건설기술연구사업

R&D-08기술혁신E01

초장대교량사업단 제3핵심 2세부 공기단축형 고주탑 시공기술 개발 최종보고서

2015. 12.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
위탁연구기관 / 한양대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

본 보고서를 “공기단축형 고주탑 시공기술 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2015. 12.

주관연구기관 : 한국건설기술연구원

원장 : 이태식

위탁연구기관 : 한양대학교

총장 : 이영무

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원

연구책임자 : 김영진

참여연구원 : 김병석, 진원종, 김희석, 윤혜진, 유진경

위탁연구책임자 : 심종성교수/한양대학교

참여기업명 : 금호산업, GS건설, 청진건설, 서현컨스텍

영화키스톤건축사사무소, 이디씨엠, 뉴컨스텍

진성토건, 삼림엔지니어링, 코아이엔씨, 유림이엔디

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유
번호</td><td>08기술혁신
-E01</td><td>해당단계
연구기간</td><td>2014.3.26
~2015.12.25</td><td>단계
구분</td><td>3단계/
3단계</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구
사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">초장대교량사업단</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구
과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">고효율 시공기술 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">공기단축형 고주탑 시공기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구
책임자</td><td rowspan="2">김영진</td><td>해당단계
참여
연구원수</td><td>총 : 24명
내부 : 15명
외부 : 9명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부 : 592,000천원
기업 : 234,300천원
계 : 826,300천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참여
연구원수</td><td>총 : 98명
내부 : 58명
외부 : 40명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 2,540,000천원
기업 : 1,399,400천원
계 : 3,939,400천원</td></tr>
<tr><td>연구
기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">한국건설기술연구원</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">금호산업(주)외 10개 기관</td></tr>
<tr><td>국제
공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="5">연구기관명 : 한양대학교 연구책임자 : 심종성</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">◦ 이 연구에서는 “기술자립 및 국제 경쟁력 확보를 위한 공기단축형 콘크리트 고주탑 가설 장비 및 공법 개발”을 목표로 “변단면 고주탑을 위한 슬립폼 장비 및 공법”, “GPS를 이용한 400m 이상 고주탑 시공 정밀도 관리”, “변단면 대응이 가능한 경량 슬립폼 모듈” 등 3개 핵심기술을 개발함.
◦ 1단계에서는 핵심기술에 대한 원천기술을 독자적으로 도출하고 그 상세를 개발하였음. 구체적으로는 BIM 기반 3D 설계 및 디지털 가상 시공을 적용하여 변단면 슬립폼시스템을 개발하여 제작오차 및 시공 시 시행착오를 최소화하였음. 또한 슬립폼 최적기 상승기술을 개발하여 공기단축, 안전성 및 콘크리트면 품질을 향상을 유도하였음. 그리고 변단면에 대한 자동화기술을 개발하여 정밀 형상 관리, 공사비 절감 및 작업 시간 단축을 가능하게 하였고, GPS를 이용한 시공정밀도 및 형상관리 기술을 개발하여 시공정밀도를 확보하고 기후 영향과 시준점 영향을 최소화하였음. 경량 GFRP 모듈형 패널 기술을 개발하여 거푸집 설치 및 해체 시간을 단축시키고 고소작업 안전성을 향상시켰으며 고른 콘크리트 품질을 확보하였음.
◦ 2단계에는 1단계에서 개발한 핵심요소기술을 검증하고 보완하였음. 1주탑 및 2주탑에 대한 변단면 슬립폼시스템을 설계 및 제작하여 성공적으로 2회의 시험시공을 완료함으로써 핵심요소기술에 대한 검증을 수행하였음.
◦ 3단계에는 개발기술의 자동화 보완과 실용화를 위해 2회의 시험 시공을 추가로 수행하고 3건의 기술실시계약을 체결하였으며, 건설신기술을 등록하는 성과를 얻었음.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색인어</td><td>한글</td><td colspan="4">슬립폼, 콘크리트 주탑, 시공 정밀도 관리, 경량 거푸집</td></tr>
<tr><td>영어</td><td colspan="4">Slip Form, Concrete pylon, Configuration Control, Light Weight Form</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

공기단축형 고주탑 시공기술 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 들어 고성능·고강도 재료의 개발과 설계 및 시공기술의 발달로 교량은 더욱 길고 높은 초장대 구조물로 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 이는 섬과 육지, 섬과 섬 사이, 대륙과 대륙을 연결하기 위한 장대 교량에 대한 사회적인 요구를 바탕으로 하고 있다. 2009년에는 인천대교(중앙경간 800m)가 개통되었고 2012년 세계 4위의 경간장을 갖는 이순신대교(중앙경간 1545m)가 시공되어 공용 중에 있다. 이러한 장대 교량들은 중앙 경간이 길기 때문에 필연적으로 매우 높은 주탑을 가질 수밖에 없다. 서해대교는 182m, 인천대교는 230.5m, 이순신대교는 270m이고 중앙경간이 2km를 초과하는 초장대교량에서는 400m에 이를 것으로 예상되고 있다. 이러한 주탑은 경제성 확보를 위해 대부분 콘크리트로 건설되고 있다.

높은 콘크리트 주탑을 시공하기 위해서는 공기 단축과 고공에서의 인력 작업을 최소화하기 위해 기계화된 이동식 거푸집 시스템을 사용하여 시공하고 있다. 이동식 거푸집 시스템으로는 운영 방법에 따라 ACS(Auto Climbing Form System)와 슬립폼시스템(Slip-Form System)으로 구분할 수 있다. 이 중에서 슬립폼시스템을 사용하는 공법은 거푸집 조립, 철근 조립, 콘크리트 타설, 양생, 거푸집 탈형 등 5가지 반복 작업이 24시간 연속 실시되어 타 공법에 비해 공사기간이 대폭 단축된다는 장점이 있다. 따라서 유럽의 경우에는 다양한 구조물에 널리 적용되고 있다. 그러나 국내에서는 관련 기술에 대한 연구가 부족하여 보편적으로 사용되고 있지 않은 실정이다.

콘크리트 구조물의 단면이 변화되지 않는 경우에서는 슬립폼시스템이 비교적 단

순하기 때문에 외국 시스템을 직도입하거나 제휴를 통해 국내에서 수정 제작하여 고교각 등에 사용하고 있다. 하지만 초장대 교량과 같이 주탑 단면이 높이에 따라 변화하고 주탑 형상이 3차원인 경우에는 해외 전문업체에 설계・제작・운용기술을 전적으로 의존할 수밖에 없고, 막대한 로열티를 지불하면서 외화가 유출되는 상황이 반복되고 있다. 콘크리트 시공에 있어서 슬립폼공법이 고난이도 기술이고 전세계적으로도 소수의 업체가 독점하고 있기 때문에 해외 전문업체는 새로운 경쟁자 출현을 막기 위해 국내로의 기술이전을 극도로 기피하고 있다. 따라서 초장대교량 건설 자립화를 이루고 고부가가치 건설기술을 확보하기 위해서는 변단면 콘크리트 주탑 시공을 위한 첨단 공법인 변단면 슬립폼시스템의 설계와 제작 기술을 국산화할 필요가 있다.

이를 위해 본 연구에서는 변단면 슬립폼 장비 및 가설공법의 국산화를 위해 변단면 슬립폼 장비의 설계 및 제작기술을 개발하고, 콘크리트 품질과 슬립폼 최적 상승을 위한 콘크리트 고소 타설 및 양생기술을 확보하며, 효율적인 경량화된 조립식 슬립폼 구조 및 모듈을 개발하고자 한다. 또한 신속하고 정확한 시공을 위한 고주탑 형상 및 시공 관리시스템을 구축하고자 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

단계	연차	연구내용	연구범위
1단계	2	◦ 변단면 시스템 설계 현황 및 시스템 특성 분석	◦ 변단면 슬립폼시스템 설계 분석 및 구조계산서 분석 ◦ 변단면 슬립폼시스템 구조개선사항 도출
		◦ 경량 거푸집 연구동향 및 슬립폼 구성부재 대체 방안 분석	◦ 경량 거푸집 연구동향 및 적용 사례 분석 ◦ 슬립폼 경량화를 위한 GFRP재료 특성 분석 ◦ 슬립폼 구성부재에 대한 GFRP부재 대체 방안 분석
		◦ 광학식 계측에 의한 시공 정밀도 관리 시스템 분석	◦ 국내외 특수교량 시공 정밀도 관리 시스템 적용현황 및 특성 분석, 시공사례 조사 분석 ◦ 시공 정밀도 관리시스템 개선을 위한 센서 구

단계	연차	연구내용	연구범위
			성안 도출
	3	◦ 슬립폼시스템 인상 속도별 품질특성 및 최적 인상 방안 연구	◦ 슬립폼시스템 skin plate 특성 및 콘크리트 마찰저항성 연구 ◦ 거푸집 인상속도를 고려한 품질특성 연구
		◦ 슬립폼 경량화 방안 도출	◦ 슬립폼 경량화 기본구조 도출 ◦ 구조해석을 통한 GFRP 구조요소 성능 검토
		◦ 시공 정밀도 관리 및 슬립폼 위치제어 소프트웨어	◦ 시공 정밀도 관리 시스템 계측센서 신호처리 기법 연구 ◦ 시공 정밀도 관리 SW를 위한 오차보정 알고리즘 및 신호처리 모듈 개발 ◦ 시공 정밀도 관리 SW 및 통합시스템 모듈 구성 방안 도출
	4	◦ 시공 정밀도 및 작업성 개선을 고려한 슬립폼시스템 설계	◦ 시공 정밀도, 작업성, 시공품질 향상을 고려한 변단면 기본 슬립폼시스템 설계 ◦ 자동화 시공을 고려한 거푸집 인상 자동제어 기법 개발 ◦ 경량 거푸집 시스템 구성 모듈 거동 실험
		◦ 고주탑 시공 정밀도 관리 통합시스템 개발 (모듈 및 SW 통합)	◦ 고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 모듈 및 SW 통합
2단계	5	◦ 개발품 프로토타입 1차 공개시연회를 통한 검증 및 보완	◦ 변단면 슬립폼시스템 프로토타입 공개시연회 시작품 제작 ◦ 공개시연회를 통한 개발 시스템 성능 검증 ◦ 공개시연회와 연계하여 시공 정밀도 관리 및 초음파 자동 인상 시스템 시험적용
	6	◦ 개발품 프로토타입 2차 공개시연회를 통한 시스템 개선	◦ 공개시연회를 통한 시스템 개선 ◦ 슬립폼 공개시연회와 연계하여 시공 정밀도 관리·초음파 자동 인상·경량 거푸집 시스템 적용

단계	연차	연구내용	연구범위
			◦ 관련 설계도서 및 기준 개발
3단계	7	◦ 변단면 슬립폼시스템 보완	◦ 슬립폼 자동화 운용기술 보완 ◦ 슬립폼 운용지침 작성 ◦ GPS 신호처리 고도화 ◦ 고주탑 형상관리 시공지침 작성 ◦ 통합형 TB 기술지원 ◦ 경제성 분석 ◦ 기술이전 및 신기술 추진
	8	◦ 통합형 TB기술지원	◦ BIM 가상설계 구축 ◦ 통합형 TB 기술지원

Ⅳ. 연구개발결과

이 연구는 초장대교량사업단의 전체적인 TRM(Technical Road Map)에 따라 2차년도부터 8차년도까지를 3단계로 나누어 구성되었으며 2009년 11월 6일에 시작하였다. 연구 목표는 “기술자립 및 국제 경쟁력 확보를 위한 공기단축형 콘크리트 고주탑 가설 장비 및 공법 개발”이며, 효과적인 연구추진을 위해 “변단면 고주탑을 위한 슬립폼 장비 및 공법”, “GPS를 이용한 400m 이상 고주탑 시공 정밀도 관리”, “변단면 대응이 가능한 경량 슬립폼 모듈” 등 3개 핵심분야로 구분하여 추진하였다.

1단계 연구는 2차년도부터 4차년도까지 총 28.7개월로 구성되었으며, 핵심기술에 대한 원천기술을 독자적으로 도출하고 그 상세를 개발하였다. 구체적으로는 BIM 기반 3D 설계 및 디지털 가상 시공을 적용하여 변단면 슬립폼시스템을 개발하여 제작오차 및 시공 시 시행착오를 최소화하였다. 또한 슬립폼 최적기 상승기술을 개발하여 공기단축, 안전성 및 콘크리트면 품질을 향상을 유도하였다. 그리고 변단면

에 대한 자동화기술을 개발하여 정밀 형상 관리, 공사비 절감 및 작업 시간 단축을 가능하게 하였고, GPS를 이용한 시공정밀도 및 형상관리 기술을 개발하여 시공정밀도를 확보하고 기후 영향과 시준점 영향을 최소화하였다. 경량 GFRP 모듈형 패널기술을 개발하여 거푸집 설치 및 해체 시간을 단축시키고 고소작업 안전성을 향상시켰으며 고른 콘크리트 품질을 확보하였다.

2단계 연구는 5차년도부터 6차년도까지 총 24개월로 구성되었으며, 1단계에서 개발한 핵심요소기술을 검증하고 보완하는 것을 연구목표로 하였다. 1주탑 및 2주탑에 대한 변단면 슬립폼시스템을 설계 및 제작하여 2회의 시험시공을 성공적으로 완료함으로써 핵심요소기술에 대한 검증 및 보완을 수행하였다.

3단계 연구는 7차년도부터 8차년도까지 총 21개월로 구성되었으며, 1단계 및 2단계 연구를 통해 개발되고 검증된 변단면 슬립폼시스템에 대한 자동화 보완과 실용화를 목표로 하였다. 이를 위해 2회의 시험 시공을 추가로 수행하였으며, 3건의 기술실시계약을 체결하고 건설신기술을 등록하는 성과를 얻었다.

이상과 같은 1단계 ~ 3단계 연구를 수행하고 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 형상이 3차원으로 변하고 단면이 변화하는 콘크리트 주탑을 시공하기 위한 변단면 슬립폼시스템의 설계와 제작에 대한 연구를 수행하였다. 슬립폼시스템의 구성요소를 분석하고, 변단면 시공을 위한 슬립폼 대응 방안을 도출하였다. 개발된 요소 기술들을 바탕으로 2회에 걸친 시험시공에 필요한 슬립폼시스템의 설계도면을 작성하고 BIM을 이용한 설계 검토를 수행하였다. 설계도면을 바탕으로 제작된 슬립폼시스템을 설치하고 변단면 콘크리트 주탑을 성공적으로 시험 시공함으로써 이 연구에서 개발된 슬립폼시스템의 안전성과 효율성을 입증하였다.

(2) 기존 슬립폼 공법에서는 경험적 방법 또는 탐침봉에 의한 재래적 기술에 의존해 시공하고 있다. 이 연구에서는 초음파(표면파)를 이용하여 슬립폼 거푸집 내에 타설된 콘크리트 경화정도를 파악하고 최적 시점에 슬립폼을 상승시킬 수 있는 연구를 수행하였다. 이를 위해 각종 콘크리트 배합과 양생온도 조건을 변수로 해서 관입저항시험, 압축강도시험, 표면파 속도 측정 실험을 동시에 수행하였으며, 그 결과 콘크리트 품질을 안정적으로 확보할 수 있는 표면파 속도를 도출하였다. 도출된

표면파 속도를 시험 시공에 적용하여 변단면 콘크리트 주탑을 성공적으로 시공하였다. 4차례에 걸친 시험시공에 적용함으로써 이 연구에서 제시한 표면파 속도로 슬립폼시스템을 상승시키면 매우 효율적인 시공이 가능함을 확인할 수 있었다. 실제 프로젝트에서는 현장 기후상황에 맞춰 다양한 콘크리트 배합이 준비되고 있으며, 따라서 시공 전 양생온도 및 습도 조건에 대한 표면파 속도를 파악하여 슬립폼 시스템 상승에 필요한 정량적인 기준을 설정할 수 있게 되었다.

(3) 기존 공법에서는 수동식 스핀들을 인력으로 조정하여 변단면 주탑을 시공하고 있다. 이는 매우 비효율적일 뿐만 아니라 정밀한 형상 관리에 문제가 생길 수 있다. 이 문제점을 보완할 수 있는 무선 제어 전동식 스핀들(K-Spindle)을 개발하고 변단면 주탑 시공에 적용하여 효율성을 입증하였다. 개발된 K-Spindle을 이용하여 2번의 시험시공을 수행한 결과 무선으로 스핀들의 개별 및 동시 제어가 가능하고 변단면 대응을 신속하게 수행함을 확인하였다. K-Spindle은 회전 속도와 방향을 자유자재로 조절할 수 있어서 정하여진 주탑 형상에 맞게 슬립폼을 확대하거나 축소하는 것이 가능하다. 적용된 기어박스의 기어비에 따라 회전력을 증가시킬 수 있는데, 이는 인력보다 매우 큰 회전력으로 스핀들을 조이거나 풀어주어 어떠한 상황에서도 변단면 처리를 신속하게 수행하는 것을 보장하였다. 또한 방우구조를 채택하여 기상조건에 관계없이 작동할 수 있도록 하였고 24시간 연속해서 작업이 이루어지는 슬립폼 특성을 반영하여 비상시 수동 작동도 가능하게 하였다. 보통 작업현장에서는 상시 예비 발전기가 준비되어 있어 응급상황에도 정상 운용할 수 있으나, 모든 전원공급이 중단되는 극단적인 비상 상황에서도 무리없이 슬립폼 작업을 할 수 있도록 수동 조작 기능을 추가하였다. 이러한 극단 상황에 대한 대응 상황을 시험시공에서 시뮬레이션하여 정상 시공이 가능함을 확인하였다. 이와 같이 변단면 콘크리트 고주탑 시공 시 슬립폼 조정 작업의 효율성을 극대화함과 동시에 정밀한 형상관리를 실현하게 되었다.

(4) 슬립폼공법을 적용한 콘크리트타워의 정밀한 시공을 위해서 기존 재래식 측량기법에서 탈피하여 기후와 같은 외부요인에 의한 영향 등을 최소화할 수 있는 무선기반 원격 시공정밀도 및 형상관리시스템을 개발하였다. 여기서는 전천후 측정을 위해 GPS와 경사계를 적용한 계측시스템과 정밀도 확보를 위한 데이터 획득 및

처리방법 등을 연구하였다. 또한 계측된 데이터에 기초하여 무선으로 유압잭을 자동 제어할 수 있는 통합시스템을 개발하였다. 여기서는 3차원으로 변하는 주탑 형상의 효율적인 시공정밀도를 관리하기 위하여 실시간 GPS 측정과 동일 위치의 경사계를 통합 운용하는 자동계측 모듈을 개발하였고 GPS계측의 정밀도 향상을 위해 칼만필터링 기법을 이용한 신호처리를 통해 신뢰성 있는 데이터를 확보하였다. 또한 개발된 통합 정밀도관리시스템인 KICS(KICT Integrated Configuration control System)를 울산대교 현장에서 시험적용하고 거푸집 및 크레인 타워의 영향 등을 파악하여 콘크리트 변단면 주탑에서의 현장 적용성을 향상시켰다. 이 연구에서 개발한 슬립폼시스템에 의해 4회에 걸쳐 변단면 콘크리트 주탑을 시험 시공할 때 본 시스템을 투입하여 시공정밀도 및 형상관리를 성공적으로 수행하였다.

(5) 슬립폼 거푸집을 경량화 시키기 위하여 GFRP로 제작되는 거푸집의 형상과 모듈을 개발하였다. 구조해석 및 실험을 통해 개발된 GFRP 거푸집이 기존 강재 거푸집 이상의 성능을 확보할 수 있는지 분석하였다. 구조해석 및 실험 결과 GFRP 거푸집이 강재 거푸집과 비교하여 보다 뛰어난 구조 성능을 가지고 있으며 단열효과 또한 뛰어난 것을 확인하였다. 단열 효과는 콘크리트 양생 시 온도를 일정하게 유지시켜 우수한 콘크리트 품질을 확보하는데 유리하게 작용한다. 그리고 GFRP 거푸집을 모듈화 하여 조립 및 해체가 용이하도록 하였고, 모듈화된 GFRP 거푸집과 슬립폼시스템과의 체결부를 개발하여 거푸집 설치에 소요되는 작업시간을 대폭 감소시킴으로써 슬립폼 작업에 소요되는 전체 공기를 단축시킬 수 있도록 하였다. 개발된 GFRP 거푸집 모듈은 차수성 재로로서 콘크리트 양생 시 습기를 밀어내게 된다. 이러한 성질은 슬립폼 인상 시 거푸집과 콘크리트 사이의 마찰력을 감소시켜 우수한 콘크리트 품질을 확보하는데 유리하게 작용한다. 그리고 실험을 통해 GFRP 거푸집을 이용하여 시공한 콘크리트 구조물의 표면이 강재 거푸집에 비해 보다 우수함을 확인함으로써 이러한 사실을 확인하였다.

(6) 변단면 콘크리트 주탑을 위한 슬립폼시스템 개발을 위해 개발한 핵심요소기술들을 3회의 목업실험을 통해 검증하고, 4회의 시험시공을 통해 그 성능을 보완 및 개선하였다. 특히 4회의 시험시공은 실제 교량의 주탑 규모로 수행되었으며, 성공적으로 시공을 완료함으로써 개발된 핵심요소기술들이 현장 적용에 문제가 없음을

거듭 확인하였다. 구체적인 검증 및 적용내용은 다음과 같다.

1단계 연구에서 개발된 핵심요소기술들을 종합하여 3차에 걸쳐 목업 슬립폼시스템을 제작하여 실증 실험을 수행하였다. 1차 목업실험에서는 가로 및 세로가 40cm인 단면을 갖는 강재와 GFRP 거푸집으로 이루어진 소형 슬립폼시스템을 제작하고 높이 25cm로 콘크리트를 여러 층 타설한 후 형상 관리시스템의 무선 유압잭 제어 프로그램을 사용하여 실시하였다. 강재와 GFRP 슬립폼을 개별적으로 인상하는 경우와 동시에 인상하는 경우를 각각 실시하고 슬립폼 상승에 따른 거푸집 마찰하중을 측정하였다. 이를 통해 GFRP 거푸집의 보온성과 시공 후 콘크리트 면이 우수함을 확인하였다. 2차 목업실험에서는 40cm 단면의 강재 및 GFRP 거푸집을 높이 1.2m로 제작하고 콘크리트를 높이 25cm로 1시간마다 타설하였다. 실제 콘크리트 주탑에서의 슬립폼 공법과 유사하게 여기서도 형상 관리시스템의 유압잭 제어프로그램을 사용하였으며 강재와 GFRP 슬립폼시스템을 동시에 인상하여 총 높이 2.0m의 기둥 2개를 시공하는 실험을 실시하였다. 이때 거푸집 하단에 초음파 모듈을 설치하여 초음파 속도로 슬립폼 상승 시기를 결정하였다. 이로부터 초음파 최적상승장치를 이용하면 슬립폼시스템의 효율적인 운용이 가능함을 확인하였다. 3차 목업실험에서는 GFRP 모듈을 이용하여 슬립폼 거푸집을 제작하여 목업실험을 수행하였다. 시공정밀도 관리시스템을 이용하여 원격으로 슬립폼시스템을 상승시켜 총 높이 1.8m의 콘크리트 기둥 2개를 동시에 시공하는 실험을 실시하였다. 이를 통해 콘크리트 타설 후 및 슬립업 후에도 연결부 등에서의 처짐이나 유해한 문제가 발생하지 않음을 확인하였다.

목업실험과 별도로 시험시공은 개발한 핵심요소기술들의 성능을 검증하고 현장 적용성을 개선하기 위해 총 4차례에 걸쳐 수행되었다. 1차 시험시공의 목적은 이 연구에서 개발된 핵심요소기술들을 통합적으로 적용하여 검증하는 데 있었다. 개발된 슬립폼시스템으로 변단면 주탑 시공이 가능함을 입증하기 위해 핵심요소기술들 모두를 반영하여 시스템을 설계하고 제작하여 시험시공에 투입하였다. 여기서, 변단면 슬립폼공법의 핵심 요소기술들에 대한 연구개발이 체계적으로 이루어졌다고 생각하였지만 설계 단계에서 예상하지 못했던 문제점들을 발견하여 보완하기도 하였다. 특히 설계단계에서 고려하지 못한 작업자 편의 및 작업공간 확보에 대한 면밀한 검토가 필요함을 확인하였다. 2차 시험시공은 래티스거더를 이용하여 2개의 변단면 슬립폼시스템을 동시에 시공하는 것이었다. 일반적인 장대교량 주탑과 유사

하게 변단면 콘크리트 타워 2기를 10m 높이까지 동시 시공을 성공적으로 실시하였다. 여기서는 당초 연구목표에는 없었지만 인력에 의해 수행되던 변단면 대응 작업을 자동화하는 전동식 스핀들 시스템의 시제품을 만들어 적용하였다. 그리고 GFRP거푸집 모듈의 체결부를 개선하여 작업의 편의성을 증진시켰고, 일반 사장교 주탑과 같이 시공 중 케이블 정착구를 삽입하여 현장 적용성을 입증하였다. 3차 시험시공에서는 본격적으로 슬립폼시스템의 변단면 자동화를 검증하였다. 2차 시험시공에서 적용가능성 여부를 확인한 전동식 스핀들의 자동화 시스템을 변단면 작업이 수행되는 모든 부분에 적용하였다. 이를 통해 작업시간을 단축하고 인력을 절감하며, 정밀한 형상관리를 수행할 수 있음을 확인하였다. 4차 시험시공은 무선 전동식 스핀들의 내구성 성능 검증과 건설신기술 현장실사를 위해 실시되었다. 3차 시험시공 후 8개월간 방치된 슬립폼시스템의 변단면 자동화시스템이 제대로 작동하는 지 검증하였다. 기 시공된 주탑 실험체에서 추가로 2m를 더 상승시켜 시공을 수행하였다. 3차 시험시공 후 설치된 무선 전동식 스핀들을 철거하지 않은 상태로 8개월 동안 외부 환경에 그대로 노출된 상태였는데 32개의 자동화시스템 모두 정상 작동하여 변단면 대응을 효율적으로 실시하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

이 연구에서는 변단면 슬립폼시스템 개발을 위해 5개의 핵심요소기술을 개발하였다. 개발된 핵심요소기술들은 “변단면 슬립폼시스템 설계기술 및 제작기술”, “경량 GFRP 모듈형 패널기술”, “슬립폼 최적기 상승기술”, “슬립폼의 변단면 대응 자동화기술”, “콘크리트 고주탑 시공정밀도 및 형상 관리기술”이다. 여기서 “변단면 슬립폼시스템 설계기술”은 BIM을 이용하는 것으로서 주탑 뿐만 아니라 슬립폼시스템으로 시공되는 다양한 구조물에 적용이 가능하다. “경량 GFRP 모듈형 패널기술”은 경량성, 단열성 및 차수성 등 우수한 GFRP 재료의 특성을 활용할 수 있으므로 변단면 슬립폼시스템 뿐만 아니라 타 공법에도 이용이 가능하다. “슬립폼 최적기 상승기술”은 초음파를 이용하여 콘크리트의 경화정도를 측정하는 기술로서 급속 시공이 필요한 모든 콘크리트 구조물에 적용이 가능하다. 그리고 “콘크리트 고주탑 시공정밀도 및 형상 관리기술”은 GPS를 활용한 것으로서 슬립폼 공법은 물

론이고 ACS 공법에서도 적용이 가능하다.

이와 같은 핵심요소기술들을 통합하는 변단면 슬립폼시스템은 기존 해외 기술과 비교하여 우수하고 차별화된 성능을 가지고 있으며, 교량의 주탑 뿐만 아니라 교각, 탱크터미널, 연돌, 사일로, LNG 벽체 구조물 등 연속적으로 시공이 이루어지는 다양한 구조물에 적용이 가능하다. 또한 완전한 기술 자립화를 통해 해외 시장 진출 시 기술 경쟁력뿐만 아니라 가격 경쟁력 또한 확보하였다.

Summary

Ⅰ. TITLE

Development of accelerated construction technology for high-rise pylons

Ⅱ. Necessity and purpose

Following the recent development of high-performance/high-strength materials and the advances realized in the design and construction technologies, bridge structures have witnessed tremendous evolution in length and height. This evolution answers concretely to the social need of long span bridges for island-to-mainland, island-to-island and intercontinental links. Incheon Bridge (central span of 800 m) opened to traffic in 2009, and Yi Sun-sin Bridge (central span of 1545 m), the fourth longest bridge in the world, was completed and entered in operation in 2012. These long-span bridges require imperatively high-rise towers to deal with their extended central spans. For example, the towers of Seohae Bridge, Incheon Bridge and Yi Sun-sin Bridge rise at respective heights of 182 m, 230.5 m and 270 m, and it can be expected that the super-long span bridge with central span longer than 2 km will see its towers rise above 400 m. Most of these towers are made of concrete for the economy.

Mechanized movable form systems are used for the erection of high concrete towers to shorten the construction period and minimize manpower works at elevated height. These movable form systems can be classified into the ACS (Auto Climbing Form System) and the slip-form system according to the operating method. The slip-form system presents the advantage of shortening significantly the construction period compared to other methods since the

erection can be executed during 24 hours without interruption through the repetition of 5 tasks that are, assemblage of forms, assemblage of rebar, placing of concrete, curing and stripping of forms. Owing to such advantage, the slip-form system has been and is being widely applied for the erection of various structures in Europe. However, this is not the case in Korea due to the lack of research on related technologies.

In the case of concrete structures with constant sections, foreign systems are being directly introduced or fabricated in modified form in Korea through technical tie-up since the slip-form system is relatively simple. However, in the case of tapered sections varying according to the height of the pylon like in super long span bridges and when the shape of the pylon is three-dimensional, the design, fabrication and operation technologies rely completely on the foreign expertise, which result in tremendous disbursement of royalties and outflow of foreign currencies. The slip-form is a highly difficult technique in concrete construction and is monopolized by a very few companies. These foreign companies are thus extremely reluctant to implement technology transfer so as to avoid the rise of any new concurrence. Accordingly, it is obviously necessary to localize the design and fabrication of the tapered slip-form system as the latest technology for the erection of tapered concrete pylons in order to secure the self-relying construction of super long span bridges and high-valued construction technology.

To that goal, this research intends to develop the design and fabrication technology of tapered slip-form equipment for the localization of the related industry, to secure elevated placing and curing technology of concrete for the quality of concrete and the optimized lift-up of the slip-forms, and to develop efficient and lightweight slip-form structures and modules. Moreover, this research also intends to establish the configuration control and erection management technology for rapid and accurate construction.

Ⅲ. Contents and scope

Stage	Year	Research contents	Scope
1	2	◦ Status of tapered system design and analysis of system characteristics	◦ Analysis of the design of tapered slip-form system and analysis of structural calculations ◦ Derivation of structural calculations of tapered slip-form system
		◦ Research trend on lightweight forms and analysis of replaceable components of slip-form	◦ Research trend on lightweight forms and review of previous applications ◦ Evaluation of characteristics of GFRP material for lightweight slip-form ◦ Evaluation of replacement of slip-form components by GFRP members
		◦ Analysis of configuration control by optical measurement	◦ Review of configuration control systems applied worldwide for special bridges, survey and analysis of previous applications ◦ Derivation of sensing layout for the improvement of configuration control
	3	◦ Study on quality according to lifting speed of slip-form system and optimization of lift-up	◦ Study on the skin plate characteristics of slip-form system and frictional resistance of concrete ◦ Study on quality of concrete considering lifting speed of form
		◦ Derivation of lightweight slip-form alternatives	◦ Derivation of basic structure for lightweight slip-form ◦ Performance evaluation of GFRP structural elements by structural analysis
		◦ Configuration control and slip-form position	◦ Study on signal processing of measurement sensors in configuration control system

Stage	Year	Research contents	Scope
		control softwares	◦ Development of error calibration algorithm and signal processing module for configuration control SW ◦ Derivation of module organization for configuration control SW and unified system
	4	◦ Design of slip-form system considering configuration and work improvement	◦ Design of basic tapered slip-form system considering configuration control, workability, and improvement of construction quality ◦ Development of automated control of form lifting considering automated construction ◦ Behavior test of constitutive modules of lightweight form system
		◦ Development of unified system for configuration control of high pylon (unification of modules and SW)	◦ Unification of modules and SW of configuration control system for high pylons
2	5	◦ Verification and supplementation by means of first public demonstration of the developed product prototype	◦ Fabrication of pilot product for public demonstration of tapered slip-form system prototype ◦ Performance verification of developed system through public demonstration ◦ Trial application of configuration control and automated lifting by ultrasonic wave through public demonstration
	6	◦ System improvement by means of 2nd public demonstration	◦ System improvement through public demonstration ◦ Application of configuration control·

Stage	Year	Research contents	Scope
		of the developed product prototype	automated lifting by ultrasonic wave·lightweight form system through public demonstration ◦ Development of related design documents and specifications
3	7	◦ Supplementation of tapered slip-form system	◦ Supplementation of automated operation technology of slip-form ◦ Preparation of slip-form operation manual ◦ Advancement of GPS signal processing ◦ Preparation of high pylon profile management manual ◦ Unified TB technology support ◦ Evaluation of economic efficiency ◦ Promotion of technology transfer and innovative technology
	8	◦ Unified TB technology support	◦ Establishment of BIM virtual design ◦ Unified TB technology support

Ⅳ. Results

This research was launched on November 6th, 2009, and was implemented in three stages starting from the 2nd year to the 8th year of the TRM (Technical Road Map) of the Super Long Span Bridge R&D Center. The goal of the research is “Development of equipment and methods for the accelerated erection of high concrete pylons to secure technological independence and international competitiveness”. For the efficient execution of the project, the research is subdivided into 3 core technologies that are: “slip-form equipment and method for high pylons with tapered-section”, “configuration control of pylons higher than 400 m using GPS”, and “lightweight slip-form modules for tapered

sections".

The first stage of the research ran during 28.7 months from the 2nd year to the 4th year of the program and was dedicated to the identification of original technologies and the development of the details for the core technologies. Concretely, the tapered slip-form system applying BIM-based 3D design and virtual erection was developed to minimize construction and fabrication errors. In addition, the lift-up time of the slip-form was optimized to shorten the erection period and improve the safety and quality of the concrete surface. Moreover, automation technology for tapered sections was developed to achieve precise configuration control, cost reduction and accelerated erection. Configuration control using GPS was developed to secure the accuracy of erection and minimize the effects of the weather and control points. Lightweight GFRP modular panels were developed to shorten the time spent for the assemblage and dismantlement of the forms, improve the safety of works at high altitude and secure even quality of concrete.

The second stage lasted for 24 months from the 5th year to the 6th year of the program. This stage verified and complemented the core technologies developed in the 1st stage. The tapered slip-form systems for 1-pylon and 2-pylon were designed and fabricated, and were used successfully in 2 trial erections.

The third stage ran during 21 months from the 7th year to the 8th year of the program. This stage implemented 2 additional trial erections to supplement the automation of the system developed in the 1st and 2nd stages. Three Technology License Agreements were contracted and the developed technology was registered as Construction Innovation Technology.

The following conclusions can be drawn from these 3 stages of research.

(1) Research was implemented on the design and fabrication of the tapered slip-form system for the erection of concrete pylons with tapered sections varying 3-dimensionally. The constitution of the slip-form system was analyzed

and solutions of the slip-form were derived to deal with tapered sections. Based upon the developed key technologies, design drawings of the slip-form system necessary for two trial erections were prepared and design verification was executed using BIM. The slip-form system fabricated based on the design drawings was installed and applied successfully for the trial erection of tapered concrete pylons. This demonstrated the safety and efficiency of the slip-form system developed in this research.

(2) In the traditional slip-form method, the erection relied on the experience or on the use of a probe bar. In this research, the degree of setting of the concrete placed inside the slip-form is assessed using ultrasonic waves (surface waves) and the optimal lift-up time of the slip-form was studied. To that goal, penetration resistance test, compressive strength test, and test measuring the speed of the surface wave were conducted simultaneously considering various parameters including the mix composition of concrete and the curing temperature. The results enabled to derive the speed of the surface wave for which the stable quality of concrete could be secured. The so-derived speed of the surface wave was applied in the trial erection and helped in the successful construction of a tapered concrete pylon. Throughout 4 trial constructions, it was verified that very efficient erection could be achieved by lifting-up the slip form based on the speed of the surface wave proposed in this research.

(3) The previous method erected the tapered pylon by adjusting manually the spindle. This method is extremely inefficient and may even cause problems in the configuration control. In order to solve such problems, the wireless-controlled electric spindle (K-Spindle) was developed and its effectiveness was verified by applying it to the erection of a tapered pylon. The results of 2 trial constructions using the K-Spindle showed that individual and simultaneous control of the spindles could be done wirelessly and that the K-Spindle could deal rapidly with tapered sections. Since the rotation speed and

direction of the K-Spindle can be adjusted easily, the slip-form can be enlarged or narrowed conveniently to fit to the desired shape of the pylon. The rotation speed can be increased according to the gear ratio of the applied gear box. This feature allows the K-Spindle to develop significantly larger torque than by manpower and to respond rapidly to the tapered section under any condition. A rain protection structure was adopted to enable operation regardless of the weather. In addition, the spindles can be switched to manual or automated mode in case of emergency so as to reflect the characteristics of the slip-form which operates non-stop 24 hours/day. Even if there is always a reserve electric power generator in ordinary sites to allow normal operation in emergency case, a manual control function was added to secure smooth operation of the slip-form even in extreme case where power supply is completely shut down. Such extreme event was simulated during the trial construction to verify the normality of the operational process. Accordingly, the efficiency of the operation of the slip-form was magnified together with the realization of precise configuration control during the erection of the high tapered concrete pylon.

(4) A wireless remote configuration control system was developed to minimize the effect of external environment like weather and be free from the traditional measurement methods for the precise erection of the concrete tower by slip-forming. Here, research was conducted on data acquisition and processing techniques to secure the accuracy and achieve a measurement system applying GPS and tiltmeter in all-weather. Moreover, a unified system enabling to control automatically and wirelessly the hydraulic jacks based upon the measured data was developed. To that goal, an automated measurement module was developed to integrate the real-time GPS measurement and the tiltmeter located at the same position for the efficient configuration control of the 3-dimensionally varying shape of the pylon. The reliability of the data was secured through signal processing using the Kalman filter to improve the accuracy of the GPS measurement. In addition, the so-called KICS (KICT

Integrated Configuration control System) was applied experimentally to the Ulsan Bridge site and the effect of the forms and crane tower was evaluated to improve the field applicability of the concrete tapered pylon. In view of the 4 trial constructions of tapered concrete pylons using the slip-form system developed in this research, this system enabled to execute successfully the configuration control of the structures.

(5) The shape and module of forms made of GFRP were developed to achieve lightweight slip-forms. Analysis was conduced to verify if the GFRP forms developed through analytical and experimental studies secured higher performance than the conventional ones. The structural analysis and experimental results revealed that, compared to the steel form, the GFRP form offered better structural performance and remarkable insulation effect. The insulation effect could keep the temperature constant during the curing of concrete and provided positive effect in the quality of concrete. The modularization of the GFRP forms eased the assemblage and dismantlement. The connection between the modular GFRP form and the slip-form system was developed so as to shorten significantly the time required for the installation of the forms and, in turn, reduce the whole slip-forming period. Since the developed GFRP form module are made of waterproof material, the module can thrust out humidity during the curing of concrete. Such property reduces the frictional force developed during the lift-up between the slip-form and concrete, and is advantageous in term of the quality of concrete. Finally, a series of tests using the GFRP form showed that the surface of the concrete structure was better than that obtained using steel form.

(6) The core technologies developed for the slip-form system for tapered concrete pylons were probated through 3 mockup tests, and their performances were supplemented and improved by means of 4 trial constructions. Especially, the 4 trial constructions involved full-scale bridge pylons and were completed

successfully, which showed that the developed core technologies could be applied on site without problem. The detailed items of the verification and application are as follows.

The core technologies developed in the first stage were integrated and resulted in the fabrications of 3 mockup slip-form systems that were used in verification tests. In the first mockup test, a small-scale slip-form system made of steel and GFRP forms and a cross-section of 40×40 cm was fabricated and used to place concrete with various layers of 25 cm prior to execute the wireless hydraulic jack control program of the configuration control system. The frictional force was measured according to the lift-up of the slip-form when the steel and GFRP forms were lifted separately and when the forms were lifted concurrently. The test enabled to verify the excellence of the concrete surface after construction as well as the insulation of the GFRP form. In the second mockup test, steel and GFRP forms with cross-section of 40×40 cm and height of 1.2 m were fabricated and 25 cm-thick layers of concrete were placed every hour. Here also, the hydraulic jack control program of the configuration control system was also used similarly to the slip-forming of an actual concrete pylon. The steel and GFRP forms were lifted concurrently to achieve two 2-m high columns. The ultrasonic wave module was installed at the foot of the form to determine the lift-up time of the slip-form using the ultrasonic wave speed. This enabled to verify the possibility to operate efficiently the slip-form system using the ultrasonic wave device. The third mockup test was conducted using the GPS module and a fabricated slip-form system. The test erected simultaneously 2 concrete columns of 1.8 m by remote control of the slip-form system using the configuration control system. The test showed the absence of problem or deflection in the connection after the placing of concrete and after slip-up.

Apart from the mockup tests, four trial constructions were conducted to verify the performance of the developed core technologies and improve their field applicability. The first trial construction intended to verify the applicability

of the integration of the core technologies developed in this research. The slip-form system was designed and fabricated to reflect all the core technologies in order to prove the feasibility of the erection of the tapered pylon using the developed slip-form system. At that time, it was believed that the R&D was completed for the core technologies of the tapered slip-form method. However, unexpected problems occurred in the design stage and were supplemented. Especially, the necessity to secure the comfort of the technicians and the working space was seen to have been ignored in the design stage. The second trial construction erected simultaneously two tapered section by slip-forming using a lattice girder. The two-tapered legs of the concrete pylon, similar to those usually applied in long span bridges, were successfully erected simultaneously up to a height of 10 m. Even if it was not initially planned, a prototype of the electro-powered spindle system enabling to automatize the erection of the tapered section that was previously done manually by manpower was applied. The convenience of work was ameliorated by improving the connection of the GFRP form module. The cable anchor was inserted as done during the erection of the pylon of ordinary cable stayed bridges so as to verify the field applicability. The third trial construction verified the automated operation of the tapered slip-form system. The automated system of the electro-powered spindle was applied in every part of the tapered section work. This trial construction enabled to verify the shortening of the working time and the reduction of manpower as well as the possibility to execute the configuration control. The fourth trial construction verified the durable performance of the wireless electro-powered spindles and the field applicability of the construction new technologies. The automated system of the tapered slip-form system that was abandoned in place during 8 months after the third trial construction was seen to operate properly. The previously erected pylon specimen was raised additionally by 2 m. Note that the wireless electro-powered were not removed after the third trial erection and were let in place to be exposed to the external environment during 8 months. Despite of

such long exposure, all the 32 automated systems operated normally and enabled to conduct effectively the tapered section.

Ⅴ. Plans for utilizing results

In this research, 5 core technologies were developed for the development of the tapered slip-form system. These core technologies are: “design and fabrication of tapered slip-form system”, “lightweight GFRP modular panels”, “optimal lift-up time of slip-form”, “automation of slip-form for tapered section”, and “configuration control of high concrete pylons”. Here, the “design of tapered slip-form system”technology uses BIM, which makes it applicable not only for pylons but also for the slip-form erection of very diversified structures. Since the “lightweight GFRP modular panels”technology exploits the remarkable properties of GFRP like its light weight, its insulation and its waterproof characteristics, this technology is applicable to tapered slip-form systems as well as other industrial sectors. The “optimal lift-up time of slip-form”technology uses ultrasonic waves to measured the degree of setting of concrete, which makes it applicable to any concrete structures requiring accelerated construction. In addition, the “configuration control of high concrete pylons”technology uses GPS that makes it applicable to the slip-form method as well as the ACS method.

