

인천대교 접속교(프리캐스트 F.C.M 교량)의 설계 및 시공

Design and Construction of Approach Bridge(Precast F.C.M) in Incheon Bridge Project



송종영*

Jong-Young Song



이창훈**

Chang-Hoon Lee



김동완***

Dong-Wan Kim



김화수****

Hwa-Soo Kim



송창희*****

Chang-Hee Song



손혁수*****

Hyeok-Soo Son

1. 머리말

인천대교 건설공사는 중국, 일본 등과의 무한경쟁 속에서 대한민국이 동북아시아의 경제중심국가로 도약하기 위해 인천 영종도(인천국제공항)와 송도국제도시(경제자유구역)를 해상으로 연결하는 교량건설 사업으로서, 설계와 시공을 동시에 진행하는 Fast Track 방식으로 시행되고 있다. 인천대교 건설공사는 2005년 6월 착공 이후 2009년 10월 완공을 목표로 현재 순조롭게 공사가 진행되고 있다.

2. 접속교 개요 및 특징

인천대교 접속교는 사장교와 고가교를 연결하는 주경간 145m 인 국내 최장지간의 7경간 연속 변단면 프리캐스트 F.C.M 해상교량이며 접속교의 개요 및 특징은 다음과 같다.

- 1) 총연장 : 동측 및 서측 접속교
= 1,778 m(2 Line, 3,556 m)
- 2) 경간 구성 : 82 + 5 @ 145 + 82 = 889 m(동측/서측)

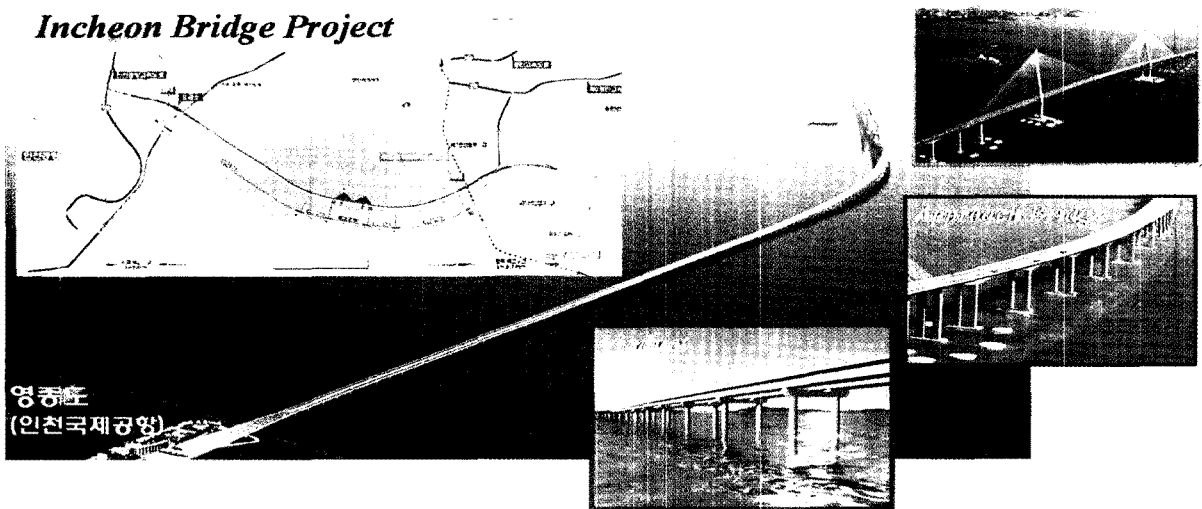
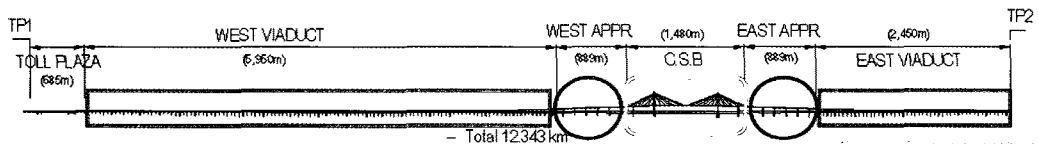


그림 1. 인천대교 위치도, 조감도 및 개요

* 정희원, 삼성물산(주)건설부문 인천대교현장 접속교 시공엔지니어링담당, 과장
jongyoung.song@samsung.com
** 삼성물산(주)건설부문 인천대교현장 접속교 공사담당, 과장
*** 삼성물산(주)건설부문 인천대교현장 접속교 공사팀장, 부장

