라우팅하는 방법, RC 스트럿을 먼저 제작한 후 필라멘트와인딩법을 사용하여 FRP 피복을 입히는 방법 혹은 FRP 피복관 내부에 돌기를 만드는 방법 등을 검토하였으나 합성단면 확보와 관련하여 현재까지 검증된 이론이나 설계 기준이 없기 때문에 실시설계시에는 피복관을 제외한 RC 스트럿만으로 설계하였다. 본 공사 전에 시험시공결과 스트럿 제작시의 충분한 다짐만으로도 FRP 피복과 콘크리트 구체 사이에 Void는 발생하지 않았다. 기 제작된 FRP 스트럿은 PSC박스 본체 콘크리트 타설전에 현장에 설치하고 본체 콘크리트 타설 후 스트럿의 상하부는 PSC박스본체와 강결로 연결된다.



#### > FRP 스트럿 제작/설치



가. FRP 피복관 제작



나. 철근조립 및 콘크리트 타설(상부)



다. 인양 및 적치

### 3. 장비 Setting 및 철근조립

선형관리에 의한 Pre-Camber를 반영하여 Cross Beam의 I-Beam Screw Jack을 통해 MSS 장비를 Setting하게 된다. Setting이 끝나면 하부슬래브와 벽체 철근 및 쉬즈관 조립이 이뤄진다. 이 때 공정상 수평시공이음면 없이 Deck의 전단면을 동시에 시공하는 일괄타설방식이 필요하였으며 따라서 상부슬래브의 하중을 MSS장비로 적절하게 전달할 방법이 필요하였다. 본 공사에서는 Inner Formwork 지지용 Block을 기존의 콘크리트 Block 대신 중량이 가벼워 작업성이 좋은 Steel block을 적용하여 Inner Formwork 이동용 Rail과 함께 시공하였다.

#### > 장비 Setting 및 Inner Formwork 작업



가. MSS 장비 Setting



나. Inner Formwork 지지 block



다. Inner Formwork 이동

### 4. Deck finisher/이동식 작업대에 의한 콘크리트 마무리

본 교량과 같이 횡방향 폭이 크고 횡구배가 있는 교량상판의 마무리는 바닥판의 건조수축이 일어나기 전에 끝내야 하며 계획고의 정밀한 시공을 위해서는 기계화시공이 필요하여 본 교량에서는 Deck finisher 와 이동식 작업대를 사용하여 정밀하고 신속한 마감작업이 되도록 하였다.

Deck finisher는 트러스의 수직처짐을 고려하여 Camber량 조정이 가능하도록 제작하였으며 콘크리트 마무리는 Finisher에 의해서 1차로 Screw 및 Drum회전마감, 2차 부직포에 의한 횡방향 거친면 마감이 이뤄지고 뒤이은 이동식 작업대에 의한 종방향 거친면 마감, 피막양생제 살포와 양생포 깔기작업, 그리고 마지막으로 Spring Cooler에 의한 습윤양생이 이뤄진다.

#### > 바닥판 마무리작업의 기계화시공



가. Deck finisher에 의한 마감

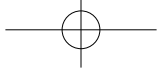


나. 이동식 작업대에 의한 마감



다. Spring Cooler 습윤양생





- 1) 본 공법은 송도신도시의 호수공원 및 근린공원을 가로지르는 도심지교량의 조형성 증진을 위해 넓은 교량상판의 폭을 확보하기 위해 캔틸레버 부분을 스트럿으로 지지하는 구조형식인 스트럿 부착 PSC박스거더교를 적용하였다. 스트럿은 미관개선, 유지관리 증진을 위해 FRP 피복 스트럿을 적용하였으며 스트럿-본체 연결부는 피로내구성 확보를 위해 강결접합구조로 시공하였다. 시공 전에 FRP 피복 시편에 대한 물성시험, 스트럿의 압축/휨시험, 스트럿-본체 접합부에 대한 피로시험, PSC박스 실물모형에 의한 하중재하시험을 수행하였으며 수행결과 구조안전성을 확보하고 있음이 검증되었다.
- 2) FRP 스트럿 부착 PSC박스거더교를 이동식 비계공법(Movable Scaffolding System)으로 시공하였다. MSS장비의 규모는 국내에서 현재까지 적용된 장비 중 최대 규모로서 철저한 구조검토 및 완벽한 기능 확보와 정밀한 시공이 요구되어 제3자로부터 설계검증을 받았으며 시공 중에는 장비계측시스템을 구축하여 안전성을 확인하며 시공하였다.
- 3) 본 교량에 적용된 FRP스트럿 부착 PSC박스거더교는 경제성뿐만 아니라 구조안전성을 확보하고 있으며 이동식비계공법 및 기계화시공에 의한 시공성이 있음이 확인되었으므로 향후 교량설계에 적용되면 상부교량형식의 경쟁력 있는 새로운 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.