The tapered slip-form system gathering these core technologies exhibits remarkable performances that are distinct from previous foreign technologies. This system can be applied not only for the pylons of bridges but also for the continuous erection of various structures like piers, tank terminals, silos, and LNG walled structures. Moreover, the originality of the system offers sufficient competitiveness in the foreign market as well as economic efficiency and price competitiveness.

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1
제 1 절 연구개발 기술의 정의 및 필요성 ····· 1
제 2 절 연구개발 목표 및 내용 ····· 7
1. 연구개발의 최종목표 ····· 7
2. 연차별 연구목표 및 연구내용 ····· 7
제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 11
제 1 절 국내 기술 동향 ····· 11
1. 국내 장대교량 주탑 현황 ····· 11
2. 공기단축형 슬립폼 공법 기술 현황 ····· 14
3. 콘크리트 고주탑 시공관리 기술 현황 ····· 23
제 2 절 해외 기술 동향 ····· 29
1. 해외 장대교량 주탑 현황 ····· 29
2. 해외 슬립폼 공법 기술 현황 ····· 48
3. 해외 시공중 형상관리 기술 현황 ····· 58
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 67
제 1 절 변단면 슬립폼시스템 설계 및 제작기술 ····· 67
1. 개요 ····· 67
2. 기존 슬립폼시스템의 구성 및 설계기술 분석 ····· 69
3. 변단면 슬립폼시스템의 프로토타입 설계 ····· 79
4. 2차 시험시공에 적용할 변단면 슬립폼시스템 설계 ····· 94
5. BIM을 이용한 슬립폼시스템의 설계 보완 ····· 102
6. 2차 시험시공에 의한 검증 및 보완 ····· 106
7. 3차 시험시공에 의한 검증 및 보완 ····· 109
8. 소결론 ····· 111

제 2 절 슬립폼 최적기 상승기술 및 변단면 자동화기술 개발 ···· 113
1. 개요 ···· 113
2. 슬립폼 최적기 상승기술 ···· 115
3. 슬립폼 변단면 자동화기술 ···· 125
4. 소결론 ···· 133
제 3 절 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리시스템 개발 ···· 135
1. 개요 ···· 135
2. KICS(KICT Integrated Configuration control System) 개발 ···· 136
3. 시험시공 중 형상 관리를 통한 검증 및 보완 ···· 139
4. GPS 신호 처리 모듈 개발 ···· 146
5. 소결론 ···· 154
제 4 절 경량 슬립폼시스템 개발 ···· 155
1. 개요 ···· 155
2. GFRP 거푸집의 역학적 특성 ···· 156
3. GFRP 모듈형 패널 개발 ···· 169
4. 소결론 ···· 173
제 5 절 목업실험 및 시험시공 ···· 175
1. 개요 ···· 175
2. 목업실험 ···· 176
3. 시험시공 ···· 185
4. 소결론 ···· 196
제 6 절 결론 ···· 199

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기대성과 ···· 205
제 1 절 연구목표 달성도 ···· 205
1. 연차별 성과지표 달성도 ···· 205
2. 연차별 주요 산출물 ···· 216
3. 연차별 연구비 집행 내역 ···· 222

제 2 절 기대성과 및 파급효과 ····· 231
1. 기술적 측면 ····· 231
2. 사회·경제적 측면 ····· 232
3. 전략적 측면 ····· 240

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 241
제 1 절 연구결과의 활용방안 ····· 241
1. 활용방안 종합 ····· 241
2. 성과물 특성에 따른 활용방안 ····· 242
제 2 절 연구결과의 기업 활용방안 ····· 243
1. 참여기업의 현황분석 ····· 243
2. 참여기업별 연계방안 및 추진전략 ····· 247
제 3 절 타 산업에 미치는 효과 ····· 249
제 4 절 정부 정책과의 연계 방안 ····· 251
1. 정부 정책과의 연계 방안 ····· 251
2. 정부 및 관련 공공기관과의 협조 방안 ····· 251
제 5 절 관련 후속연구개발의 전망 ····· 253

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ··· 255
제 1 절 중국 장대교량 주탑시공 현황 분석 ····· 255
1. 수통대교 ····· 256
2. 강소양자대교 ····· 258
3. 태주장강대교 ····· 260
4. 상해소재 사장교 ····· 263
제 2 절 교량의 시공방법 현황 분석 ····· 267
1. 교량 형식과 시공 방법 ····· 268
2. Jacking and Skidding ····· 272
3. Movable Scaffolding Systems ····· 274
4. Form Traveller Systems ····· 274

5. Precast Full Span Method ····· 275

제 7 장 참고문헌 ····· 279

Contents

Chapter 1 Outline ····· 1
1 Definition and Necessity of R&D ····· 1
2 Objectives and Contents of R&D ····· 7
1 Final Objective of R&D ····· 7
2 Yearly Research Objectives and Contents ····· 7

Chapter 2 Status in Korea and Overseas ····· 11
1 Technology Trends in Korea ····· 11
1 Status of Long-span Bridge Pylon in Korea ····· 11
2 Technology Status of Accelerated Slip-form Erection ····· 14
3 Configuration Control of High Concrete Pylons in Korea ····· 23
2 Technology Trends Overseas ····· 29
1 Status of Long-span Bridge Pylon Overseas ····· 29
2 Accelerated Slip-form Technology Overseas ····· 48
3 Configuration Control of High Concrete Pylons Overseas ····· 58

Chapter 3 R&D Contents and Results ····· 67
1 Design and Fabrication of Tapered Slip-form Systems ····· 67
1 Outline ····· 67
2 Composition and Design of Previous Slip-form Systems ····· 69
3 Prototype Design of Tapered Slip-form System ····· 79
4 Design of Tapered Slip-form Systems for 2nd Pilot Test ····· 94
5 Supplementation of Design of Slip-form System Using BIM ····· 102
6 Verification and Improvement by 2nd Pilot Test ····· 106
7 Verification and Improvement by 3rd Pilot Test ····· 109

8 Conclusions ····· 111

2 Development of Optimal Lift-up Time and Automated Tapered Slip-form ····· 113

1. Outline ····· 113

2. Optimal Lift-up of Slip-form ····· 115

3. Automation of Slip-form Tapered Section ····· 125

4. Conclusions ····· 133

3 Development of Configuration Control and Erection Precision for High Pylons ····· 135

1. Outline ····· 135

2. Development of KICS(KICT Integrated Configuration control System) ·· 136

3. Verification and Improvement by Configuration Control During Trial Erection of Concrete Tower ····· 139

4. Development of GPS Signal Processing Module ····· 146

5. Conclusions ····· 154

4 Development of Lightweight Slip-form System ····· 155

1. Outline ····· 155

2. Mechanical Properties of GFRP Panel ····· 156

3. Development of GFRP Modular Panels ····· 169

4. Conclusions ····· 173

5 Mockup Test and Pilot Erection ····· 175

1. Outline ····· 175

2. Mockup Test ····· 176

3. Trial Erection ····· 185

4. Conclusions ····· 196

6 Conclusions ····· 199

Chapter 4 Completion Rate of R&D and Expected Contribution to Related Sectors ····· 205
1 Completion Rate of R&D ····· 205
1. Yearly Completion Rate of Key Performance Indicators ····· 205
2. Major Products per Year ····· 216
3. Settlement of Research Funds ····· 222
2 Expected Contribution and Side Effects ····· 231
1. Technological Aspect ····· 231
2. Socio-economic Aspect ····· 232
3. Strategical Aspect ····· 240

Chapter 5 Utilization Plan of R&D Results ····· 241
1 Utilization Plan of Research Results ····· 241
1. Summary of Utilization Plan ····· 241
2. Utilization Plan According to Features of Results ····· 242
2 Industrial Utilization Plan of Research Results ····· 243
1. Status of Participating Companies ····· 243
2. Linkage and Promotion Strategy per Participating Company ····· 247
3 Effect on Other Industrial Sectors ····· 249
4 Linkage with Governmental Policies ····· 251
1. Linkage with Governmental Policies ····· 251
2. Cooperation with Governmental and Public Institutions ····· 251
5 Forecast of Future Related R&D ····· 253

Chapter 6 Foreign Data Acquired During R&D ····· 255
1 Status of Pylon Erection in Chinese Long Span Bridges ·· 255
1. Sutong Bridge ····· 256
2. Kangzhu Yangtze Bridge ····· 258

3. Zhengzhou Yellow River Bridge ····· 260
4. Cable Stayed Bridge in Shanghai ····· 263
2 Status of Bridge Erection Methods ····· 267
1. Bridge Types and Erection Methods ····· 268
2. Jacking and Skidding ····· 272
3. Movable Scaffolding Systems ····· 274
4. Form Traveller Systems ····· 274
5. Precast Full Span Method ····· 275

Chapter 7 References ····· 279

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발 기술의 정의 및 필요성

최근 들어 고성능·고강도 재료의 개발과 설계 및 시공기술의 발달로 교량은 더욱 길고 높은 초장대 구조물로 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 이는 섬과 육지, 섬과 섬 사이, 대륙과 대륙을 연결하기 위한 장대 교량에 대한 사회적인 요구를 바탕으로 하고 있다. 국내에서도 1973년 중앙경간 400m의 남해대교를 일본에 의존해 건설한 이후 경제 발전에 의하여 장대 교량 필요성이 증대함에 따라 2000년 서해대교(중앙경간 470m), 2003년 광안대교(중앙경간 500m) 등이 완공되었고, 최근 들어서는 다수의 장대교량이 건설되었거나 시공 중에 있다. 특히 2009년에는 인천대교(중앙경간 800m)가, 2012년에는 이순신대교(중앙경간 1545m)가 완공되었다. 이러한 장대 교량들은 중앙 경간이 길기 때문에 필연적으로 매우 높은 주탑을 가질 수밖에 없다. 서해대교는 182m, 인천대교는 230.5m, 이순신대교는 270m이고 중앙경간이 2km를 초과하는 초장대교량에서는 400m에 이를 것으로 예상되고 있다.

2000년 이전의 장대교량 주탑은 대부분 강재가 적용되었지만 콘크리트 시공기술이 발달하고 강재 가격이 비싸짐에 따라 2000년대 이후에는 서해대교, 인천대교, 이순신대교 등에서 알 수 있듯이 콘크리트 주탑이 대세로 인정되어 건설되고 있다. 장대교량 콘크리트 주탑의 시공은 공기 단축과 고공에서의 인력 작업을 최소화하기 위해 기계화된 이동식 거푸집 시스템을 사용하여 수행되고 있다. 이동식 거푸집 시스템으로는 운영 방법에 따라 구분하여 ACS(Auto Climbing Form System)와 슬립폼시스템(Slip-Form System)을 주로 사용하고 있다. 슬립폼 공법은 슬라이딩 공법이라고도 하며, 수평 또는 수직으로 구체 속에 묻혀 있는 로드(Rod)를 수직 잭(Jack)이 물고 요오크 레그(Yoke leg)와 폼패널(Form panel) 등을 수직 상승시키면서 콘크리트를 연속 타설하는 공법으로, 거푸집 조립, 철근 조립, 콘크리트 타설, 양생, 거푸집 탈형 등 5가지 반복 작업이 순차적으로 연속 실시되어 타 공법에 비해 공사기간이 대폭 단축된다는 장점이 있다. 슬립폼 공법은 1일 콘크리트 타설 높이가 약 2~4m로서 ACS 공법에 의한 시공보다 공기를 대폭 단축할 수가 있으며,

공기단축에 따른 노무비·관리비·장비비 및 기타 기자재 비용을 절감할 수 있다. 시공 이음이 없는 연속타설로 일체형의 고품질 시공이 가능하며, 일반적인 콘크리 구조물에서 흔히 관찰되는 미세균열이 발생하지 않는다. 그러나 슬립폼 공법은 콘크리트 타설이 완료될 때까지 24시간 연속적으로 작업이 진행되어야 하기 때문에 품질관리, 노무관리, 자재관리, 장비관리 등이 완벽하게 연계된 원활한 공정이 이루어져야 하는데, 문제점이 발생하여 공정에 차질이 생길 경우 시공 품질 관리에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 치밀한 시공 계획에 의한 사전대비를 철저하게 수립하여야 한다.

슬립폼시스템을 이용한 고주탑의 연직 시공은 기초 상면에서 탑정까지 단면이 거의 변화되지 않고 일정하게 유지되는 경우와 상부로 올라가면서 단면이 변화되는 변단면 형상을 갖는 경우로 구분할 수 있다. 단면이 변화되지 않는 경우에서는 슬립폼시스템이 비교적 단순하여 외국 기술진과 제휴하여 시공한 기존 장대교량에서의 경험을 바탕으로 국내에서도 설계와 제작이 가능하다. 하지만 초장대 교량과 같이 주탑 단면이 높이에 따라 변화하고 주탑 형상이 3차원인 경우에는 아직까지 해외 전문업체에 설계・제작・운용기술을 전적으로 의존할 수밖에 없고, 해외 전문업체는 국내에 기술이전을 극도로 기피하기 때문에 막대한 외화가 유출되고 있는 실정이다. 따라서 초장대교량 건설 자립화를 이루기 위해서는 콘크리트 주탑을 시공하는 첨단 공법인 변단면 슬립폼시스템의 설계와 제작 기술의 자립을 이룰 필요가 있다.

일반적으로 철근콘크리트 구조물 공사 시 거푸집은 전체 공사비의 10~15%를 차지하며, 공사기간은 25%를 차지하고 있다. 거푸집은 서포트에 의해 지지되기 때문에 작업공간의 확보가 관건이며 거푸집 전용률이 낮아 다량의 건설 폐자재 발생의 원인이 되고 있다. 슬립폼 거푸집 시스템에서도 강재 skin plate를 조립하고 해체하는데 많은 시간과 비용이 소요될 뿐만 아니라 한번 사용한 것은 다시 사용되지 못하고 폐기되고 있다. 그런데 조립식 GFRP거푸집은 거푸집 제작, 설치 및 해체가 용이하고 재사용이 가능하다. 또한 강재보다 단열 성능이 우수하여 동절기 기온 저하에 의한 콘크리트 품질 확보에 장점이 있다. 그러나 세계적으로 연구 개발이 시도된 사례가 거의 없으며 급속 시공이 필요한 일부 소규모 공사에서 적용된 사례가 있다. 이 연구에서는 재사용이 가능하고 경량화된 GFRP 거푸집을 슬립폼 시스템에 적용하여 노무 인력 최소화와 조립 및 해체 시 공기를 단축하고 슬립폼

공법에서 문제가 되고 있는 동절기의 시공 품질을 향상시키고자 한다.

슬립폼 공법으로 시공되는 콘크리트 주탑의 시공품질은 슬립폼시스템의 상승속도와 밀접한 관계가 있는데, 이는 슬립폼시스템의 상승속도에 따라 콘크리트가 거푸집 밖으로 노출되는 거푸집 탈형 시기가 결정되기 때문이다. 거푸집의 탈형은 콘크리트가 거푸집 제거에 따른 변형이나 뒤틀림 등의 손상이 발생하지 않는 충분한 강도를 가지는 시기에 이루어져야 한다. 만약 슬립폼시스템의 상승속도가 빠를 경우 거푸집 탈형 시기가 빨라지게 되어 콘크리트의 강도발현에 지장을 초래하거나 변형이 발생하게 되면, 슬립폼시스템의 안전성과 콘크리트 표면 관리에 문제가 된다. 반대로 슬립폼시스템의 상승속도가 늦을 경우에는 공기가 길어질 뿐만 아니라 거푸집에 콘크리트가 점착되어 슬립폼 상승에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 슬립폼시스템의 상승속도는 슬립폼 공법에서 시공품질 및 시공효율을 결정하는 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 초기경화시간은 콘크리트가 거푸집에서 안전하게 빠져나올 수 있는 굳기를 갖게 되는 콘크리트 타설 후 경화시간으로 슬립폼시스템의 상승속도를 결정하는 주요 인자인데, 콘크리트의 초기응결 반응시간과 관계가 깊다. 초기경화시간은 배합 시 단위시멘트량에 크게 영향을 받으며 또한 타설시 콘크리트의 온도, 계절적 영향, 지역적 영향, 슬립폼의 높이, 구조물의 두께 등 여러 현장 환경에 크게 영향을 받는다. 따라서 콘크리트 타설전에 초기경화시간을 정확히 파악하는 것은 매우 어려우며, 이 때문에 현장에서는 검침봉을 슬립폼 거푸집내에 타설된 콘크리트에 직접 삽입하여 정성적으로 콘크리트의 경화정도를 파악하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방법만으로는 콘크리트의 초기경화시간을 정확히 파악하는 것이 어려우며, 특히 시공자의 잘못된 판단은 경화가 덜 진행된 콘크리트를 거푸집 밖으로 노출시키게 만들어 슬립폼시스템의 안전성 및 콘크리트면의 유지관리 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결할 수 있도록 콘크리트 경화정도를 정량적으로 파악하는 기술이 필요하며, 또한 연속적으로 시공이 이루어지는 슬립폼 공법을 고려하였을 때 이러한 기술은 연속적인 콘크리트 경화정도의 파악이 가능하여야 한다. 이와 같이 슬립폼시스템의 상승속도를 결정하기 위해서는 슬립폼 공법에서 요구되는 거푸집 탈형 강도 및 이를 측정할 수 있는 방법과 함께 시멘트 종류, 콘크리트 배합 및 양생 조건 등에 따른 콘크리트 강도발현 특성을 정확히 파악할 수 있어야 한다. 따라서 이 연구에서는 이러한 슬립폼시스템의 상승속도를 결정하기 위하여 콘크리트의 양생온도 및 배합 조건에 따른 강도

발현 특성과 슬립폼 거푸집 탈형 강도를 조사하고 슬립폼시스템의 상승속도 계산식을 유도하였으며, 슬립폼시스템 상승속도를 결정하는 콘크리트 초기경화시간을 파악할 수 있는 초음파 기법을 개발하고자 한다.

슬립폼시스템의 변단면 처리는 스핀들이라고 불리는 기계 장치에 의해 수행되어진다. 스핀들은 봉강에 나사를 내고 너트를 끼워 넣어 회전시킴으로써 길이를 조절하는 장치로, 슬립폼 거푸집을 지지하는 웨일러에 장착되어 슬립폼시스템의 변단면 처리를 수행하도록 고안되었다. 이러한 스핀들은 슬립폼시스템 상승 직후 회전시켜 설계된 단면 크기에 맞게 거푸집을 이동시킴으로써 슬립폼시스템의 변단면 작업을 수행하게 된다. 스핀들의 회전 작업은 슬립폼시스템을 운영하는 작업자에 의해 수행되어지는데 스패너를 이용하여 스핀들을 회전시키게 된다. 이때 스핀들을 회전시키기 위해서는 거푸집 내에 타설된 콘크리트의 강도와 웨일러간의 마찰력을 초과하는 회전력이 필요한데, 이러한 회전력은 콘크리트의 경화정도에 따라 크게 달라진다. 즉 콘크리트는 초결 이후 경화가 진행될수록 강도가 급격하게 증가하게 되므로 스핀들 회전에 필요한 회전력은 커지게 되며, 콘크리트의 종결 이후에는 스핀들 회전이 거의 불가능하게 된다. 따라서 슬립폼시스템의 변단면 작업은 작업자가 스핀들을 회전시킬 수 있는 시간 내에 이루어져야 하며, 이러한 시간을 초과할 경우 스핀들을 회전시킬 수 없어 슬립폼시스템의 변단면 작업을 수행할 수 없게 된다. 지금까지 슬립폼 시공 현장에서는 이러한 스핀들 작업을 한명의 작업자가 전담하여 수행해오고 있으며, 따라서 스핀들의 개수가 많아질 경우 작업에 상당한 시간이 소요되어 변단면 작업에 어려움을 겪는 경우가 자주 발생하고 있다. 이러한 경우 구조물이 설계된 단면의 크기로 시공이 되지 않는 등 형상관리에 문제가 발생할 수밖에 없다. 따라서 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 지금까지 작업자에 의해 개별적으로 수행되던 스핀들 회전 작업을 자동화 시키는 기술을 개발할 필요가 있었다. 이 연구에서는 기존 수동식 스핀들을 전동식 모터로 대체함으로써 스핀들의 개별 및 동시 제어가 가능하도록 하였다. 스핀들의 개별 및 동시제어를 통해 스핀들 회전 작업시간을 단축시켜 슬립폼 변단면 작업의 효율을 향상시킬 수 있으며, 전동식 모터를 사용하여 스핀들 회전 각도를 정밀하게 제어함으로써 보다 정밀한 형상관리가 가능하게 할 수 있다. 또한 전동식 스핀들은 작업자보다 10배 이상의 회전력을 발휘할 수 있으므로 슬립폼시스템 변단면 처리를 수행할 수 있는 시간이 상대적으로 길어 형상관리에 유리하다.

슬립폼 공법을 이용하여 연속적으로 시공할 때 가장 중요한 핵심 기술 중 또 하나가 주탑의 시공정밀도 관리라고 할 수 있다. 시공정밀도가 불량할 경우 주탑에 예상치 못한 추가모멘트가 발생하여 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 고주탑 시공시 형상관리를 위한 계측 시스템은 시공 중에 교량에 미칠 수 있는 외부 환경 요인과 이에 따른 구조물의 응답을 계측·감시하고 데이터베이스화하여 시공 중 형상을 자동적·연속적·객관적으로 모니터링함으로써 체계적인 형상관리를 가능하게 한다. 기존의 광파기를 이용한 측량방식은 측량 지점 간 가시거리가 확보되지 못하는 기후조건 하에서는 측량자체가 불가하여 공정의 진행이 중단되는 등의 문제점이 발생한다. 그리고 레이저연직기를 사용하여 연직도를 관리하는 경우에도 날씨에 따른 영향을 배제할 수 없을 뿐만 아니라 주탑 축선이 3차원으로 경사져 올라가면 거푸집에 설치한 타겟이 가려질 우려가 있어 사용이 매우 제한되고 있으며, 높이에 따라 오차가 증가할 수 있다. 따라서 해상에서 많이 시공되는 장대교량 고주탑 특성을 감안하여 기후와 같은 외부요인에 영향을 받지 않는 진화된 시공관리시스템의 개발이 필요하다. 현재 여러 분야에 걸쳐 활용범위가 많이 확대되고 있는 GPS를 이용하면 측정에 소요되는 인력과 시간을 절약하고 기후조건에 관계없이 절대좌표를 획득할 수 있다. 이 연구에서는 토목/IT 융합기술을 기반으로 무선기반의 GPS와 경사계를 이용한 초장대교량 고주탑의 시공정밀도 관리시스템을 개발하여 진화된 콘크리트 고주탑 시공관리시스템을 개발하고자 한다.

제 2 절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발의 최종목표

규모와 상징성으로 볼 때 초장대 교량의 구성 요소 중 가장 두드러지는 요소인 주탑 구조물의 시공을 위하여 변단면 슬립폼 장비 및 가설공법 개발을 최종목표로 하고 있다. 최종목표를 달성하기 위한 세부 연구 목표로는 변단면 슬립폼 장비 및 가설공법 개발, 경량 거푸집 설계 및 가설장비 개발, 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리시스템 개발, 콘크리트 고소 타설 및 양생기술 개발 등으로 설정하였다.

2. 연차별 연구목표 및 연구내용

1단계 연구에서는 핵심요소기술을 선정하고 개발하는 것을 연구목표로 하였다. BIM 기반 3D 설계 및 디지털 가상 시공을 수행하여 변단면 슬립폼시스템 제작오차 및 시공 시 시행착오를 최소화하고, 슬립폼 최적기 상승기술을 개발하여 공기단축, 안전성 및 콘크리트면 품질을 확보하며, 슬립폼 변단면 자동화기술을 개발하여 정밀 형상 관리, 공사비 절감 및 작업 시간 단축을 도모한다. GPS를 이용한 시공정밀도 및 형상관리 기술을 개발하여 시공정밀도를 확보하고 기후 영향과 시준점 영향을 최소화한다. 그리고 경량 GFRP 모듈형 패널기술을 개발하여 거푸집 설치 및 해체 시간을 단축시키고 고소작업 안전성을 향상시키며 콘크리트 시공품질을 향상시킨다.

2단계 연구에서는 개발한 핵심요소기술을 검증하고 보완하는 것을 연구목표로 하였다. 1주탑 및 2주탑에 대한 변단면 슬립폼시스템을 설계 및 제작하여 2회의 시험시공을 수행함으로써 핵심요소기술에 대한 검증 및 보완을 수행한다.

3단계 연구에서는 1단계 및 2단계 연구를 통해 개발되고 검증된 변단면 슬립폼 시스템에 대한 자동화 보완과 실용화를 연구목표로 하였다. 이를 위해 2회의 시험시공을 추가로 수행한다. 그리고 당초 연구목표에서는 설정되지 않았지만, 연구성과물의 현장 적용 실용화를 앞당기기 위해 참여기업과의 기술이전 및 기술실시계약을 조기에 체결하고 국토교통부의 건설신기술 인정등록을 연구기간내에 추진하고자 한다.

단계	연차	연구내용	연구범위
1단계	2	◦ 변단면 시스템 설계 현황 및 시스템 특성 분석	◦ 변단면 슬립폼시스템 설계 분석 및 구조계산서 분석 ◦ 변단면 슬립폼시스템 구조개선사항 도출
		◦ 경량 거푸집 연구동향 및 Slip- Form 구성부재 대체 방안 분석 ◦	◦ 경량 거푸집 연구동향 및 현장 적용 사례 분석 ◦ 슬립폼 경량화를 위한 GFRP재료 특성 분석 ◦ 슬립폼 구성부재에 대한 GFRP부재 대체 방안 분석
		◦ 광학식 계측에 의한 시공 정밀도 관리 시스템 분석	◦ 국내외 특수교량 시공 정밀도 관리 시스템 적용현황 및 특성 분석 시공사례 조사 분석 ◦ 시공 정밀도 관리시스템 개선을 위한 센서 구성방안 도출
	3	◦ 슬립폼시스템 인상 속도별 품질특성 및 최적 인상 방안 연구	◦ 슬립폼시스템 skin plate 특성 및 콘크리트 마찰저항성 연구 ◦ Form 인상속도를 고려한 시공 품질특성 연구
		◦ 슬립폼 경량화 방안 도출	◦ 슬립폼 경량화 기본구조 도출 ◦ 구조해석을 통한 GFRP 구조요소 성능 검토
		◦ 시공 정밀도 관리 및 슬립폼 위치제어 소프트웨어	◦ 시공 정밀도 관리 시스템 계측센서 신호처리 기법 연구 ◦ 시공 정밀도 관리 SW를 위한 오차보정 알고리즘 및 신호처리 모듈 개발 ◦ 시공 정밀도 관리 SW 및 통합시스템 모듈 구성 방안 도출
	4	◦ 시공 정밀도 및 작업성 개선을 고려한 슬립폼 시스템 설계	◦ 시공 정밀도, 작업성, 시공품질 향상을 고려한 변단면 기본 Slip- Form 시스템 설계 ◦ 자동화 시공을 고려한 Form 인상 자동제어기법 개발 ◦ 경량 거푸집 시스템 구성 모듈 거동 실험
		◦ 고주탑 시공 정밀도 관	◦ 고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 모듈 및 SW

단계	연차	연구내용	연구범위
		리 통합시스템 개발 (모듈 및 SW통합)	통합
2단계	5	◦ 개발품 프로토타입 1차 공개시연회를 통한 검증 및 보완	◦ 변단면 슬립폼시스템 프로토타입 공개시연회 시작품 제작 ◦ 공개시연회를 통한 개발 시스템 성능 검증 ◦ 공개시연회와 연계하여 시공 정밀도 관리 및 초음파 자동 인상 시스템 시험적용
	6	◦ 개발품 프로토타입 2차 공개시연회를 통한 시스템 개선	◦ 공개시연회를 통한 시스템 개선 ◦ 슬립폼 공개시연회와 연계하여 시공 정밀도 관리·초음파 자동 인상·경량 거푸집 시스템 적용 ◦ 관련 설계도서 및 기준 개발
3단계	7	◦ 변단면 슬립폼시스템 보완	◦ 슬립폼 자동화 운용기술 보완 ◦ 슬립폼 운용지침 작성 ◦ GPS 신호처리 고도화 ◦ 고주탑 형상관리 시공지침 작성 ◦ 통합형 TB 기술지원 ◦ 경제성 분석 ◦ 기술이전 및 신기술 추진
	8	◦ 통합형 TB기술지원	◦ BIM 가상설계 구축 ◦ 통합형 TB 기술지원

제 2장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술 동향

1. 국내 장대교량 주탑 현황

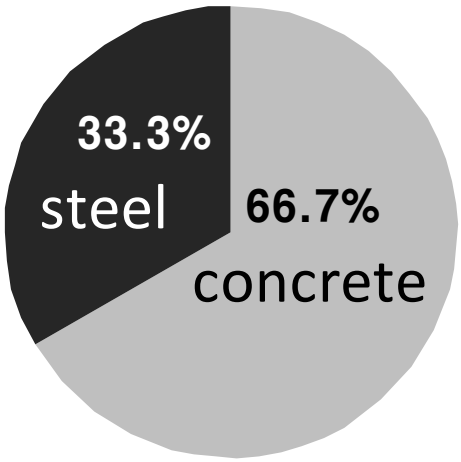
최근 우리나라에서는 국토개발의 패러다임 변화 등에 따라 장대교량 건설시장이 비약적으로 커지고 있다. 특히 '제4차 국토종합개발계획'에서 수립된 '큰 섬 지역 도로망 확충계획'에서만도 100여 개의 교량을 계획하여 이순신대교, 압해-암태 연도교, 제2남해대교, 고군산연도교 등 많은 장대교량이 건설되고 있다(표 2.1.1). 이와 같이 장대교량 건설시장은 향후 대폭 증가할 것으로 예상된다. 현재 사장교와 현수교의 장대교량에서 주탑은 콘크리트가 66.7%를, 강재가 33.3%정도로 콘크리트 주탑이 절대 다수를 차지하고 있다(그림 2.1.1). 2000년대 후반 이후에 건설되는 장대교량에서는 콘크리트가 주로 적용하고 있다. 경간 길이가 증가함에 따라 주탑도 계속 높아지고 있다(그림 2.1.2). 강재 주탑은 영종대교에서 107m로 최고이며, 콘크리트 주탑은 최근 완공한 이순신대교가 270m의 높이를 가지고 있다.

<표 2.1.1> 국내 장대교량 현황

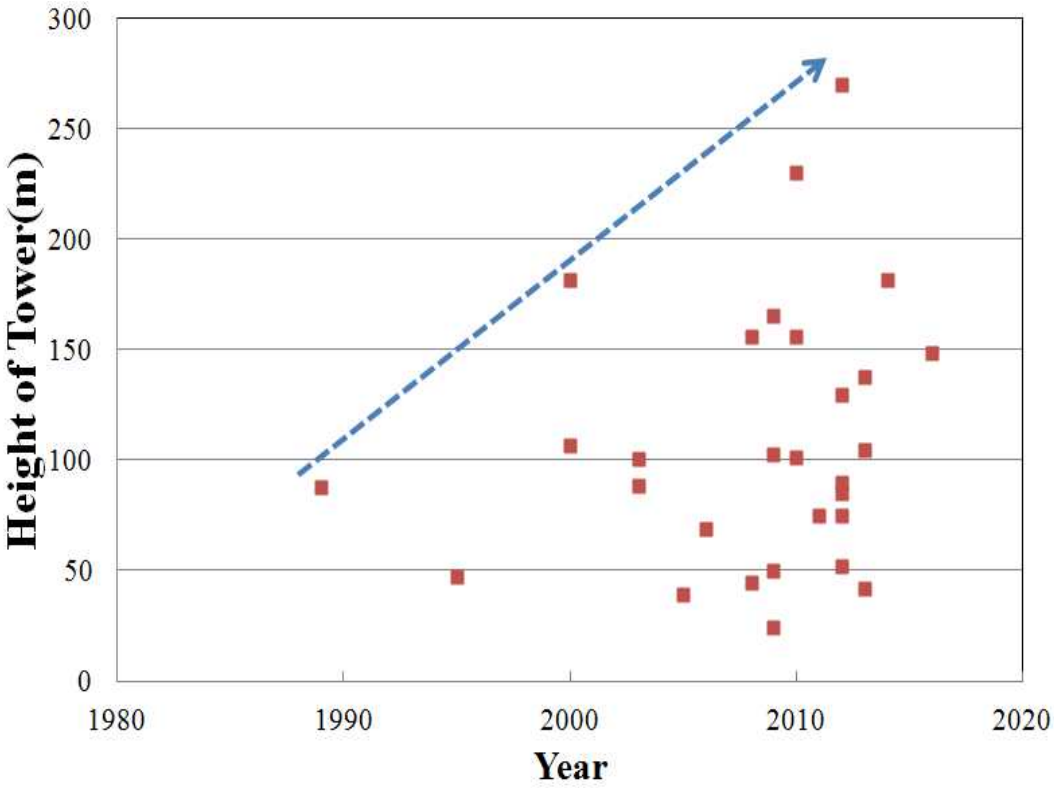
No	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Span (m)	Pylon H(m)	Remark
1	남해대교	경남	1973	steel	steel	404	60.7	현수교
2	돌산대교	전남	1984	steel	steel	279.5	62	사장교
3	진도대교	전남	1984	steel	steel	344	69	사장교
4	올림픽 대교	서울	1989	concrete	concrete	138.2	88	사장교
5	신행주 대교	서울	1995	composite	concrete	120	47.6	사장교
6	서해대교	경기	2000	composite	concrete	470	182	사장교
7	영종대교	인천	2000	steel	steel	300	107	현수교
8	삼천포 대교	경남	2003	composite	concrete	230	88.5	사장교
9	광안대교	부산	2003	steel	steel	500	101.1	현수교
10	어등대교	전남	2005	steel	concrete	105	39.6	사장교

No	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Span (m)	Pylon H(m)	Remark
11	제2진도대교	전남	2006	steel	steel	344	69	사장교
12	마창대교	전남	2008	composite	concrete	400	164	사장교
13	영덕대교	경기	2008	composite	concrete	115	45	사장교
14	목포대교	전남	2009	steel	concrete	500	165.5	사장교
15	청풍대교	충북	2009	composite	concrete	327	103	사장교
16	송도고가교	인천	2009	composite	steel	90	50	사장교
17	연륙4공구	인천	2009	steel	steel	115	24.3	사장교
18	거가대교(주항로교)	경남	2010	composite	concrete	475	156.3	사장교
19	거가대교(부항로교)	경남	2010	composite	concrete	230	101.7	사장교
20	인천대교	인천	2010	steel	concrete	800	230.5	사장교
21	금빛대교	서울	2011	steel	concrete	480	75	사장교
22	돌산-화태	전남	2012	composite	steel	500	130	사장교
23	여수대교	전남	2012	concrete	concrete	230	90	사장교
24	완도대교	전남	2012	steel	steel	200	75	사장교
25	세풍대교	전남	2012	concrete	concrete	220	52	사장교
26	한림생림	경남	2012	concrete	concrete	260	85.6	사장교
27	이순신대교	전남	2012	steel	concrete	1545	270	현수교
28	운남대교	광주	2013	concrete	concrete	152.5	42	사장교
29	영남-적금	전남	2013	steel	concrete	850	138	현수교
30	단등교	전북	2013	steel	concrete	400	105	현수교
31	북항대교	부산	2014	composite	concrete	480	182	사장교
32	제2남해대교	경남	2016	steel	concrete	890	148.5	현수교

이와 같이 국내의 장대교량은 장경간화와 더불어 높이가 매우 높은 고주탑을 가지고 있으며, 콘크리트를 적용하는 추세임을 알 수 있다. 그러나 콘크리트 고주탑에 대한 기술 수준은 매우 부족하여 장대교량 건설 시 선진국에서 주요 핵심기술을 도입하여 시공하는 등 기술 자립도가 상당히 낮은 상황이다. 국내 최고 높이의 이순신대교 주탑은 해외 전문업체에 로열티를 지불하고 슬립폼시스템을 사용하여 가설하였다. 따라서 국내 장대교량의 기술자립과 기술력 제고를 통하여 국가예산을 절감하고 막대한 국부유출을 방지하기 위해서는 콘크리트 고주탑 건설 기술개발이 시급한 실정이다.



<그림 2.1.1> 국내 주탑의 재료 형식 분포



<그림 2.1.2> 국내 장대교량의 주탑 높이 추이

2. 공기단축형 슬립폼 공법 기술 현황

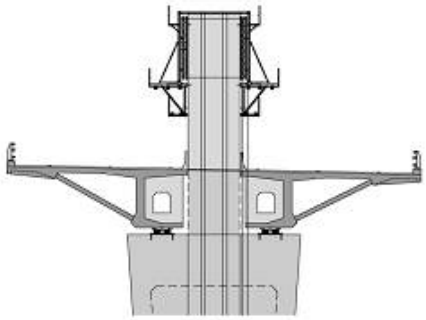
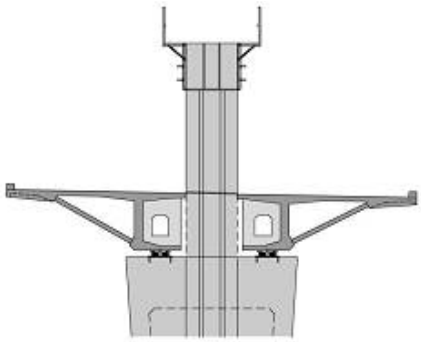
현재 장대 교량의 주탑 시공방법은 크게 이동식 거푸집(ACS, Auto Climbing form Sysytem) 공법과 슬립폼(Slip form) 공법 등으로 구분할 수 있다(표 2.1.2). 이동식 거푸집을 이용하는 ACS 시공법은 기술이 비교적 간단하고 공사비가 저렴하며 기상변화에 대한 대응성이 좋은 반면, 고소 작업시 거푸집 낙하 등 안전성 확보가 떨어지고 시공기간이 길어진다는 단점이 있다. 주탑 공기의 여유가 있으면 경제적인 측면 때문에 ACS를 이용한 주탑 시공이 유리하지만, 해상작업의 안전성, 주탑의 축변화에 대한 적용성, 콘크리트 품질 확보, 급속 시공 필요성 등을 고려한다면 슬립폼을 이용한 시공방법이 훨씬 우수하다.

국내에서 슬립폼 공법에 의한 대형 구조물의 최초 시공은 1960년대 중반에 시멘트 사일로(Cement Silo) 건설에 일본 기술을 도입한 것이었고 1971년에는 정부종합청사 건설에 적용한 바 있다. 최근 들어서는 장대 현수교 및 사장교, 대형 사일로, 복합플랜트, 초고층빌딩, 발전소, LNG 터미널 등에서 공사기간 단축에 따른 전체 사업비 감축을 도모하고자 급속시공 필요성이 증가하고 있다. 특히 민자사업이 많아짐에 따라 공사기간 전체에 대한 금융조달 비용 산정 영향으로 공기 단축이 사업성의 중요한 요소가 되고 있다. 따라서 장대교량의 주탑 뿐만 아니라 복합플랜트의 연돌, 초고층빌딩의 코어, 원자력발전소 격납건물, LNG탱크 등에 자체 공사비는 일부 증가하더라도 전체적인 사업비를 감축할 목적으로 급속시공 기술인 슬립폼 공법을 적용하는 것을 적극 검토되고 있다. 일례로 2015년에 시공된 광양 LPG 탱크 외조구조물이 있는데 10개월 이상 걸리던 것을 슬립폼 공법으로 15일 만에 완공하였다.

일반 교량의 콘크리트 교각과 같이 단면 변화가 없는 경우에 적용하는 슬립폼시스템의 설계 및 제작은 그동안 축적한 경험을 바탕으로 국내에서 가능하다고 판단된다(표 2.1.3). 하지만 높이에 따라 단면 변화가 있으며, 특히 형상이 3차원인 경우에는 국내 기술로는 전혀 불가능하여 해외 전문업체에 전적으로 의존할 수밖에 없는 실정이다. 2000년에 건설된 서해대교 주탑은 변단면 형상으로는 국내 최초로 슬립폼시스템으로 시공되었는데(그림 2.1.3), 이때 막대한 로열티를 주고 슬립폼시스템 장비(그림 2.1.4)와 시공기술을 오스트리아 GBG사로부터 도입하였다. 외국 업체

는 공사를 직접 수행하고 완공 후 슬립폼시스템의 모든 부품 및 장비 일체를 수거해 갔기 때문에 국내에는 기술이 전파되지 못하였다.

<표 2.1.2> 장대교량 주탑 시공법 비교

	ACS 공법	슬립폼 공법
개요도		
시공법	◦ 연직도 확보 및 수정 가능 ◦ 거푸집(2~4m)과 발판이 일체로 된 조립되어 1 lot씩 타설 후 약 2일 정도 양생시키고 잭으로 상방향 이동시켜 시공하는 방법	◦ 시공이음 없어 내구성 우수 ◦ 거푸집(약 1.2m) 탈착을 하지 않고 콘크리트를 타설하면서 연속적으로 상승해 나가는 공법
장점	◦ 장비 및 인원을 공종별 필요에 따라 투입 가능 ◦ 숙련된 기능공 필요인원 적음 ◦ 주탑 자체의 시공에서는 경제성 유리	◦ 대형, 고소 공사 유리 ◦ 안전 관리 및 안전성 유리 ◦ 시공이음이 없고 콘크리트 품질 우수 ◦ 급속시공으로 공기 대폭 단축
단점	◦ 야간 작업 불가능하여 공기가 김 ◦ 롯트(lot)별 시공, 양생기간 필요, 시공이음 발생 ◦ 각 롯트 시공 마다 거푸집 설치 및 해체 작업이 필수 ◦ 거푸집 낙하 등 대형 안전사고 우려	◦ 장비 및 인원의 24시간 배치 ◦ 숙련된 기능공 필요 ◦ 주탑 자체의 시공에서는 일반적으로 경제성 불리
국내시공 실적고	230.5m	270m
시공사례	◦ 인천대교, 올림픽, 팔당대교, 북항대교, 단등교, 울산대교	◦ 중부 내륙 5공구(중원대교), 인천대교 일반 교각, 서해대교, 마창대교, 이순신대교

서해대교는 주탑고가 182m이고 전체 시공일수는 273일로 평균 시공속도는 0.67 m/day이다. 슬립폼은 최고 2.07 m/day, 최저 1.10 m/day, 평균 1.58 m/day의 속도로 상승되었다.

이후 2008년 완공된 마창대교에서는 슬립폼시스템과 ACS(Auto Climbing System) 공법을 혼용하여 주탑을 시공하였다. 전체 164 m의 주탑 중 하부 119 m를 슬립폼시스템으로, 상부 45 m를 ACS로 시공하였다. 슬립폼 시공일수는 124일로 평균 시공속도는 0.96 m/day이었다. 슬립폼은 최고 2.42 m/day, 최저 1.05 m/day, 평균 1.79 m/day로 서해대교에 비하여 약간 빠른 속도로 상승되었다.