**** 삼성물산(주)건설부문 인천대교현장 현장소장, 상무
***** 정희원, (주)서영엔지니어링 구조설계실, 부장
***** 정희원, (주)서영엔지니어링 구조설계실, 차장

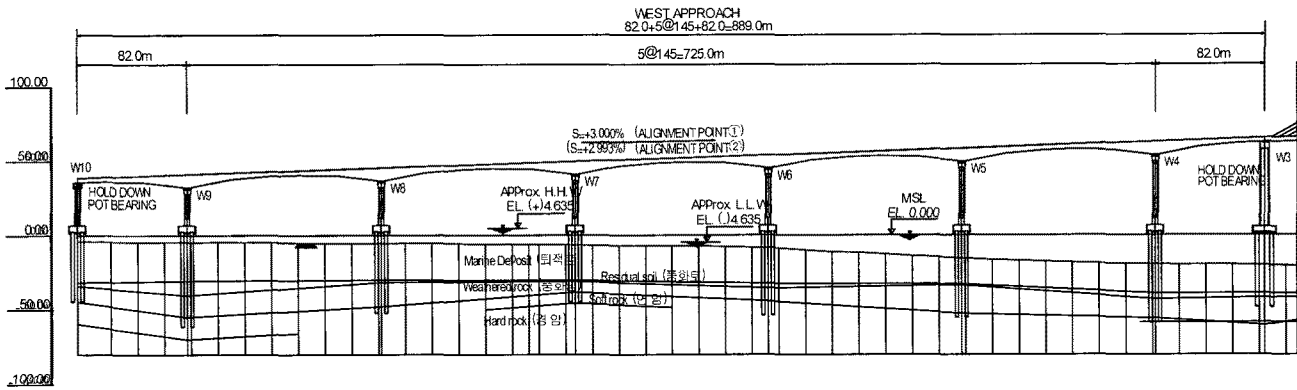


그림 2. 인천대교 접속교(서측) 개요도

- 3) 상부 : 변단면 프리캐스트 박스 거더
(단면높이(H) = 3.0 ~ 8.5 m)
- 4) 받침 : 내부교각-상부와 일체 형식, 단부교각-받침
- 5) 교각 : 중공 사각 기둥(5m×4m×0.7m)
- 6) 기초 : 파일캡 구조물
(27.2m×12m×4.4m, PC house 제외)
- 7) 말뚝 : 현장타설말뚝(8 ea - φ 2.4 m/개소)

표 1. F.C.M 공법 비교

구분	현장타설 공법	프리캐스트 공법
공법 개요	<ul style="list-style-type: none"> • 공사기간이 길다 (15일/Seg.) • 제작/가설을 현장에서 동시 진행 • 50 ~ 250 m 지간 적용 	<ul style="list-style-type: none"> • 공사기간 짧음 (1 ~ 2일/Seg.) • 현장 타설에 비해 높은 기술력 필요 • 50 ~ 150 m 지간 적용 • 장지간 반복현장에서 경제적 • 야적장에서 충분한 재령 발현으로, 장기거동 영향이 작음
설계 측면	<ul style="list-style-type: none"> • 재하시점 콘크리트 재령이 작으므로, 장기거동 영향이 큼 • 전체 처짐량이 상대적으로 큼 • 박스 거더간 인장 허용함 (RC설계) • 공법관련 가시설 설계 단순 	<ul style="list-style-type: none"> • 처짐량이 현장 타설에 비해 1/3 수준 • 박스 거더간 인장불허(PS설계) • 몰드, 가설 장비 등 가시설 설계 복잡
제작/가설	<ul style="list-style-type: none"> • 이동거푸집(form traveler, F/T) 가설 • 현장 인력 및 F/T 운영 중요 • 제작/가설 선행관리 일괄적용 	<ul style="list-style-type: none"> • crane, erection girder 이용 가설 • 제작장/몰드 설계, 관리 중요 • 제작/가설단계 선행관리 각각 필요
장단점	<ul style="list-style-type: none"> • 경제적 단면 사용, 우수한 미관 • 복잡한 선형 적용 가능 • 시공속도 느림 • 현장노동 집약적, 가시설 작업 많음 • 제작장 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 경제적 단면 사용, 우수한 미관 • 복잡한 선형적용 가능 • 시공속도 빠름 • 현장침해 작음 • 고가의 제작장/가설 장비 필요 • 공장 수준의 우수한 품질 확보

본 기사에서는 변단면 프리캐스트 세그멘탈공법의 적용, 국제 설계기준인 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 의 적용, 프리캐스트 대블럭 주두부 제작/가설, 숏라인(short line)공법 적용 및 대형 인양장비를 이용한 해상가설 등 세계적 수준의 프리캐스트 세그멘탈 F.C.M 교량의 기술력이 실현되고 있는 인천대교 접속교의 설계 및 시공에 대한 주요항목에 대해 소개하고자 한다.

3. 접속교 설계 주요특징

3.1 프리캐스트 F.C.M 공법

프리캐스트 공법은 현장타설 공법에 비해 효율적인 단면구성, 빠른 시공, 미관 우수, 해상현장작업의 최소화, 제작장 제작으로 세그먼트의 품질 우수 등의 장점을 갖는다. 그러나 현장 조성 시 제작장 및 몰드의 계획이 필요하며 제작장 및 가설 장비 비용이 높고, 상대적으로 높은 수준의 기술력이 요구되는 특징을 가지고 있다.

3.1.1 프리캐스트 주두부 대블럭

주두부 대블럭은 교각 위에 거치되는 상부 거더로서 소블럭 시공의 기초가 되는 부재이다. 주두부 대블럭은 공기단축 및 해상작업의 최소화를 위해 길이 20m, 중량 약 1,500 ton의

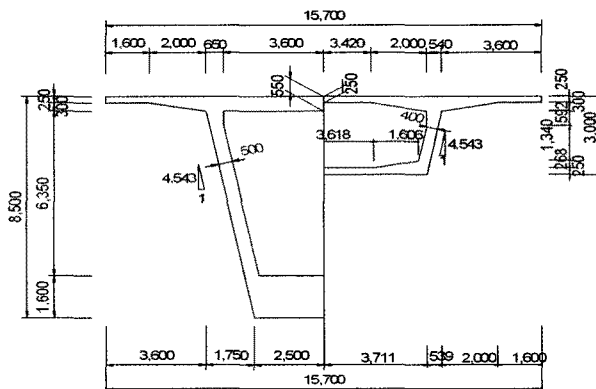


그림 3. 프리캐스트 박스거더 단면

대형 블럭으로 계획되었으며, 제작장에서 제작되어 3,000 tonf 해상크레인으로 운반하여 가설된다. F.C.M 주두부 대블럭의 프리캐스트화로 현장 타설 공법에 비해 비약적인 공기단축, 해상 고소작업의 위험요소 제거, 공장수준의 우수한 콘크리트 품질확보가 가능하다.