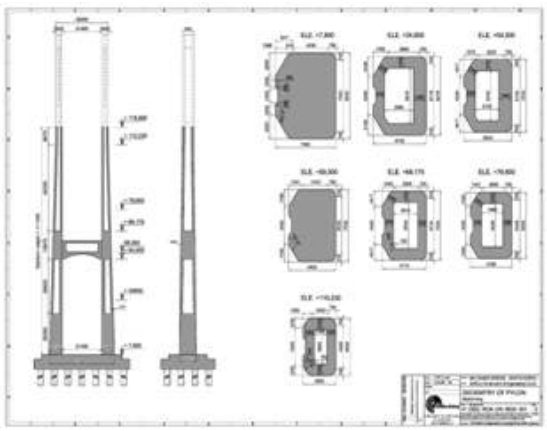
<그림 2.1.3> 서해대교 주탑 시공전경



<그림 2.1.4> 최초 도입된 변단면 슬립폼



<그림 2.1.5> 마창대교 주탑 시공전경



<그림 2.1.6> 마창대교 주탑 시공도면

한편 국내 최대 사장교인 인천대교에서는 230.5 m의 주탑을 ACS 공법으로 한

lot 4 m를 최대 4일, 평균 9.2일로 시공하였는데 평균 시공속도는 0.43 m/day로 슬립폼 공법에 비하여 대략 2배 정도 공사기간이 더 소요되었다.



<그림 2.1.7> 인천대교 주탑 시공전경

국내 최대 현수교인 이순신대교(중앙경간장 1,545 m)에서 2011년 완공된 주탑에서는 다시 슬립폼 공법이 적용되었지만, 이때에도 막대한 로열티를 GBG사에 지불하였다. 변단면 슬립폼시스템을 직도입하여 적용할 수밖에 없었고 장비 운용도 외국기술자가 직접 맡아서 진행하였다. 여기에서도 시공 완료 후 모든 기술 및 장비, 부품 등을 수거해 갔으므로 국내 전문업체는 제한적인 시공 경험만을 축적하였을 뿐 변단면 슬립폼시스템의 설계, 제작, 운용 등에 관련된 노하우는 전혀 취득할 수 없어 높은 기술 장벽과 기술 부족에 대한 서러움을 깊이 절감하게 되었다.

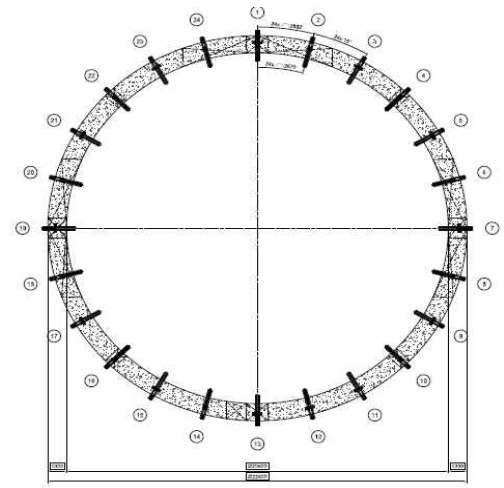


<그림 2.1.8> 이순신대교 주탑 시공전경

세계 시장에서 독보적인 기술을 보유하고 있는 오스트리아의 GBG사는 전술한 바와 같이 국내 서해대교(주탑고 182 m), 마창대교(주탑고 164 m), 이순신대교(주탑고 270 m)와 같은 대규모 장대교량의 주탑은 물론이고 고교각, 건축, 사일로 등 다양한 분야에서 독점적으로 시공에 참여하여 왔다. 단면이 높이에 따라 변하고 공기 단축이 요구되는 경우에는 GBG는 변단면 슬립폼 기술을 무기로 국내 시공 현장을 석권하고 있다. 일례로 현재 시공중인 영흥화력발전소 연돌공사에서도 GBG사에 막대한 로열티를 주고 변단면 슬립폼시스템을 적용하고 있다.



<그림 2.1.9> 영흥화력발전소 연돌공사



<그림 2.1.10> 슬립폼 요크 배치 현황

원형 연돌에 있어서 슬립폼시스템을 구성할 때 변단면을 어떻게 대응할 것인가가 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 슬립폼시스템은 연돌의 직경변화 및 두께 변화에 대응할 수 있도록 구성되어야 한다. 먼저, 거푸집이 연돌의 직경변화에 대응하기 위하여 요크 상부에 설치된 유압잭(그림 2.1.11)과 Star Beam을 사용하며, 미세조작은 판넬의 미세 조절용 Screw를 사용한다. 내·외부 폼은 24개의 단위로 이루어져 있다. 상부로 갈수록 직경이 줄어드는데, 요크 쪽에 있는 필러 거푸집이 직경변화에 맞게 겹쳐져 직경이 줄어들도록 제작된다. 거푸집 두께 조절은 요크에 설치된 조절볼트를 활용한다(그림 2.1.12).



<그림 2.1.11> 직경조절 유압잭



<그림 2.1.12> 거푸집 두께 조절

이상과 같이 변단면 슬립폼 공법에 대한 기술 선진국과의 격차는 매우 크며 국내로의 기술이전을 극도로 꺼리기 때문에 수많은 장대교량의 고주탑이 최근 많이 건설되고 있음에도 불구하고 변단면 슬립폼 기술에 대한 국산화가 미진한 이유가 되고 있다. 국내 콘크리트 주탑의 슬립폼 시공에 대한 국내 기술 보유 현황은 표 2.1.3과 같은데 단편적인 기술일 뿐만 아니라 체계적인 연구로부터 개발된 기술이 아니므로 현장 적용에는 한계를 지니고 있다. 따라서 시급히 콘크리트 주탑의 슬립폼 공법에 대한 연구 투자를 집중하여 장대교량 건설 기술의 진정한 자립을 달성할 필요가 있다고 판단된다.

콘크리트 주탑을 시공할 때 슬립폼시스템은 24시간 연속적으로 상승하고 있다. 이 상승속도는 콘크리트의 초기경화시간에 의해 결정된다. 시멘트 및 콘크리트 배합비, 그리고 다양한 현장 환경에 따라 콘크리트의 초기경화시간은 달라지므로 이를 정확히 예측하는 것은 매우 힘든 일이다. 국내외 현장에서는 슬립폼 거푸집내에 여러 층으로 타설시점이 다른 콘크리트에 검침봉을 삽입하여 하단의 콘크리트 경화 정도를 파악하고 있다. 이때 숙련기술자의 감각적인 오랜 경험과 노하우에 의존해 콘크리트 초기강도를 판별하고 슬립폼을 상승시켜 콘크리트를 탈형시키고 있다.

2007년에 준공된 청원-상주고속도로 2공구의 고교각 등단면 슬립폼 시공 현장(쌍용건설(주))에서는 이러한 방법을 좀 더 정량적으로 개선하기 위해 그림 2.1.13

과 같이 관입저항 측정장치를 검침봉 상단에 설치하는 것을 시도한 적이 있다. 그러나 타설시점이 다른 여러 층의 콘크리트가 쌓여 있고 철근 및 골재 등의 영향으로 콘크리트 초기경화에 대한 신뢰성 있는 기준값을 제시하기 어렵다. 이러한 방법은 콘크리트 골재의 종류 및 분포에 대하여 정확히 파악한 뒤에 탐침위치를 선정해야 그나마 오차를 줄일 수 있지만 현실적으로 콘크리트 탈형 강도를 정량적으로 파악하는데는 매우 힘들다고 할 수 있다.

<표 2.1.3> 콘크리트 주탑의 슬립폼 시공과 관련한 국내 보유기술 현황

보유 기술 또는 특허	최고기술 보유기관	비고
◦ 콘크리트 타설용 슬립폼의 유압잭 검사 장치	진성토건	법정관리
◦ 슬립폼 공법에 의한 콘크리트 구조물의 시공방법	쌍용건설	
◦ 교량 및 고가도로의 교각 구축용 슬립폼 상승장치	금한건설 / 유원	
◦ 교량의 콘크리트 주탑의 연직도 관리를 위한 원격자동제어 기능을 가진 주탑 시공용 이동식 거푸집 장치 및 이를 이용한 교량의 콘크리트 주탑 시공방법 ◦ 교량의 캔틸레버부 시공용 거푸집 지지장치 및 거푸집 지지구조 ◦ 급속시공이 가능한 조립식 합성형 프리캐스트 교각 및 그 시공방법 ◦ 폐합거푸집 및 경사지지 구조를 이용한 고유동 콘크리트 구조물의 경사타설 제작방법	한국건설기술연구원	
◦ 교량의 콘크리트 주탑 시공시의 연직도 측정기 ◦ 고소 시공물의 연직도 관리 시스템 및 이를 이용한 시공방법		
◦ GNS를 이용한 시설물 시공 관리 시스템 ◦ 가속도계를 이용한 GPS 변위 보정 시스템	(주)카이센	



<그림 2.1.13> 관입저항치 측정장치(김성호, 2004)

한편, 콘크리트의 거푸집 탈형강도와 관련한 국내 기준은 콘크리트 건설 제요령(한국콘크리트학회, 2002)에서 40MPa 이상의 고강도 콘크리트일 경우 8MPa, 콘크리트표준시방서(국토해양부, 2009), 가설공사표준시방서(건설교통부, 2006), 고속도로공사 전문시방서(한국도로공사, 2009)에서는 5MPa, 터널표준시방서(국토해양부, 2009)에서는 3MPa을 제시하고 있으나 이 강도기준에 대한 역학적 근거가 제시되어있지 않다. 또한 이러한 기준은 모두 일반 거푸집에 타설되는 콘크리트에 적용되는 것들이며, 슬립폼시스템에 사용되는 콘크리트에 대한 구체적인 기준은 시방서에서 전혀 제시되어 있지 않은 실정이다.

표 2.1.4는 국내에서 슬립폼 공법으로 시공된 주탑이나 교각들에 대한 거푸집 탈형에 대한 기준을 분석하여 정리한 것이다. 슬립폼 공법으로 시공된 국내 대부분의 현장은 구체적인 콘크리트 탈형강도에 대한 기준 보다는 표준관입저항시험(KSF 2346)에 의한 간접적인 기준이나, 철근을 콘크리트내에 삽입하는 등의 감각에 의존하는 정성적인 기준에 의해 시공이 이루어졌다. 그러나 이러한 간접적이거나 정성적인 기준만으로는 슬립폼시스템의 안전성, 시공품질 및 공기 지연 등의 문제점들을 발생시킬 수 있으므로 슬립폼 거푸집에 대한 구체적인 탈형강도 기준이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

<표 2.1.4> 국내 현장 슬립폼 거푸집 탈형 기준

시공현장	시공사	거푸집 탈형 기준
여천탱크 터미널 공사	대림산업㈜, 1993	콘크리트 압축강도 0.1MPa을 거푸집 탈형 기준으로 하였으나 연속적인 측정이 불가능하므로 철근을 콘크리트 내부에 밀어 넣어 경화콘크리트 위치를 점검하는 방법을 사용
서울외곽순환 고속도로 제5공구	우성건설㈜, 1994	
대진고속도로 제2공구	㈜삼호, 1997	
영동고속도로 제3공구	고려개발㈜, 1997	
서해안고속도로 제1공구	대림산업㈜, 1998	
용담댐 이설도로	고려개발㈜, 2001	
영동고속도로 제13공구	삼환기업㈜, 2000	
영동고속도로 제14공구	대림산업㈜, 2001	
영동고속도로 제15공구	한신공영㈜, 2001	
동해고속도로 제4공구	대림산업㈜, 2004	
군산 곡물 Silo	대림산업㈜, 2004	
청주-상주간 고속도로 2공구	쌍용건설㈜, 2007	자체 제작한 관입저항시험기의 관입저항치가 20.5kg일 때를 기준으로 하였으나 구체적인 탈형강도가 제시되지 않음
인천대교	삼성물산㈜, 2009	관입저항치(KSF2346)가 1.75~7.0 kg/cm^{2}일 때를 기준으로 하였으나 구체적인 탈형강도가 제시되지 않음
이순신대교	대림산업㈜, 2012	압축강도 기준이 없으며 16mm 철근을 힘껏 눌렀을 때 근입하지 않는 두께(거푸집내 굳은 콘크리트 높이가 30~38cm 이상, 75cm 이하)를 기준으로 하였으며 탈형강도는 제시되지 않음

3. 콘크리트 고주탑 시공관리 기술 현황

고주탑 시공 중 계측 시스템은 시공 중에 교량에 미칠 수 있는 외부 환경 요인과 이에 따른 구조물의 응답을 계측·감시하고 데이터베이스화하여 시공 중 형상을 자동적·연속적·객관적으로 모니터링함으로써 체계적인 형상관리를 가능하게 한다. 콘크리트 고주탑 시공 시에는 슬립폼 상단에 조립 대기 중인 철근 등의 편재하로 인하여 거푸집 변형이 발생할 수 있으며, 또한 부분 상승에 의한 거푸집 편측 변형 등이 발생할 수 있다. 이러한 변형에 의해 주탑의 연직도가 확보되지 않을 수 있으므로 엄밀한 계측을 통해 철저한 관리가 필요하다. 고주탑 및 고소 구조물의 국내 시공관리 기술은 아직까지 연구가 미흡하여 많지 않은 실정으로 표 2.1.5에 나타낸 것에 불과하다. 국내에서 콘크리트 주탑으로서 높이가 최고인 이순신대교에서는 광파측량기와 레이저연직기를 이용하여 시공관리를 수행하였다. 광파측량기와 레이저 연직기에 의한 시공관리방법(그림 2.1.14)은 가장 보편적으로 사용되는 방법이나 우천이나 안개 등 기후 의존성이 높기 때문에 연속적인 시공이 필요한 슬립폼 공법에서는 일부 문제가 발생할 수 있다. 또한 초장대교량과 같이 경간 길이가 긴 경우에는 광파 시준이 곤란할 수 있으며, 3차원 변단면 주탑인 경우에는 레이저 연직기의 배치에 세심한 고려가 필요하다. 따라서 기후 영향과 시공장비의 간섭 영향 등을 최소화하고 3차원 변단면 고주탑 슬립폼 위치를 정밀하고 편리하게 계측할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

이러한 단점을 극복하기 위해 환경의 영향을 거의 받지 않는 GPS 도입에 대한 필요성이 대두되었다. 최근에는 토목 및 건축 구조물의 위치 계측에 GPS장비가 도입되어 고층빌딩, 침매터널, 댐, 사면 등에서 기하학적 거동을 실시간 모니터링하고 있다. 이러한 기법을 이용한 시공 중 정밀도 관리 사례로서는 S건설의 세계 최고층 빌딩인 부르즈칼리파, R건설의 초고층 건물, D건설의 침매터널 함체 가설 등의 프로젝트를 들 수 있으며 일부 장대교량에서 GPS를 이용한 시공관리를 시도하였으나 연구가 부족하여 거푸집과 타워크레인의 영향 등을 극복하지 못하고 콘크리트 고주탑 시공에는 본격 적용되지 못하였다.



<그림 2.1.14> 레이저연직기를 이용한 연직도 측정

<표 2.1.5> 국내 시공정밀도 관리 기술 현황

업체명	보유 기술 또는 특허	비고
(주)카이센	GNS를 이용한 시설물 시공 관리 시스템	
	가속도계를 이용한 GPS 변위 보정 시스템	
	시스템 상태 추정기법을 통한 GPS 위치 보정 시스템	
시설안전 기술공단	교량의 수직구조물 시공방법 및 이에 사용되는 거푸집 위치보정시스템	
롯데건설	GPS 및 가속도를 이용한 시공 중 건축 구조물 연직도 관리 시스템	
삼성건설	해상교량 주탑 모니터링 시스템	

국내 최초의 시공 중 GPS 적용사례로는 서강대교를 들 수 있다. 서강대교 공사 마지막 단계에서 아치구조물을 정확한 위치에 안착시키기 위해 GPS장비를 활용하였다. 교각 또는 주탑의 침하, 교량 상판의 처짐 또는 구조물의 변형 등을 실시간으로 측정하여 안전 진단에 활용하고자 2007년 영종대교에 GPS 모니터링 시스템이 설치되었고, 2009년 10월 개통된 인천대교에서는 교각 수직도 관리를 위해 GPS가 일부 적용되었으며 고가교 모드 및 변위를 RTK 및 DGPS 방식을 적용하여 측정하였고, FCM공법 시공 중 처짐측량에도 적용하고자 시도하였다.



<그림 2.1.15> 교량 GPS 적용 사례(인천대교, 2009) (한국건설기술연구원, 2009)

L건설에서는 국내 초고층빌딩의 코어를 시공할 때 연직도 관리를 위해 GPS 망 조정을 통한 시공 중 좌표관리시스템을 구축한 바 있고, 정밀도를 높이기 위해 가속도계를 혼용하였다.



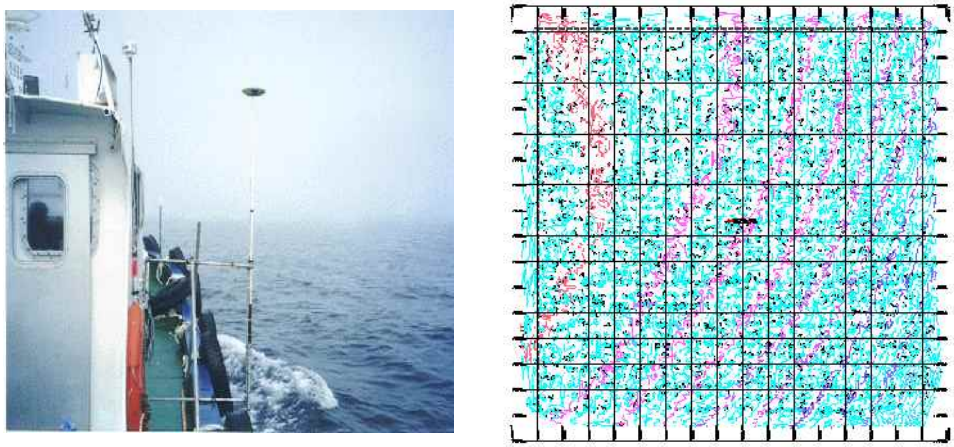
<그림 2.1.16> 초고층빌딩의 코어 시공 시 연직도 관리(L건설, 2008)
(한국건설기술연구원, 2009)

H전력공사는 영흥T/L 송전철탑의 절대위치 관측 시스템으로 활용하기 위해 GPS를 적용하여 형상관리와 추세관리를 진행한 사례가 있다.



<그림 2.1.17> 송전철탑 GPS 모니터링(H공사, 2004)
(한국건설기술연구원, 2009)

그 밖에 GPS를 이용하는 사례로는 GPS수신기로 굴삭기와 작업현장의 위치를 얻어 지형을 보지 않고도 모니터에 표시된 화면만으로 계획단면의 굴삭작업을 수행할 수 있는 굴삭기의 실시간 작업시스템(2006)과 해역의 수심측량을 위해 GPS를 활용하는 사례(2008) 등이 있다. 그림 2.1.18 (a)는 해저구조물 설치를 위해 온산해역에서 GPS를 이용하여 수심측량에 활용하는 모습을 찍은 사진이고 (b)는 측정한 등심선도이다(한국건설기술연구원, 2009).



(a) GPS 안테나설치 (b) 등심선도

<그림 2.1.18> 온산해역 수심측량(한국건설기술연구원, 2009)

3차원으로 변화하는 콘크리트 고주탑의 시공정밀도 관리에 있어서 기존의 광파기와 레이저연직기를 이용한 관리시스템은 적용하기 힘들다. 최근에는 국내외를 막론하고 단면 변화가 있거나 초고층, 중요 구조물인 경우에는 전술한 바와 같이 레이저연직기, 광파측량기, GPS 등 세가지를 조합하여 상호 보완적으로 적용하는 것이 시도되고 있다. 이 연구에서는 고주탑 시공시 GPS를 이용한 시공정밀도 및 형상 관리시스템에 대한 연구를 수행하여 슬립폼 공법의 시공관리 기술을 확보하고자 한다. GPS를 사용하여 계측할 경우에는 정밀도 확보를 위한 데이터 획득과 처리방법, 진동・바람・타워크레인의 영향을 최소화하는 슬립폼 내 최적 장착 위치 선정, 그리고 견고한 장착 방법 등을 우선 해결해야 할 것으로 판단된다. (한국건설기술연구원, 2009)

제 2 절 해외 기술 동향

1. 해외 장대교량 주탑 현황

1900년 초반부터 2010년 내외에 건설한 280여개의 해외 장대교량인 사장교에 대한 데이터를 분석하였다. 해외에서도 1970년대 이후 장대 사장교 건설이 급속하게 증가하였음을 알 수 있다(표 2.2.1). 이 중에서 콘크리트 주탑은 최근에 많이 건설되기 시작하여 전체에서 38.1% 차지하고 있다(그림 2.2.1).

주탑고 대 주경간장 비에 대한 검토 결과 보강형 형식에 따른 차이는 있으나 거의 0.3 이내로 설계되었으며, 강합성형교는 0.32정도로 다른 형식에 비해 주탑 높이가 약간 높은 것으로 나타났다. 강합성 사장교인 양푸대교(중앙 경간장 602 m)가 223 m로 강재 주탑 중 최고 높이를 가지고 있으며 콘크리트 주탑으로는 2008년에 완공된 세계 최장 사장교인 수통대교(중앙 경간장 1088 m)가 306 m를 기록하고 있다. 그림 2.2.2와 같이 주탑의 높이가 점점 높아지고 있으며 조만간 400m를 돌파할 것으로 예상되고 있다. 따라서 이 연구에서도 400m 이상의 고주탑에 대하여 효율적으로 대응할 수 있는 시공법을 개발해야 할 것으로 판단된다.

<표 2.2.1> 해외 장대 사장교의 주탑 현황

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
1	Cassagne	France	1909	steel	steel	156		-
2	Lezardrieux	France	1925	steel	steel	112		-
3	Tempul Viaduct	Spain	1925	concrete	concrete	60.35		-
4	Narin River	Russia	1936	steel	-	132	22	-
5	Pierrelatte	France	1952	concrete	concrete	81		-
6	Stromsund	Sweden	1955	steel	-	182.6	27.694	문형 주탑
7	Buchenau	Germany	1956	강합성	steel	58.8	9	이주형 주탑
8	Theodor Heuss	Germany	1957	steel	steel	260		-

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
9	Beton City	USA	1957	concrete	-	52		-
10	Katsuse	Japan	1960	steel	concrete	128	15.3	문형 주탑
11	North Romain	Canada	1960	steel	steel	61	18.3	문형 주탑
12	Severin	Germany	1961	steel	steel	302	77.2	A형 주탑
13	Maracaibo	Venezuela	1962	concrete	concrete	235	86.6	문형 주탑
14	Julicher-Strabe	Germany	1963	steel	-	98.7	17.34	일주형 주탑
15	Juikcher Strasse Bridge	Germany	1963	steel	steel	98.7		일주형 주탑
16	Jinnou	Japan	1963	steel	steel	80	21.33	문형 주탑
17	Polcevera Viaduct	Italy	1964	concrete	concrete	207.9	45	-
18	George-Street	Great Britan	1964	steel	concrete	152.4	51.8	일주형 주탑
19	Dnepr	Ukraine	1964	concrete	-	144	63	H형 주탑
20	Leverkusen Bridge	Germany	1965	steel	steel	280	49.3	일주형 주탑
21	Wye	Great Britan	1966	steel	-	234.7	29.3	일주형 주탑
22	Maxau	Germany	1966	steel	-	175	48.25	일주형 주탑
23	Maya	Japan	1966	steel	steel	139.4	33	일주형 주탑
24	Necker	Germany	1966	steel	concrete	77	18.8	이주형 주탑
25	Friedrich Ebert	Germany	1967	steel	steel	280		-

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
26	Rees-Kalkar	Germany	1967	steel	steel	255		-
27	Magliana	Italy	1967	concrete	-	145	34	-
28	Isles	Canada	1967	steel	concrete	105	51	이주형 주탑
29	Hawkshaw	Canada	1967	-	steel	217		-
30	Ludwigshafen	Germany	1968	steel	-	-	71.7	A형 주탑
31	Luangwa	Zambia	1968	강합성	steel	222		H형 주탑
32	Onomichi	Japan	1968	concrete	steel	215	39.335	문형 주탑
33	Batman	Australia	1968	steel	steel	204.74	91	경사 A형 주탑
34	Stahlhochstrasse	Germany	1968	steel	steel	139.75	43.3	A형 주탑
35	Harmsen	Netherlands	1968	steel	steel	108.6	49.3	일주형 주탑
36	Hafenbahnbrucke	Germany	1968	steel	concrete	77		-
37	Knie	Germany	1968	steel	steel	319	114.1	문형 주탑
38	Papineau-Leblanc	Canada	1968	steel	steel	240.7	38.4	일주형 주탑
39	Toyosato grand	Japan	1970	steel	steel	216	34.873	A형 주탑
40	Paris-Massena	France	1970	steel	steel	161.4	33	일주형 주탑
41	Arakawa grand	Japan	1970	steel	steel	160	34	일주형 주탑
42	Erkine	Great Britan	1971	steel	-	305		

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
43	Erskine	Great Britan	1971	-	-	304.9	38	일주형 주탑
44	Kurt Schumacher	Germany	1971	steel	steel	287	77.93	H형 주탑
45	Wadi Kuf	Libya	1971	steel	concrete	282	54.1	-
46	Bratislava Danube	Slovakia	1972	concrete	steel	303	84.6	A형 주탑
47	Hainburg	Austria	1972	steel	steel	228	76.33	A형 주탑
48	Hainburg	Australia	1972	steel	-	228	76.33	A형 주탑
49	Linz	Australia	1972	steel	-	215	67.8	일주형 주탑
50	Voest	Austria	1972	steel	steel	215	69.26	일주형 주탑
51	Galecopper	Netherlands	1972	steel	steel	180	34	일주형 주탑
52	Ishikarikakou	Japan	1972	steel	steel	160	34	A형 주탑
53	John O'Connel memorial	USA	1972	steel	steel	137.2	30.47	이주형 주탑
54	Heer Agimont	Belgium	1972	steel	steel	124	40.7	문형 주탑
55	Danaubrucke Deggenau	Germany	1973	steel	-	290	81.5	일주형 주탑
56	Chaco-Corrientes	Argentinia	1973	concrete	-	245	47	-
57	Kwang Fu	Germany	1973	steel	-	610	155	일주형 주탑
58	Sacramento River	Argentinia	1973	concrete	-	900		-
59	Saint Nazaire	France	1974	steel	steel	404		A형 주탑

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
60	Kohlbrand	Germany	1974	steel	-	325	98	A형 주탑
61	Waal River	Holland	1974	concrete	-	267	46.2	-
62	Daikoku Grand	Japan	1974	steel	steel	165.4	42.68	문형 주탑
63	Barranquilla	Colombia	1974	concrete	-	140		-
64	Rio Magdalena	Colombia	1974	concrete	concrete	140		문형 주탑
65	Franklin	Germany	1974	steel	steel	125.3	19.05	일주형 주탑
66	Daikoku	Japan	1974	steel	steel	165.4	42.68	문형 주탑
67	Yamato	Japan	1974	steel	concrete	83	13.2	이주형 주탑
68	Rande	France	1974	steel	steel	900		역Y형 주탑
69	West Gate	Germany	1974	steel	-	407	204	H형 주탑
70	Pasco-Kennewick	Holland	1974	concrete	-	404	154	-
71	Neuwied	Japan	1974	steel	steel	350		H형 주탑
72	Raiffeisen	Colombia	1974	concrete	-	350	116	-
73	Godsheide	Colombia	1974	concrete	concrete	288	99.13	-
74	Bridge over the arno river	Germany	1974	steel	steel	215	76	-
75	Bybrua	Japan	1974	steel	steel	177	64.4	A형 주탑
76	Yamato	Japan	1974	steel	concrete	171.88		-

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
77	Saint Nazaire	France	1975	steel	steel	404	68	A형 주탑
78	Suehiro Grand	Japan	1975	steel	-	250	47.75	일주형 주탑
79	Kamome Grand	Japan	1975	steel	steel	240	45	일주형 주탑
80	Danube Canal	Austria	1975	concrete	concrete	119	16	-
81	Saint Nazaire	France	1975	steel	steel	-		-
82	Moscow Dnepr River	Russia	1976	-	-	300	125	A형 주탑
83	Ewijk	Netherlands	1976	steel	-	270	51	일주형 주탑
84	Oberkassel	Germany	1976	steel	steel	257.8	100	일주형 주탑
85	Rokkou Grand	Japan	1976	steel	steel	220	56.541	문형 주탑
86	Shin Grand	Japan	1976	steel	steel	103.8	37.78	이주형 주탑
87	Zarate-Brazo Largo	Argentinia	1977	steel	concrete	330	111.5	문형 주탑
88	Brotonne	France	1977	concrete	concrete	320	70.4	-
89	Speyer Bridge	Germany	1977	steel	steel	275	87.05	A형 주탑
90	Arno	Italy	1977	steel	-	189	50	일주형 주탑
91	Carpineto	Italy	1977	concrete	-	181	28.87	-
92	Suigou Grand	Japan	1977	steel	steel	178.9	47.2	일주형 주탑
93	Eisai	Japan	1977	steel	steel	144	48.51	A형 주탑
94	Kwang Fu	Taiwan	1977	concrete	-	134	20.4	-

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
95	Sacramento River	USA	1977	steel	steel	134	14.6	문형 주탑
96	Rande	Spain	1978	steel	concrete	54.8	23.5	문형 주탑
97	West Gate	Australia	1978	steel	-	400.1	37.2	일주형 주탑
98	Pasco-Kennewick	USA	1978	concrete	concrete	336	24.54	H형 주탑
99	Neuwied	Germany	1978	steel	steel	299	35.5	A형 주탑
100	Raiffeisen	Germany	1978	steel	steel	235.2	35.5	일주형(교직) A형(교축)
101	Godsheide	Belgium	1978	steel	-	235.2	26	이주형 주탑
102	Bridge voer the arno river	Italy	1978	steel	-	210.2	22.4	경사 주탑
103	Bybrua	Norway	1978	steel	concrete	206	15.5	A형 주탑
104	Steyregger	Austria	1978	강합성	-	161.2	24.9	A형 주탑
105	Flehe	Germany	1979	concrete	concrete	368	41.7	역Y형 주탑
106	Save	Serbia	1979	steel	-	253.7	16.5	문형 주탑
107	Steyregger	Austria	1979	강합성	steel	161.2	24.8	A형 주탑
108	Ebro River	Spain	1979	concrete	-	146		-

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
109	Gasshyiu Grand	Japan	1979	steel	steel	144	10.5	A형(교축) 문형(교직)
110	Lyne	Great Britan	1979	concrete	concrete	54.87	11.56	-
111	Willems	Netherlands	1980	steel	steel	270	34.3	문형 주탑
112	Ganter	Switzerland	1980	concrete	-	174		-
113	Danube Bridge at Metten	Germany	1980	concrete	steel	145	30	-
114	Sancho El Mayor	Spain	1980	concrete	concrete	137.1	28.9	
115	Myton	Great Britan	1980	steel	-	55.6	32	
116	Sloboda	Serbia	1981	steel	steel	351	27.68	
117	Fourth Mosul	Itaq	1981	concrete	concrete	76	31.5	A형 주탑
118	Luling (Mississippi River)	USA	1982	steel	steel	372.5	25.604	A형 주탑
119	Kessock	Great Britan	1982	steel	steel	240	21.92	이주형 주탑
120	Barrious de Luna	Spain	1983	concrete	concrete	440	22.5	-
121	Tanaro	Italy	1983	steel	steel	114.3	30	
122	Alba Elevated Highway	Italy	1983	concrete	steel	114.3		
123	Ijssel	Netherlands	1983	-	-	-		-

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
124	중량대료	Taiwan	1984	steel	concrete	200	72.17	문형 주탑
125	Adhamiyah	Iraq	1984	steel	steel	182.5	52.6	일주형 주탑
126	Takanashi Grand	Japan	1984	steel	src	100	32.5	문형 주탑
127	Meiko Nishi	Japan	1985	-	steel	405	122	A형 주탑
128	Meikou Nishi	Japan	1985	steel	steel	405	122	A형 주탑
129	Faro	Denmark	1985	steel	concrete	290	95	A형 주탑
130	East Huntington	USA	1985	강합성	concrete	274.32		-
131	Chichibu	Japan	1985	steel	src	153	40	A형 주탑
132	Diepoldsau	Switzerland	1985	concrete	concrete	97		-
133	Alex Fraser	Canada	1986	강합성	concrete	465		-
134	Alcoy	Spain	1986	concrete	concrete	110	50	문형 주탑
135	Saint-Maurice	Switzerland	1986	강합성	concrete	93	26	A형 주탑
136	A.Fraser	Canada	1986	steel	concrete	465	152.9	문형 주탑
137	Rama IX	Thailand	1987	steel	steel	450	85.8	일
138	Sunshine Skyway	USA	1987	concrete	concrete	366	73.76	-
139	Dongying Bridge	China	1987	steel	steel	288	69.7	문형 주탑
140	Quincy	USA	1987	steel	pc	274.3	71.37	문형 주탑

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
141	Weirton-Steubenville	USA	1987	강합성	pc	249.9	111.3	A형 주탑
142	Yasaka	Japan	1987	steel	steel	240	46.5	A형 주탑
143	katsushika	Japan	1987	steel	steel	220	65	일
144	Torikainiwaji	Japan	1987	steel	steel	200	48.8	일
145	Iwakurojima	Japan	1988	steel	concrete	420		H형 주탑
146	Hitsuishijima	Japan	1988	steel	concrete	420		H형 주탑
147	Iwagurojima	Japan	1988	steel	steel	420	152.3	문형 주탑
148	Tampico	Mexico	1988	steel	concrete	360	123.5	다이아몬드
149	Tokachichuuou	Japan	1988	steel	concrete	250	52	A형 주탑
150	Aratsu	Japan	1988	steel	steel	184.2	60	일주형 주탑
151	Pertuiset	France	1988	concrete	concrete	132	56	역Y형 주탑
152	Akkar	India	1988	concrete	concrete	77	54.6	-
153	Hitsuishijima	Japan	1988	steel	steel	420	143.46	문형 주탑
154	Tempozan	Japan	1989	steel	steel	160.5,152.0	170	A형 주탑
155	Yokohama Bay	Japan	1989	steel	-	460		H형 주탑
156	Dames Point	USA	1989	concrete	concrete	396	92	-
157	Sugaharasirokita	Japan	1989	steel	steel	238	44.5	일주형 주탑
158	Wandre	Belgium	1989	concrete	concrete	168	95.5	역Y형 주탑

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
159	Chandoine	Switzerland	1989	concrete	concrete	140	30.3	-
160	Lumberjack's Candle	Finland	1989	concrete	concrete	126	47	일주형 주탑
161	Nishhaga	Japan	1989	steel	steel	116	43.7	문형 주탑
162	Shima-maruyama	Japan	1989	concrete	concrete	114	47	H형 주탑
163	Nakaupo	Japan	1989	steel	steel	65	30	문형 주탑
164	Fudoskutsu	Japan	1989	steel	steel	44.5	21	문형 주탑
165	Tempozan	Japan	1990	-	-	350		-
166	Obere Argen	Germany	1990	steel	steel	250	55	A형 주탑
167	Bannaguro grand	Japan	1990	steel	steel	140.4	45	일주형 주탑
168	Hikihara 1	Japan	1990	steel	steel	124	48	A형 주탑
169	Kamitsu grand	Japan	1990	steel	steel	106.5	43	문형 주탑
170	Kamitsuma	Japan	1990	concrete	concrete	103.7	45.39	문형 주탑
171	Gilly	France	1990	concrete	concrete	102	33.8	이주형 주탑
172	Airside access	Japan	1990	steel	steel	88.5	49.5	이주형 주탑
173	Bittorio Sora	Italy	1990	강합성	concrete	70	34.88	이주형 주탑
174	Skarnsundet	Norway	1991	concrete	concrete	530	152	A형 주탑
175	Ikuchi	Japan	1991	복합 psc/st	steel	490	123	A형 주탑

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
176	Queen Elizabeth	Great Britan	1991	강합성	-	450	137	-
177	Helgeland	Norway	1991	concrete	concrete	425		A형 주탑
178	Nanpu	China	1991	강합성	-	423		-
179	Talmadge Memorial	USA	1991	-	-	335		H형 주탑
180	Sakitama	Japan	1991	steel	steel	190	80	일주형 주탑
181	Isere Viaduct	France	1991	-	concrete	156	94	-
182	Isere	France	1991	concrete	concrete	156	94	일주형 주탑
183	Heisei grand	Japan	1991	steel	steel	125	45	A형 주탑
184	Oxford	France	1991	concrete	concrete	119.5	48	H형 주탑
185	Alamillo	Spain	1992	concrete	concrete	250	162	경사 주탑
186	Alamillo	Spain	1992	steel	src	200	142	일주형 주탑
187	Bourgone	France	1992	-	concrete	152		-
188	Chuuou	Japan	1992	steel	s	138.5		역Y형 주탑
189	Fuchuuko	Japan	1992	steel	s	130	53	일주형 주탑
190	La Arena Viaduct	Spain	1992	강합성	s	105		-
191	Potos Street	Spain	1992	concrete	s	76		-
192	Iwazu	Japan	1993	steel	concrete	-	55	문형 주탑
193	Yang Pu	China	1993	강합성	-	602	223	역Y형 주탑

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
194	Higashi Bridge	Japan	1993	steel	-	485		-
195	Second Hooghly	India	1993	강합성	s	457.2	122	문형 주탑
196	Karnali River	Nepal	1993	steel	s	325	124.55	문형 주탑
197	Dnepr River South	Ukraine	1993	-	-	271		-
198	Tahtiniemi	Finland	1993	steel	s	165	105	H형 주탑
199	Hattabara gradn	Japan	1993	steel	s	144.2	53.57	A형 주탑
200	Victor Bodson	Luxembourg	1993	concrete	concrete	130	105	일주형 주탑
201	Paterna Technology Park	Spain	1993	-	s	64		역Y형 주탑
202	Saame	Finland	1993	steel	s	-	117	H형 주탑
203	Tsurumi	Japan	1994	-	-	510		역Y형 주탑
204	Tsurumikouro	Japan	1994	steel	s	510	182	A형 주탑
205	Tsurumi Tsubasa Bridge	Japan	1994	steel	-	510		-
206	Iroise	France	1994	concrete	-	400		일주형 주탑
207	Second Macao-Taipa Crossing	China	1994	concrete	-	112		-
208	jackfield	Great Britan	1994	steel	s	57.6	30	H형 주탑

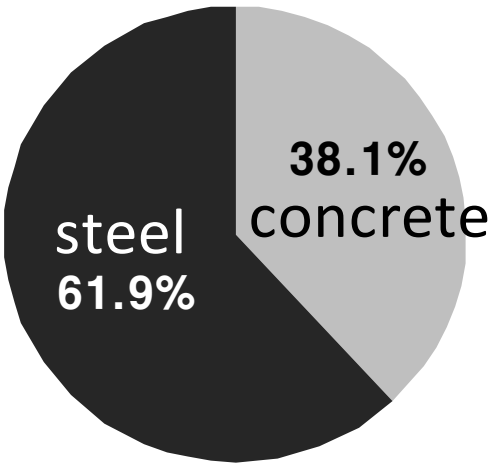
No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
209	Normandy	France	1995	복합psc/st	concrete	856	214.77	역Y형 주탑
210	Tonglin, Yangtzew River	China	1995	concrete	-	436		-
211	Fred Hartman	USA	1995	steel	concrete	381	133	-
212	Houston Ship Channel	USA	1995	강합성	concrete	381	129.8	A형 주탑
213	Chesapeake & Delaware Canal	USA	1995	concrete	concrete	229	102	-
214	Schaffhausen N4 Rhine	Switzerland	1995	concrete	concrete	125.26	51.5	문형 주탑
215	Lerez River	Spain	1995	concrete	concrete	125		일주형 주탑
216	Second Severn Crossing	Great Britan	1996	-	concrete	456		H형 주탑
217	Erasmus	Netherlands	1996	steel	steel	280	139	경사 A주탑
218	Replot	Finland	1996	steel	concrete	250	82	역Y형 주탑
219	Sunmarine	Japan	1996	concrete	concrete	130	61	A형 주탑
220	Xupu	China	1997	steel	-	590	217	A형 주탑
221	Kap Shiu Mun	Hongkong	1997	복합psc/st	concrete	430	133	H형 주탑
222	Batam-Tonton	Indonesia	1997	concrete	concrete	350	199	-

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
223	Dee River Crossing	Great Britan	1997	-	-	294	118	-
224	Karkistensalmi	Finland	1997	-	-	240		H형 주탑
225	Hauchinohe port	Japan	1997	concrete	concrete	100	47	일주형 주탑
226	Meiko Chuo	Japan	1998	steel	-	590		-
227	Ting Kau	Hongkong	1998	강합성	concrete	448	194	-
228	Vasco da Gama	Portugal	1998	-	concrete	420	155	H형 주탑
229	Sunniberg	Switzerland	1998	concrete	concrete	140		
230	Marinsky	Czech Rep.	1998	steel	steel	123.5	60	A형 주탑
231	Sydney Airport	Australia	1998	concrete	steel	105	34.5	
232	Aire du jura	France	1998	concrete	concrete	60		역Y형 주탑
233	Mastenbro다	Netherlands	1998	steel	concrete	56	43.35	이주형 주탑
234	Tatara	Japan	1999	steel	steel	890	220	역Y형 주탑
235	Ayunose	Japan	1999	concrete	concrete	200	70	역Y형 주탑
236	Hispanoamerica	Spain	1999	복합psc/st	concrete	120	41	이주형 주탑
237	Twistvile	Netherlands	1999	concrete	steel	56	35	이주형 주탑
238	Nanjing Second Yangtse River	China	2000	강합성	-	628		역Y형 주탑

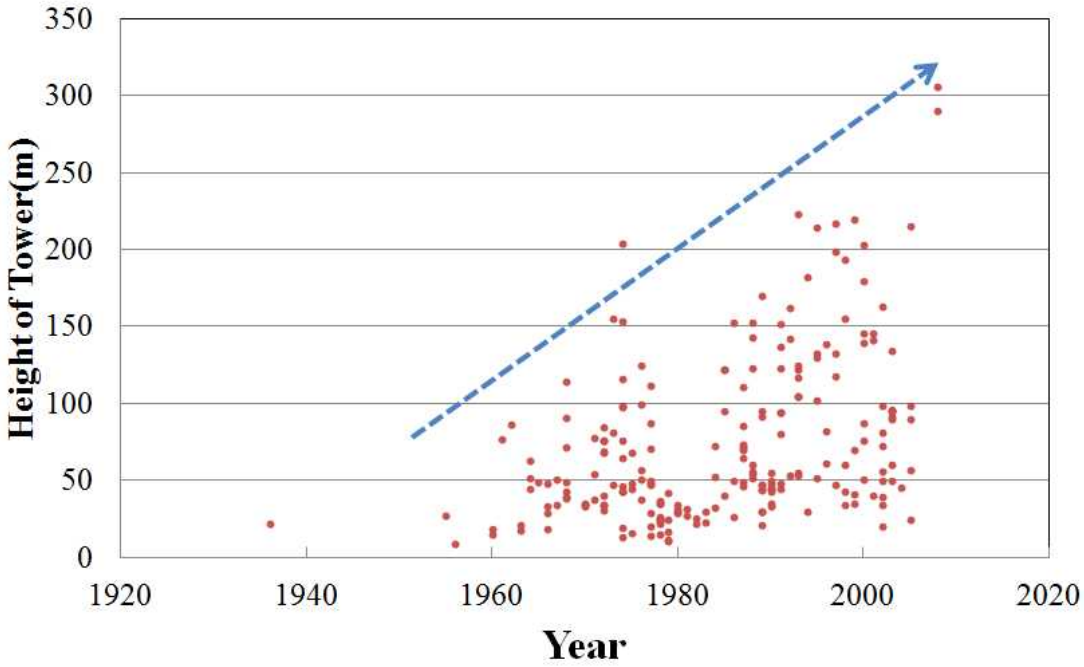
No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
239	resund	Denmark	2000	steel	concrete	490	203.5	이주형 주탑
240	Seo-Hae Grand	Korea	2000	강합성	concrete	470	180	H형 주탑
241	Lijatuo, Yangtze River	China	2000	-	-	444		-
242	Uddevalla	Sweden	2000	강합성	concrete	414	140	A형 주탑
243	Surgut	Russia	2000	steel	steel	408	146	H형 주탑
244	Wuhu Yangtze River	China	2000	steel		312		-
245	Tarascon-Beaucaire	France	2000	concrete	concrete	192		H형 주탑
246	Mermaid	Poland	2000	steel	concrete	180	87.5	역Y형 주탑
247	Liege	Belgium	2000	concrete	concrete	162	76	일주형 주탑
248	Himinoe	Japan	2000	concrete	concrete	112	51	일주형 주탑
249	Qingzhou Minjiang	China	2001	강합성	-	605		-
250	Junshan Yangtze River	China	2001	steel	-	460		-
251	Sydney Lanier	USA	2001	concrete	concrete	381	146	H형 주탑
252	Dubrovnik Most	Croatia	2001	복합psc/st	concrete	304.05	141.5	역Y형 주탑
253	Grijalva	Mexico	2001	concrete	concrete	116	40	V형 주탑

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
254	Milenio	Spain	2001	concrete	concrete	110		일주형 주탑
255	Lipon	Finland	2001	concrete	concrete	70		일주형 주탑
256	Rosario-Victoria	Argentinia	2002	-	-	330		H형 주탑
257	Seri Saujana	Malaysia	2002	concrete	concrete	300	73	일주형 주탑
258	Rama VIII	Thailand	2002	강합성	concrete	300	163	역Y형 주탑
259	Rlughafen	Germany	2002	steel	steel	287.5	81	역삼각형
260	Niederrhein	Germany	2002	steel	steel	275	34.2	역삼각형
261	Leonard .Zakim Bunker Hill	USA	2002	steel	-	227	98.4	역Y형 주탑
262	Taney	Ireland	2002	concrete	concrete	108.5	50	역Y형 주탑
263	Mario Covas	Brazil	2002	concrete	concrete	85	56	문형 주탑
264	Sixth street	USA	2002	concrete	concrete	60	39.6	이주형 주탑
265	Blautal	Germany	2002	concrete	concrete	41	20	이주형 주탑
266	Rainha Santa Isabel	Portugal	2003	강합성	concrete	186.5	90	일주형 주탑
267	La Uniidad	Mexico	2003	강합성	concrete	185	134	일주형 주탑
268	Boyne	Ireland	2003	강합성	concrete	170	95	역Y형 주탑
269	Seri Wawasan	Malaysia	2003	concrete	강합성	168.5	96	일주형 주탑

No.	Bridge Name	Location	Built	deck	Pylon	Main Span	Pylon H	Remark
270	Ukai	Japan	2003	강합성	steel	154	60	일주형 주탑
271	Prince Clusus	Netherlands	2003	강합성	concrete	150	91.7	일주형 주탑
272	Eilandbrug	Netherlands	2003	강합성	concrete	150	95	A형 주탑
273	Pedar	Colombia	2003	concrete	concrete	121	50	일주형 주탑
274	Rion-Antirion	Greece	2004	강합성	concrete	560		-
275	Lutzana swing	Spain	2004	concrete	steel	108	46	일주형 주탑
276	Nanjing Third Yangtse River	China	2005	-	-	648	215	-
277	Millau Viaduct	France	2005	steel	강합성	342	90	일주형 주탑
278	Millennium	Serbia	2005	concrete	concrete	145	57	일주형 주탑
279	Puget-Theniers	France	2005	concrete	concrete	66	25	이주형 주탑
280	Leonard p.Zakim Bunker Hill	USA	2005	steel	steel	227	98.4	역Y형 주탑
281	Sutong	China	2008	steel	concrete	1088	306	A형 주탑
282	Sutonecutter Bridge	Hongkong	2008	강합성	concrete	1018	290	-



<그림 2.2.1> 해외 사장교의 주탑 재료 형식 분포



<그림 2.2.2> 해외 장대교량의 주탑 높이 추이

2. 해외 슬립폼 공법 기술 현황

슬립폼 공법은 1910년을 전후하여 북유럽(스웨덴)에서 처음으로 시도되었는데 당시에는 거푸집 이동(Sliding)을 위해 인력 조작에 의한 스크류 잭(Screw jack)을 사용하였다. 1940년대 중반 이후 거푸집 이동을 위해 유압잭이 도입되기 시작하면서 슬립폼 공법이 활성화되기 시작하였다. 유럽에서 활용되던 슬립폼은 미국에서 사회간접자본시설의 대대적인 발주에 따라 미국시장을 공략하게 되었으며 이를 계기로 미국, 일본 등지에서 상당한 기술축적이 이루어질 수 있게 되었다.

슬립폼 공법을 적용할 경우 소요 비용 중에서 Form Work가 20~40% 정도의 높은 비중을 차지하고 있다. 타공종이 기계화로 인한 인력절감이 현저한 반면 Form Work는 상대적으로 발전이 지연되어 고교각이거나 시공기간의 단축이 요구되는 경우에 있어서 신속한 조립을 위한 모듈화 및 구조 시스템이 필요하다고 판단된다. 슬립폼 공법은 굴뚝, 사일로, 건축물 벽체, 교각, 교량 주탑, 유정 기초 등 많은 분야에서 적용되고 있다. 도입 초기에는 단면이 일정한 구조물의 적용이 활발하였으나, 최근에는 단면이 변하는 구조물에서도 적용이 활발하다.

선도적인 기술을 보유하고 있는 해외 업체들은 오스트리아의 GBG, 스웨덴의 Nils H. Ahlgren, 미국의 O. R. Shumaker, 프랑스의 Philipp Holzmann AG, 독일의 WIRTGEN GmbH, 일본의 NKK CORP, KOUSHAKK 등이 있다. 특히, 오스트리아의 GBG는 등단면 및 변단면 슬립폼시스템에 대한 독자적인 기술을 보유하고 있으며, 전술한 바와 같이 국내에서 서해대교, 이순신대교와 같은 대규모 교량 공사에 참여하였으며, 영흥 화력 연돌 공사, 고교각 시공 등 많은 공사에 참여하여 왔다.



<그림 2.2.3> 코스타리카 Tempisque교
주탑의 슬립폼 시공(2001, GBG, RSEA)



<그림 2.2.4> 이집트 Suez canal Bridge
주탑의 슬립폼 시공(2001, GBG, Kajima)

슬립폼 공법의 경제성은 시공현장에서 요구되는 시공품질을 만족시키도록 슬립폼시스템의 상승속도를 적절히 유지하는데 달려있다. 따라서 슬립폼시스템의 경제성을 향상시키기 위해 상승속도를 최대 7m/day 까지 높여 운영할 수는 있으나, 재료 수급 또는 환경적인 요인 등의 현실적인 사항들을 반영하여 4m/day 정도의 속도로 운영되고 있다. 이러한 슬립폼시스템의 상승속도는 시멘트 종류와 혼화재, 그리고 슬립폼 거푸집 높이와 슬립폼 상승 장비의 성능 등에 의해 결정된다. 따라서 슬립폼시스템의 상승속도는 이러한 사항들을 충분히 반영하여 결정되어야하며, 반

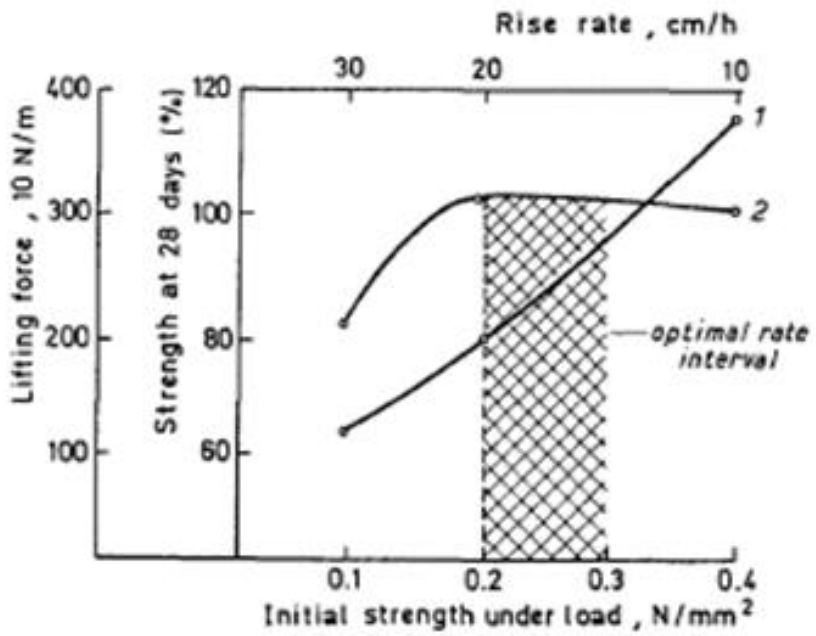
드시 설계속도보다 커서는 안 된다.

그러나 슬립폼시스템의 설계속도가 결정되었다고 하더라도 슬립폼시스템의 상승속도는 현장에서 타설된 콘크리트의 초기경화 여부에 의해 결정되어야 한다. 이는 슬립폼 거푸집의 높이를 증가시키거나 슬립폼 상승 장비의 성능을 향상시킨다고 하더라도 자재수급이나 철근조립 속도 등이 제한적이어서 슬립폼시스템의 상승속도를 증가시키는데 한계가 있기 때문이다. 그러나 콘크리트의 초기경화는 슬립폼시스템의 상승속도를 결정하는데 절대적인 기준이 되는데, 이는 초기경화가 일어나지 않은 콘크리트를 슬립폼 거푸집 밖으로 노출시킬 경우 콘크리트가 흘러내려 콘크리트의 강도발현이 충분하지 못하거나 변형이 발생하게 되어 슬립폼시스템의 안전성과 콘크리트 표면 관리 문제 등이 발생할 수 있기 때문이다. 그리고 초기경화가 진행된 후 상당한 시간이 지나 거푸집 탈형이 이루어질 경우 콘크리트와 거푸집 부착으로 인한 균열이 발생하거나 공기가 길어지게 되어 공사비 증가 등의 문제가 발생할 수 있다. 이와 같이 슬립폼시스템의 상승속도는 콘크리트의 초기경화시간에 따라 결정된다. 그러나 이러한 초기경화시간은 시멘트나 콘크리트 배합비 뿐만 아니라 온도, 바람, 습도 등 다양한 현장 환경에 크게 영향을 받으므로 콘크리트 타설 전에 초기경화시간을 정확히 파악하는 것은 매우 어렵다. 초기경화시간은 콘크리트의 강도 발현 시점에 의해 결정된다.

슬립폼 거푸집 탈형과 관련하여 ACI Committee 347(Formwork for concrete, 2005)에서는 “경험있는 관리자가 변화하는 현장 조건을 반영하여 시공이음이나 콘크리트의 박리가 발생하지 않도록 슬립폼 내부의 콘크리트가 충분히 경화되었는지 검침봉을 이용하여 확인하여야 한다.”라고 규정하고 있다. 그러나 콘크리트의 충분한 경화 정도에 대한 기준은 제시되어 있지 않으며, ACI 318-05(Building Code Requirements for Structural Concrete, 2004), ACI 347-04(Guide to Formwork for concrete, 2005), EM 1110-1-2009(Engineering and Design Architectural Concrete, 1997)에서는 “콘크리트가 거푸집 제거에 따른 처짐이나 뒤틀림 등의 손상이 발생하지 않는 충분한 강도를 가지는 시기”로 규정하고 있으나 구체적인 강도에 대한 기준은 없으며, 설계자나 현장관계자가 결정하도록 규정하고 있다. 그러나 이러한 기준들은 모두 일반거푸집에 타설되는 콘크리트에 적용되는 것들이며 슬립폼시스템에 대한 구체적인 탈형강도가 시방서 수준에서 제시되어 있지 않은 실정이다. 이와 같이 슬립폼 거푸집의 탈형 기준이 되는 콘크리트의 초기경화시간은 정성적인 기

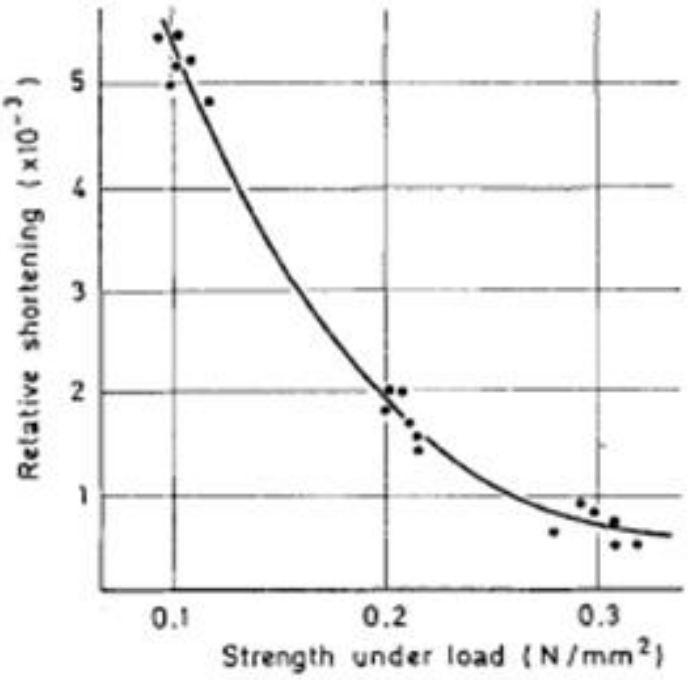
준만이 제시되어 있을 뿐 정량적인 기준은 아직까지 제시되어 있지 않은 실정이다.

Reichverger와 Jaegermann(1980)은 “슬립폼시스템에서 거푸집 밖으로 노출된 콘크리트는 거푸집 내의 콘크리트 자중에 의한 압력(약 0.025MPa)을 저항해야 한다“는 기본 가정아래 실험을 통한 연구를 수행하였다. 그림 2.2.5는 거푸집 탈형 강도에 따른 28일 강도와의 관계 및 슬립폼시스템 상승속도에 따른 상승하중(lifting force)에 대한 관계를 보여주며, 그림 2.2.6은 거푸집 탈형 강도에 따른 콘크리트 변형에 대한 관계를 보여준다. 그림 2.2.5에서 보면 초기강도 0.2MPa 이상에서 거푸집을 탈형해야 콘크리트 28일강도의 100%가 발현되고, 콘크리트 초기강도가 증가하면 상승 하중도 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 2.2.6에서 보면 초기강도 0.2MPa 이상에서 거푸집 탈형 시 자중에 의한 변형이 급격히 작아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 Reichverger와 Jaegermann은 0.2MPa의 콘크리트 압축강도를 적정한 슬립폼 거푸집 탈형강도로 제안하였다.



<그림 2.2.5> 탈형강도에 따른 상승하중(1) 및 압축강도(2)

(Reichverger and Jaegermann, 1980)



<그림 2.2.6> 탈형강도에 따른 콘크리트 상대 변형

(Reichverger and Jaegermann, 1980)

슬립폼내에서 연속적으로 여러 층이 타설되어 경화되고 있는 콘크리트에서 탈형강도 0.2MPa를 정확히 파악하는 것은 불가능하다고 할 수 있다. 상단의 재령이 작은 신생 콘크리트로부터 초기경화시간(Initial Setting Time)이 경과한 최하단부 콘크리트가 슬립폼시스템의 내부에 층을 이루고 쌓여 있다. 여기서 최하단 콘크리트의 압축강도를 측정하거나 유추하는 것은 매우 힘들다. 현재까지 국내는 물론 해외 슬립폼 시공현장에서도 콘크리트의 압축강도를 정량적으로 측정할 수 있는 방법은 정립되어 있지 않다. 단지 검침봉을 슬립폼 거푸집내의 타설된 콘크리트에 직접 삽입하여 정성적인 경험에 의존해 콘크리트의 경화정도를 파악하는 방법을 사용하고 있다.

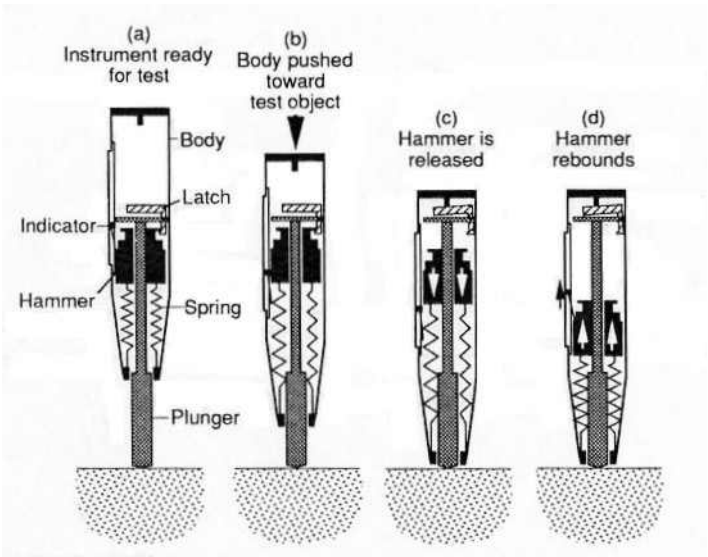
한편, 일반적인 콘크리트 부재에서 경화정도를 파악하는 정량적인 기법은 크게 역학적 기법(반발경도법, 인발법, 관입저항법 등)과 초음파를 이용한 기법(충격반향기법, 초음파 속도법 등) 등으로 나눌 수 있다.

가. 역학적 기법

(1). 반발경도법(Rebound Method)

이 방법은 경화된 콘크리트면에 슈미트해머로 타격에너지를 가하여 콘크리트면의 경도에 따라 반발경도를 측정하고, 이 반발경도와 콘크리트 압축강도와의 상관관계를 도출함으로써 콘크리트의 압축강도를 추정하는 방법이다. 대표적인 슈미트해머에 의한 반발경도법은 경화된 콘크리트의 표면을 스프링의 힘으로 타격을 가한 후에 반발되는 거리와 콘크리트의 압축강도 사이에 특정한 관계가 있다는 실험에 기초하고 있다(그림. 2.2.7).

이 방법은 간편하고 짧은 시간에 강도추정이 가능하여 콘크리트 구조물 전체에 대한 강도추정이 가능하다는 점에서 유용한 시험법이라고 할 수 있다. 그러나 타격시의 반발경도는 타격에너지 및 피타격체의 형상, 크기, 재료의 물리적 특성 등 여러 요인에 의해 크게 달라진다. 즉, 콘크리트 표면의 골재 유무, 습윤상태, 콘크리트의 재령, 탄산화 정도 등이 반발경도에 영향을 줄 수 있다. 결정적으로 탈형된 후 콘크리트 표면을 타격해야 하므로 슬립폼시스템에 적용하는 데에는 많은 문제점을 가지고 있다.

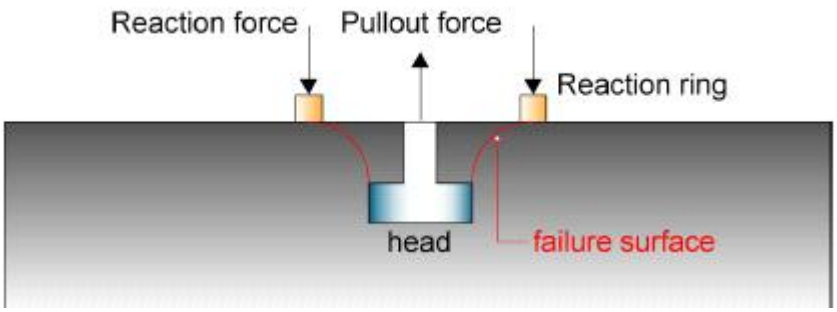


<그림 2.2.7> 슈미트해머의 원리

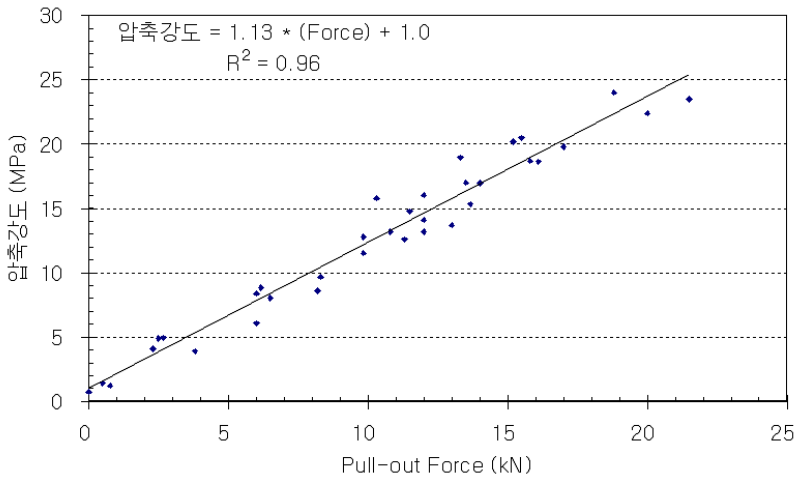
(http://blog.naver.com/heungjinblog/30186402483)

(2) 인발법(Pullout Method)

인발법은 콘크리트 중에 묻힌 삽입체의 두부(head)와 반력 링(reaction ring)을 사용하는 것으로 삽입체를 잡아 당겨서 콘크리트가 원추형으로 파괴될 때의 최대 내력에서 콘크리트의 압축강도를 추정하는 방법이다. 비교적 정량적이고 간편하게 콘크리트의 압축강도를 측정할 수 있으나, 삽입체를 매립해야 하고 구조체에 손상을 입힐 수 있으므로 연속적으로 시공이 이루어지는 슬립폼 공법에 적용하는 것은 불가능 하다.



<그림 2.2.8> 인발법 개념도(손유신 & 이승훈, 2007)



<그림 2.2.9> 인발력과 압축강도와의 관계(손유신 & 이승훈, 2007)

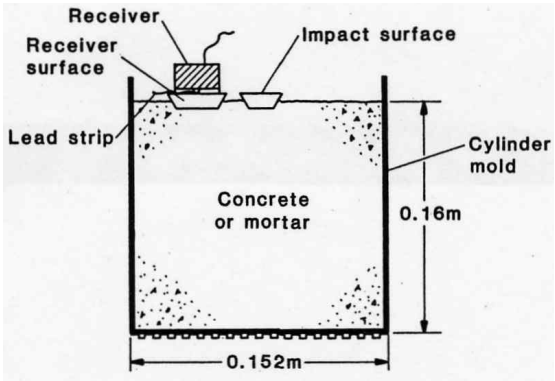
(3) 관입저항법

관입저항법은 콘크리트의 표면에 탐침봉(probe)을 삽입하여 삽입된 깊이를 측정하여 관입저항력을 측정함으로써 콘크리트의 압축강도를 추정하는 방법이다. 이러한 방법은 최근 거푸집을 제거하기위한 강도를 측정할 때 가장 널리 사용되는 방법이다. 그러나 골재의 종류에 따라 큰 오차가 발생할 수 있으며, 층층이 쌓여 있는 콘크리트에서 최하단의 탈형강도를 산정하기란 매우 힘들기 때문에 슬립폼 공법에서는 객관적인 기준을 설정하기 쉽지 않다.

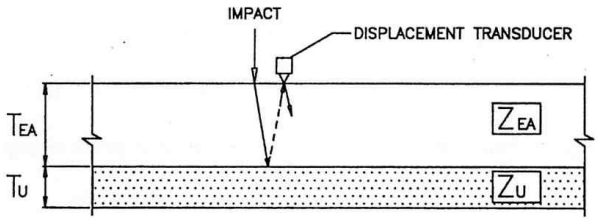
나. 초음파를 이용한 기법

(1) 충격반향기법

충격반향기법은 콘크리트 표면에 물리적인 충격을 가하여 탄성파를 생성시킨 후 반대편 표면에 반사되어 돌아오는 탄성파를 측정하여 탄성파의 속도나(콘크리트의 두께를 알고 있는 경우) 콘크리트의 두께(탄성파의 속도를 알고 있는 경우)를 측정하는 기법이다. 이 방법은 초기재령 콘크리트의 초기경화를 모니터링하는데 사용될 수 있지만 주탑과 같이 초음파가 투과해야할 매질의 두께가 두껍거나 탄성파의 전파경로 상에 철근 등의 방해물이 있을 경우 반사파를 검출하는 것이 힘들다. 따라서 거푸집안에서 최하단층의 탈형강도에 대한 정확한 기준을 도출하기 어렵다. 따라서 슬립폼 공법에 적용하기 힘들다고 판단된다.



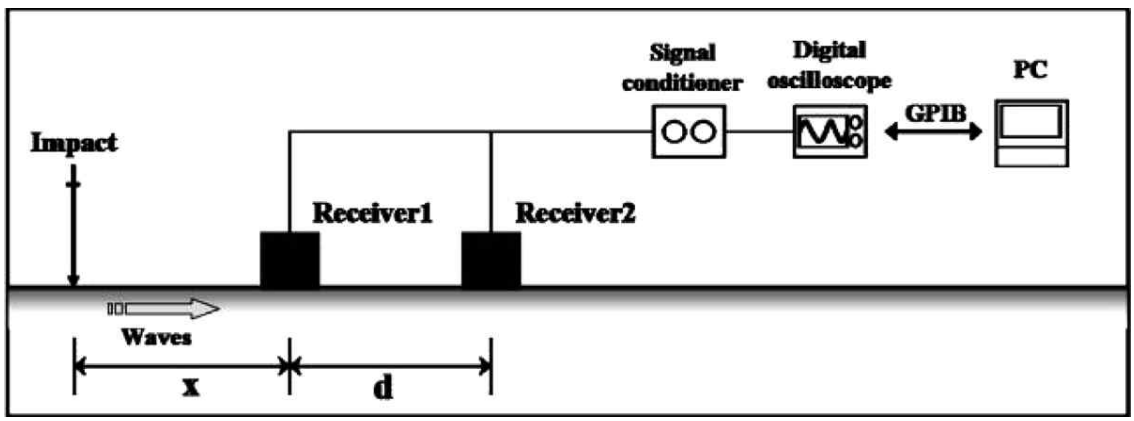
<그림 2.2.10> Pessiki and Carino(1988)



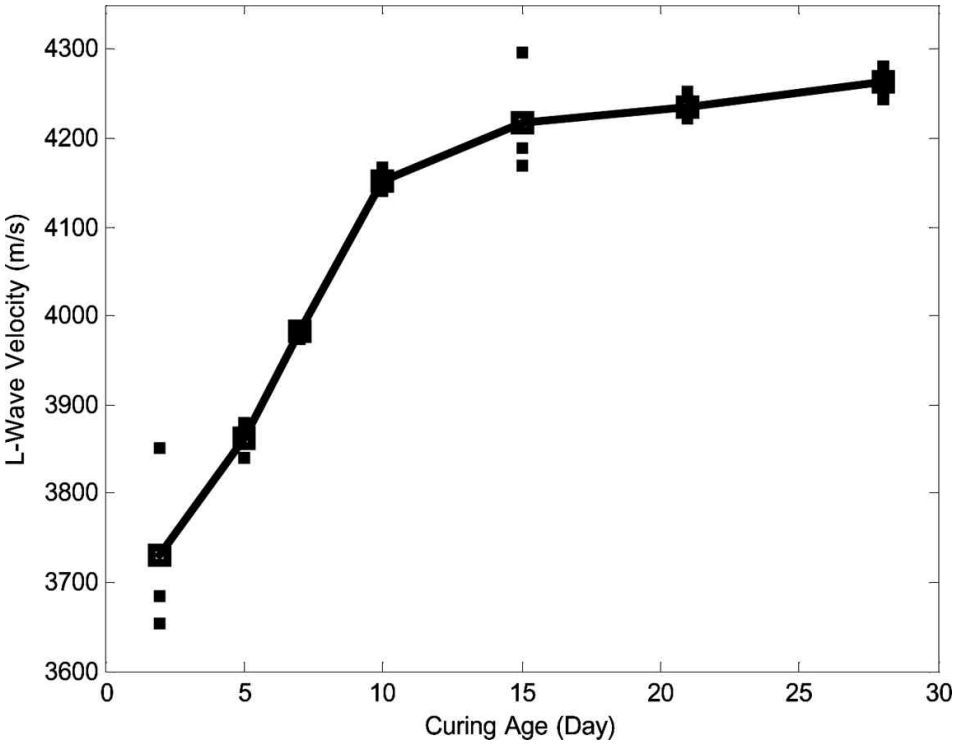
<그림 2.2.11> Pessiki and Johnson(1994)

(2) 초음파 속도법

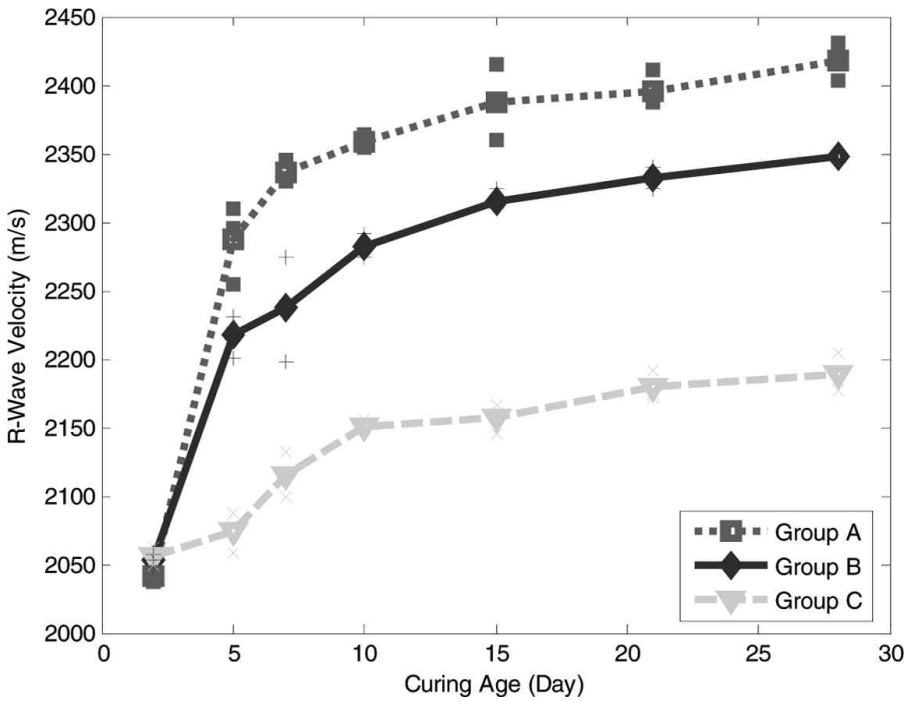
초음파 속도법은 파를 콘크리트 표면에 발생시킨 후 반대편에서 투과된 파의 속도를 측정하는 양방향 기법과 파를 콘크리트 표면에 발생시킨 후 표면을 따라 전파하는 파의 속도를 측정하는 일방향 기법으로 나눌 수 있다. 양방향 기법은 주로 압축파의 속도를 측정하며, 양방향 기법은 압축파 및 표면파의 속도를 측정하여 콘크리트의 경화 정도를 측정한다. 여기서 양방향 기법도 충격반향법과 동일하게 초음파가 투과해야 할 두께가 두꺼운 구조물이나 전파경로 상에 방해물이 있을 경우 적용이 어렵다. 그러나 일방향 기법은 표면을 따라 전파하는 파의 속도를 측정하면 되므로 거푸집 일부에 구멍을 뚫어 탐촉자를 설치하면 슬립폼 공법으로 시공되는 주탑 콘크리트의 초기경화 정도를 파악하는데 용이하다고 할 수 있다.



<그림 2.2.12> 일방향 초음파 속도법(Shin et al., 2007)



<그림 2.2.13> 양생시간에 따른 압축파 속도(Shin et al., 2007)



<그림 2.2.14> 양생시간에 따른 표면파 속도(Shin et al., 2007)

3. 해외 시공중 형상관리 기술 현황

현재까지 고주탑 시공 시 형상 또는 변위를 계측하는 방법으로는 광파거리측정기(Total station), 레이저연직기, 레이저 미세변위측정기(Laser interferometer), 전자거리 계측기(Electronic distance measurement instrument), 가속도계 등을 사용하여 변위로 환산하는 방법과 GPS를 사용하는 방법 등이 있다. 광파거리측정기와 레이저연직기는 현장에서 가장 많이 사용되는 장비이나 날씨변화 및 간섭조건에 따라 사용이 제한된다는 단점이 있다. 레이저 미세변위측정기는 계측 구조물의 특정한 국부지점의 변위를 단속적으로 측정하고자 사용되는 기기로 2000hz 이상의 샘플링 데이터를 획득할 수 있으며 1μm 이하의 높은 데이터 해상도를 가지고 있다. 그러나 이 측정기기가 구조물의 거동에 간섭 받지 않아야 하므로 이로 인해 계측기 및 데이터 저장장치의 설치를 위하여 간섭을 배제하는 부수적인 설비를 필요로 하게 된다. 전자거리 계측기는 레이저 미세변위 계측기와 유사하지만 1mm 단위의 더 작은 해상도를 가진다. 소형 및 경량인 가속도계를 이용한 변위환산 방법은 풍하중에 의한 수평진동수준과 이력을 비교적 정밀하게 계측할 수 있는 장점을 가지고 있으나 변위의 기준점 설정, 이중적분에 의한 누적 오차, 저장장치까지 케이블의 연장에 의한 노이즈 발생, 케이블 및 계측기기의 유지관리 등의 어려움으로 고층 건물의 정확한 상대 변위 계측에는 어려움이 있는 것으로 평가되고 있다.

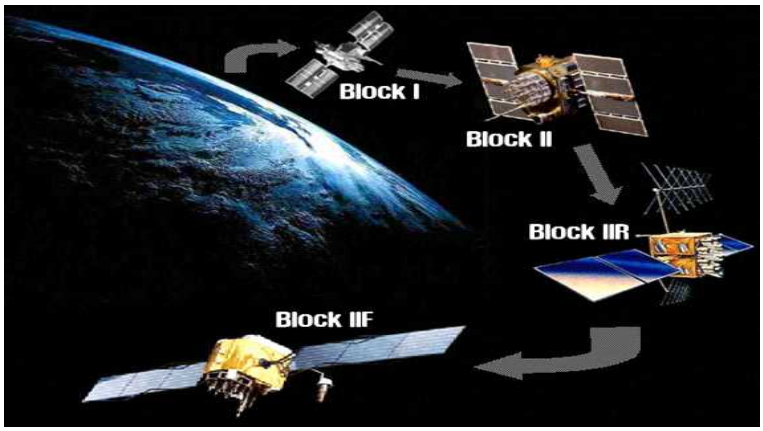
이상과 같은 다양한 계측장치의 한계에 대한 대안으로 GPS를 이용하는 방법이 제안되고 있으며 기존 측량법의 문제점인 측점간의 시계 확보, 장거리 측정 문제, 우천이나 야간 측정 문제 등을 해결할 수 있으며 24시간 신호 이용이 가능하므로 수직높이 및 수평방향으로 편향 여부를 측정하여 연직도 관리를 위한 중요한 측정 데이터를 제공할 수 있다. 따라서 GPS는 이 연구에서 개발하는 고주탑 변단면 슬립폼 시공 시 실시간 계측 및 장기 계측에 적용하는데 있어서 유리하다고 할 수 있다.

GPS는 지구상의 어느 곳에서나 인공위성에서 보내오는 정보를 수신하여 정지 또는 이동하는 물체의 위치를 측정할 수 있는 전천후 위치측정시스템이다. 1959년 미 해군에서 Transit계획에 의하여 NNSS(U.S. Navy Navigation Satellite System, 미 해군 항법위성체계)가 처음 시작되었다. 이는 1961년 Transit 인공위성이 발사

되고, 이어서 여러 개의 시험위성이 발사됨으로써 1964년에 실용화되었으며, 1967년 인공위성을 이용한 선박항법시스템이 일반에게 공개되었다. NNSS는 인공위성에서 발신하는 전자파의 도플러 효과를 관측하여 위치를 측정하는 시스템으로서 비교적 위치정확도가 낮아도 무관한 선박항법시스템으로 출발하였으나, 그 성능이 우수하여 통신이 되지 않는 낙도의 위치결정이나 개발도상국의 지도 작성에 필요한 기준점 측량까지 활용되었다. 2007년 4월 기준으로 총 30개의 GPS 위성이 운용중이고 추가의 6개 위성들은 기본 위성에 문제가 발생할 경우 백업 역할을 함과 동시에 GPS 수신기의 정밀도를 향상시키는 데에 이용된다. 추가 위성이 운용됨으로서 위성의 배열은 불규칙적으로 되었으나 그러한 불규칙적인 배열이 GPS 체계의 신뢰도와 이용성을 증대시켰다.

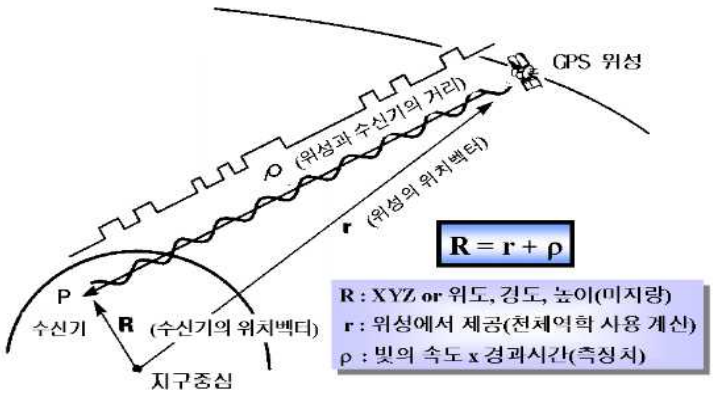
GPS는 삼각측량의 원리를 사용하는데(그림 2.2.16), 전형적인 삼각측량에서는 알려지지 않은 지점의 위치가 그 점을 제외한 두 각의 크기와 그 사이 변의 길이를 측정함으로 결정되는데 반해 GPS에서는 알고 싶은 점을 사이에 두고 있는 두 변의 길이를 측정함으로써, 미지 점의 위치를 결정한다는 것이 고전적인 삼각측량과의 차이점이라 할 수 있겠다. 인공위성으로부터 수신기까지의 거리는 각 위성에서 발생시키는 신호의 발생 시점과 수신 시점의 시간 차이를 측정한 다음 여기에 빛의 속도를 곱하여 계산한다. 실제로 위성의 위치를 기준으로 수신기의 위치를 결정하기 위해서는 이 거리 자료 이외에도 위성의 정확한 위치를 알아야 하는데 이 위성의 위치를 계산하는 데는 GPS 위성으로 부터 전송되는 궤도력을 사용한다. 위성의 궤도 반경은 약 20,183 km이고, 실용위성의 공전주기는 0.5일, 개별 수명은 7.5년으로 알려져 있다. 각 위성에는 세슘 원자시계 2대, 루비듐 원자시계 2대 등이 탑재되는 것이 일반적이며, 무게는 약 845kg 내외이다.

사용자는 1개 이상의 수신기를 필수적으로 구비해야 하고, 사용 목적에 따라서 휴대형 또는 고성능 컴퓨터 시스템, 그리고 관련소프트웨어가 필요하며 이에 따라 정밀도가 좌우된다.



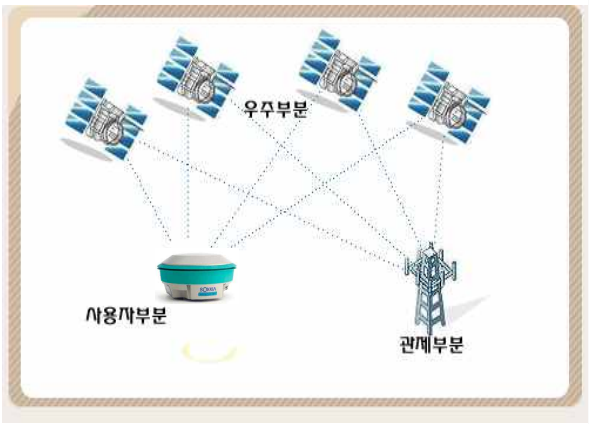
<그림 2.2.15> GPS위성의 발전

(http://www.gps.re.kr/outline/outline_2.asp)



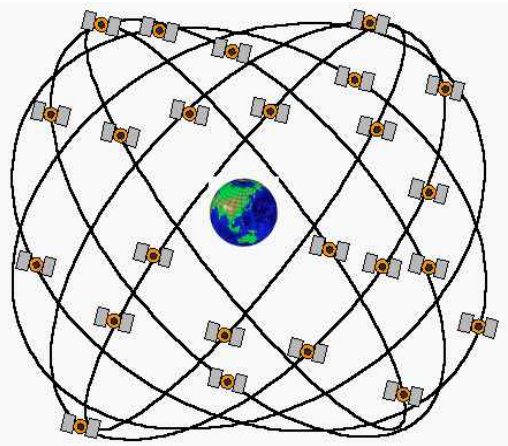
<그림 2.2.16> GPS원리 개념도

(http://www.gps.re.kr/outline/outline_2.asp)



<그림 2.2.17> GPS 구성요소

(http://www.howhow.co.kr/html/gps03.html)



<그림 2.2.18> GPS위성 궤도면 도해

(http://joongyup.egloos.com/m/9173909)

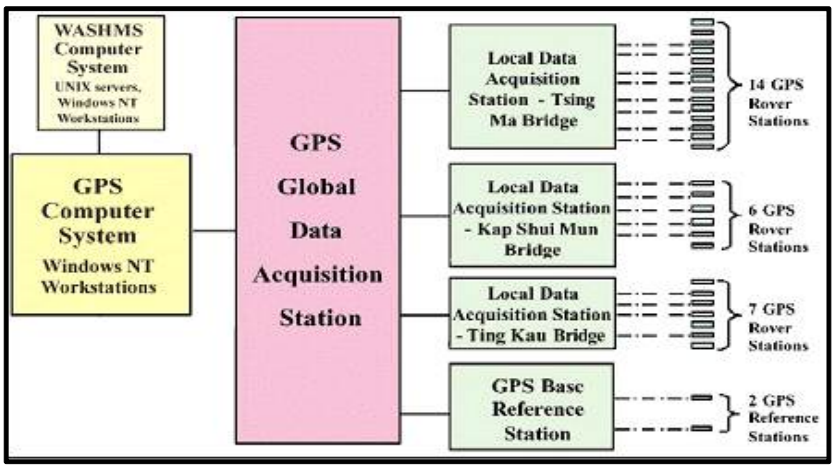
GPS를 이용하여 구조물의 거동을 감시하는 시스템은 홍콩, 일본, 미국 등에서는 수년전부터 연구되어 왔다. 특히, 홍콩의 칭마대교는 주탑과 주형에 GPS를 각각 설치하여 교량 동적거동을 감시하고 기존의 레벨 센서와 기타 계측기 관측 값을 비교함으로써 GPS 적용 타당성에 대해 연구하고 있다.(박기정, 2007)

GPS를 이용한 형상관리시스템으로써 고층건물을 포함하여 세장한 구조물의 변위 계측에 적용된 해외사례로는 Loves(1995) 등에 의하여 캘거리 타워에 GPS를 적용하였으며, Celebi(2000)는 GPS 계측기술을 간단한 실험모형과 고층빌딩에 적용하였으나 정밀도 실험에 의한 GPS의 계측오차를 파악하지 못하고 적용성 여부를 확인한 정도에 지나지 않았다. 이후 Tamura(2002) 등이 RTK-GPS를 적용하여 정밀도 실험을 하였으며 변위 2cm 이상, 고유주파수 2Hz 이하에서 적용성이 높음을 보고하였고 Breuer(2002) 등이 간단한 정밀도 실험을 통하여 타워와 굴뚝에 GPS 계측기술을 적용하였으나 정밀도 실험의 결과를 정량적으로 분석하지 못하였다. (박효선, 2005)

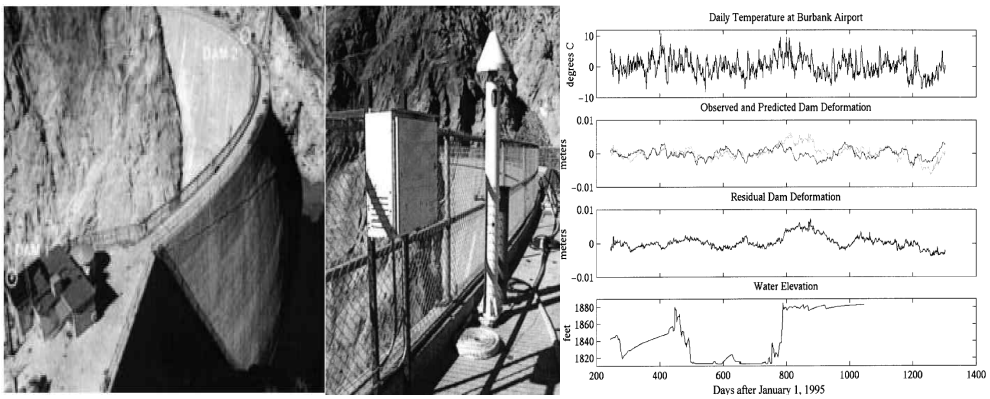
이외에 미국 캘리포니아에 위치한 다이아몬드벨리 댐과 파코이마 댐에도 GPS가 설치되어 있다. 특히 파코이마 댐의 경우, 노스리지 지진이 있은 후 파코이마 댐 내부에 설치해놓은 계측장비들이 망실됨에 따라 댐 거동 모니터링이 불가능하게 되어 수위 및 온도에 따른 영향을 분석하기 위해 GPS 상시 관측을 실시하고 있다.