3.1.2 매치캐스트 블럭

주두부 대블럭을 20m로 계획함에 따라 빠른 시공이 가능하게 되었으나, 중량이 커서 미세조정이 힘들고 대블럭 가설 시 오차가 발생하는 경우, 키세그 폐합 시 오차가 커지는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여 교각과 주두부 대블럭 사이에 매치캐스트 블럭을 계획하였으며, 상대적으로 가벼운(총중량 65 tonf) 매치캐스트 블럭을 교각 위에 정확하게 가설함으로써 요구되는 교량의 선형을 정밀하게 확보할 수 있게 된다.

3.1.3 소블럭

접속교 145m 경간은 대블럭(20m)과 34개의 소블럭(14 ea-3m, 20 ea-4m) 및 키세그먼트(3m)로 구성된다. 소블럭은 세그먼트의 중량에 따라 3m 또는 4m로 분할하였으며(그림 4), 이전 세그먼트의 접합면을 거푸집의 면으로 사용하여 다음 세그먼트를 제작하는 숏라인 공법으로 제작된다. 숏라인 공법의 경우 경간 전체를 한 번에 제작하는 롱라인(long-line) 공법보다 작은 크기의 제작장이 필요하나, 보다 정밀한 선형관리기술이 요구된다.

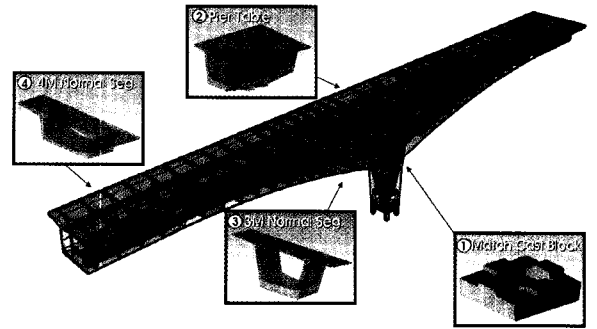


그림 4. 세그먼트 분할

3.1.4 긴장재 배치

(그림 5)는 접속교의 캔틸레버 텐던, 연속화 텐던 및 외부 텐던의 배치를 나타낸 것이며, 국내 주요 F.C.M 교량과의 비교 결과를 <표 2>에 나타내었다.

3.1.5 시공단계 해석 및 캠버 관리

접속교 상부 박스거더는 제작장에서 콘크리트 타설 완료 후 횡방향 포스트텐션을 도입하고, 인양 장비를 이용하여 교각을 중심으로 경간중앙부 방향으로 평형상태를 맞추면서 상부 텐던을 긴장하여 완성된 거더를 상부에 거치시킨다. 중앙의 키세그먼트를 가설 한 후 하부텐던을 긴장하여 연속화하고, 신축이음부 세그먼트를 가설하여 전구간이 연결된 후 외부 강연선을 긴장하여 교량을 완성시킨다. 주요 제작 및 가설일정을 고려하여,

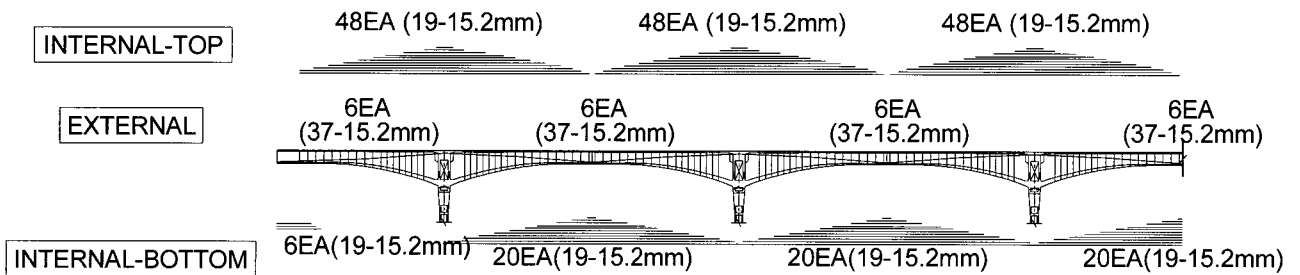


그림 5. 긴장재 배치 현황

표 2. 국내 주요 F.C.M 교량의 비교

구 분	인천대교	서해대교	신촌교	고정교
경간구성	82 + 5 @ 145 + 82(프리캐스트)	85 + 2 @ 165 + 85(현장타설)	113 + 5 @ 170 + 97(현장타설)	70 + 9 @ 120 + 70(현장타설)
주두부/중앙부 폭원	8.5/3.0	9.0/3.5	10/3.4	7/3.0
바닥판 두께	1.6/0.25	1.5/0.25	0.95/0.25	0.95/0.25
콘크리트 강도	45 MPa	40 MPa	40 MPa	40 MPa
캔틸레버 텐던	19-Φ15.2, 48 ea	19-Φ 15.2, 60 ea	19-Φ 15.2, 52 ea	19-Φ 15.2, 28 ea
연속화 텐던	19-Φ15.2, 20 ea	22-Φ 15.2, 20 ea	22-Φ 15.2, 18 ea	19-Φ 15.2, 16 ea
외부 텐던	37-Φ15.2, 6 ea	-	22-Φ 15.2, 4 ea	19-Φ 15.2, 8 ea
하부 구조물	2.4 RCD 8 ea	2.5 RCD 35 ea	1.8 RCD 25 ea	1.5 RCD 16 ea

시공단계해석을 수행하였으며, 제작캠버는 30년 캠버를 기준으로 실제 현장의 시공조건을 반영하여 작업하중을 산정하고, 영중도방향과 송도방향의 제작캠버를 각각 산정하여 제작에 반영하였다(그림 6).

3.2 하부구조

3.2.1 교각

인천대교 접속교는 상부와 하부가 일체인 다경간 연속교로서 온도변화, 크리프, 건조수축에 의해 수평력이 크게 발생하는 특성을 가진다. 이러한 수평력은 교각의 휨모멘트를 크게 증가시키므로 교각의 강성을 줄이기 위하여 직사각형 중공단면 교각으로 계획하였다.

인천대교 접속교는 예시설계단계에서 중앙부 힌지 구조계로 계획되었으나, 활하중에 의한 과도한 처짐 및 장기거동 시 유지관리 등의 문제점으로 인해 최종 설계단계에서는 교축방향으로 유연한 교각단면의 도입과 함께 키세그먼트 폐합 시 상부 구조계의 변위거동 제한으로 발생하는 수평력을 반대방향의 하중으로 재하하는 선보정공법을 도입하여 7경간 연속교로 설계하였다. 적절한 선보정 하중 도입으로 다경간 연속화로 발생하는 변위력을 효과적으로 제어함으로써 경제적인 하부구조 설계가 가능하였다(그림 7).

3.2.2 기초

인천대교의 기초는 해수면 근처에 위치하며, 기초의 시공을 위하여 제작장에서 PC-House를 제작한 후 말뚝에 거치하여 파일캡 기초의 시공 시에 거푸집으로 사용하는 방법을 채택하였다. 국내·외 해상교량의 하부 구조물에서 자주 접하게 되는 파일캡 구조물은 일반적으로 상부 거더에서 발생하는 축력 및 모멘트를 말뚝기초에 전달하는 역할을 한다. 구조적인 관점에서 파일캡은 두꺼운 슬래브 형태로서, 말뚝기초의 두부와 접하는 면을 지점으로 아래에서 작용하는 집중하중과 교각과 만나

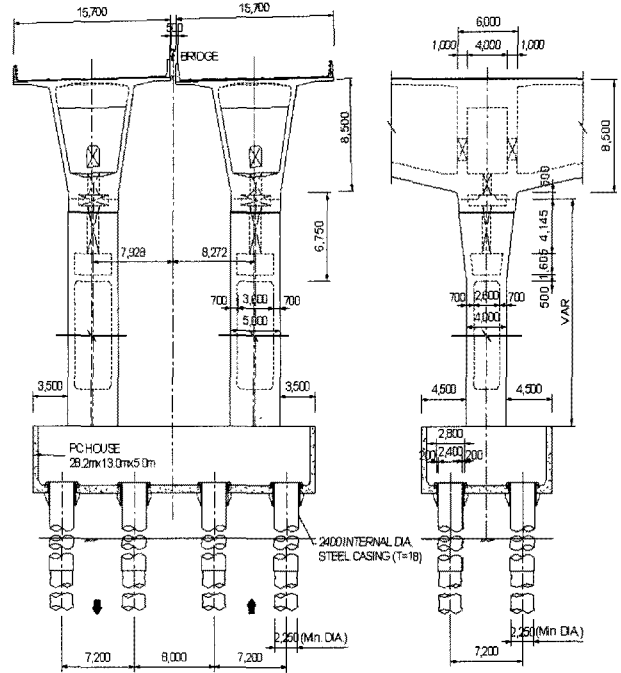


그림 7. 하부구조 제원

는 상면에 축력, 수평력 및 모멘트가 작용한다. 국내의 파일캡 설계는 대부분 전통적인 방법으로 파일캡을 깊은보로 간주하여 위험단면에서의 전단검토를 중심으로 설계가 수행되어 왔으며, 최근에는 보다 합리적인 파일캡의 설계방법이라 간주되는 스트럿-타이 모델의 적용이 증가하고 있는 실정이다. 인천대교 접속교의 파일캡은 두개의 교각을 지지하는 방식으로 (그림 8)에 나타낸 것과 같이 스트럿-타이 모델을 적용하여 철근 배근의 적정성을 검토하였다.

3.2.3 지반스프링 산정

접속교 설계에서는 지반-구조물 상호작용을 고려하여 다음과 같은 방법으로 지반스프링을 산정하였다.