<그림 2.2.19> 홍콩 칭마대교의 GPS 관측시스템 (좌 : 주탑, 우 : 보강형)

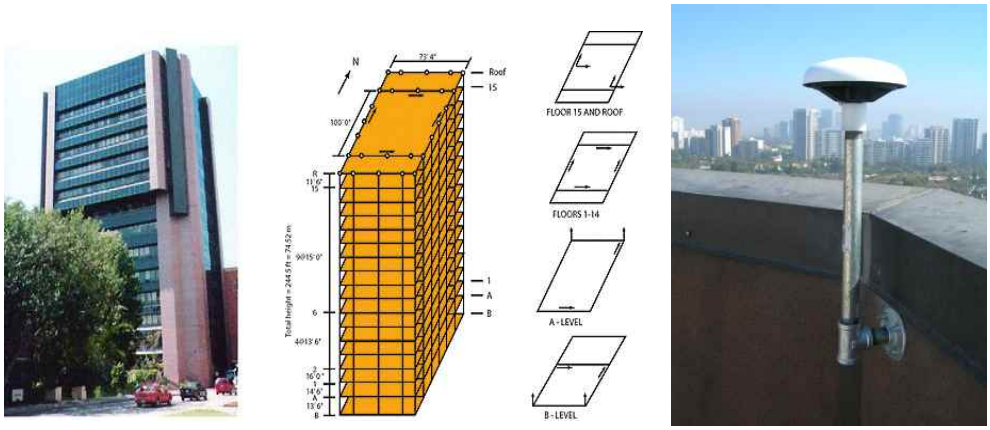


<그림 2.2.20> 홍콩 칭마대교의 GPS 관측 시스템 구성도 (박기정, 2007)



<그림 2.2.21> 댐에서의 GPS 계측 시스템 운영 (미국)

USGS(U.S. Geological Survey)에서는 UCLA 대학 내 17층 빌딩에 가속도계와 GPS를 설치하여 빌딩의 손상감지를 모니터링하고 있다.



<그림 2.2.22> 빌딩 손상감지 모니터링 (미국)

(http://factor.gps.caltech.edu/node/61)

미국공병대에서는 Libby Dam의 광학측정기를 GPS로 대체하여 댐 상류와 댐 좌안 사면에 각각의 GPS 기준국을 설치하여 댐 변위를 상시 관측하고 있다.



<그림 2.2.23> Libby Dam 사면 GPS 계측 관리 (미국)

(http://joongyup.egloos.com/9173838)

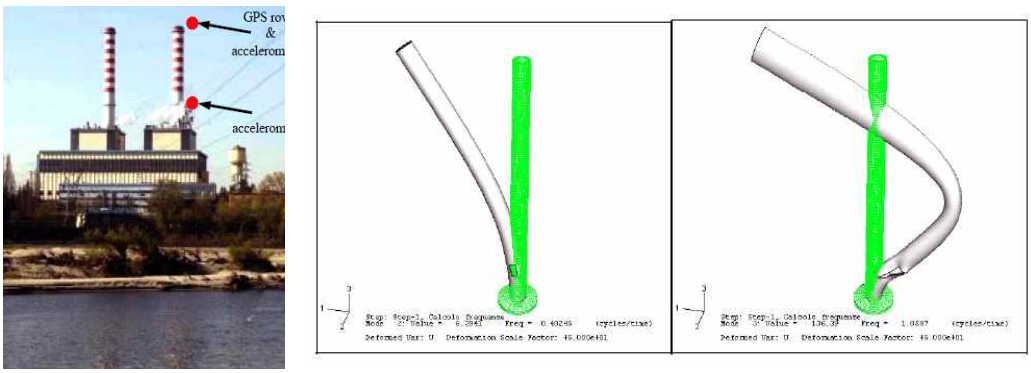
싱가폴에서는 강풍이 부는 Republic plaza 빌딩에 설치하여 구조물의 풍하중에 따른 영향을 모니터링하고 있다. 여기서 translational 및 torsional response를 검출한 후 스펙트럼 분석을 통하여 유지, 보수 관리자에게 경고 메시지를 송출하고 있

다(Clement Ogaja et al, 2001).



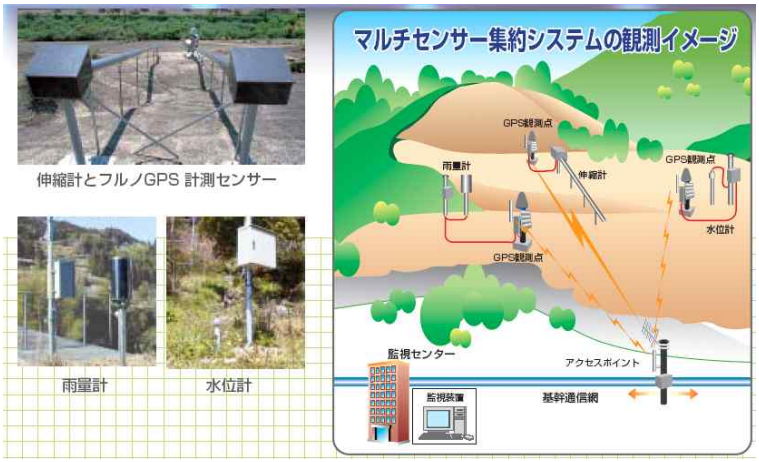
<그림 2.2.24> RTK-GPS를 이용한 고층건물 모니터링 (싱가폴)
(Clement Ogaja et al, 2001)

이탈리아의 경우 화력발전소 굴뚝 구조체를 GPS를 이용하여 계측하여 Structural identification analysis, Thermal analysis 및 Wind analysis를 통한 구조적 안전성 검토에 활용하고 있다(N.E. Cazzaniga et al, 2006).



<그림 2.2.25> 화력발전소 굴뚝 구조체의 안전성 검토 (이탈리아)
(N.E. Cazzaniga et al, 2006)

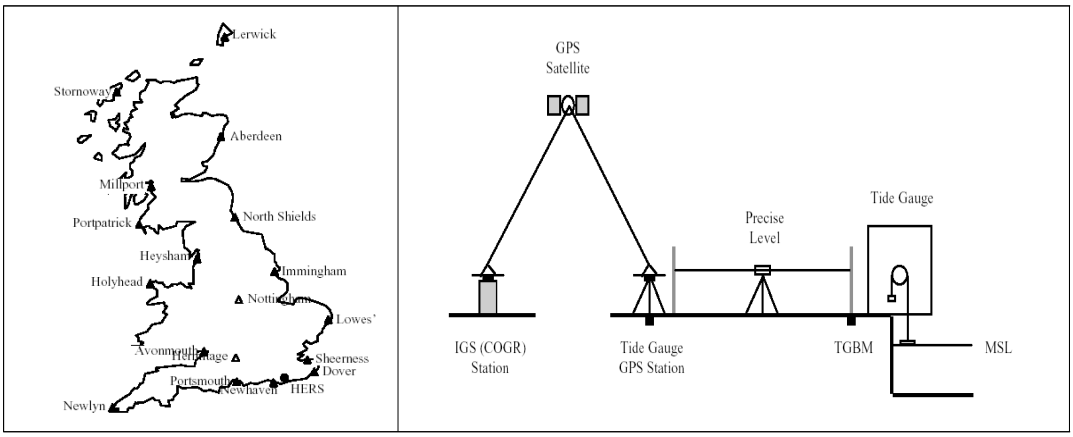
일본에서도 대형 사면 등에 1990년대 중후반부터 GPS 관측 시스템을 설치하여 운영하고 있다.



<그림 2.2.26> 사면 GPS 계측시스템 (일본)

(http://joongyup.egloos.com/m/9173832)

영국에서는 해수면 관측을 위하여 조류(tide) 게이지와 GPS의 레벨을 통합한 시스템을 운영 중에 있다(V.Ashkenazi et al, 1998). 이처럼, 전 세계적으로 GPS를 이용하여 다양한 구조물의 거동 관측 시스템이 활용되고 있음을 알 수 있었으며 콘크리트 고주탑의 시공 중 계측에도 충분히 활용 가능하다고 판단되었다.



<그림 2.2.27> 해안구조물 침하계측 (영국)

(V.Ashkenazi et al, 1998)

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 변단면 슬립폼 시스템 설계 및 제작기술

1. 개요

콘크리트 주탑 시공을 위한 거푸집은 용도, 모양, 사용 방법에 따라 다양하게 세분되나 크게 일반 거푸집과 시스템 거푸집으로 구분된다. 시스템 거푸집은 미리 거푸집과 이를 보강하는 지지물 등을 일체화, 유닛화, 대형화 시킨 것이다. 고소 구조물의 시공에서는 작업성과 안전성을 확보하기 위하여 ACS(Auto Climbing System)와 슬립폼시스템(Slipform System)을 많이 사용하며 거푸집과 발판이 일체화된 구조를 가지고 있다. 특히 슬립폼 공법은 24시간 연속 타설과 폼의 자동 상승 기술의 적용으로 공기 단축의 장점을 갖는 최첨단 공법이라 할 수 있다. 하지만 국내에서는 지금까지 슬립폼시스템에 대한 설계와 제작을 수행한 경험이 없고 오직 외국 기술에 의존해 왔다. 서해대교, 마창대교, 이순신대교 등에서는 오스트리아의 G.B.G사의 설계 및 제작기술을 전적으로 수입하고 중소 전문업체가 시공하는 실정이다(백한솔 등 2011, 천재원 등 1997). 이러한 이유로 국내에서는 슬립폼 공법에 대한 연구가 일부 진행되었으나(서진선 등 2003) 슬립폼시스템의 설계기술을 개발하기 위한 체계적인 연구는 진행되지 못하였다. 따라서 콘크리트 주탑 시공을 위한 첨단 공법인 슬립폼시스템의 설계와 제작기술을 국산화하여 장대교량의 건설 자립화가 필요하다.

콘크리트 고주탑을 연속적으로 시공하는 슬립폼 공법은 거푸집을 탈착시키지 않고 콘크리트 타설과 거푸집의 상승이 연속적으로 이루어지기 때문에 24시간 연속 작업이 가능한 공법이다. 수직 Jack이 콘크리트 속에 묻혀 있는 Rod를 물고 요크(Yoke)와 거푸집(Form-Panel)을 상승시키기 때문에 콘크리트의 연속 시공이 가능하다. 슬립폼시스템은 콘크리트 타설을 위한 콘크리트 사일로(Concrete Silo), 상부 작업대(Top-Deck), 래티스 트러스(Lattice Truss), 요오크(Yoke), 상승장치, 가설작

업대(Working-Deck), 하부작업대(Hanging-Deck), 폼패널(Form-Panel) 등으로 구성되며 각각의 구성요소에 대한 구조개선 및 최적화 연구를 수행할 필요가 있다.

이 연구에서는 먼저 변단면 슬립폼시스템 설계 현황을 파악하고자 서해대교와 마창대교, 이순신대교, 영흥복합 화력발전소 등에서 해외기술을 수입하여 적용한 변단면 슬립폼시스템을 분석하였다. 이를 통해 3차원 변단면 콘크리트 고주탑의 시공을 위한 슬립폼 대응 방안을 도출하였다. 특히 해외 최신 기술이 적용된 270m의 이순신대교 주탑과 영흥복합 화력발전소 연돌에 적용된 슬립폼시스템을 정밀 분석하여 국산화를 넘어 세계 기술을 추월하는 WBT(World's Best Technology)형 변단면 슬립폼시스템을 도출하고자 하였다. 먼저 변단면 슬립폼시스템을 구성요소별로 세부적으로 분해하여 그 구조와 작동원리 등을 파악하였고, 구조계산의 근간이 되는 각종 하중들을 추출하여 변단면 슬립폼시스템 설계 기반자료를 확보하였다. 또한 상용 프로그램인 마이다스를 사용하여 구조 모델을 해석하고 설계 값과 비교하였으며 하중 조합에 대한 노하우를 습득하였다. 이를 통해 변단면 슬립폼시스템에 대한 상세 설계 기술을 확보할 수 있었다.

구체적으로 1단계 연구에서는 슬립폼시스템 설계에 필요한 요소기술들을 개발하고 기본시스템을 설계하였다. 이를 위해 1단계 2차년도에는 국내 장대교량 주탑 시공에 적용된 슬립폼시스템 자료를 수집하여 분석하였다. 수집된 자료를 바탕으로 슬립폼시스템의 구성요소를 상세분석하고 구조 개선사항을 도출하였다. 또한 변단면 시공을 위한 슬립폼 대응 방안을 도출하였다. 3차년도에는 G.B.G사의 설계 및 제작기술로 시공된 이순신대교 주탑의 슬립폼시스템을 검토하고 구조계산서를 분석하여 슬립폼시스템의 최적 설계를 위한 연구를 수행하였다. 4차년도에 변단면 슬립폼의 프로토타입인 기본시스템을 설계하였다.

2단계 연구에서는 개발된 요소기술들을 바탕으로 시험시공을 고려한 변단면 슬립폼의 설계 도면을 완성하였다. 5차년도에 10m 높이의 타워 1기 시공을 위한 슬립폼시스템을 상세 설계를 수행하였으며, 6차년도에는 10m 높이의 타워 2기 시공을 위한 변단면 슬립폼의 상세 설계와 도면을 작성하였다. 슬립폼시스템은 작업 편의성을 고려하여 구성 요소들을 적절히 배치하고 구조해석 및 설계를 통하여 안전성을 검토하였다. 또한 BIM을 통한 디지털 가상 시공으로부터 각각의 부재 요소들의 변화 위치를 확인하고 조립과 설치 시 부재들 간의 간섭 여부를 확인하였다.

3단계 연구에서는 개발 기술들의 실용화를 위한 지침작성과 시험시공에 필요한

설계검토를 수행하였다. 7차년도에는 슬립폼 장비 운용 지침을 작성하고, 3차 시험시공을 위하여 BIM을 이용한 슬립폼 설계 검토를 추가로 수행하였다. 8차년도에는 슬립폼시스템의 실용화를 위한 건설신기술 등록을 추진하였는데 이를 위한 원가계산, 표준품셈 마련, 경제성 분석 등을 수행하였다.

2. 기존 슬립폼시스템의 구성 및 설계기술 분석

지역명소로서 Landmark 역할을 하는 장대교량은 미적인 요소가 매우 중요한 가치라고 인식되고 있다. 따라서 최근에 건설된 서해대교를 비롯하여 인천대교, 이순신대교, 울산대교 등의 주탑들은 미적 효과를 극대화하기 위해 수직으로 3차원 곡선 형상을 가진다(그림 3.1.1). 여기에 경제성을 최대한 확보하기 위해 주탑 하부는 크게 하고 상부는 작게 하여 단면 효율을 높이도록 설계되고 있다. 이와 같이 수직으로 형상이 3차원으로 변하고 단면이 변화하는 콘크리트 주탑의 시공은 난이도가 매우 높아 첨단 기술을 적용하여 수행되어야 한다. 서해대교와 이순신대교에서는 외국에서 비싼 로열티를 지불하고 3차원 변단면 슬립폼시스템과 가설 기술을 도입하였으며, 인천대교와 울산대교는 현장 여건상 공기 단축을 포기하고 국내 기술진으로 해결이 가능한 ACS 공법을 채용할 수밖에 없었다.

본 연구에서는 최근 완공된 이순신대교의 주탑 시공에서 적용한 슬립폼시스템을 정밀 분석하였다. 먼저 변단면 슬립폼시스템을 구성 요소별로 분해하여 그 구조와 작동원리 등을 파악하였고, 구조계산의 근간이 되는 각종 하중들을 추출하여 변단면 슬립폼시스템 설계 자료를 확보하였다. 구조해석 모델을 상용 프로그램인 마이다스를 사용하여 해석하고 설계 값과 비교하였으며 하중 조합에 대한 노하우를 습득하였다. 이를 통해 변단면 슬립폼시스템에 대한 상세 설계 기술을 확보할 수 있었다.



<그림 3.1.1> 3차원 곡선 형상 변단면 콘크리트 주탑(이순신대교)

가. 슬립폼시스템 구성요소 분석

최근 완공된 이순신대교에서 적용한 슬립폼시스템(그림 3.1.2)은 거푸집(panel), 요크(yoke), 강봉(rod), 작업발판(deck), 수평트러스(lattice girder)로 구성되어 있으며, 철근 및 각종 자재 인양을 위한 데릭 크레인(derrick crane)이 탑주 당 1대씩 설치되어 철근 등 각종 자재를 인양하는데 사용되었다. 콘크리트는 Schwing Concrete Pump를 이용하여 압송하여 슬립폼의 상부데크 위에 설치된 그림 3.1.3과 같은 콘크리트 사일로(Silo)에 받은 후 콘크리트 타설을 진행하고 있다.

요크(Yoke)는 그림 3.1.4와 같이 수직으로 된 2개의 Leg와 수평재(Channel)로 구성되어 있는데 슬립폼시스템의 뼈대에 해당된다. 요크는 유압잭의 인상력을 지지하여 거푸집을 끌어올리고 각종 작업발판을 매달고 있는 슬립폼의 중심 부재이다. 요크는 변단면에 대응할 수 있는 가변식과 등단면에 대응하는 고정식으로 구분할 수 있으며 설계 시 각각의 특성을 고려하여 해석을 수행하고 검토하여 단면을 결정해야 한다.



<그림 3.1.2> 슬립폼시스템



<그림 3.1.3> 콘크리트 사일로





<그림 3.1.4> 요크

작업발판(Deck)은 콘크리트 타설과 철근 조립 및 배치, 양생, 콘크리트 면 관리 등을 위해 노무자의 실질적인 작업이 이루어지는 공간으로 Top deck, Working deck, Hanging deck 등 3가지로 구분할 수 있다. 슬립폼시스템의 최상부에 위치하는 Top Deck은 수직철근을 크레인으로 운반하여 적재하고 콘크리트 타설을 위한 사일로, 그리고 기타 작업을 위한 공간이다. 슬립폼시스템 중간에 있는 Working Deck은 콘크리트 타설 시 진동 다짐 작업과 철근작업, 잭작업 등 실질적인 작업이 이루어지는 공간으로 요크레그(Yoke-Leg) 에 브라켓을 부착하고 데크를 설치한다. Hanging Deck은 슬립업이 되고 난 뒤에 탈형된 콘크리트면의 상태를 검사하고 필요시 미장을 할 수 있는 작업공간이다.



(a) Top Deck (b) Working Deck (c) Hanging Deck

<그림 3.1.5> 작업발판

슬립폼 인상용 유압잭(Jack)은 자벌레 잭이라 불리는 것으로 주탑에 미리 배치된 강봉(Rod)을 잡고 올라가는 구조를 가지고 있다. 이 유압잭에 의하여 전체 슬립폼 시스템은 상승을 하게 되는데 보통 1개 유압잭 인상력은 60kN이 일반적이며 필요에 따라 30kN부터 150kN까지 선택하여 사용할 수 있다. 이순신대교에서는 60kN 잭을 사용하였으며 탑주 당 44개이므로 전체 용량은 2,640kN 정도이다.



<그림 3.1.6> 슬립폼 인상용 유압잭

거푸집(Form-Panel)은 콘크리트 타설에 따른 측압을 지지하기 위해 수직 보강재를 용접하여 부착한 형태를 가지고 있으며 변단면에 따른 거푸집 제거를 위해 그림 3.1.7과 같이 단면 모서리 부분에 ㄷ형 채널로 되어 있다. 필요에 따라 ㄷ형 채널을 제거하게 되어 있다. 거푸집의 측압 및 마찰하중은 수평으로 배치된 I형강 Waler를 통해 요크에 전달된다.



<그림 3.1.7> 변단면 대응 거푸집 구조

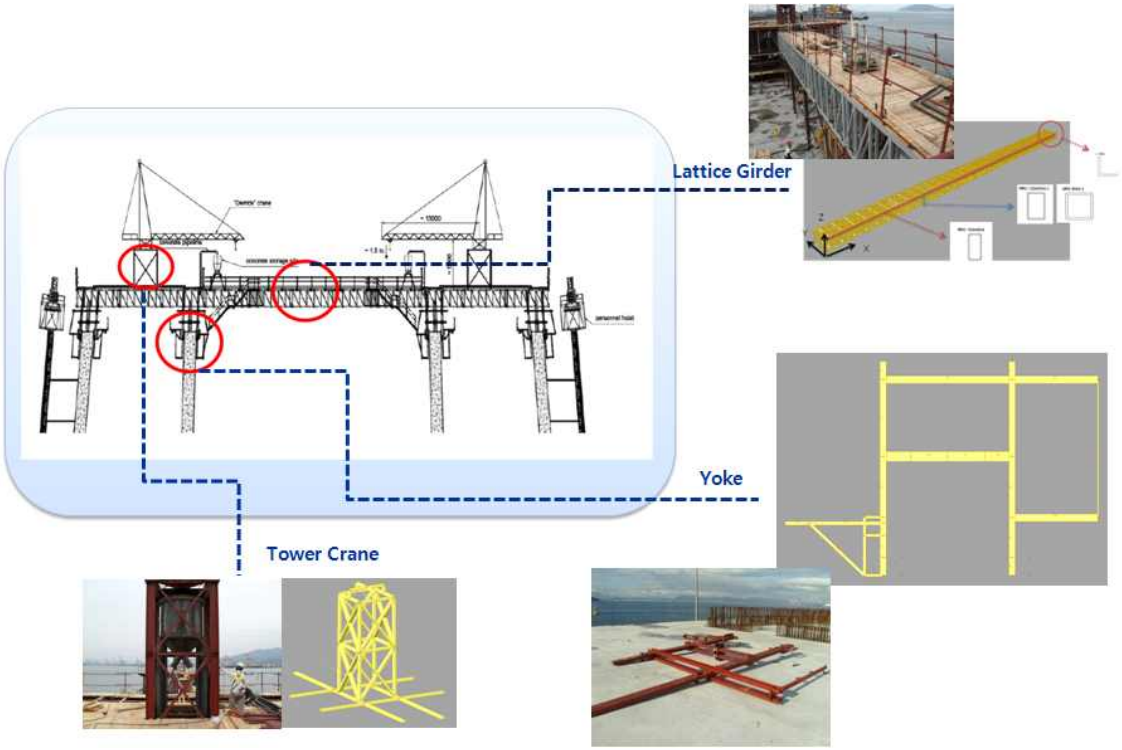
이순신대교는 주탑의 2개 Leg가 거의 동시에 시공이 이루어지므로 양쪽 작업을 효율적으로 진행하고 작업자의 내업 공간, 각종 장비 보관 등을 위해 수평트러스(Lattice Girder)를 설치하였다. 수평트러스는 주탑의 양쪽 탑주를 횡단하여 설치되며, 작업통로로도 사용되고 형상관리를 위한 기준점이 설정되어 있다. 이 수평트러스는 고공에 매달려 있는 구조이므로 풍하중에 대하여 특별한 고려가 필요하다.



<그림 3.1.8> 수평트러스

나. 변단면 슬립폼시스템의 구조해석 및 설계 분석

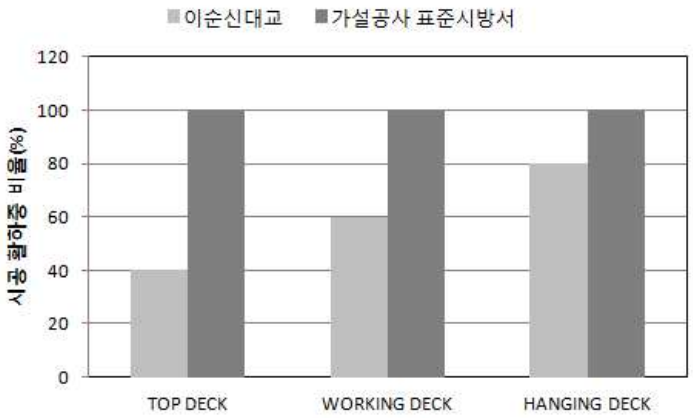
슬립폼시스템은 크게 그림 3.1.9와 같이 각종 자재를 운반하는 크레인타워, 잭이 설치되어 슬립폼시스템 전체의 하중을 지지하는 요크, 그리고 2개의 Leg를 연결하는 수평트러스에 대한 구조해석을 통하여 설계 검토를 실시하고 있다.



<그림 3.1.9> 슬립폼시스템 구조 검토 요소

슬립폼시스템의 설계 시에는 고정하중과 활하중을 고려하고 있다. 고정하중으로는 부재 자중으로 강재 $78.50kN/m^3$, 콘크리트 $25.00kN/m^3$, 목재 $6kN/m^3$을 고려하고 추가하중으로 5cm 두께의 목재 발판과 콘크리트 버켓에 10kN, 울타리에 $0.4kN/m$을 고려하고 있다. 활하중으로는 작업발판에서의 시공활하중, 철근 및 기타 작업을 위하여 작업발판에 적재하는 적재하중, 슬립폼 인상에 따른 마찰하중, 콘크리트 측압, 풍하중 등을 고려하고 있다.

콘크리트 타설시 거푸집에 작용하는 측압은 국내 가설공사 표준시방서(2006)는 거푸집에 등분포로 작용하도록 규정하고 있으나, 이순신대교 슬립폼 설계에서는 콘크리트 단위질량을 고려하여 굳지 않은 콘크리트 영역까지 선형으로 증가하고, 경화 콘크리트 영역에서는 그 크기가 감소하는 삼각형 형태의 하중을 사용하였다.



<그림 3.1.10> 시공활하중 크기 비교

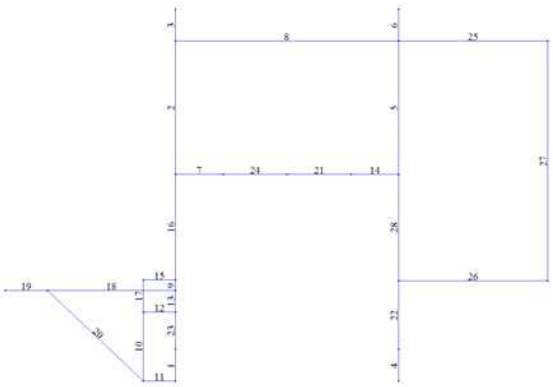
그림 3.1.11은 요크가 설치된 모습이고, 그림 3.1.12는 보 요소를 사용하여 모델링한 것이다. 여기서 표 3.1.3과 같이 17가지의 하중을 고려하여 해석을 수행하였다.

각 하중들을 재하한 요크레그 모델에 대한 구조해석을 상용 프로그램인 MIDAS를 이용하여 실시하였다. 요크 단면의 설계 검토를 위하여 표 3.1.2와 같이 3가지 하중 조합을 고려하였다. 슬립폼 시공을 위한 작업하중이 슬립폼 내부에서만 작용하는 경우와 슬립폼 내부 및 외부에서 동시에 작용하는 경우를 구분하였으며, 극대풍하중으로 인하여 작업이 정지되는 상황 등을 추가로 검토하였다.

- 하중조합 1 : 슬립폼 내부 작업 상황
- 하중조합 2 : 슬립폼 내부/외부 동시 작업 상황
- 하중조합 3 : 극대 풍하중 작용 상황



<그림 3.1.11> 요크



<그림 3.1.12> 요크 해석 모델

<표 3.1.1> 하중 종류

구분	하중종류
LC1	structural dead load
LC2	dead load platform beam
LC3	live load from platform beam
LC4	dead load working platform
LC5	concrete pressure
LC6	friction force from sliping
LC7	deadload hanging platform
LC8	liveload hanging platform
LC9	live load working platform
LC10	wind
LC11	wind load 60m/s
LC12	storage load
LC13	live load hanging deck2
LC14	live load working deck2

<표 3.1.2> 요크의 하중조합

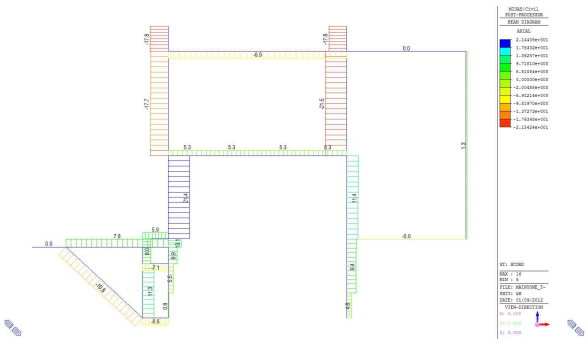
하중 조합	자중	Platform Beam		Working platform			Hanging platform			콘크리트 측압	마찰	풍하중	
		사하중	활하중	사하중	활하중1	활하중2	사하중	활하중1	활하중2			사용 상태	극대
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC9	LC14	LC7	LC8	LC13	LC5	LC6	LC10	LC11
CO1	○	○	○	○	○		○	○		○	○	○	
CO2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
CO3	○	○		○			○						○

표 3.1.3은 해석에서 고려한 3가지 하중조합을 적용하였을 때 유압잭 위치에서 발생하는 반력 크기를 정리한 것이다. GBG사에서 실시한 이순신대교 슬립폼 구조계산서와 비교하였을 때 거의 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

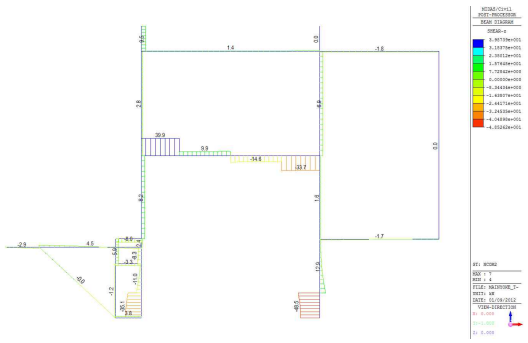
<표 3.1.3> 잭의 반력 비교

	하중조합1		하중조합2		하중조합3	
	GBG [kN]	MIDAS [kN]	GBG [kN]	MIDAS [kN]	GBG [kN]	MIDAS [kN]
P1	31.09	31.00	21.10	15.40	3.72	3.60
P2	24.59	24.50	18.62	18.50	4.77	4.70
P3	24.58	20.20	26.30	23.40	6.18	6.10

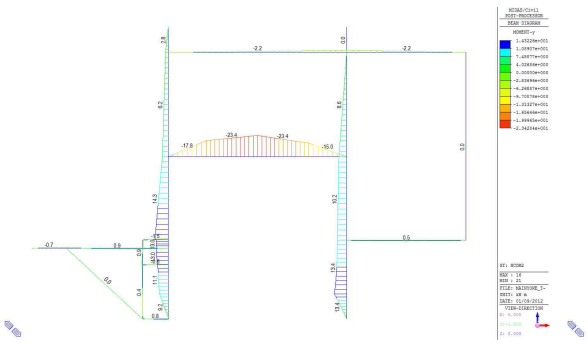
3가지 하중조합을 적용하였을 때의 요크에 발생되는 부재력을 그림 3.1.13 ~ 3.1.21에 나타냈다. 그림 3.1.13 ~ 3.1.15는 슬립폼 내부에서만 작업하는 경우(하중조합 1), 요크에서 발생하는 축력, 전단력, 모멘트를 나타낸 것이다. 그리고 3.1.16 ~ 3.1.18은 슬립폼 내외부에서 동시에 작업을 할 때, 요크에 발생하는 축력, 전단력, 모멘트이고 그림 3.1.19 ~ 3.1.21은 극대 풍하중이 작용하는 경우 축력과 전단력, 모멘트이다. 그림 3.1.22는 발생하는 최대모멘트만을 정리하여 나타낸 것이다.



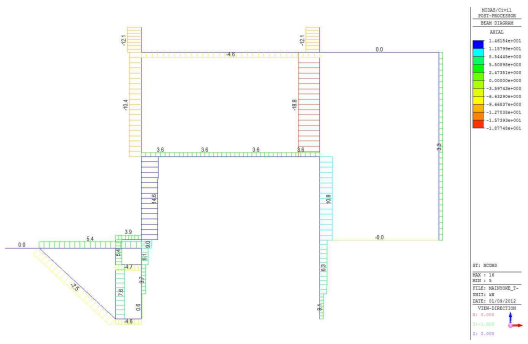
<그림 3.1.13> CO1-축력



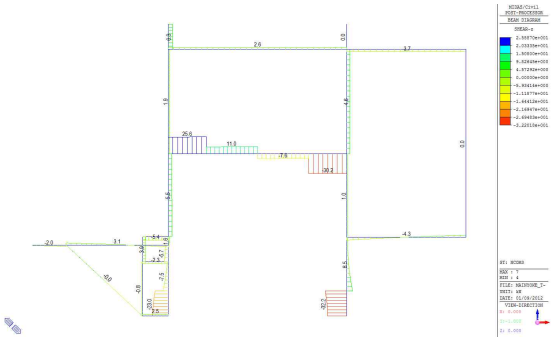
<그림 3.1.14> CO1-전단력



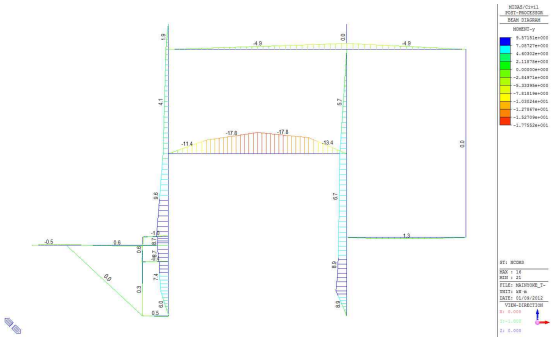
<그림 3.1.15> CO1-모멘트



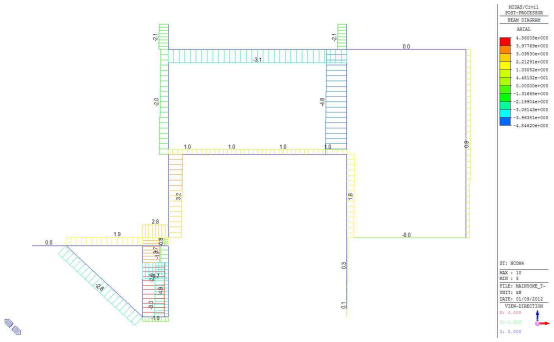
<그림 3.1.16> CO2-축력



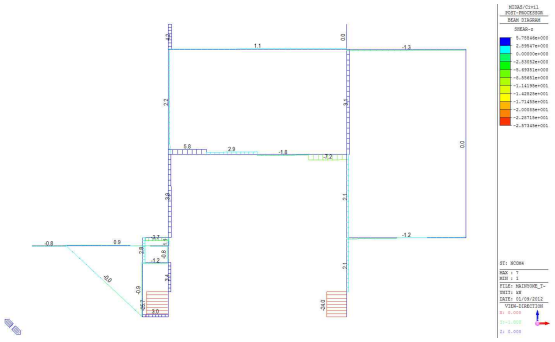
<그림 3.1.17> CO2-전단력



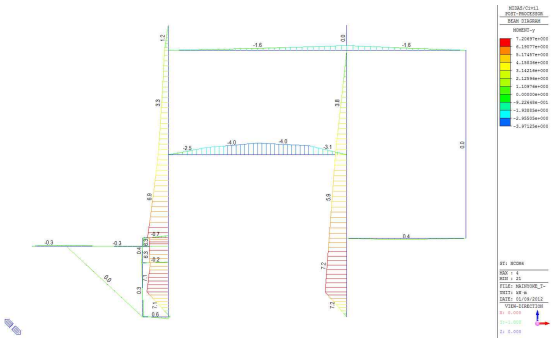
<그림 3.1.18> CO2-모멘트



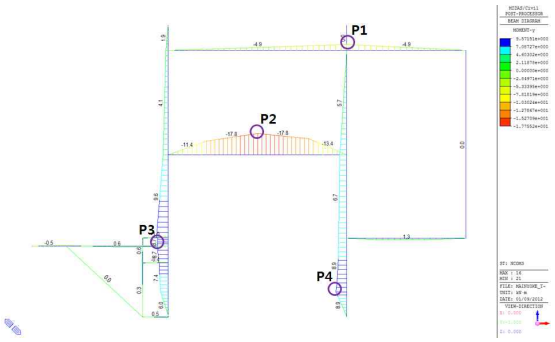
<그림 3.1.19> CO3-축력



<그림 3.1.20> CO3-전단력



<그림 3.1.21> CO3-모멘트



<그림 3.1.22> 요크 부재 최대 모멘트

각 재료의 허용응력과 MIDAS로 수행한 요크해석에 의한 최대 응력의 비율을 표 3.1.4에 요약 정리하였다. 사용된 재료의 허용응력을 고려하였을 때 요크는 충분한 안전율을 가지고 있음을 알 수 있다.

<표 3.1.4> 요크의 최대응력과 허용응력

단면	휨응력[kN/cm^2]		응력 비	전단응력[kN/cm^2]		응력비
	최대응력	허용응력		최대응력	허용응력	
PRO 200x100x6.3	7.49	25	0.30	1.69	14.43	0.12
FlatBar 100/160	5.48	28.64	0.19	0.374	16.53	0.02
RO 48.3x4.0	14.5	21.36	0.68	1.6	12.33	0.13
PRO 100x60x5.0	1.8	32.27	0.06	0.554	18.63	0.03
2UR U120-100	1.44	21.36	0.07	0.167	12.33	0.01
RD 20	0	20.45	0	0	11.81	0

3. 변단면 슬립폼시스템의 프로토타입 설계

가. 개요

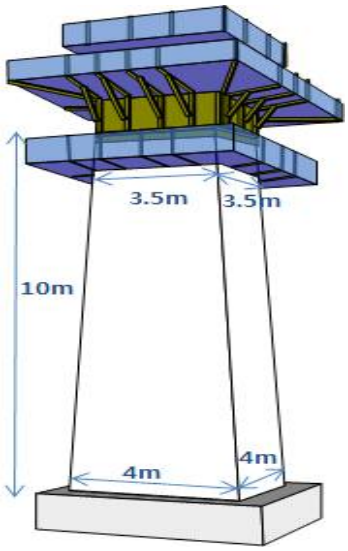
이 연구에서는 장대 교량의 건설기술 자립화를 위해서 변단면 콘크티트 고주탑의 급속시공에 필요한 슬립폼시스템의 설계 및 제작기술을 개발하였다. 기존 공법 자료를 수집하여 가설 장비들의 구성 요소를 분해하고 구조계산서 및 도면을 정밀 분석하여 설계 기술을 확보하였다. 이를 토대로 1차 시험시공을 위한 변단면 슬립폼시스템의 프로토타입 설계를 수행하였다.

기존 자료들의 정밀 분석으로 습득된 슬립폼시스템의 구조 및 작동원리, 설계를 위한 하중 조합 및 구조검토 기술을 바탕으로 변단면에 대응 가능한 슬립폼시스템의 프로토타입 설계를 수행하고 설계도면을 작성하여 변단면 슬립폼시스템에 대한 상세 설계기술을 확보할 수 있었다.

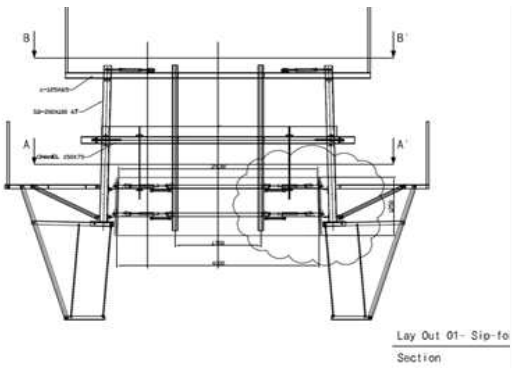
상세 설계된 프로토타입으로 콘크리트 주탑에 대한 시험시공을 2012년 한국건설기술연구원 부지에서 실시였는데, 국토교통과학기술진흥원 및 초장대교량사업단 관계자, 기타 전문가들을 대상으로 공개적으로 진행되었다. 현장 여건을 고려하여 1차 시험시공용 콘크리트 주탑은 그림 3.1.23과 같이 높이가 10m 이며, 하부 단면이 4m x 4m, 상부 단면은 3.5m x 3.5m의 변단면으로 계획하였다.

나. 프로토타입 시스템 구성

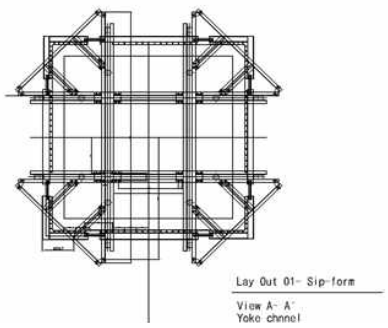
슬립폼시스템의 기본 구성은 거푸집(form panel), 요크(yoke), 유압잭(jack), 작업발판(deck) 등으로 되어 있다. 거푸집 높이는 기존의 시공 사례와 철근 조립의 용이성을 고려하여 1.25m로 결정하였다. 요크와 유압잭은 8개를 배치하는 것으로 하였으며, 작업발판은 상부작업대(top deck), 가설작업대(working deck), 하부작업대(hanging deck)등 3단으로 구성하였다. 슬립폼 기본 시스템의 레이아웃은 그림 3.1.24 및 그림 3.1.25와 같다.