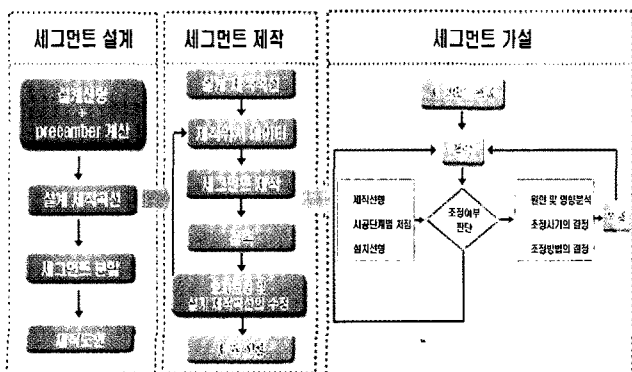


그림 6. 캠버관리 흐름도

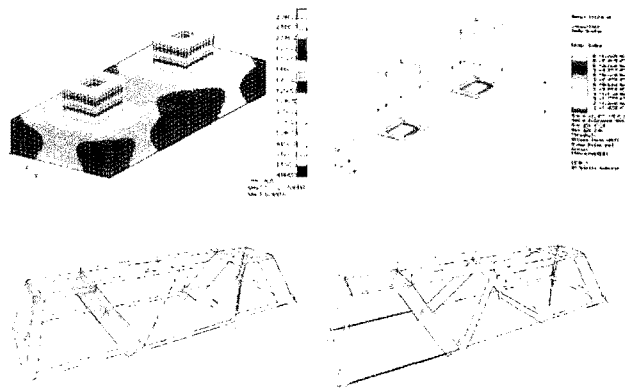


그림 8. 스트럿-타이 모델을 적용한 파일캡 배근검토

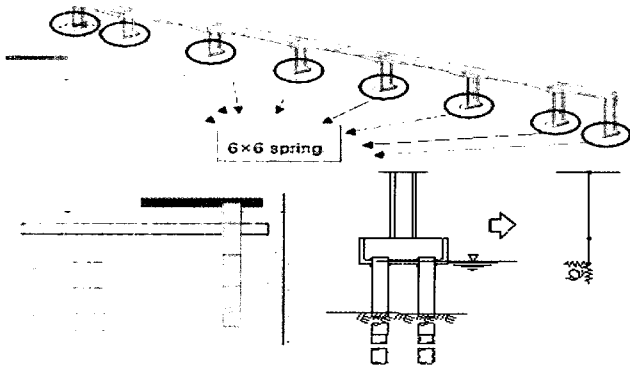


그림 9. 지반스프링 산정 개념

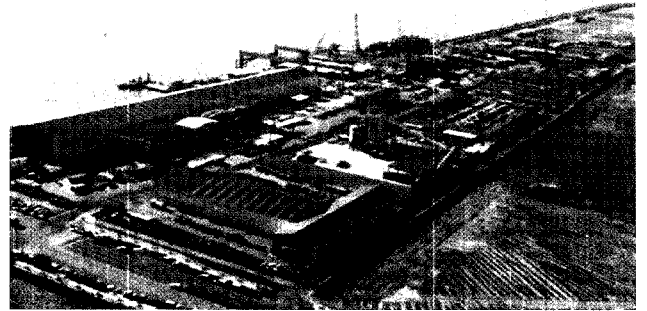


그림 11. 인천대교 제작장 전경

- 1) 전체계모델 지반면의 경계조건을 고정단으로 하여 구조 해석을 수행한 후, 지반면에서의 반력(R_1) 산정
- 2) 지반면에서의 반력(R_1)을 말뚝-지반 비선형해석 프로그램인 FB-PIER에 하중으로 입력하여, 각 교각별 말뚝-지반의 비선형성이 고려된 대표 6×6 강성행렬을 통한 스프링상수(K_1) 산정
- 3) 전체계모델 지반면의 경계조건을 스프링상수(K_1)로 하고, 지반면에서의 반력(R_2) 산정
- 4) 1) ~ 3)의 과정을 반복하여, 하중 또는 변위가 수렴되는 등가선형스프링상수(K)를 결정

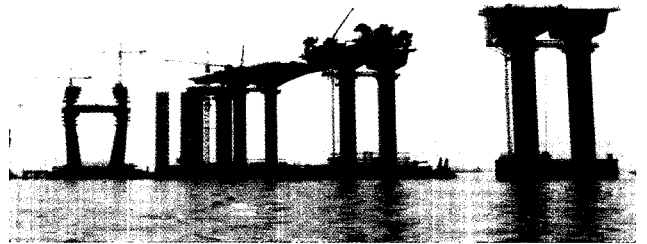


그림 12. 인천대교 접속교 가설현장 전경

4. 접속교 시공 주요특징

4.1 파일캡 및 교각 시공

상부구조 가설 전 해상에서 수행되는 접속교 기초시공은 RCD 말뚝 시공을 시작으로, 제작장에서 제작된 PC House를 해상크레인을 사용하여 시공완료된 RCD 말뚝 두부에 설치한 후 파일캡의 배근 및 교각부 연결 철근을 배근하여 파일캡 시공을 완성한다. 중공사각단면의 교각은 철근케이지화를 이용하여 해상작업을 최소화하며 해상 BP선을 이용하여 콘크리트를 타설한다. <그림 10>에 파일캡 및 교각 시공의 주요 공정을 간략하게 나타내었다.

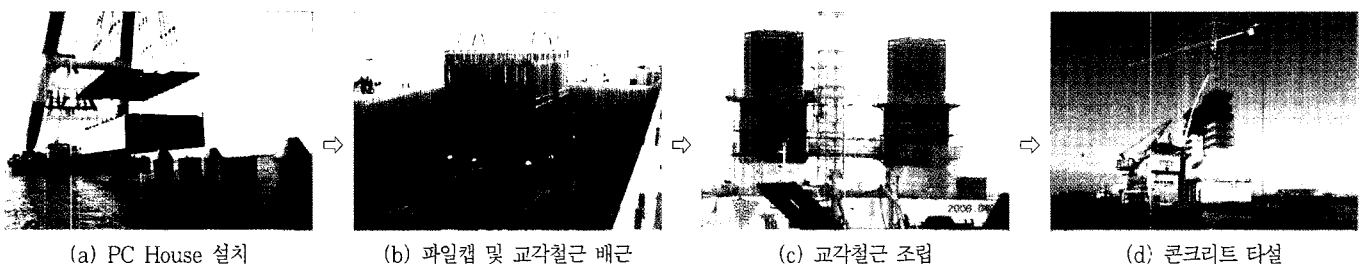


그림 10. 파일캡 및 교각 시공 주요공정

4.2 프리캐스트 세그먼트 제작 및 가설

인천대교는 해상교량의 특성상, 육상 제작장에서 제작된 세그먼트를 대형 해상크레인을 이용하여 현장까지 운반한 후, 중량 및 작업 여건에 따라서 데리크레인 또는 해상크레인을 이용하여 가설된다(그림 11, 12). 이와 같은 운반, 가설 특성을 고려하여 인양방법에 대한 검토가 설계 단계에서부터 검토, 반영된 것은 물론 본 구조물의 설계, 시공과 함께 많은 가시설 구조물의 설계, 시공문제를 충분히 고려하여야 하기 때문에 고도의 기술력과 품질관리가 요구된다고 할 수 있다.

4.2.1 대블럭 제작 및 가설

제작장에서 대블럭 몰드 설치가 완료된 후, 주두부의 하면에

미리 제작된 매치캐스트 블록을 세팅하고, 바닥철근을 조립한다. 조립이 끝난 후에는 벽체의 일부까지 1차 타설을 한 후, 나머지 벽체 철근 조립과 상부배근을 완료한 뒤에 2차 타설을 수행하여 대블럭 제작을 완성하게 된다. 교각과 주두부 대블럭은 강결로 설계되었으며, 이를 위하여 24개의 강봉(Φ40 mm)과 20개의 강선(37 ea - Φ15.2 mm)을 긴장하여 고정한다. 1,500 tonf의 주두부 대블럭을 정확한 위치에 설치하기 위하여 매치캐스트 블록을 제작한 후, 대블럭 하면과 매치캐스트 블럭 상면을 매치캐스트 공법으로 제작하여 중량이 가벼운 매치캐스

트 블럭을 먼저 정확하게 교각 위에 설치한 후 대블럭을 가설한다. 대블럭 제작 및 가설의 주요 공정은 <그림 14, 15>와 같다.

4.2.2 소블럭 제작 및 가설

소블럭의 제작은 인천대교 현장에서 자체 개발한 선형관리 프로그램을 이용하여, 제작 선형관리를 수행하고 있으며, 소블럭의 가설은 먼저 주두부와 연결되는 기준세그먼트의 가설이 선행되면 후속 세그먼트의 가설이 진행된다. 기준세그먼트와 주두부와의 연결은 150 mm 현장타설 콘크리트로 이루어져 있