<그림 3.1.23> 프로토타입 실증 시험시공 주탑



<그림 3.1.24> 측면도

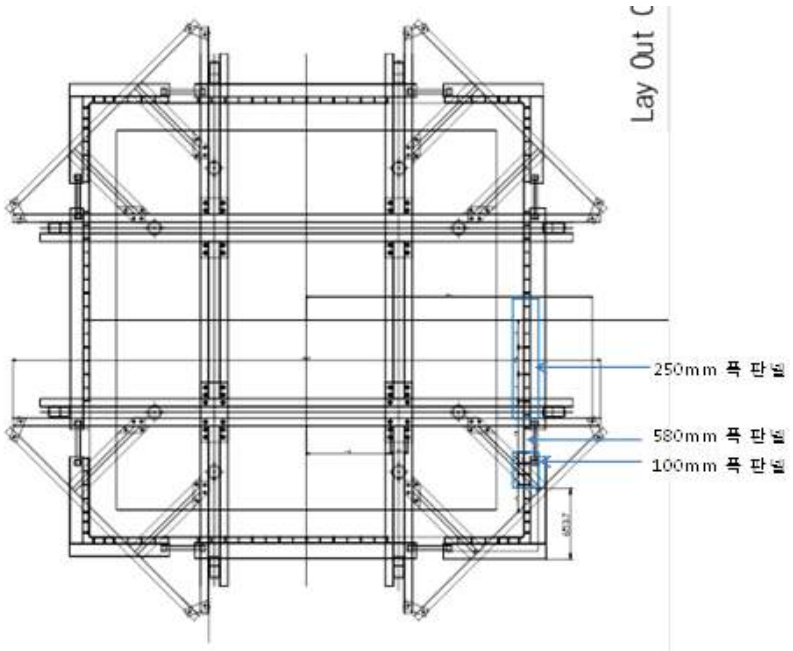


<그림 3.1.25> 평면도

슬립폼시스템이 변단면에 대응하기 위해서는 슬립폼을 구성하는 요크, 거푸집, 월러 등의 부재들이 주탑 높이에 따라 치수 조절이 가능하도록 설계되어야 한다. 이를 위하여 다음 사항들을 고려하였다.

① 거푸집 치수 조절을 위한 검토

거푸집 치수 조절을 위해서는 판넬, 월러 치수 조절이 필요하다. 판넬은 폭 250mm를 기본으로 하였으며, 치수 변화가 필요한 영역에서는 100mm와 580mm의 판넬로 구성하였다(그림 3.1.26).



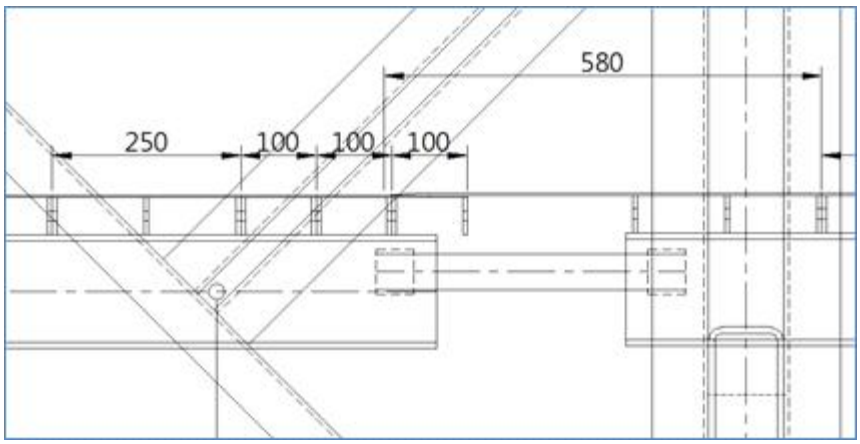
<그림 3.1.26> 거푸집 판넬 구성

그림 3.1.27은 치수 변화가 이루어지는 위치에서의 판넬 상세 도면이다. 거푸집의 단면이 줄어듦에 따라 580mm 판넬과 100mm의 판넬이 겹쳐지도록 하고, 두 판넬이 완전히 겹쳐지게 되면 겹쳐진 100mm의 판넬을 제거함으로써 거푸집 크기를 조절할 수 있다. 월러는 판넬과 요크-레그를 연결하고 콘크리트 측압을 지지하는 역할을 한다. 월러 치수는 그림 3.1.28과 같이 월러 상단에 위치한 스핀들을 사용하여 스핀들의 조임에 따라 변화된다.

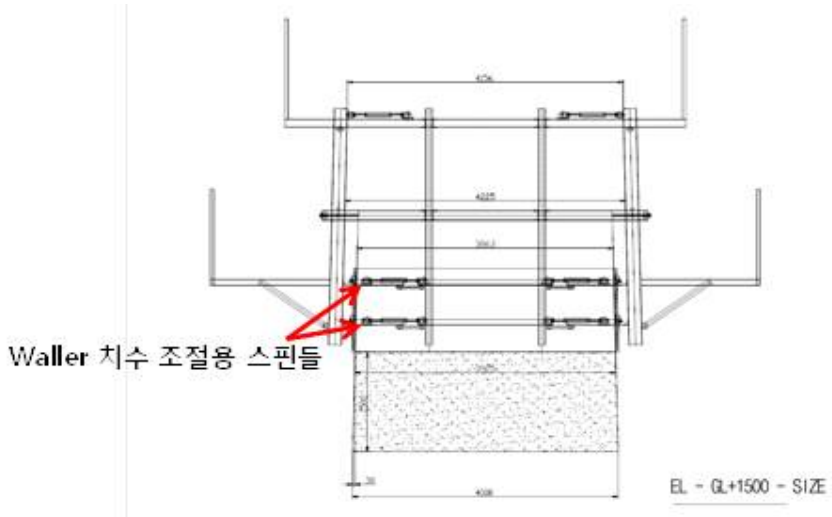
② 요크 치수 조절을 위한 검토

요크는 요크-레그와 요크-채널로 구성되며 치수 조절은 그림 3.1.29의 상·하 스핀들을 이용한다.

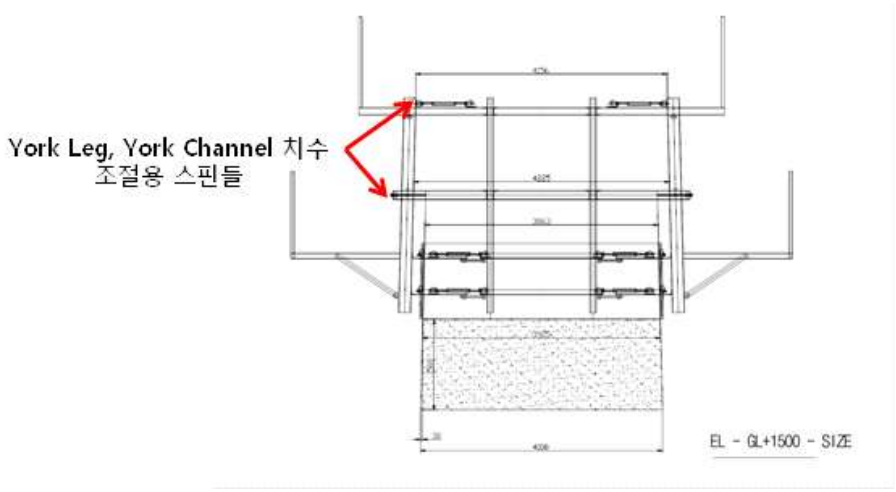
그림 3.1.30은 최종적으로 도출된 슬립폼시스템을 나타내고 있다. 변단면 주탑 형상을 구현하기 위하여 A, B, C, D지점에서는 각기 다른 폭을 갖게 된다. 기준 높이 1.25m까지의 슬립폼 상승에 필요한 A, B, C, D 지점에서의 슬립폼 치수변화를 표 3.1.5에 나타내었다. 이 목표치수에 맞게 스핀들을 조정하도록 작업자에게 지시하여야 한다.



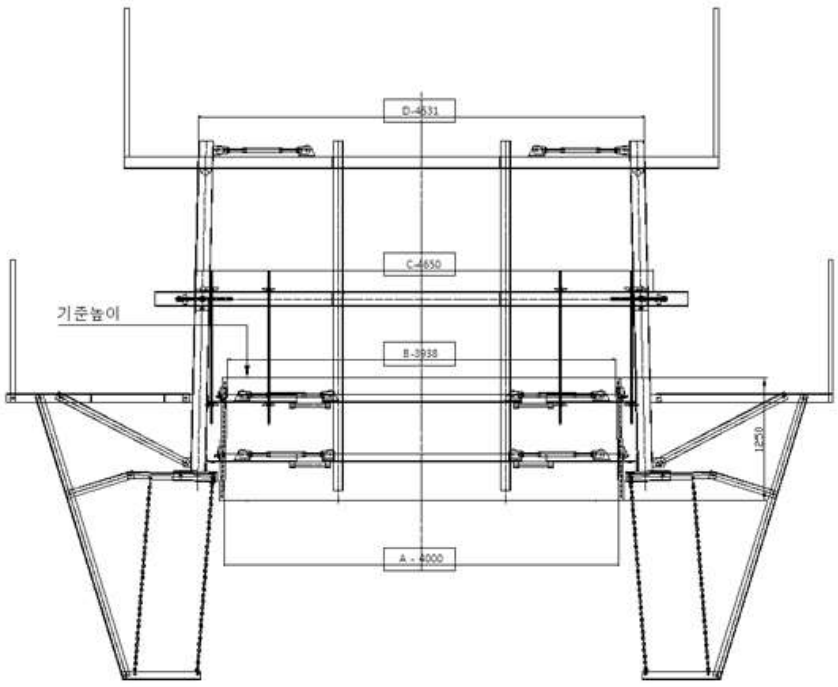
<그림 3.1.27> 거푸집 크기 조정



<그림 3.1.28> 월러 치수 변경용 스핀들



<그림 3.1.29> 요크 치수 조절용 스핀들



<그림 3.1.30> 슬립폼시스템의 프로토타입

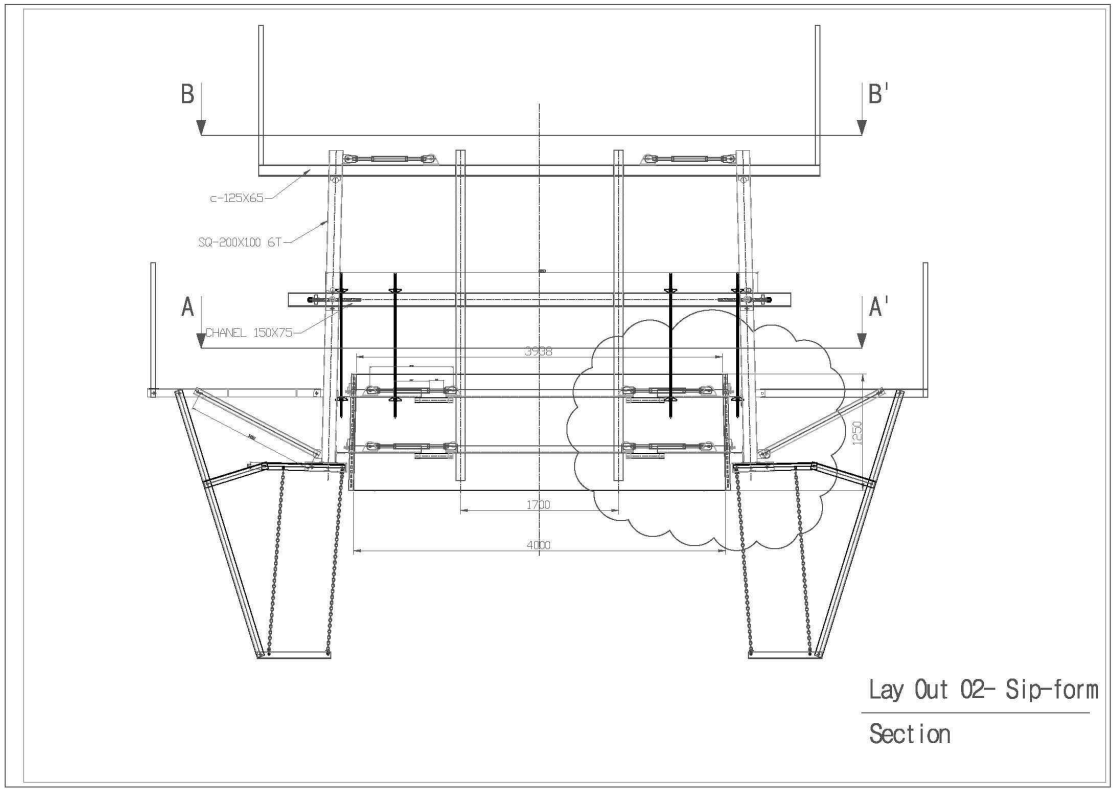
<표 3.1.5> 주탑 시공높이에 따른 슬립폼 변단면 치수

높이 [mm]	위치			
	A[mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
1250	4000	3938	4650	4531
1500	3987.5	3925.5	4637.5	4518.5
1750	3975	3913	4625	4506
2000	3962.5	3900.5	4612.5	4493.5
2250	3950	3888	4600	4481
2500	3937.5	3875.5	4587.5	4468.5
2750	3925	3863	4575	4456
3000	3912.5	3850.5	4562.5	4443.5
3250	3900	3838	4550	4431
3500	3887.5	3825.5	4537.5	4418.5
3750	3875	3813	4525	4406
4000	3862.5	3800.5	4512.5	4393.5
4250	3850	3788	4500	4381
4500	3837.5	3775.5	4487.5	4368.5
4750	3825	3763	4475	4356
5000	3812.5	3750.5	4462.5	4343.5
5250	3800	3738	4450	4331
5500	3787.5	3725.5	4437.5	4318.5
5750	3775	3713	4425	4306
6000	3762.5	3700.5	4412.5	4293.5
6250	3750	3688	4400	4281
6500	3737.5	3675.5	4387.5	4268.5
6750	3725	3663	4375	4256
7000	3712.5	3650.5	4362.5	4243.5
7250	3700	3638	4350	4231
7500	3687.5	3625.5	4337.5	4218.5
7750	3675	3613	4325	4206
8000	3662.5	3600.5	4312.5	4193.5
8250	3650	3588	4300	4181
8500	3637.5	3575.5	4287.5	4168.5
8750	3625	3563	4275	4156
9000	3612.5	3550.5	4262.5	4143.5
9250	3600	3538	4250	4131
9500	3587.5	3525.5	4237.5	4118.5
9750	3575	3513	4225	4106
10000	3562.5	3500.5	4212.5	4093.5
10250	3550	3488	4200	4081
10500	3537.5	3475.5	4187.5	4068.5
10750	3525	3463	4175	4056
11000	3512.5	3450.5	4162.5	4043.5

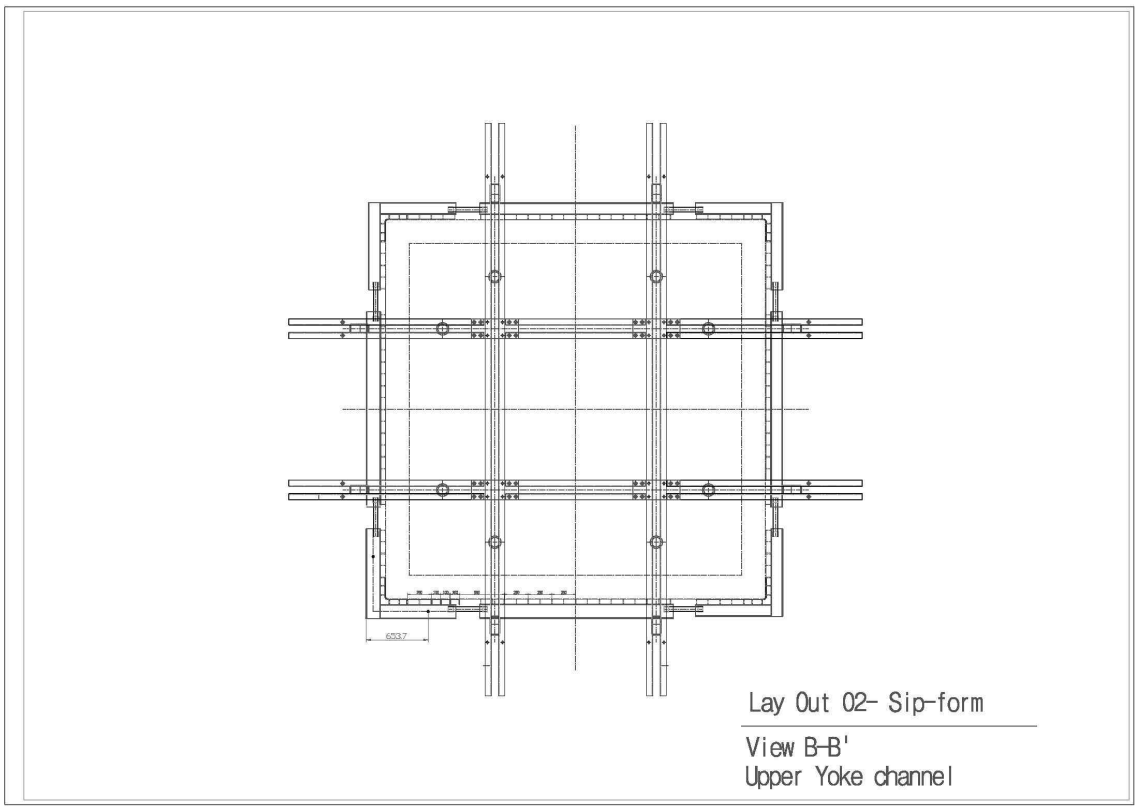
프로토타입 슬립폼시스템의 상세 설계도면은 표 3.1.6과 같이 작성하였으며 이중 대표적인 것을 그림 3.1.31~3.1.36에 나타냈다.

<표 3.1.6> 슬립폼 기본시스템 상세 설계 도면 목록

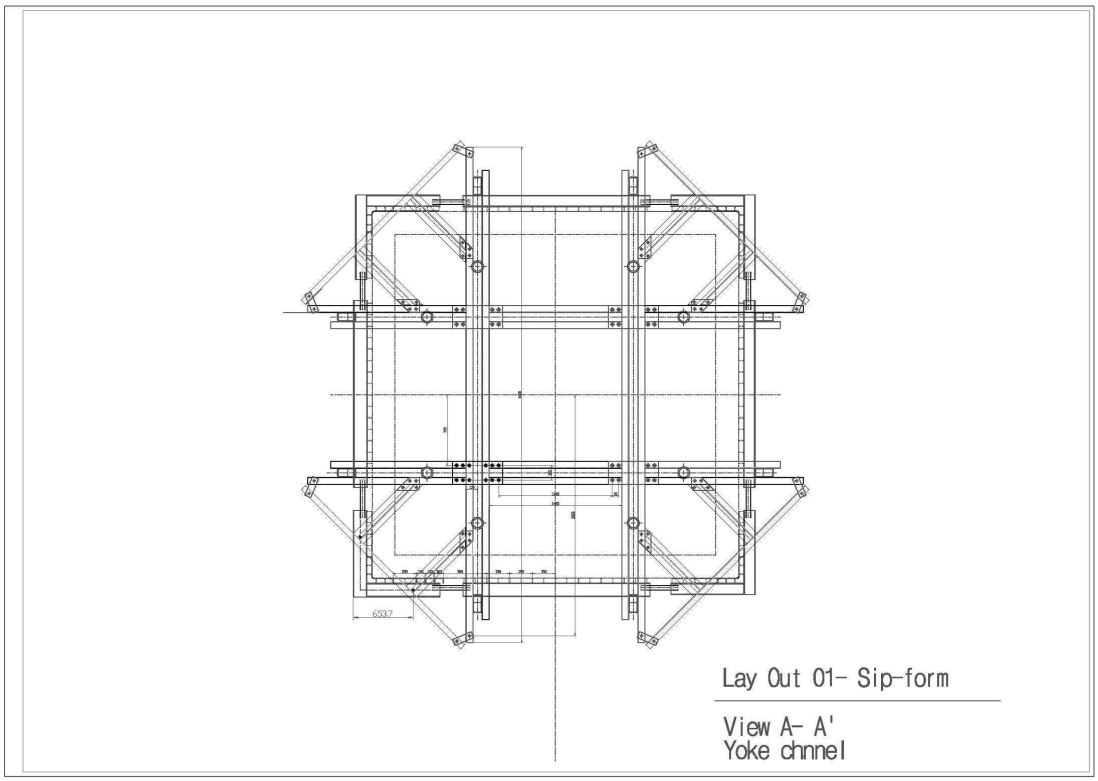
	목록	비고
1	슬립폼시스템 전체 레이아웃	그림 3.1.31
2	요크-채널 배치도(Upper Yoke Channel)	그림 3.1.32
3	요크-채널 배치도(Yoke Channel)	그림 3.1.33
4	상부데크(Top Deck)	그림 3.1.34
5	작업데크(Working Deck)	그림 3.1.35
6	하부데크(Hanging Deck)	그림 3.1.36
7	Working Deck Bracket	
8	Working Deck Post	
9	Waller-Normal	
10	Waller-Corner	
11	Form Panel 1250x100	
12	Form Panel 1250x250	
13	Form Panel 1250x580	
14	Form Panel Corner 1250x250	
15	Yoke Leg	
16	Upper Yoke Channel	
17	Upper Yoke Channel(계속)	
18	Yoke Channel	
19	Assist Yoke Channel	
20	Assist Yoke Leg	
21	Push-Pull Rod	



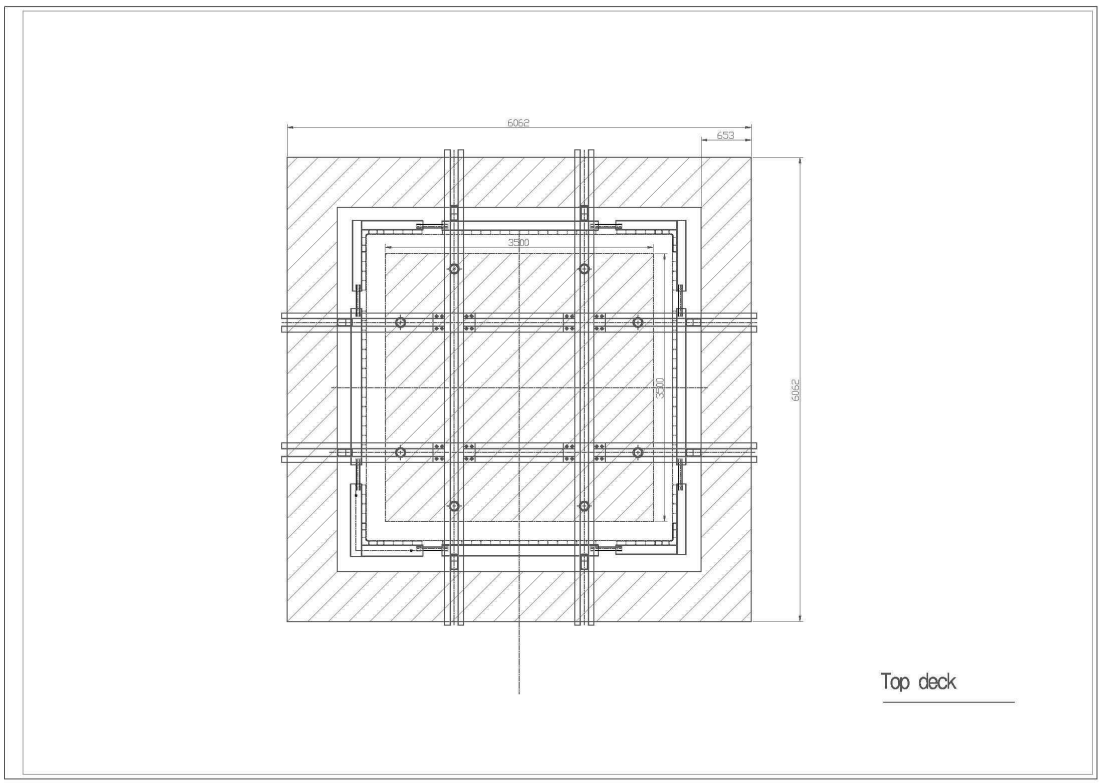
<그림 3.1.31> 슬립폼시스템 전체 레이아웃



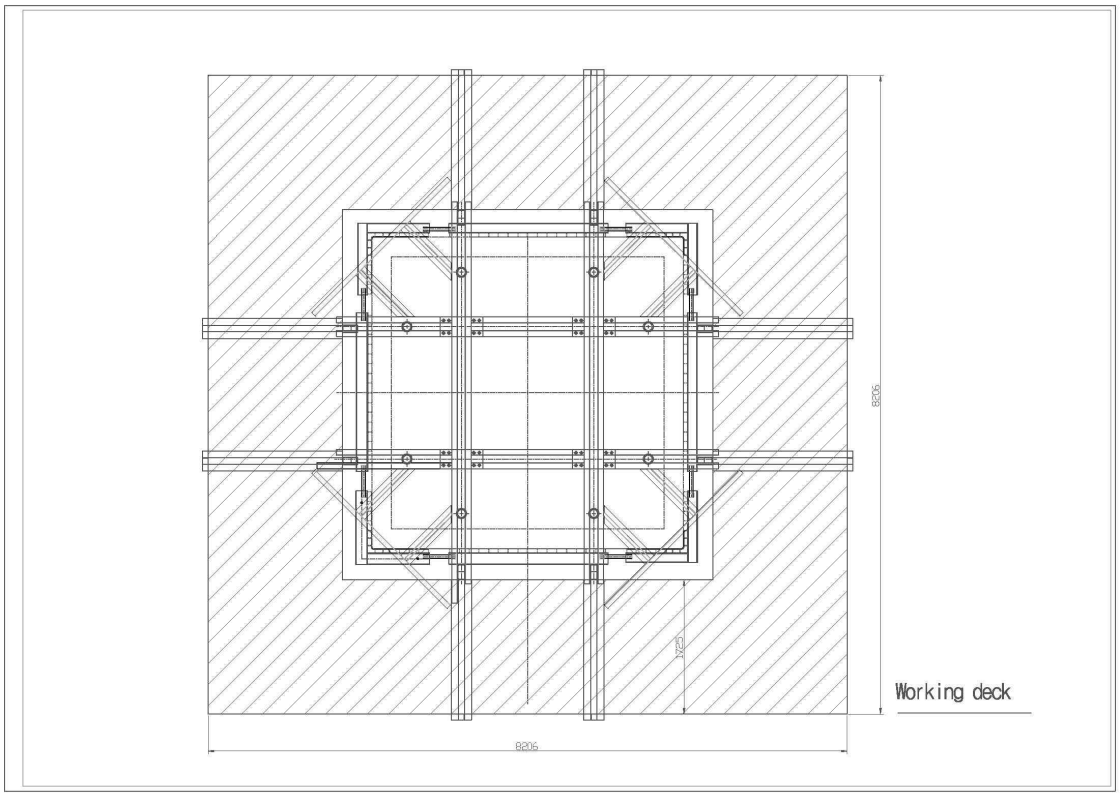
<그림 3.1.32> 요크-채널 배치도



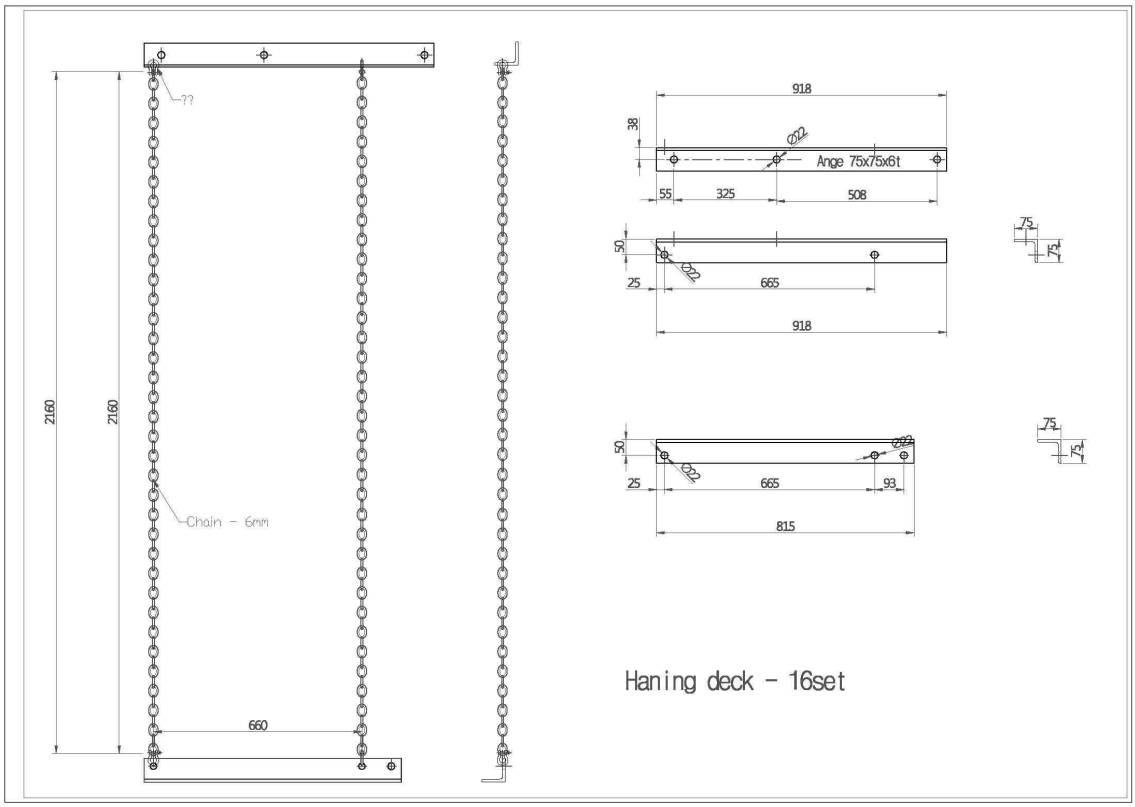
<그림 3.1.33> 요크-채널 배치도



<그림 3.1.34> 상부데크



<그림 3.1.35> 작업데크

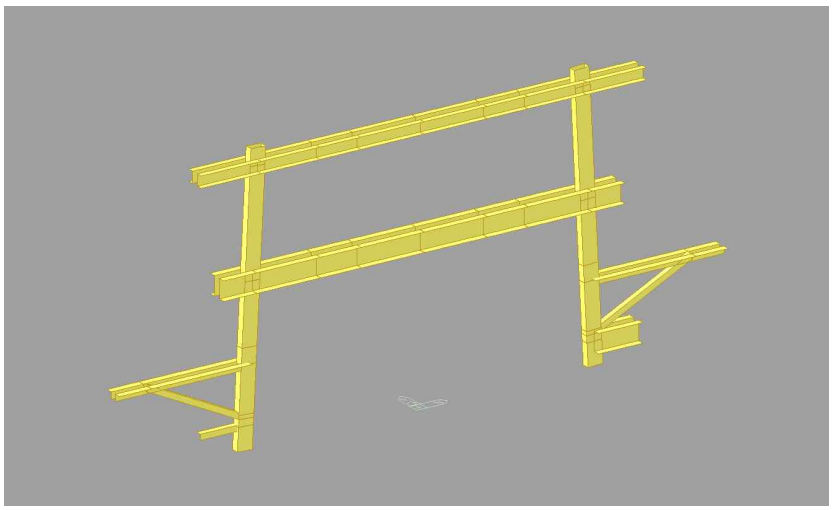


<그림 3.1.36> 하부데크

다. 구조해석 및 단면 검토

슬립폼은 이순신대교 등에서 알 수 있듯이 허용응력설계법을 사용하여 구조검토를 실시하고 있다. 이 연구에서도 이와 동일하게 허용응력법에 기초하여 설계를 실시한다. 이순신대교 슬립폼에서는 요크, 탑정 크레인, 래티스거더 등에 대해서 구조검토를 실시하고 있지만 이 연구에서 대상으로 하는 슬립폼시스템은 주탑 leg가 한 개이므로 래티스 거더가 없고 크레인 또한 필요가 없으므로 요크에 대해서만 구조검토를 실시하면 된다. 따라서 여기서는 요크에 대하여 허용응력설계를 실시하였다.

요크는 SS 400 강재로 제작되며 탄성계수는 210GPa을 사용하였다. 요크에 대한 구조해석 유한요소 모델은 그림 3.1.37과 같다.



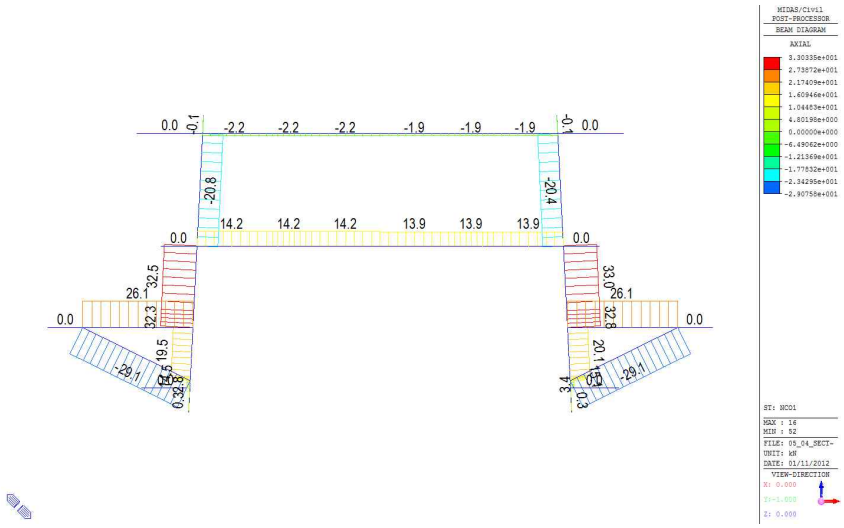
<그림 3.1.37> 요크의 구조해석 모델

본 슬립폼시스템은 유압잭이 수직방향으로 작용하여 모든 하중을 부담한다. 이를 반영하기 위하여 유압잭이 설치되는 위치에 해당하는 절점에서 수직하중을 지지하도록 경계조건을 설정하고 반력을 구하였다. 잭이 부담하는 수직반력 크기는 표 3.1.7과 같이 계산되었으며 여유를 고려한 개별 잭의 용량은 60kN정도면 충분한 것으로 판단된되었다.

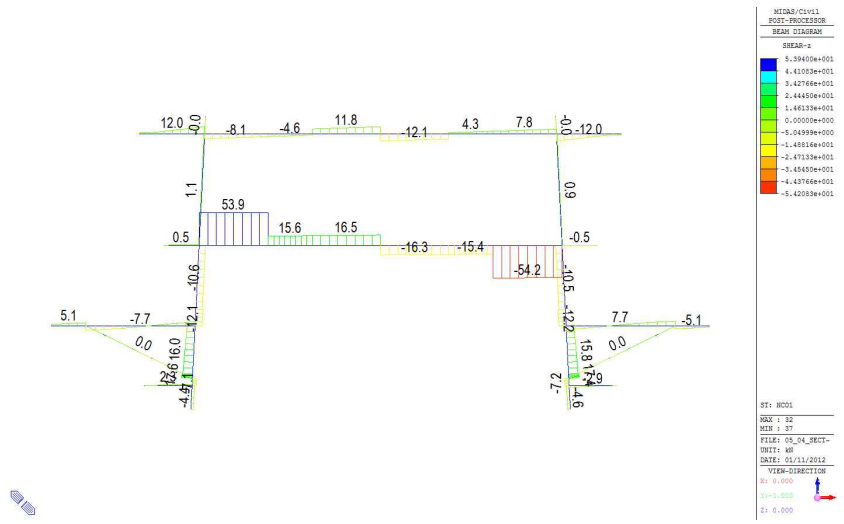
<표 3.1.7> 유압잭이 부담하는 수직반력

위치	P1 [kN]	P2 [kN]	P3 [kN]
하중조합1	38.9	32.8	39.4
하중조합2	15.5	13.2	15.8

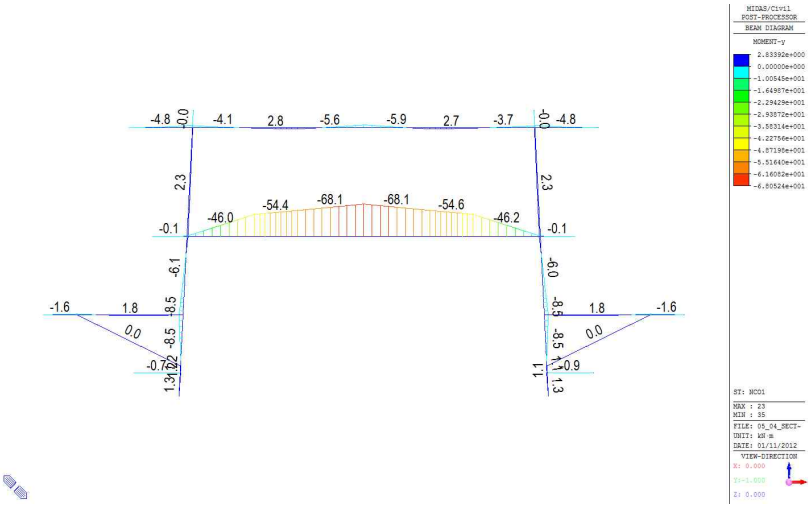
구조해석을 각각 실시한 후 하중조합에 따른 부재력을 구하고 그림 3.1.38~3.1.43에 나타냈다. 하중조합 1에 의하여 요크에 발생하는 축력은 그림 3.1.38과 같으며, 전단력은 그림 3.1.39, 모멘트는 그림 3.1.40과 같은 분포를 나타내고 있다.



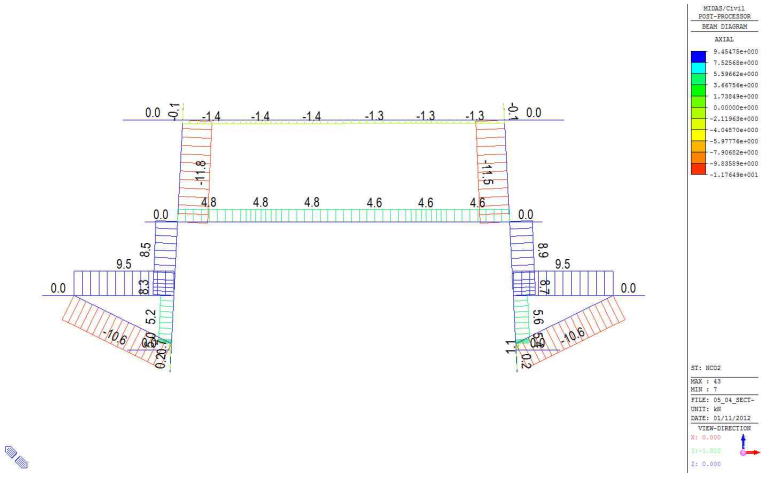
<그림 3.1.38> 하중조합1-축력



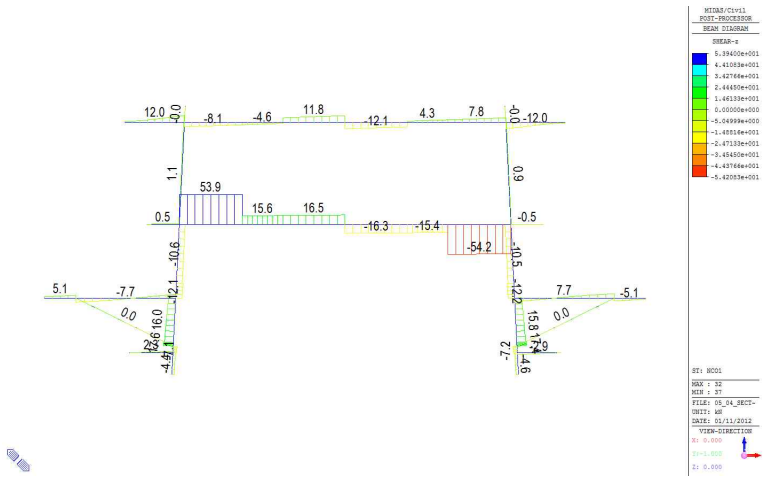
<그림 3.1.39> 하중조합1-전단력



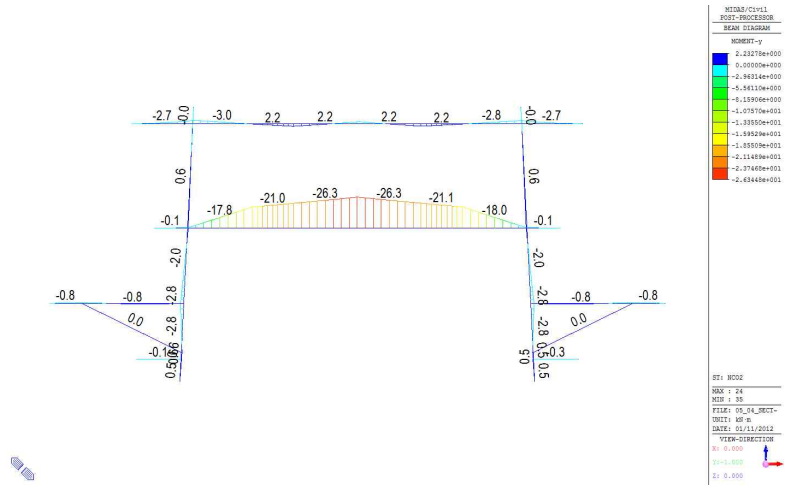
<그림 3.1.40> 하중조합1-모멘트



<그림 3.1.41> 하중조합2-축력



<그림 3.1.42> 하중조합2-전단력



<그림 3.1.43> 하중조합2-모멘트

슬립폼시스템 요크에 사용되는 SS400강재의 허용응력은 도로교설계기준(2010)에 따르면 다음과 같다.

- 허용전단응력 : 75MPa
- 허용축방향 인장응력 : 130MPa
- 허용축방향 압축응력 : 130MPa
- 허용 휨압축응력 : 130MPa

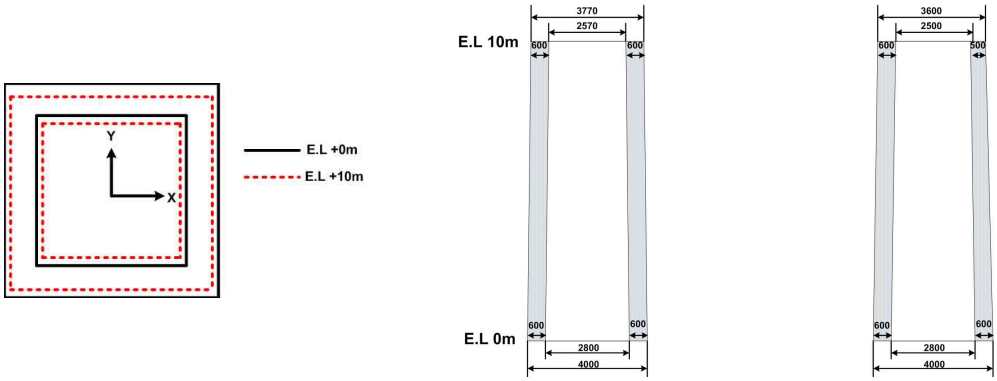
슬립폼시스템에 발생하는 최대응력과 SS400강재의 허용응력을 비교 검토하여 표 3.1.8에 나타냈다. 이와 같이 본 연구의 슬립폼시스템은 도로교설계기준에서 제시하는 허용응력을 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다. 따라서 시험시공용 슬립폼시스템으로서 충분한 안전율을 가지고 있다고 판단된다.

<표 3.1.8> 프로토타입 시스템 응력 검토

단면	휨응력$[kN/cm^2]$		응력비
	최대응력	허용응력	
전단응력	11.8	75	0.16
압축응력	44.4	130	0.34
인장응력	12.5	130	0.10
휨압축응력	13.9	130	0.11
휨인장응력	92.2	130	0.71

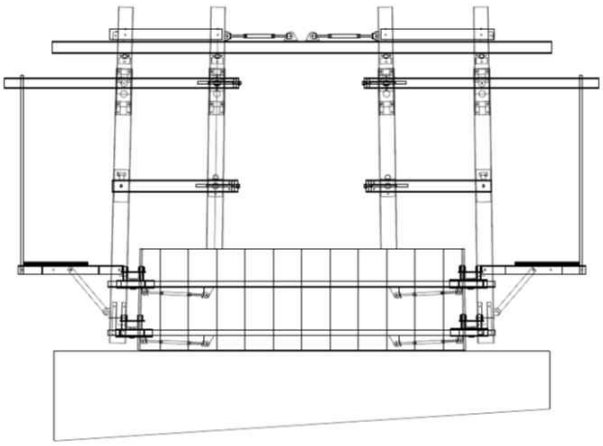
라. 시험 시공에 의한 검증

1차 시험 시공에서 프로토타입을 투입하여 높이 10m의 콘크리트 타워 1기를 시공하였다. 이를 위하여 슬립폼시스템이 10m 높이의 콘크리트 타워 시공이 가능하도록 구성 요소를 배치하고, 주탑 단면이 하단에서 상단으로 갈수록 줄어드는 단면 변화에 대응하기 위한 설계기술을 적용하였다.



(a) 단면 (b) 정면 (c) 측면

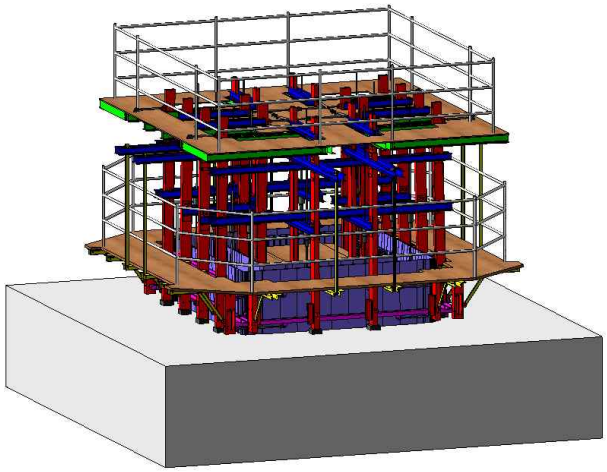
<그림 3.1.44> 시험 시공을 위한 주탑 단면 형상



<그림 3.1.45> 타워 1기 시공을 위한 슬립폼시스템 개략도

슬립폼시스템 운용 시 예상되는 하중들을 고려하여 구조적 안전성을 보완하였고 설계된 슬립폼시스템을 BIM에 의한 가상 시공으로 사전에 조립 및 해체, 운용 시

발생할 수 있는 문제점을 파악하고 대처하였다.

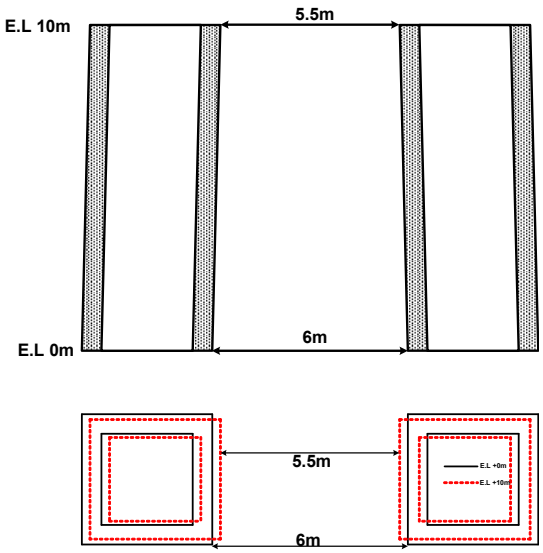


<그림 3.1.46> BIM에 의한 가상시공

4. 2차 시험 시공에 적용할 변단면 슬립폼시스템 설계

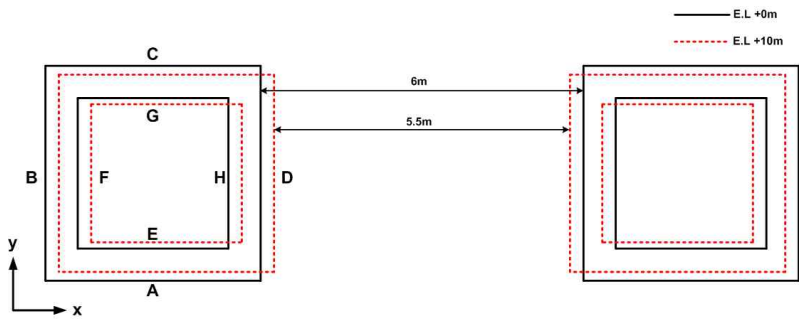
1차 프로토타입 시스템을 설계하면서 축적된 변단면에 대한 슬립폼 대응방안 및 상세 설계기술들을 바탕으로 추가적인 시험 시공을 위한 변단면 슬립폼시스템의 시제품을 설계하고 제작하였다.

2차 시험 시공은 높이 10m의 콘크리트 타워 2기를 고려하였다. 일반적으로 교량 주탑은 2개의 타워를 갖고 타워 단면은 하단에서 상단으로 갈수록 줄어든다. 양 타워의 내측거리는 H형 형식의 주탑에서는 일정하지만 일부 다른 형식의 주탑에서는 주탑 높이에 따라 변한다. 따라서 2차 시험시공에서는 실제 케이블 교량에서와 같이 2개의 타워 시공을 위한 슬립폼시스템을 설계하였다. 주탑은 1차 시험 시공과 동일하게 10m 높이를 갖고 중공의 사각 변단면을 계획하였다. 2차 시험시공에서는 주탑 높이에 따라 양 타워의 내측거리가 변하도록 계획하였다. 타워 간 간격은 지면에서는 6m, 10m 높이에서는 5.5m이다.



<그림 3.1.47> 대상 주탑 형상

단면 형상은 높이에 따라 길이와 두께가 변하도록 계획하였다. 이 때 X방향에 수평한 A, E, G, C면은 길이 변화 없이 X 방향으로의 위치 이동만 있다. Y방향에 수평한 B, F, H, D면은 상단으로 갈수록 길이와 두께가 줄어들도록 계획하였다. 최종 결정된 하단과 10m 상단에서의 단면 치수는 아래 그림과 같다.

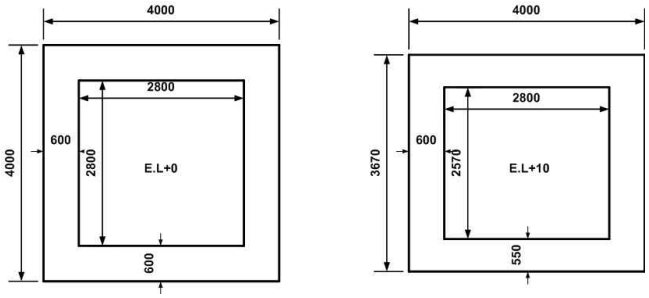


<그림 3.1.48> 변단면 계획

가. 슬립폼시스템 구성

슬립폼시스템은 거푸집의 상승을 위한 부재, 콘크리트의 측압을 지지하고 주탑의 형상 유지를 위한 부재, 벽체의 길이 및 두께 조정을 위한 부재, 타워 간 간격을 조정하는 부재, 작업발판 등으로 구성하였다. 그리고 거푸집 상승을 위하여 요크,

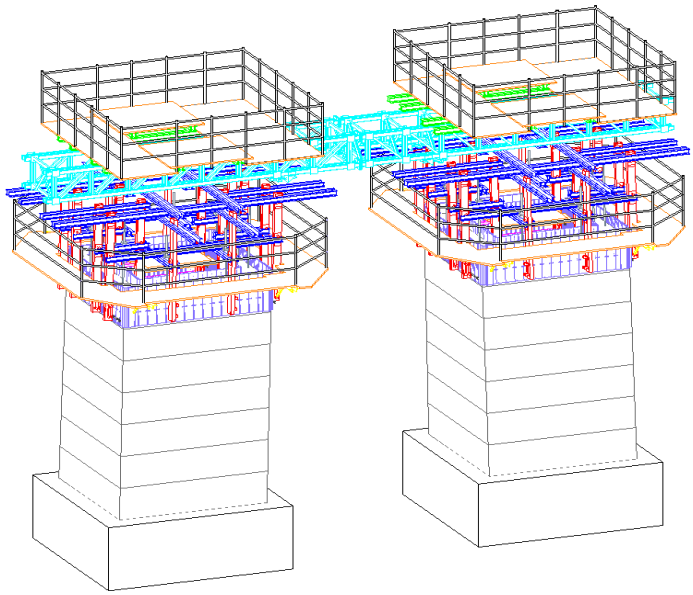
유압잭 및 펌프 등을 배치하였다.



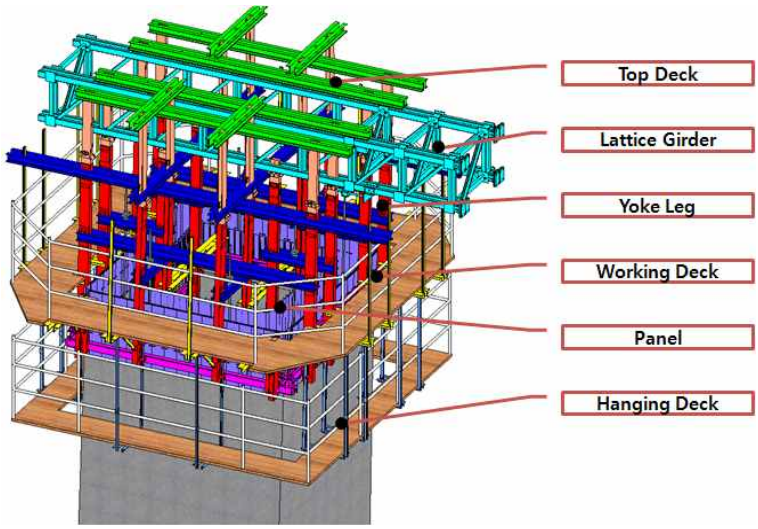
<그림 3.1.49> 단면 치수

패널과 웨일러는 콘크리트의 측압과 주탑 형상 유지를 위한 부재이다. 타워간 거리를 조정하기 위한 목적으로 각각의 타워에 설치된 슬립폼시스템을 수평방향으로 연결하는 래티스거더를 설치하였다. 작업발판은 상부작업대, 중간작업대, 하부작업대의 3단으로 구성하였다. 시스템을 구성하는 주요 부재들의 역할 및 특징은 다음과 같다.

- 요크 : 슬립폼시스템의 가장 뼈대가 되는 부재로, 수직 방향 2개의 요크레그와 수평 방향 2개의 요크채널로 이루어졌다. 요크는 주탑의 형상과 크기, 단면의 길이 변화를 고려하여 10개를 배치하였다.
- 유압잭 : 슬립폼시스템에는 거푸집을 탈착시키지 않고 연속적으로 상승시키기 위하여 다수의 유압잭(Hydraulic Jack)이 배치된다. 이들 유압잭은 콘크리트 구체 속에 묻혀 있는 로드(Rod)를 물고 요크와 거푸집 등 시스템 전체를 상승시킨다. 슬립폼시스템의 전체 무게 및 콘크리트 자중을 고려하여 유압잭의 수량을 결정하였으며, 각각의 타워에 12개를 배치하였다. 유압잭은 60kN의 용량을 가지고 있으며 요크채널 상단에 배치하였다.
- 거푸집 패널 : 높이는 기존의 시공 사례와 철근 조립의 용이성을 고려하여 1.25m로 결정하였다. 기존 강재 패널과 본 연구로부터 개발된 GFRP 패널을 혼용하여 적용하였는데, 내부는 강재, 외부는 GFRP를 적용하여 콘크리트 면 상태를 서로 비교하였다.
- 래티스거더 : 각각의 타워에서 상부데크와 요크채널 사이에 거치하여 연결한 트러스 거더로 주탑 레그를 안쪽으로 모으는 잭의 지지대로 활용된다.



<그림 3.1.50> 타워 2기 시공을 위한 변단면 슬립폼



<그림 3.1.51> 슬립폼시스템의 상세 구성

나. 변단면 대응 기술

2차 시험시공에서 벽체는 하부에서 상부로 올라갈수록 그 길이와 두께가 줄어들도록 계획하였다. 또한 양 타워의 내측 거리가 줄어들도록 계획하였다. 슬립폼시스템은 이러한 형상변화와 타워 간 거리변화에 대응하도록 설계하였다.

- 벽체 횡방향 길이 변화

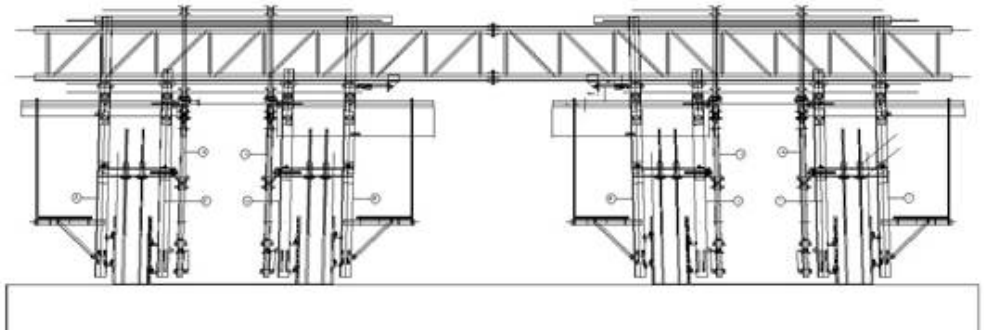
거푸집 패널은 콘크리트의 측압을 지지하면서 주탑의 형상을 유지시키는 부재이다. 따라서 벽체의 횡방향 길이변화에 대응하기 위해서는 거푸집 패널은 치수조절이 가능하도록 설계되어야 한다. 슬립폼이 특정 높이에서 그에 맞게 정하여진 길이 변화량이 있다. 이를 위해 인위적인 압축력으로 스핀들을 조이고 거푸집 패널은 이와 연동하여 자동적으로 치수 조절이 가능하도록 하여야 한다. 그래서 스핀들을 벽체 길이가 변화하는 곳에 설치하였다. 벽체의 길이 변화가 있는 곳에 배치된 두 개의 패널은 스핀들이 조여짐에 따라 서로 점진적으로 겹쳐지고 일정하게 겹쳐지면 거푸집 패널 모듈을 제거할 수 있도록 대응 계획을 수립하였다. 이는 모서리부에서 발생하도록 하였다. 따라서 스핀들은 모서리부 웨일러에 설치하였으며 스핀들을 조였을 때 모서리 패널(Corner Panel)과 일반부 패널이 점진적으로 겹쳐지도록 하였다. 모서리 패널과 일반부 패널이 완전히 겹쳐지면 겹쳐진 일반부 패널을 제거하였다. 스핀들은 해당 벽체의 거푸집 면에 2개를 웨일러 하단부에 각각 설치하였다.

- 벽체의 두께변화 대응

시험시공 주탑은 중공단면으로 요크는 외부거푸집과 내부거푸집에 연결되며 2개의 요크레그와 2개의 요크채널로 구성된다. 벽체의 두께변화에 대응하기 위해서는 외부 요크레그와 내부 요크레그의 간격조절이 가능하도록 설계되어야 한다. 이에 요크레그와 요크채널의 연결부에 스크류를 설치하고, 슬립폼이 특정 높이에 이르면 정해진 치수만큼 스크류를 조여 요크레그 간격을 축소시킴으로써 벽체의 두께가 줄어들도록 설계하였다. 스크류는 벽체의 두께가 축소되는 면에 배치되는 요크에만 설치하여 각각의 타워에 8개의 스크류를 사용하였다.

- 타워 간격변화 대응

본 슬립폼시스템에서는 두 개의 타워를 가로지르는 래티스거더를 설치함으로써 타워 간격변화에 대응할 수 있도록 설계하였다. 래티스거더는 길이 16m, 높이 1m, 폭 1.7m의 치수를 갖는다. 래티스거더는 슬립폼과 직접적으로 연결되지는 않는다. 다만 래티스거더와 요크레그 사이에 치수 조절이 가능한 스크류를 배치하고 스크류를 조임으로써 타워 간 간격을 조절할 수 있도록 하였다.



<그림 3.1.52> 래티스 거더

다. 1차 시험시공으로부터의 슬립폼시스템 개선 사항

콘크리트 타워를 처음 건설한 1차 시험 시공에서는 설계 단계에서 예상하지 못했던 문제점들이 실제 시공 시 다수 발견되었데, 이를 2차 시험 시공에서는 보완하여 설계를 수행하였다. 주요 개선 사항은 다음과 같다.

- waler 형상 개선

1차 시험시공에서는 웨일러를 ㄷ형 채널로 설계하였으나 시험 시공 과정에서 웨일러의 강도가 약하여 패널의 측면에서 배부름 현상이 발견되었다. 이에 2차 시험시공을 위한 설계에서는 웨일러의 강도를 보강하기 위하여 H 형강으로 변경하여 설계하였다.

- GFRP거푸집 모듈 폭 축소

1차 시험시공에서는 GFRP 패널이 35cm의 폭을 갖도록 설계하였다. 거푸집의 길이 축소는 벽체의 길이 변화가 발생하는 곳에 배치된 두 개의 패널이 점진적으로 서로 겹쳐지면서 구현된다. 두 패널이 완전히 겹쳐지면 겹쳐진 패널을 제거하고 이웃해 있는 패널과 다시 겹쳐지면서 이후의 단면 변화에 대응하게 된다. 1차 시험시공 시 35cm의 폭을 갖는 GFRP 패널은 너무 커서 변단면 대응에 용이하지 못한 것으로 나타났다. 따라서 2차 시험시공에서는 1개의 GFRP모듈이 벽체 변화에 용이하게 대응할 수 있도록 폭을 25cm로 수정하여 설계하였다.

- GFRP 패널과 웨일러 체결부 보완

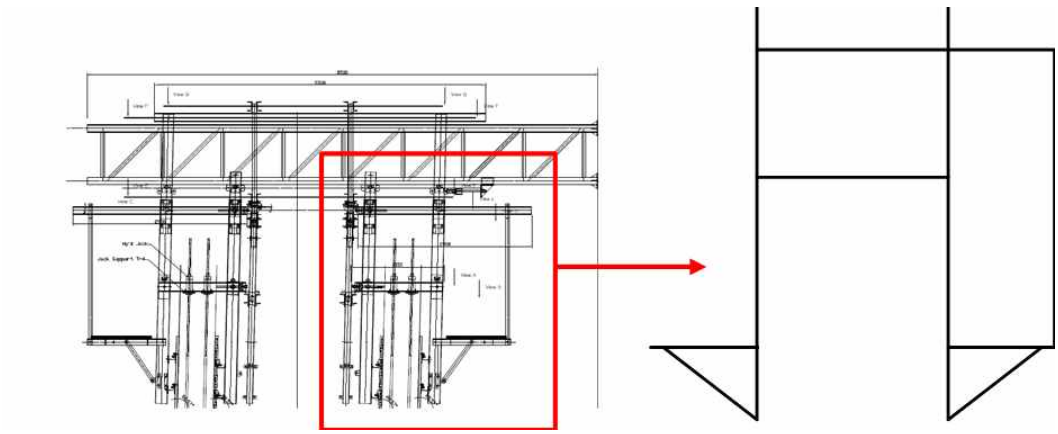
1차 시험시공에서 고려한 GFRP 패널과 웨일러의 체결 부재는 시공 과정에서 웨일러의 선형을 유지시키기에는 체결력이 부족한 것으로 나타났다. 이에 2차 시험시공에서는 이를 보완할 수 있도록 체결부재를 설계하였고 원천특허로 등록되었다.

- 유압잭 보완

1차 시험시공에서 사용한 유압잭은 60kN의 용량과 25mm의 stroke를 갖는 것으로 레벨링장치(Leveling Device)를 설치하지 않았다. 레벨링장치는 일정 높이 이상 유압잭이 상승하지 못하도록 구속하는 장치로 주탑의 형상관리를 위한 필수 장치라 할 수 있다. 이에 2차 시험시공에는 레벨링장치를 반영하여 유압잭을 설계하였다.

라. 구조해석 및 설계검토

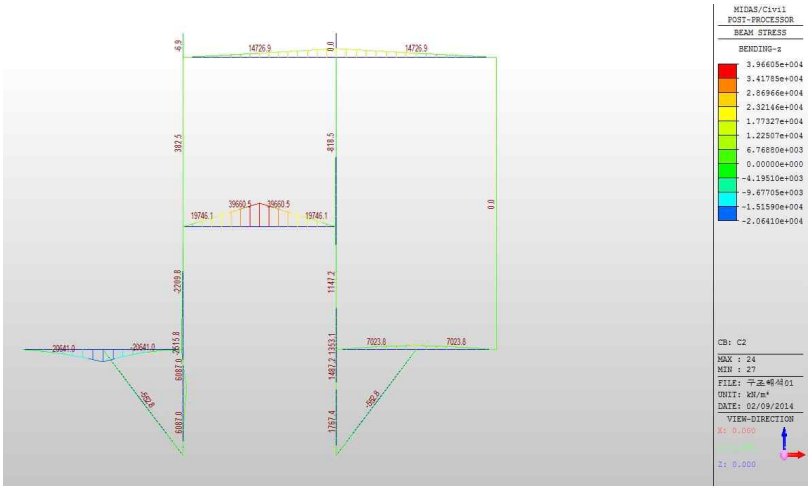
10m 높이를 갖는 타워 2기를 동시에 시공하는 것을 고려하여 슬립폼시스템을 설계하고, 상용 프로그램인 마이다스를 사용하여 설계검토를 수행하였다. 설계검토는 슬립폼시스템에서 뼈대 구조라 할 수 있는 요크를 대상으로 하였으며 허용응력설계법으로 검토하였다.



<그림 3.1.53> 해석모델링

슬립폼시스템은 철골 구조이고 요크는 탄성계수 210 GPa의 SS400 강재를 사용

하였다. 요크는 빔 요소로 모델링하여고, 고정하중, 작업하중, 콘크리트 타설 측압, 슬립폼시스템의 인상에 따른 콘크리트와의 마찰하중, 풍하중 등을 고려하였다.



<그림 3.1.54> 고정하중 재하에 의한 모멘트도

- 유압잭 용량 검토

슬립폼시스템에서 유압잭은 수직방향으로 작용하는 모든 하중을 부담한다. 구조해석 결과에 따르면 유압잭에 작용하는 최대 수직하중은 31.9 kN 이다. 개별 잭의 용량이 60 kN 임을 고려하였을 때 설계에서 고려한 유압잭의 수량과 배치는 적절한 것으로 판단된다.

- 요크 부재 허용응력 검토

요크에 발생되는 최대 응력을 SS400 강재의 허용응력과 비교하였다. 구조해석 결과에 따르면 슬립폼시스템에서 요크는 도로교설계기준(2010) 허용응력 기준을 충분히 만족하도록 설계된 것으로 판단된다.

- 웨일러 변형 검토

스핀들이 지지되는 웨일러의 안전성 검토를 목적으로 콘크리트 측압으로 발생되는 웨일러의 변형 크기를 가설공사표준시방서(2006)의 거푸집 변형기준과 비교하였다. 웨일러는 일정한 간격의 요크레그에 고정되므로 단순보로 가정하였다. 웨일러에 작용하는 하중은 콘크리트 타설로 발생 가능한 최대 측압(=$25kN/m^3 \times 1.2m$)을

웨일러의 형상을 고려하여 산정하였다.

· 작용하중

$$w = 25kN/m^3 \times 1.2m \times 0.125m = 3.75kN/m$$

· 웨일러에 발생하는 처짐

$$\triangle = \frac{5wl^4}{384EI} = \frac{5 \times 3.75 \times 1.6^4}{384 \times (2.1 \times 10^8) \times (8.5 \times 10^{-6})} = 0.000179m = 0.179mm$$

· 처짐에 대한 검토

가설공사표준시방서(2006)에 따르면 거푸집 패널의 허용처짐은 표면의 마무리 정도에 따라서 달라진다. 콘크리트 측압으로 웨일러에 발생하는 변형 크기는 허용처짐을 가설공사표준시방서에서 가장 보수적인 3mm로 설정하더라도 해당 기준을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

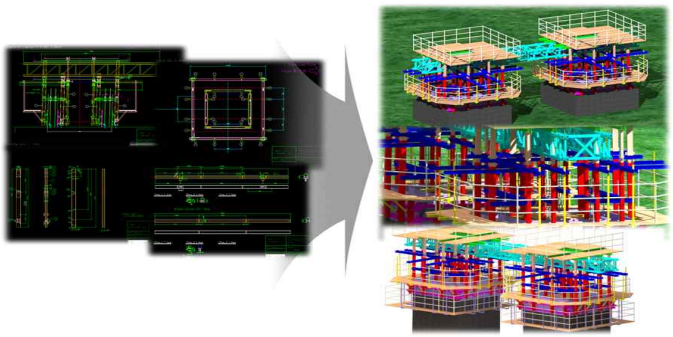
<표 3.1.9> 거푸집 널의 변형기준(가설공사표준시방서, 2006)

표면의 등급	상대변형	절대변형
A급	$l_n/360$	3mm
B급	$l_n/270$	6mm
C급	$l_n/180$	13mm

비고 A급: 미관상 중요한 노출 콘크리트 면
B급: 마감이 있는 콘크리트 면
C급: 미관상 중요하지 않은 노출콘크리트 면

5. BIM을 이용한 슬립폼시스템의 설계 보완

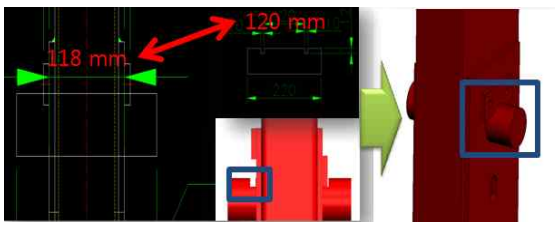
주탑의 시공에 앞서 시각화된 형상 모델로부터 기존 2D 도면을 검토하였다. BIM(Building Information Modeling) 기술을 적용하여 가상의 조립 및 시공을 시뮬레이션을 하였으며 개발된 슬립폼시스템의 효율성과 안전성을 확인할 수 있었다.



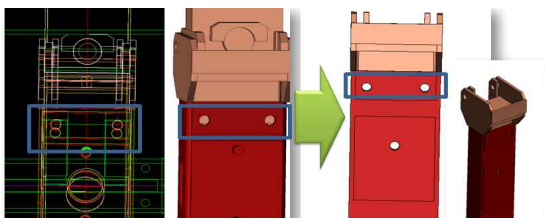
<그림 3.1.55> BIM을 이용한 3D 형상 Model 작성

가. 슬립폼의 디지털 가상 제작

2D CAD로 설계된 슬립폼시스템을 구성하는 부재 도면을 BIM에 기반하여 3차원 형상으로 모델링하였다. 설계 결과물을 시각화하고 가상 제작함으로써 2D 도면에서는 파악하기 힘든 문제점들을 도출하여 이를 수정·보완하였다. 슬립폼시스템의 전체 부재에 대한 3D 모델링으로부터 부품도와 제작도의 문제점들을 약 50여 가지를 파악할 수 있었으며 이를 반영하여 기존의 2D 도면을 수정·보완하였다.



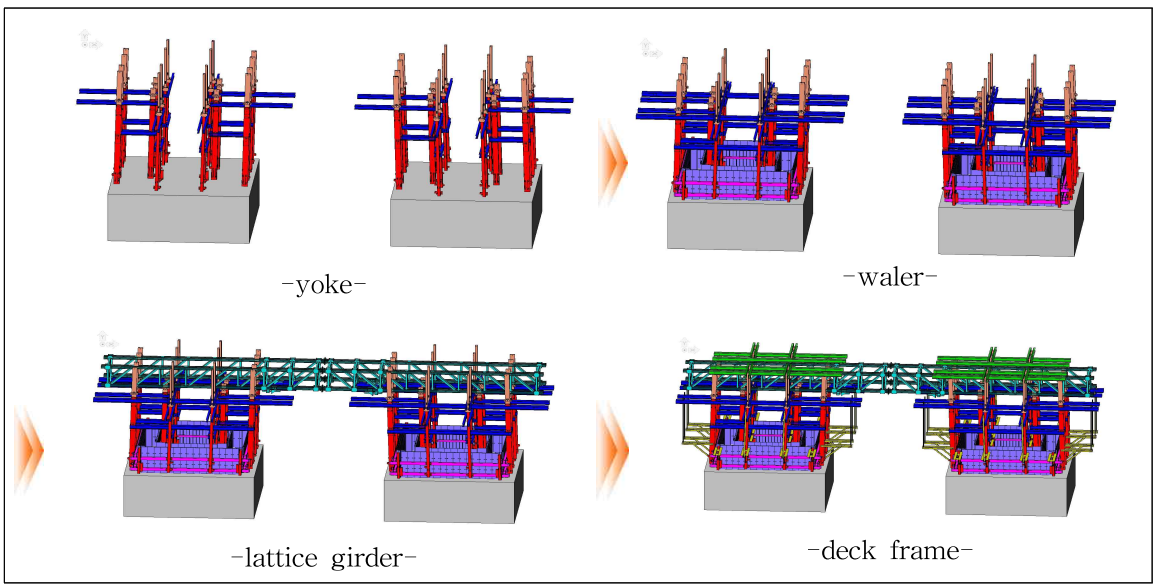
<그림 3.1.56> 3D 모델링을 통한 요크레그



<그림 3.1.57> 요크레그 길이 연장을 위한 부재의 설계검토

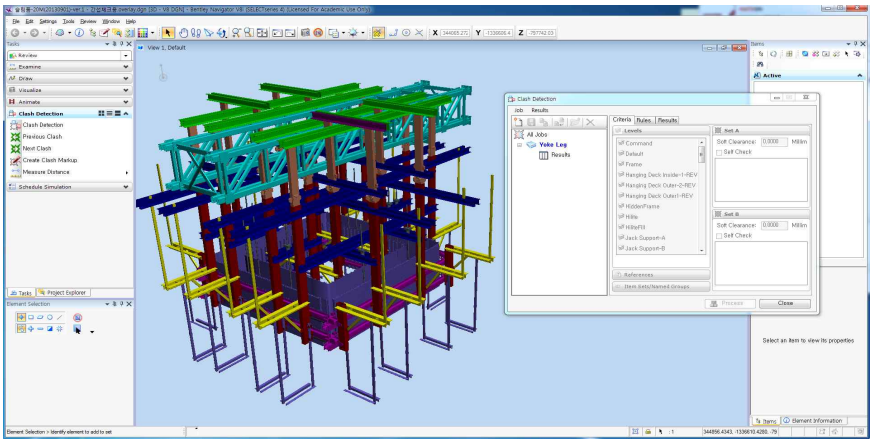
나. 디지털 가상 조립 및 설치

디지털 가상 제작을 통하여 슬립폼시스템을 구성하는 부재들의 제작과정에서 발생될 수 있는 문제점들을 파악하고 이를 수정하였으며 이후에는 디지털 가상 설치를 수행하여 실제 상황에서 부재들의 간섭 여부를 검토하였다. 디지털 가상설치는 방법과 순서에 있어 실제의 시공 상황을 반영하였다. 이로부터 각각의 부재들의 설치위치를 확인하고, 설치 시 부재들 간의 간섭 여부를 확인하였다.



<그림 3.1.58> BIM을 통한 슬립폼 조립 구현

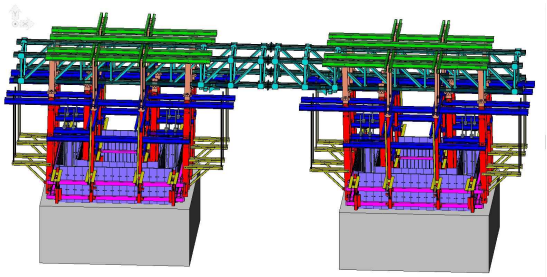
최종 수정된 3D 모델들을 바탕으로 조립된 슬립폼을 Bentley Navigator의 간섭점검 기능을 활용하여 슬립폼시스템의 설치에 따른 부재들의 간섭여부를 검토하였다.



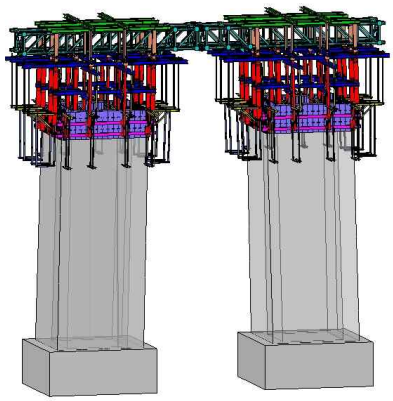
<그림 3.1.59> 3D로 슬립폼 간섭 검토

다. 디지털 가상 시공

디지털 가상 조립으로부터 일부 부재들이 같은 공간에서 겹쳐지는 것을 발견하여 수정하였으며, 이들이 보완된 최종 도면을 바탕으로 가상 시공을 실시하였다.



<그림 3.1.60> 슬립폼 조립 상황

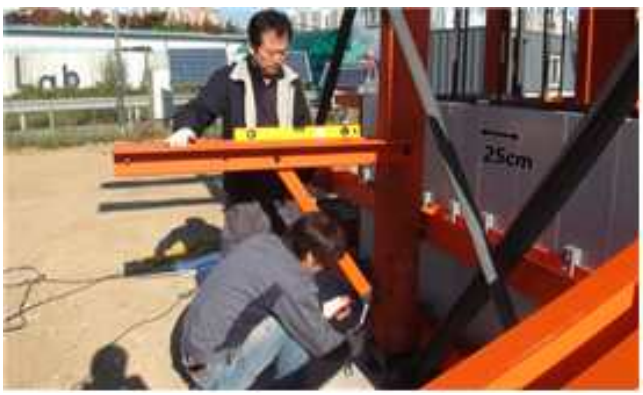


<그림 3.1.61> 10m 슬립업

6. 2차 시험시공에 의한 검증 및 보완

가. 경량 GFRP 패널 반영

기존의 슬립폼시스템에서 강재 패널 만을 사용한 것에 비해 본 연구에서는 강재 패널과 함께 경량 GFRP 패널을 적용하였다. 내부 거푸집에는 강재 패널을 적용하였다. 외부 거푸집에는 모서리부는 강재 패널을 사용하고, 이외의 구간에는 GFRP 패널을 사용하였다. 1차 시험시공에서는 35cm의 폭을 갖는 GFRP 패널을 적용하였으나 변단면 대응에 용이하지 못한 것으로 나타났다. 이에 2차 시험시공에서는 GFRP 패널이 벽체의 길이 변화에 용의하게 대응할 수 있도록 패널의 폭을 25cm로 수정하여 적용하였다.



<그림 3.1.62> 경량 GFRP 패널

나. 스핀들 자동화

슬립폼이 특정 높이에 이르면 거푸집의 길이 변화가 요구된다. 이를 위하여 길이 변화가 발생하는 곳에 설치된 스핀들을 조여야 하고 거푸집 패널은 자동적으로 치수 조절이 가능하도록 설계 되어야 한다. 본 연구의 1차 시험시공에서는 스핀들을 조정하는 방법에 있어서 기존과 같이 인력으로 스핀들을 조절하는 것으로 하였다. 이후 스핀들의 제어 방식을 개선하기 위하여 전동으로 스핀들을 제어하는 전동식 스핀들을 개발하였다. 개발된 전동식 스핀들은 역회전 및 미세조정이 가능하다. 개

발된 전동식 스핀들은 2차 시험시공에 적용되어 총 64개 중 2개는 개발된 전동식 스핀들을 적용하였다.



<그림 3.1.63> 스핀들

다. 유압잭

2차 시험시공에서는 유압잭을 제작하고, 유압잭이 1차 시험시공에서와 동일한 용량을 갖되 유압잭에 일정 높이 이상으로 상승하지 못하도록 레벨링 장치를 추가함으로써 유압잭의 제어 방식을 개선하였다.



(a) 제어장치 개선 전 유압잭 (1차 시험시공)



(b) 제어장치 개선 후 유압잭 (2차 시험시공)

<그림 3.1.64> 유압잭

라. 래티스거더를 이용한 타워 간격 축소

2차 시험시공에서는 두 개의 타워를 가로지르는 래티스거더를 설치함으로써 타워 간격변화에 대응하였다. 래티스거더는 길이 16m, 높이 1m, 폭 1.7m의 치수를 갖는다. 래티스거더는 슬립폼과 직접적으로 연결되지는 않는다. 다만 래티스거더와 요크레그 사이에 치수 조절이 가능한 스크류를 배치하고 스크류를 조임으로써 타워 간 간격을 조절할 수 있도록 하였다.



(a) 래티스 거더 (b) 타워 간격 조절을 위한 스크류

<그림 3.1.65> 래티스 거더

마. GFRP 패널과 웨일러 체결장치 개선

1차 시험시공에서 고려한 GFRP 패널과 웨일러의 체결 부재는 시공 과정에서 웨일러의 선형을 유지시키기에는 체결력이 부족한 것으로 나타났다. 이에 2차 시험시공에는 이를 보완할 수 있도록 체결 부재를 개선하였다.



<그림 3.1.66> GFRP 패널과 웨일러 체결 부재

바. 케이블 정착구를 고려한 타워 시공

2차 시험시공에서는 사장교 주탑에서와 같이 케이블 정착구를 고려하여 시험시공을 수행하였다. 케이블 정착구는 5m 높이에 설치하였다.

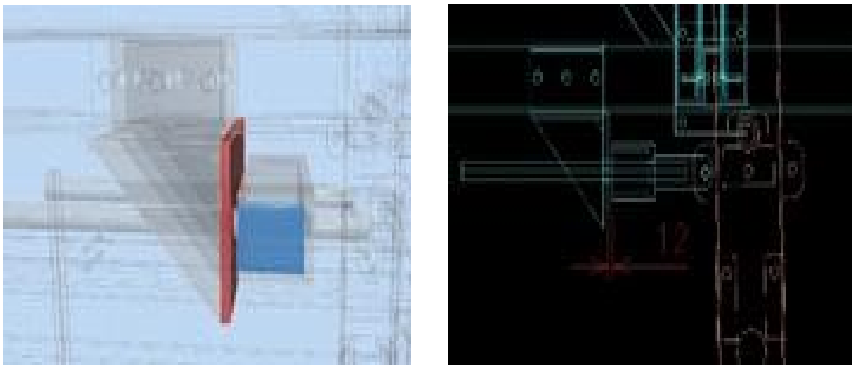


(a) 정착장치 설치 (b) 시공 후

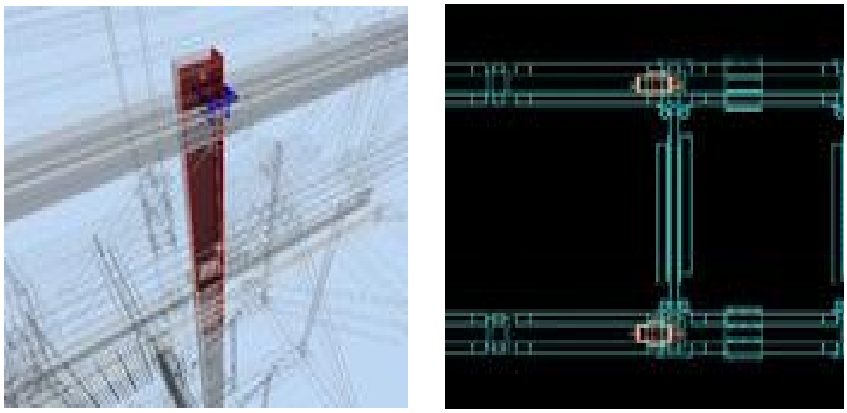
<그림 3.1.67> 케이블 정착구를 고려한 타워 시공

7. 3차 시험시공에 의한 검증 및 보완

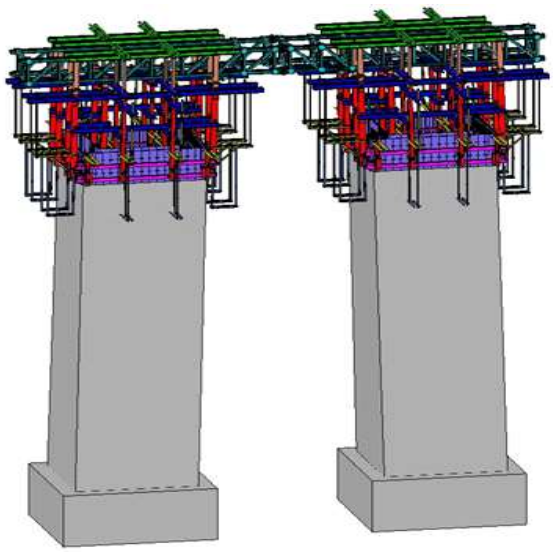
2차 시험시공에서 슬립폼시스템은 수동식 스핀들과 전동식 스핀들을 혼합 적용하여 구축하고, 콘크리트 타워 2기를 10m 까지 시공하였다. 3차 시험시공에서는 10m 높이까지 시공된 슬립폼시스템에서 기존의 스핀들 32개를 모두 무선전동식인 K-Spindle로 모두 교체하였다. 여기서도 BIM을 통한 디지털 가상시공을 실시하여 높이 10m까지 시공이 완료된 슬립폼시스템의 추가 2m 상승에 대한 가능 여부를 검토하였다. 그 결과 12m 높이에서 래티스 거더의 브라켓과 요크레그 간격이 11mm로 매우 좁긴 하지만 시공에는 문제가 되지 않는 것으로 판단되었다. 또한 12m 높이에서 래티스 거더의 스페이서와 요크레그 간의 간섭이 발생하는 것으로 나타났으나, 이는 시공 중 스페이서를 제거함으로써 조치가 가능한 것으로 판단되었다.



<그림 3.1.68> 래티스거더 브라켓과 요크레그 간격 검토



<그림 3.1.69> 래티스거더 스페이서와 요크레그 간섭 검토

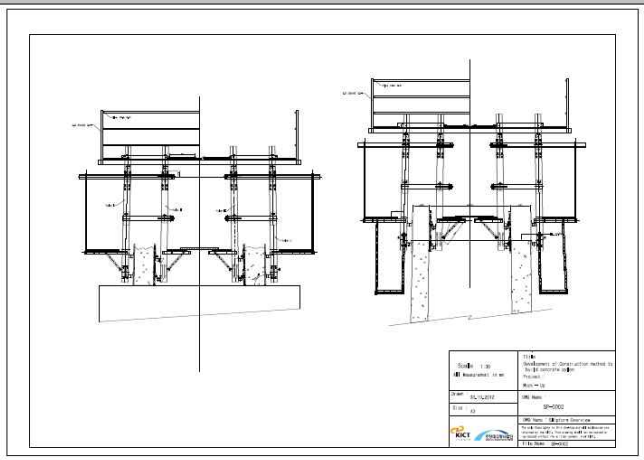


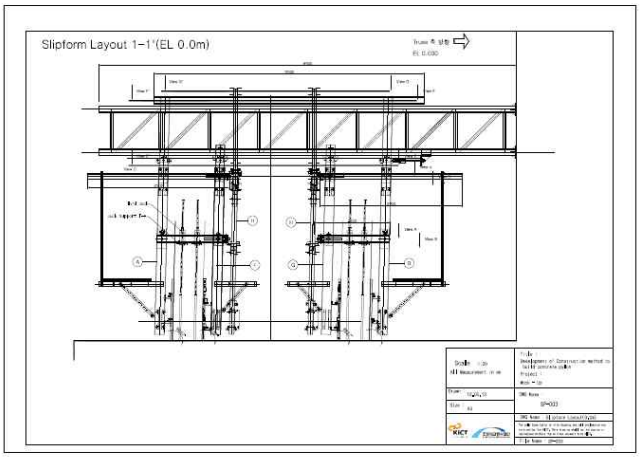
<그림 3.1.70> 슬립폼 상승시 상황(12m 슬립업)

8. 소결론

이 연구에서는 변단면 슬립폼시스템의 설계와 제작을 위한 연구를 수행하였다. 슬립폼시스템의 구성요소를 분석하고, 변단면 시공을 위한 슬립폼 대응 방안을 도출하였다. 개발된 요소 기술들을 바탕으로 2회에 걸친 시험시공을 위한 슬립폼시스템의 설계도면을 작성하고 BIM을 이용한 설계 검토를 수행하였다. 설계도면을 바탕으로 제작된 슬립폼시스템을 설치하고 변단면 콘크리트 주탑을 성공적으로 시험시공함으로써 이 연구에서 개발된 슬립폼시스템의 효율성을 입증 할 수 있었다.