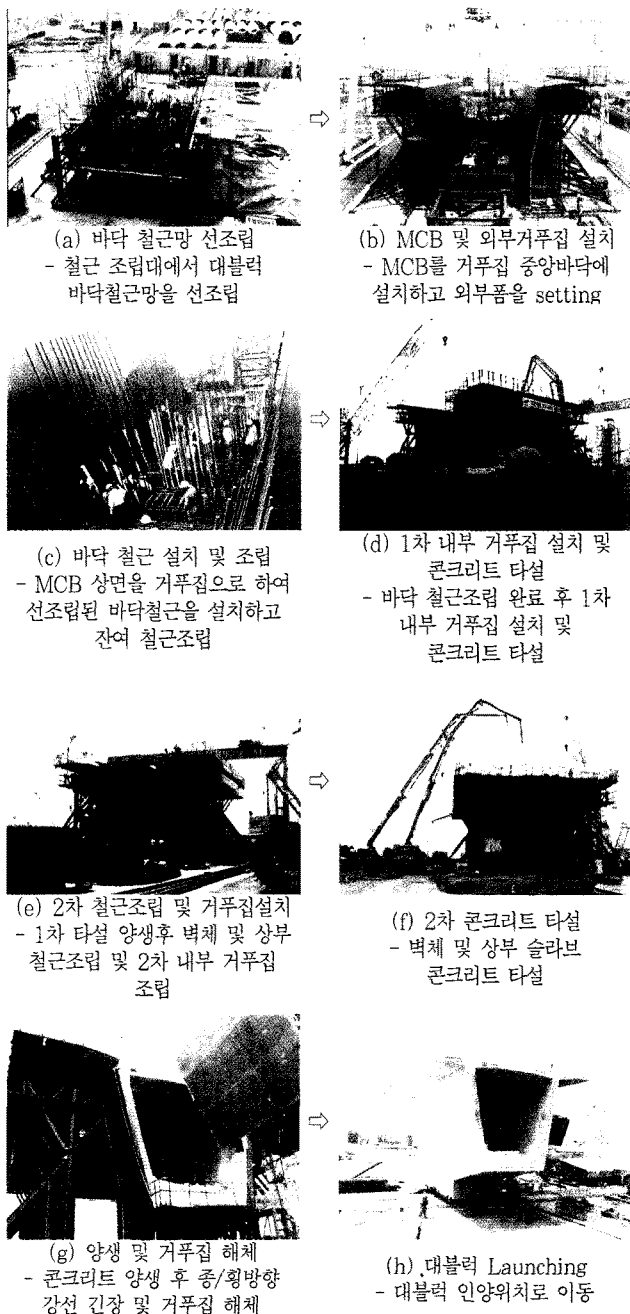


그림 14. 대블럭 제작 공정

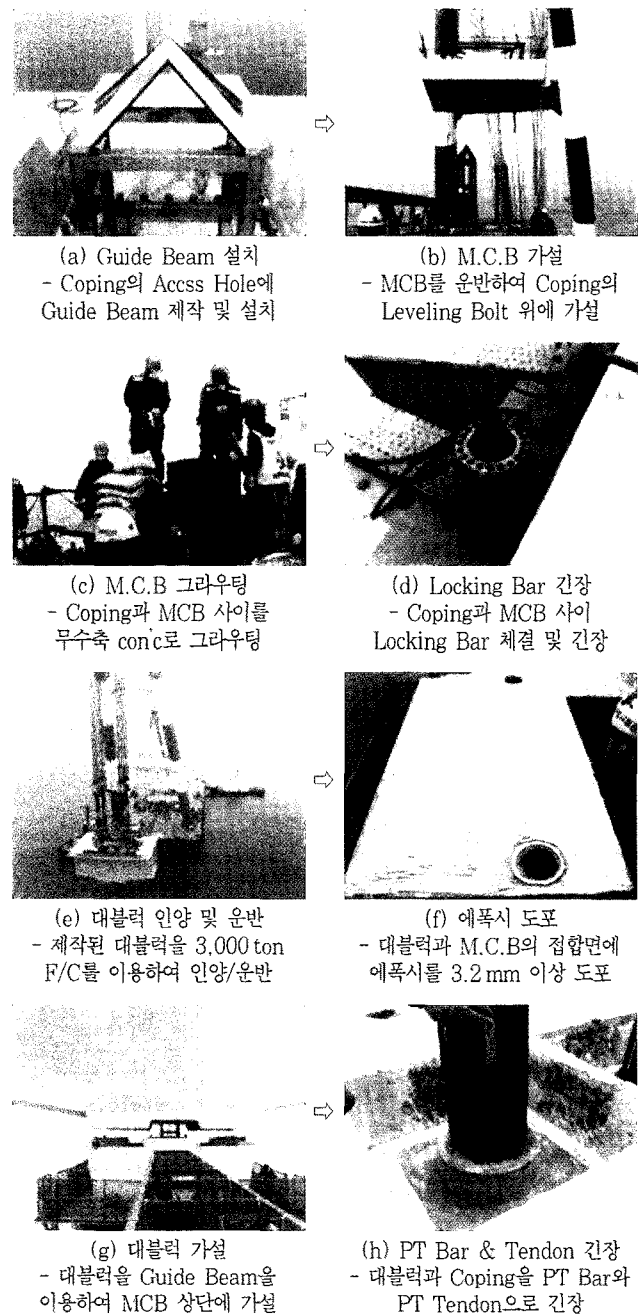
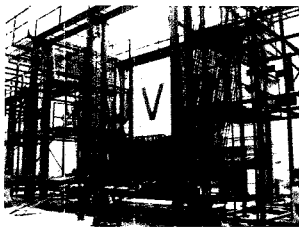
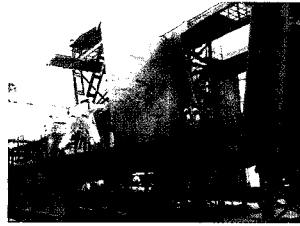


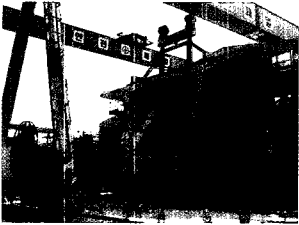
그림 15. 대블럭 가설 공정



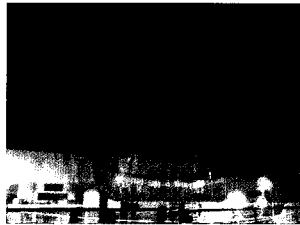
(a) 철근망 선조립
- 철근 조립대(JIG)에서 소블럭 철근망을 선조립



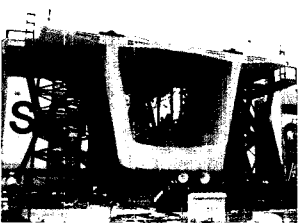
(b) 외측 폼 조립
- Fixed Bulkhead 및 바닥폼 세팅



(c) OLD SEG. 세팅
- OLD SEG.를 세팅하여 NEW SEG.의 선형 결정. Side Form을 달는다.



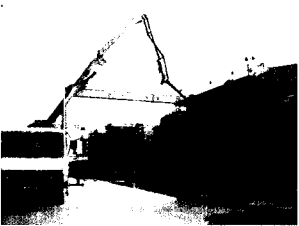
(d) 철근망 근입
- 철근 조립대에서 선 조립된 철근망을 인양한 후 몰드에 세팅



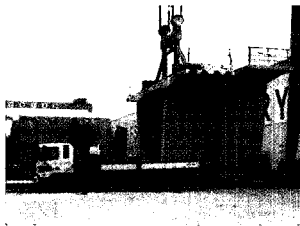
(e) 코어폼 세팅
- 철근망 근입이 종료 후 코어폼을 세팅하여 폼작업 마무리



(f) 상부 슬라브 철근 및 PT 조정
- 상부 슬라브의 철근 및 PT등을 조정하여 최종 조립 상태를 확인하고 검측



(g) 콘크리트 타설 및 양생
- 펌프카를 이용하여 콘크리트 타설 및 증기양생 실시



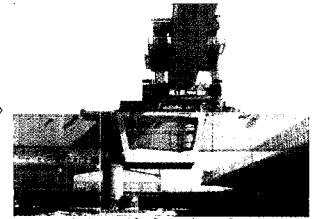
(h) 횡방향 인장, 그라우팅 및 야적장 이동
- 횡강선인장 및 그라우팅 종료 후 야적장으로 이동

그림 16. 세그먼트 제작 공정

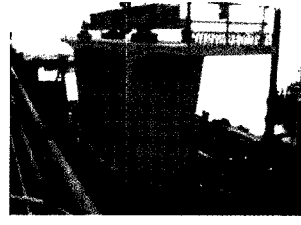
으며, 소요강도가 확보된 후, 데리크레인을 전진하여 일반세그먼트를 가설한다. 접속교의 소블럭(최대 150 ton)은 데리크레인을 사용하여 가설되며, 소블럭 인양 후 임시 강봉으로 고정하고, 상부텐던을 이용하여 이미 가설된 캔틸레버에 고정시킨다. 상부텐던을 이용하여 한 쪽 캔틸레버의 세그먼트를 전부 가설하며, 두 개의 캔틸레버를 연결시 연속화 텐던을 이용하여 하부 슬라브에서 연결한다. 세그먼트 제작 및 기준 세그먼트 가설 주요공정은 <그림 16, 17>과 같다.



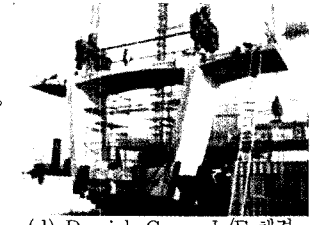
(a) 소블럭 운반 대차 이동
- 야적된 소블럭을 운반 대차로 운반하여 90° 회전 후 운반대차 상차



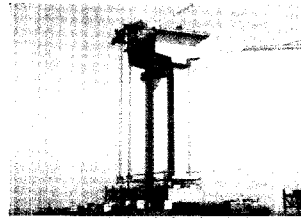
(b) 소블럭 O/C 이동
- Overhead Crane(1400 ton)으로 소블럭을 인양하여 마지막선 위치까지 소블럭 운반



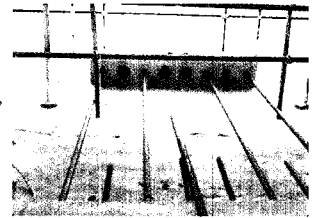
(c) 소블럭 선적 및 운반
- 바지에 선적하여 소블럭 가설 위치까지 해상 운반



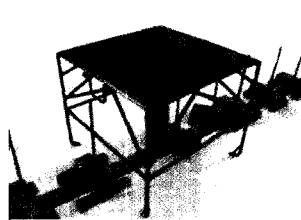
(d) Derrick Crane L/F 체결
- 바지 정위치 후 Derrick Crane의 Lifting Frame을 체결하여 인양 준비



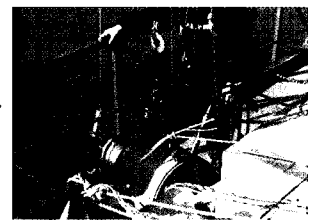
(e) 소블럭 인양 및 정위치
- Derrick Crane으로 소블럭 인양 후 선형과 가설 Camber를 고려하여 정위치



(f) 임시 강봉 긴장
- 대블럭과 소블럭을 임시 강봉 긴장력 도입으로 임시 고정



(g) C.I.P 타설
- 대블럭과 소블럭 사이에 Conc 타설을 실시하여 C.I.P Joint 시공



(h) 상부 Tendon 긴장
- 상부 Tendon을 삽입하여 350 ton 긴장력 도입

그림 17. 기준세그먼트 가설 공정

5. 맺음말

본 기사에서는 현재 공사가 활발하게 진행 중인 인천대교 해상교량 중 사장교와 고가교를 연결하는 접속교의 주요 설계 및 시공 항목에 대해 기술하였다. 인천대교 접속교는 주경간 145 m 인 국내 최장지간의 7경간 연속 변단면 프리캐스트 F.C.M 해상교량으로 현재 공사가 활발히 진행되고 있으며, 본 공사를 통해 축적된 기술력은 국내 교량건설 기술능력을 향상시키는 계기와 더불어 장래 유사 교량건설에 관한 모범사례가 될 것으로 믿어 의심치 않는다. □