■ 설계도면(2건)

번호	타워 1기 시공을 위한 슬립폼시스템 설계도면
1	

번호	타워 2기 시공을 위한 슬립폼시스템 설계도면
2	

제 2 절 슬립폼 최적기 상승기술 및 변단면 자동화기술 개발

1. 개요

가. 슬립폼 최적기 상승기술

슬립폼 공법에서는 조기 콘크리트 탈형에 따른 시공품질을 확보할 수 있도록 상승 속도를 적절히 유지하는 것이 매우 중요하다. 시공 중 슬립폼시스템의 상승 속도는 안전성 및 시공품질 확보를 위하여 사전에 결정된 설계상승속도(design slip-up speed)를 크게 벗어나지 않도록 해야 한다. 슬립폼시스템의 설계상승속도는 시멘트 종류와 혼화제 사용에 따라 콘크리트 경화속도에 차이가 있으므로 민감한 영향을 받는다. 또한 슬립폼의 거푸집 높이, 철근 배근과 변단면 조정 등 부대 작업 속도, 슬립폼 상승 장비 성능 등을 종합적으로 고려하여 결정되어야 한다. 설계상승 속도를 충분한 사전 검토를 통해 결정하고 시공 중에는 실제 환경조건(온도, 습도)과 콘크리트 타설 위치에 따라 슬립폼시스템의 상승속도는 변동이 발생할 수 있다. 이러한 변동폭을 최소화하는 것이 슬립폼 공법에 있어서 기술 노하우에 해당한다.

현장에서 타설된 콘크리트는 환경조건과 위치에 따라 경화 정도가 변화하게 되는데, 적정한 강도로 양생이 이루어지지 않은 시점에 콘크리트를 슬립폼 거푸집 밖으로 노출시킬 경우 콘크리트가 흘러내릴 수 있으며 28일 콘크리트강도 발현에도 문제가 발생할 수 있다. 반대로 콘크리트가 지나치게 양생된 후 슬립폼 탈형이 이루어질 경우, 콘크리트와 거푸집의 부착으로 인하여 슬립폼시스템의 상승력이 지나치게 커져 안전성을 저해할 수 있고 구체에 수평방향 균열을 유발할 수 있다. 따라서 슬립폼시스템의 상승은 거푸집 탈형 시 콘크리트가 자립할 수 있고 장기적으로 충분한 강도를 가질 수 있는 적정한 시기에 이루어져야 하며, 또한 콘크리트와 거푸집 부착으로 인한 슬립폼시스템의 상승력이 지나치게 크게 발생하기 전에 이루어져야 한다.

슬립폼 상승에 대한 적정한 시기, 즉 상승속도는 전술한 바와 같이 콘크리트 초기강도에 밀접한 관련이 있다. 이러한 콘크리트의 초기강도를 파악하기 위해 관입저

항시험법, 직접 압축강도시험법 등을 사용할 수 있다. 1회 타설높이가 20cm 정도이고 경화시간이 다른 다수의 콘크리트 층을 갖는 슬립폼 현장에서 관입저항시험과 압축강도시험을 통해 탈형강도를 도출하는 것은 매우 힘들다. 따라서 기존 슬립폼 공법에서는 관입저항시험법과 유사하게 탐침봉으로 찔러서 굳기 정도를 파악한 후 슬립폼을 상승시키고 있다. 이러한 탐침봉에 의한 초기경화시간 측정 방법은 경화시간이 다른 여러 층을 통과하여 최하단의 콘크리트를 찔러서 경험적으로 파악하는 것이므로 많은 경험을 필요할 뿐만 아니라 정확성을 담보할 수 없다고 사료된다. 또한 신속한 탈형강도 파악으로 적기에 슬립업 작업을 수행하기에는 한계가 있다고 판단된다.

이 연구에서는 초음파에 의한 실시간 정량적으로 탈형강도를 추정하여 슬립업을 수행할 수 있는 기술을 개발하였다. 먼저, 슬립업 최적기에서 콘크리트 초기강도를 도출하였다. 그리고 배합 및 온도조건에 따라 타설 직후부터 콘크리트의 관입저항시험, 압축강도시험, 초음파(표면파) 전파속도 실험을 수행하였다. 이로부터 최적기 콘크리트 초기강도에 해당하는 초음파 속도를 도출하였다. 이를 토대로 소형 목업 실험을 통해 안정적인 콘크리트 품질 확보와 적정한 슬립업 마찰력을 얻을 수 있었다. 최적기 상승기술은 슬립폼시스템에 실제 투입하여 4회에 걸친 시험시공에서 성공적으로 적용되었다.

나. 슬립폼 변단면 자동화기술

3차원으로 형상이 변하고 단면이 변하는 콘크리트 주탑에서 슬립폼시스템의 변단면 처리는 스핀들 장치에 의해 수행되어진다. 스핀들은 슬립폼 거푸집을 지지하는 웨일러와 요크레그에 장착된 것으로 봉강에 나사를 내고 너트를 끼워 넣은 것이다. 이 스핀들 나사를 회전시켜 길이를 조절하여 슬립폼 거푸집을 당기거나 밀도록 하여 거푸집 단면을 조정한다.

스핀들은 슬립폼시스템 상승과 동시에 회전시켜 설계된 단면 크기로 거푸집을 변화시키게 된다. 스핀들의 회전 작업은 슬립폼에 대기 중인 작업자들에 의해 인력으로 수행된다. 작업자가 지정된 스핀들 회전량(스핀들 리스트)에 따라 스패너를 이용하여 회전시키게 된다. 이때 스핀들을 회전시키기 위해서는 거푸집 내에 타설된 콘크리트의 경화 정도에 따른 압축력과 측면 모서리부의 웨일러 사이 마찰력을

초과하는 회전력이 필요하다. 콘크리트는 초결 이후 경화가 진행될수록 강도가 급격하게 증가하면서 압축에 필요한 힘은 매우 커지게 되므로 스핀들 회전에 필요한 회전력도 급격히 커진다. 콘크리트의 종결 이후에는 스핀들 회전이 거의 불가능하게 된다. 따라서 슬립폼시스템의 변단면 작업은 작업자가 스핀들을 회전시킬 수 있는 시간 내에 이루어져야 하며, 이러한 시간을 초과할 경우 스핀들을 회전시킬 수 없어 슬립폼시스템의 변단면 작업을 수행할 수 없게 된다. 지금까지 슬립폼 시공 현장에서는 이러한 스핀들 작업을 수동으로 수행하고 있으며, 이에 따라 스핀들의 개수가 많아질 경우 작업에 상당한 시간이 소요되어 스핀들 회전에 어려움을 겪는 경우가 자주 발생하고 있다. 이러한 경우 구조물이 설계된 단면의 크기로 시공이 되지 않는 등 형상관리에 문제가 발생할 수 있다.

이 연구에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 지금까지 작업자에 의해 개별적으로 수행되던 스핀들 회전 작업을 전동식으로 간편하게 실시하도록 고안하였다. 이 전동식 스핀들은 개별적으로 또는 동시 제어가 가능하여 작업의 편리성 및 효율성을 도모하였다. 즉, 스핀들의 개별 및 동시제어를 통해 스핀들 회전 작업시간을 단축시켜 슬립폼의 변단면 작업 효율성은 높였으며, 전동식 모터로 스핀들 회전 각도를 정밀하게 제어함으로써 보다 정밀한 형상관리가 가능하도록 하였다. 전동식 스핀들은 작업자보다 10배 이상의 회전력을 발휘할 수 있으므로 슬립폼시스템 변단면 처리를 수행할 수 있는 기간을 상대적으로 길게 하여 주탑의 형상관리를 여유있게 실행할 수 있게 되었다.

2. 슬립폼 최적기 상승기술

가. 슬립폼 탈형 강도

슬립폼 거푸집에 대한 탈형 기준은 ACI Committee 347 에서 “경험있는 관리자가 변화하는 현장 조건을 반영하여 시공이음이나 콘크리트의 박리가 발생하지 않도록 슬립폼 내부의 콘크리트가 충분히 경화되었는지 검침봉 등을 이용하여 확인하여야 한다.”라고 제시하고 있다. 따라서 국내 대부분의 슬립폼 공법 현장에서는 구체적인 콘크리트 탈형강도에 대한 기준보다는 관입저항시험에 의한 간접적인 기

준이나 철근을 콘크리트 내에 삽입하는 등의 기능공의 감각적인 경험에 의존하는 방법에 의해 콘크리트를 탈형하여 슬립폼을 상승시키고 있다.

Reichverger와 Jaegermann(1980)은 보다 체계적인 연구를 통해 “거푸집 내에 타설된 콘크리트는 슬립폼시스템 상승이 용이할 정도로 덜 굳은 상태여야 하며, 거푸집 밖으로 노출된 콘크리트는 거푸집 내의 콘크리트 자중에 의한 압력에 저항할 수 있어야 하고, 또한 시공품질을 고려하여 면처리 작업이 가능해야 한다.”는 가정하에 다양한 실험을 통하여 슬립폼 거푸집의 적절한 탈형강도를 제안하였다. 이들은 콘크리트 강도가 약 0.2~0.3MPa에서 거푸집의 탈형이 이루어질 경우 콘크리트의 28일 강도가 100% 발현되고 변형이 작으며, 시공 품질 관리를 위한 면처리 작업이 용이하다는 실험 결과를 제시하였다. 그러나 이러한 탈형강도 기준을 적용하기 위해서는 연속적으로 타설되는 모든 콘크리트에 대한 압축강도 데이터가 필요하므로 압축강도를 콘크리트 층마다 매 순간 측정하여 슬립폼시스템의 상승 시기를 결정하는 것은 힘든 일이다.

따라서 이 연구에서는 슬립폼시스템에 장착되어 시공 중 연속적으로 표면파 속도를 측정할 수 있는 시스템을 개발하고, 표면파 속도와 관입저항강도 및 압축강도와의 관계를 규명함으로써 슬립폼시스템 상승 시기 결정에 표면파 속도를 활용하는 연구를 수행하였다.

나. 슬립폼시스템 거푸집 제거를 위한 초음파(표면파) 속도의 결정

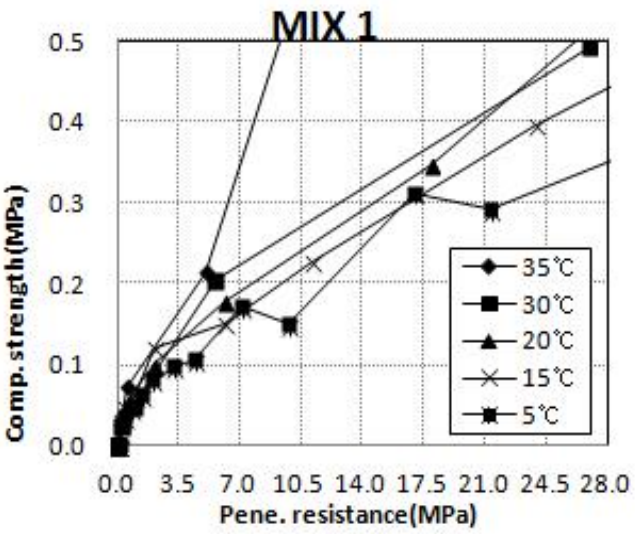
이 연구에서는 표면파 속도와 관입저항강도 및 압축강도와의 관계를 규명하기 위해 2가지 콘크리트 배합과 5가지 양생 온도 조건(5℃, 15℃, 20℃, 30℃, 35℃)에 대해 표면파 속도 측정 실험, 관입저항시험, 그리고 압축강도시험을 타설재령에 따라 수행하였다.

실험에 사용한 2가지 배합은 일반적으로 장대교량 주탑에 사용되는 콘크리트로, 보통포틀랜드 콘크리트(OPC)와 슬래그 콘크리트(SC)이며 상세한 배합비는 표 3.2.1과 같다.

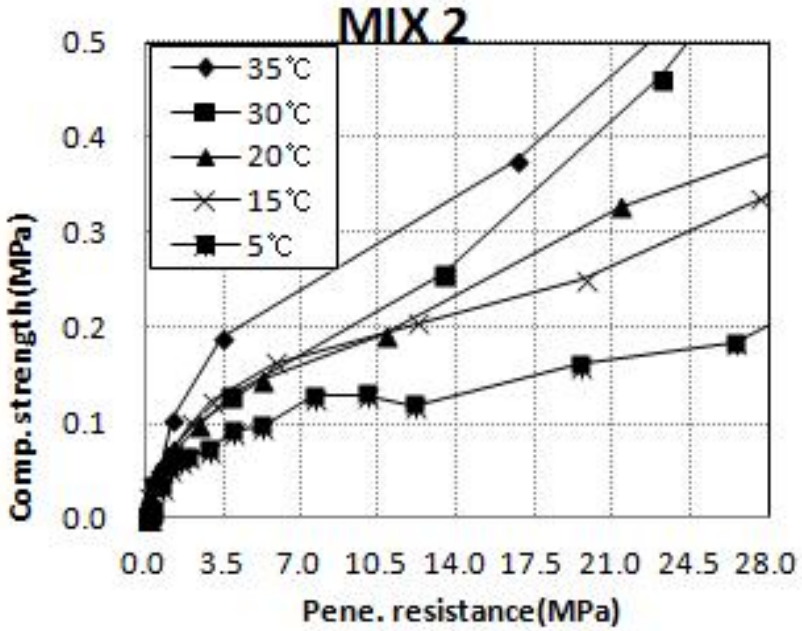
<표 3.2.1> 콘크리트 배합비

	MIX 1 (OPC)	MIX 2 (SC)
Characteristics	20-40-200	20-400-200
W/C (%)	35.4	35.4
Water (kg)	168	168
Cement (kg)	475	475
Sand (kg)	760	760
Aggregate (kg)	935	935
AE water reducing agent (kg)	4.75	4.75

그림 3.2.1과 3.2.2는 관입저항강도와 압축강도와의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 초결시점(초기경화시간)에서 관입저항강도는 3.5MPa이다. 이 시점에 압축강도는 모든 양생 온도와 콘크리트 배합 조건에 있어서 모두 0.2MPa보다 작게 나타났다. 따라서 압축강도 0.2MPa에 도달하는 시점에 슬립폼을 상승시키더라도 콘크리트 품질에 문제가 없을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 압축강도 0.2MPa에서 표면파 속도를 온도조건에 따라 미리 구한 후 슬립폼시스템을 상승시키는 기준으로 설정하고자 한다. 표면파 속도에 대한 자세한 사항은 기술노하우에 해당하므로 본 보고서에서는 기술을 생략하였다.



<그림 3.2.1> 관입저항강도와 압축강도(MIX1)



<그림 3.2.2> 관입저항강도와 압축강도(MIX2)

다. 표면파 속도를 이용한 슬립폼시스템의 상승 실험

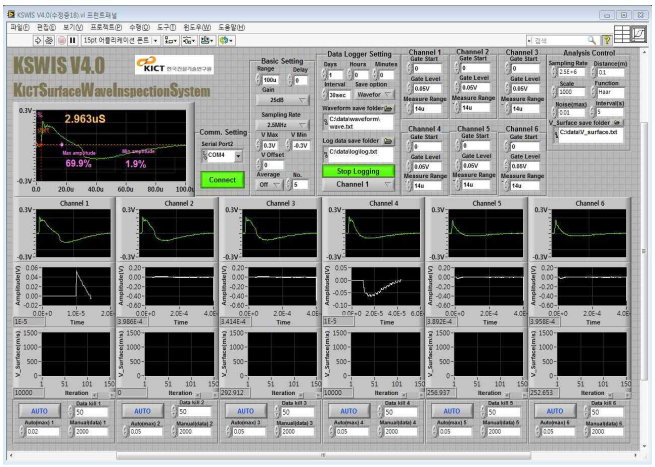
실험은 하단부 4m×4m, 상단부 3.77m×3.6m의 중공 사각형 변단면 콘크리트 주탑을 표면파 상승시스템을 투입하여 시공하였다. 콘크리트를 25cm 높이로 2시간 간격으로 타설하였으며, 높이 10m까지 시공하였다.

거푸집 하단에 표면파 속도 측정 장치를 설치하고 슬립폼 시공 중에 표면파 속도를 지속적으로 측정하였다. 표면파 속도 측정 장치는 발신 및 수신 탐촉자로 구성되어 있는데 거푸집 하단에 개구부를 설치하고 부착하였는바, 여기로 콘크리트 페이스트 누출이 없도록 특별한 장치를 고안하였다. 본 실험에서는 주탑이 4각형 단면이므로 4면에서 표면파 속도를 측정하여 최저 값을 기준으로 슬립폼을 상승시켰다. 표면파 속도는 현장과 유사한 배합 및 온도조건에서 실내 실험으로부터 사전에 도출된 1100m/s를 기준으로 하였다.

슬립폼시스템에서 측정된 신호로부터 표면파 속도를 분석할 수 있도록 표면파 프로그램(KSWIS V4.0)을 개발하였다(그림 3.2.4). KSWIS V4.0은 초음파 발수신기 및 무선 데이터 전송장치를 원격으로 제어할 수 있으며, 동시에 6개의 초음파 신호로부터 표면파 신호를 분석할 수 있도록 작성되었다.



<그림 3.2.3> 슬립폼 실험

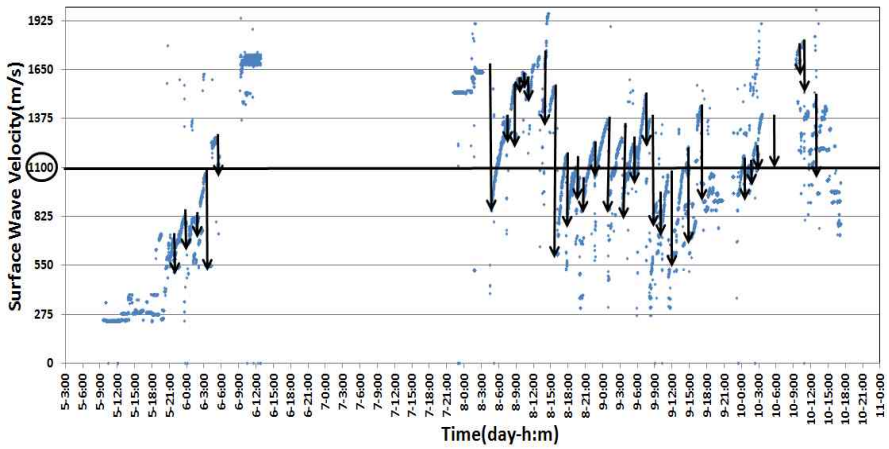


<그림 3.2.4> 표면파 분석 프로그램(KSWIS V4.0)

그림 3.2.5는 표면파 속도 측정 장치로부터 측정된 표면파 속도 변화를 보여준다. 이 그림에서 표면파 속도가 일정하게 증가하여 어느 정도에 도달한 후 슬립폼을 상승시키면 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 화살표로 표시된 부분은 표면파 속도의 급격한 감소가 이루어진 시기로써 이는 슬립폼시스템의 상승 시기와 일치한다. 본 연구에서는 표면파 속도를 지속적으로 측정하면서 표면파 속도가 설정된 기준 값(1100m/s)보다 작은 경우에도 슬립폼을 상승시켜 콘크리트 면 상태를 관찰하

였다. 그림 3.2.6과 3.2.7은 표면파 속도가 1100m/s에 도달하기 전과 도달한 이후 슬립폼시스템을 상승시켰을 경우 노출된 콘크리트 면을 각각 보여준다. 표면파 속도가 1100m/s 이하인 경우 콘크리트 면이 불규칙하며 일부 박리가 일어난 것을 볼 수 있는 반면, 표면파 속도가 1100m/s 이상인 경우에는 콘크리트 면에 문제가 발생하지 않음을 알 수 있다.

이상과 같이 검증을 위해 표면파 속도를 기준으로 슬립폼시스템을 높이 10m까지 상승시킨 결과, 설정된 표면파 속도이후에 상승 시킨 모든 구간에서 양호한 콘크리트 면을 얻을 수 있었다. 따라서 이 연구에서 개발한 표면파속도에 의한 슬립폼 최적기 상승기술이 현장에서도 충분히 적용될 수 있음을 확인하였다.



<그림 3.2.5> 표면파 속도 변화

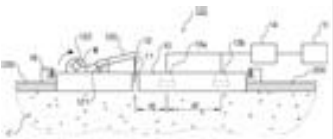


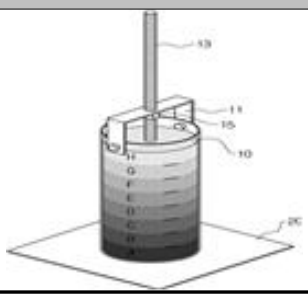
<그림 3.2.6> 콘크리트 면(1100/s 이하)

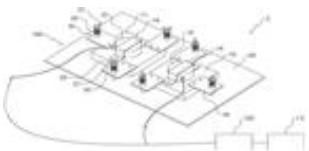


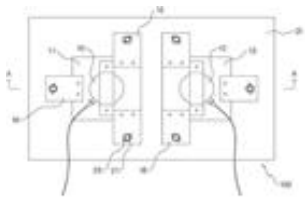
<그림 3.2.7> 콘크리트 면(1100/s 이상)

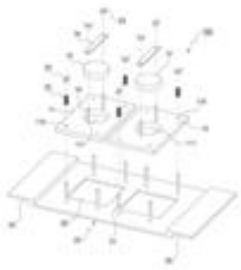
라. 특허(6건) 및 SW(3건)

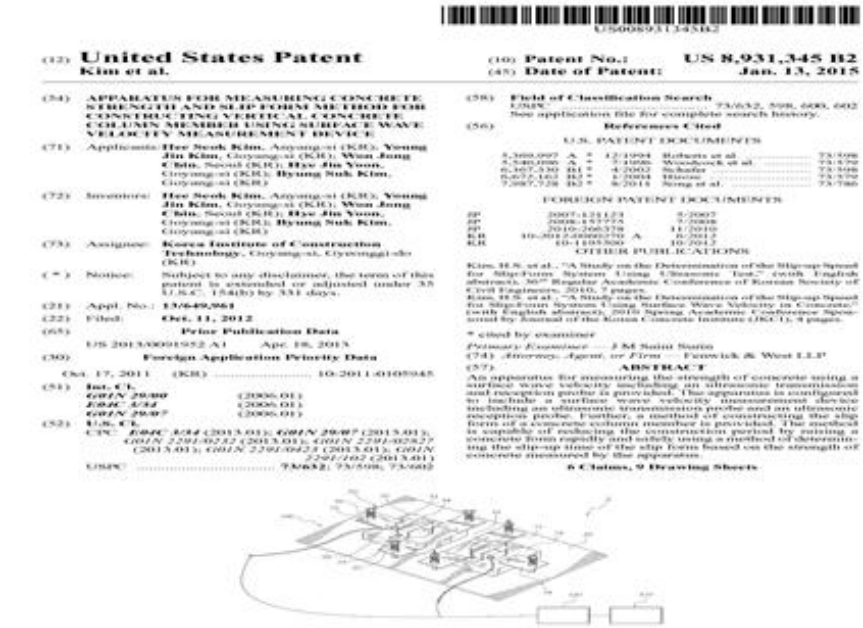
번호	표면파를 이용한 콘크리트 강도 측정 결과에 기초하여 상승 시기를 결정하는 슬립폼 시공방법	특허 10-1195500
1	본 발명은 슬라이딩 되는 거푸집(슬립폼)을 단계적으로 상승시켜가면서 콘크리트를 타설하여 교량 주탑이나 교량 교각 등과 같은 수직 콘크리트 축부재를 제작하는 슬립폼 시공방법에서, 표면파를 이용하여 콘크리트의 강도를 측정하여 슬립폼의 상승 시기를 결정함으로써, 신속하고 안전하게 거푸집을 상승시켜 공기를 단축시킬 수 있게 되는 슬립폼 시공방법 즉, 표면파 콘크리트 강도 측정을 이용하여 슬립폼의 상승 시기를 결정하는 슬립폼 시공방법에 관한 것이다.	

번호	슬립폼 상승시기 판단용 콘크리트 경화정도 검사장치 및 이를 이용한 슬립폼 시공방법	특허 10-1268348
2	본 발명은 슬라이딩 되는 거푸집(슬립폼)을 단계적으로 상승시켜가면서 콘크리트를 타설하여 교량 주탑이나 교량 교각 등과 같은 수직 콘크리트 축부재를 단계적으로 제작할 때, 슬립폼의 상승시기를 판단하기 위한 슬립폼 상승시기 판단용 콘크리트 경화정도를 검사하는 장치 및 이를 이용하여 콘크리트 축부재를 시공하는 슬립폼 시공방법에 관한 것이다.	

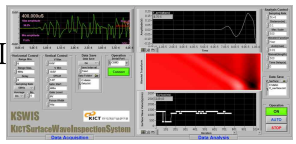
번호	초음파 발신 및 수신 탐촉자 일체형 표면파 속도측정 이용 콘크리트 강도 측정장치 및 콘크리트 강도 측정 결과에 기초하여 슬립폼의 상승시기를 결정하는 방법	특허 10-1257304
3	본 발명은 초음파 발신 탐촉자와 초음파 수신 탐촉자를 구비하고 있는 표면파 속도측정 장치를 구비하고 있어, 콘크리트를 타고 흐르는 표면파의 전파속도를 측정하여 이를 기초로 콘크리트의 강도를 측정하게 되는 "초음파 발신 및 수신 탐촉자 일체형 표면파 속도측정 이용 콘크리트 강도 측정장치"와, 슬라이딩 되는 거푸집(슬립폼)을 단계적으로 상승시켜가면서 콘크리트를 타설하여 교량 주탑이나 교량 교각 등과 같은 수직 콘크리트 축부재를 제작하는 슬립폼 시공방법을 수행함에 있어서, 상기 콘크리트 강도 측정장치에 의해 측정된 콘크리트 강도에 기초하여 슬립폼의 상승 시기를 결정함으로써, 신속하고 안전하게 거푸집을 상승시켜 공기를 단축시킬 수 있게 되는 "콘크리트 축부재의 슬립폼 시공방법"에 관한 것이다.	

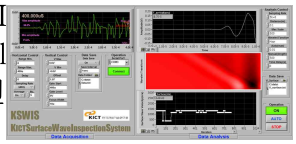
번호	콘크리트 표면 밀착형태로 초음파 발신 탐촉자와 수신 탐촉자가 일체로 구비된 표면파 속도측정 이용 콘크리트 강도측정장치	특허 10-1280993
4	본 발명은 초음파 발신 탐촉자와 초음파 수신 탐촉자를 구비하고 있는 표면파 속도측정 장치를 구비하고 있어, 콘크리트를 타고 흐르는 표면파의 전파속도를 측정하여 이를 기초로 콘크리트의 강도를 측정하게 되는 "콘크리트 표면 밀착형 초음파 발신 탐촉자와 수신 탐촉자의 일체 구비 방식의 표면파 속도측정 이용 콘크리트 강도측정장치"에 관한 것이다.	

번호	콘크리트 강도를 측정하기 위한 초음파 발신 및 수신 탐촉자 일체형 표면파 속도측정장치	특허 10-1486434
5	본 발명은 초음파 발신 탐촉자와 초음파 수신 탐촉자를 구비하고 있어서 콘크리트를 타고 흐르는 표면파의 전파속도를 측정하여 이를 기초로 콘크리트의 강도를 측정하되 거푸집에 설치되었을 때 콘크리트의 표면에 지속적으로 밀착되는 구성을 가지는 표면파 속도측정장치에 관한 것이다.	

번호	Apparatus for measuring concrete strength and slip form method for constructing vertical concrete column member using surface wave velocity measurement device	특허 US 8,931,345
6	본 발명은 슬립폼을 이용하여 교량 주탑, 교량 교각 등의 수직한 콘크리트 축부재를 시공하는 방법에 관한 것으로서, 구체적으로는 슬라이딩 되는 거푸집(슬립폼)을 단계적으로 상승시켜가면서 콘크리트를 타설하여 교량 주탑이나 교량 교각 등과 같은 수직 콘크리트 축부재를 제작하는 슬립폼 시공방법에서, 초음파를 이용하여 콘크리트의 강도를 측정하여 슬립폼의 상승 시기를 결정함으로써, 신속하고 안전하게 거푸집을 상승시켜 공기를 단축시킬 수 있게 되는 슬립폼 시공방법 즉, 초음파 콘크리트 강도 측정을 이용하여 슬립폼의 상승 시기를 결정하는 슬립폼 시공방법에 관한 것이다.  	

번호	KSWIS V1.0(표면파 분석 시스템 버전 1.0)	프로그램 C-2012-008756
7	본 프로그램은 매질의 지표면을 따라 전파하는 표면파를 검출하기 위한 것이다. 일반적으로 반무한 매질에 전파하는 파는 압축파, 전단파, 표면파로 구분할 수 있으며 이중 표면파는 전파되는 파에너지의 약 67%를 가지고 전파하게 된다. 그러나 표면파는 압축파와 전단파와 섞여 전파하게 되므로 이를 검출해내기 위해서는 특수한 수학적 처리과정이 요구된다. 본 프로그램은 연속웨이블릿변환을 이용하여 표면파를 검출해내는 프로그램으로써 콘크리트의 양생 시간에 따른 경화정도를 추정하는데 활용될 수 있다. 	

번호	KSWIS V2.0(표면파 분석 시스템 버전 2.0)	프로그램 C-2012-008757
8	본 프로그램은 KSWIS V1.0을 Labview 기반에서 작성하여 GUI 기능을 향상시킴으로써 사용자의 편리성을 도모하였다. 	

번호	KSWIS V3.0(표면파 분석 시스템 버전 3.0)	프로그램 C-2012-008758
9	본 프로그램은 KSWIS V1.0을 Labview 기반에서 작성하여 GUI 기능을 향상시킴으로써 사용자의 편리성을 도모하였으며, install 프로그램으로 작성되어 있어 Labview가 설치되어 있지 않은 어떤 컴퓨터에서도 설치하여 작업을 수행할 수 있다. 	

3. 슬립폼 변단면 자동화기술

가. 슬립폼시스템 스핀들

변단면 슬립폼시스템은 구조물 시공에 필요한 거푸집 조립, 철근 조립, 콘크리트 타설, 콘크리트 양생, 거푸집 제거 등의 모든 공정이 동시에 연속적으로 이루어지기 때문에 시공 속도가 다른 공법과 비교하여 가장 빠르고 시공 이음이 발생하지 않는 등 우수한 장점들을 가지고 있다. 이러한 슬립폼시스템의 핵심 기술 중 하나는 시공 중에 연속적으로 수행되는 변단면 처리기술이며, 이러한 변단면 처리는 스핀들에 의해 수행하게 된다. 스핀들은 그림 3.2.8과 같이 슬립폼 거푸집을 지지하는 웨일러에 장착되며, 이를 회전시킴으로써 거푸집을 이동시켜 변단면 처리 기능을 수행하게 된다.



<그림 3.2.8> 슬립폼시스템 웨일러에 장착된 스핀들

슬립폼시스템에 장착되는 스핀들의 개수는 단면의 형상과 시스템 설계 방법에 따라 약간의 차이가 발생할 수 있으나, 변단면 처리를 위해서는 일반적으로 한 면에 최소 4개의 스핀들이 필요하다. 따라서 교량의 주탑 구조물과 같이 2기가 동시에 시공되는 구조물의 단면 변화를 위해서는 직사각형 중공 단면을 가정할 경우 최소 64개의 스핀들이 필요하다.

스핀들은 슬립폼시스템 상승 직후 회전시켜 설계된 단면 크기로 거푸집을 이동

시킴으로써 시공 중 슬립폼시스템의 변단면 작업을 수행하게 된다. 그러나 스핀들의 개수가 많아질 경우 모든 스핀들을 회전시키기 위해서는 상당한 시간이 소요될 뿐만 아니라, 작업자의 실수로 스핀들 작업 시간 자체가 지연될 경우 콘크리트 경화로 인해 스핀들의 회전이 불가능해지는 경우가 발생하게 된다. 이러한 경우 변단면 처리 자체가 불가능해져 형상관리에 문제가 발생하게 된다.

나. 무선 다중 제어 전동식 스핀들(K-Spindle)

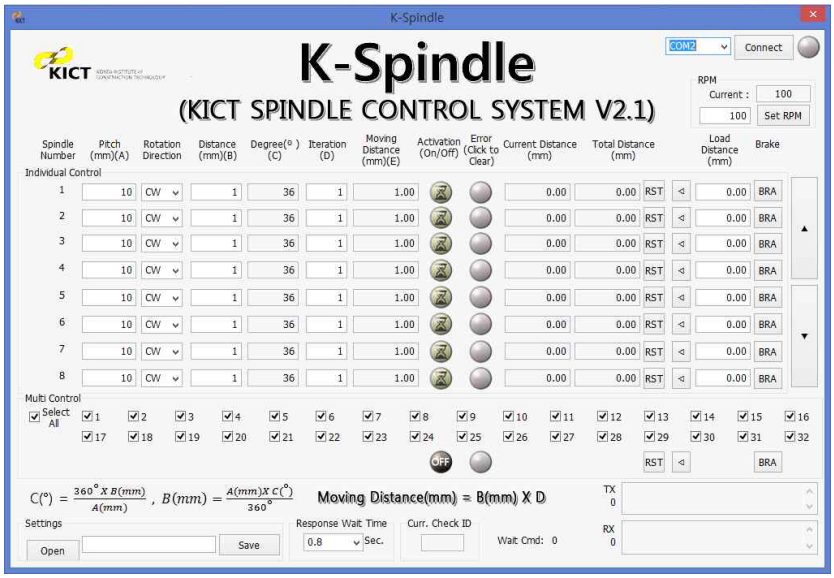
스핀들 작업을 위해 동시에 여러 작업자를 투입할 수 있겠으나 인건비 상승으로 인한 공사비가 증가하게 되므로 보통 슬립폼 현장에서는 소수의 작업자가 스핀들 작업을 전담하게 된다. 따라서 전술한 스핀들 조정 지연 및 누락 문제점들이 언제든지 발생할 수 있다. 이 연구에서는 기존의 인력에 의한 수동 방식을 무선 다중 제어 전동식으로 대체함으로써 작업의 효율을 높이면서 정밀한 형상관리가 이루어질 수 있도록 고안하였다.

개발된 무선 다중 제어 전동식 스핀들은 전기 모터, 모터를 제어하는 제어기, 전기 모터에 결합되어 회전력을 증가시키는 기어박스, 무선 모듈, 제어 프로그램으로 구성되어 있다(그림 3.2.9). 제어프로그램인 K-Spindle(그림 3.2.10)은 무선으로 32개 이상의 스핀들을 개별 및 동시에 제어할 수 있도록 개발되었으며, 제어 오작동 시 각각의 스핀들에 대해 제어 프로그램에서 즉시 확인 및 조정할 수 있는 기능과 실제 스핀들의 이동 거리를 표시할 수 있는 기능을 포함하고 있다. 또한 우천 시를 대비해 방우구조로 제작되었다.

전동식 스핀들은 슬립폼시스템 웨일러에 장착되게 되며, 이때 회전력을 전달하기 위해 기어박스에 봉강을 설치하고, 봉강에 유니버설 조인트를 설치하여 암나사를 체결한 후 암나사에 수나사를 연결하게 된다. 설치가 완료된 후 전기 모터를 회전시키게 되면 수나사가 암나사 안으로 삽입되는 방식으로 수나사의 길이가 줄어들어 거푸집의 위치를 이동시킴으로써 슬립폼시스템의 변단면 작업을 수행하게 된다.



<그림 3.2.9> K-Spindle의 구성 요소



<그림 3.2.10> K-Spindle의 제어 프로그램

다. K-Spindle을 적용한 슬립폼시스템 실험

■ 1차 실험

1차 실험은 기존 방식의 수동식 스핀들과 이 연구에서 개발한 K-Spindle의 성능을 비교하기 위한 것으로써, 변단면 슬립폼시스템에 수동식 및 전동식 스핀들 시스템을 동시에 적용하여 실험을 수행하였다. 그림 3.2.11은 기존 방식의 수동식 스핀들 30개와 K-Spindle 2개가 적용된 변단면 슬립폼시스템으로 시공되고 있는 모습

이다. 시공되는 실험체는 직사각형 중공단면을 가지는 2기의 콘크리트 주탑으로써, 높이 10m까지 외부 40cm, 내부 23cm의 단면이 축소되도록 계획되었다.



<그림 3.2.11> 변단면 슬립폼시스템

기존 수동식 스핀들 30개를 수동으로 모두 회전시키는데 약 1시간 이상이 소요되었다(그림 3.2.12). 스핀들 회전 작업은 슬립폼시스템의 상승 직후 수행되게 되었는데 일부 콘크리트가 지연되거나 철근 배치가 지체되면 스핀들 조정이 급박하게 진행해야 했다. 이때 이미 타설된 콘크리트가 상당히 경화하여 인력으로는 스핀들을 회전시킬 수 없는 경우가 발생하기도 하였다. 이러한 경우가 실험 중에 수차례 발생하였으며, 설계된 단면의 형상으로 맞추기 위해 다음 상승 시에 스핀들을 더 많이 회전시켜야 했다. 이러한 경우 작업성은 더 떨어져 형상관리에 문제점이 발생하게 되었다. 반면에 K-Spindle인 경우(그림 3.2.13) 스핀들의 동시 제어를 통해 1시간 이상 소요되던 스핀들 회전 작업시간을 불과 1분 이내로 줄일 수 있었으며, 슬립폼시스템의 상승 시간 지연으로 인해 콘크리트가 상당히 경화된 경우에도 인력보다 10배 이상의 회전력을 발휘할 수 있어 스핀들 회전 작업에 문제가 발생하지 않았다. 70kg의 작업자가 1m 길이의 스패너로 돌릴 수 있는 최대 회전력 686.7Nm에 불과하지만, 전동식 스핀들에 의한 회전력은 약 10,000Nm로 14배 이상으로 강력하다.



<그림 3.2.12> 수동식 스핀들 작업



<그림 3.2.13> 전동식 스핀들 작업

■ 2차 실험

콘크리트 주탑 전체에 전동스핀들을 장착하여 2차 실험을 수행하고 K-Spindle의 성능을 검증하였다. 시공은 1차 실험에서 시공된 주탑을 추가적으로 2m 상승시키고 외부 6.6cm, 내부 4.6cm의 단면을 K-Spindle을 통하여 축소되도록 계획되었다. 단면 변화를 위해 총 32개(내부 16개, 외부 16개)의 전동 스핀들이 설치되었으며, 각각의 K-Spindle에는 오작동 여부를 원격지 사무실에서 확인할 수 있도록 CCTV가 장착되어 있어 제어 PC에서 편리하게 스핀들 작동에 따른 회전량을 점검할 수 있다.



<그림 3.2.14> 스핀들 관리 CCTV

K-Spindle은 슬립폼에서 웨일러와 요크레그에 장착하였으며, 이때 회전력을 전달하기 위해 기어박스를 통과하는 강봉에 유니버설 조인트와 너트를 체결한 특별

한 장치를 개발하여 적용하였다. 스핀들은 매우 큰 인장력을 받는 상태에서 회전을 하게 된다. 큰 인장력에 의한 회전 저항을 줄이기 위해 유니버셜조인트라는 특별한 장치를 고안하게 되었으며, 강봉의 나사부가 너트에 삽입되는 방식으로 길이가 줄어들어 거푸집의 위치를 이동시켜 슬립폼시스템의 변단면 작업을 수행하게 된다.



<그림 3.2.15> K-Spindle의 설치(외부)



<그림 3.2.16> K-Spindle의 설치(내부)

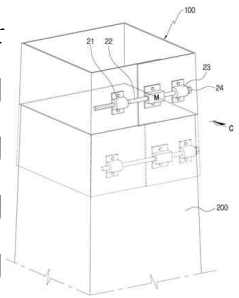
스핀들 작업은 슬립폼시스템이 10cm 상승할 때마다 거푸집을 내부 1.15mm, 외부 1.65mm씩 이동되도록 수행되었다. PC 제어프로그램에서 명령한 목표 값에 맞게 정확히 스핀들을 회전시키기 때문에 정밀한 형상관리를 실현할 수 있었다. 여기서 확인되었듯이 K-Spindle에서는 스핀들리스트(기준 높이별 회전량)을 세분화하면 매우 정밀한 형상 관리가 가능함을 알 수 있다.

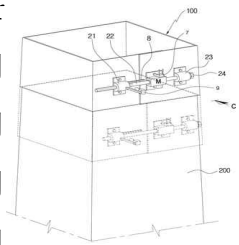
스핀들의 회전을 위해 제어 프로그램에서 무선으로 신호를 보내는데, 약 0.8초의 간격을 두고 각각의 스핀들이 순차적으로 작동되게 된다. 32개의 스핀들이 모두 작동을 완료하는데 약 35초가 소요되었으며, 이는 1차 실험에서 30개의 수동식 스핀들을 회전시키는데 소요된 1시간보다 대폭 단축된 것이다. 스핀들 작업 시간의 단축은 직접적으로 공기 단축의 효과와 함께 간접적으로 콘크리트의 초기경화 직후에 스핀들 작업이 완료되므로 형상 관리의 용이성을 증진하고 있다. 또한 숙련기술자를 대폭 줄였을 뿐만 아니라 인력보다 강한 회전력을 발휘하였으므로 1차 실험에서 발생하였던 스핀들 회전 불능 문제점이 전혀 나타나지 않았다. 그림 3.2.17은 K-Spindle로 변단면을 수행하여 시공한 콘크리트 주탑 모습이다. 전반적으로 양호한 변단면 상태 및 콘크리트 품질을 확인할 수 있다.

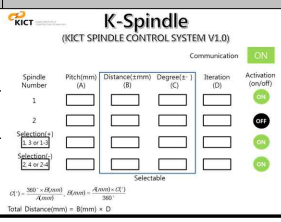


<그림 3.2.17> 2차 실험 종료 후 콘크리트 타워

라. 특허(2건) 및 SW(1건)

번호	신축기구를 구비한 거푸집 장치	특허 10-1398530
1	본 발명은 콘크리트 구조물을 시공하기 위한 거푸집 장치에 관한 것으로서, 구체적으로는 콘크리트 구조물의 단면크기가 줄어드는 변단면 형태로 콘크리트 구조물을 시공할 수 있도록, 콘크리트 구조물의 측면을 형성하는 거푸집 판재의 크기를 콘크리트 구조물의 단면크기 변화에 맞추어서 가변시킬 수 있는 신축기구(mechanism)를 구비한 거푸집 장치에 관한 것이다.	

번호	신축 상태의 모니터링에 의한 신축의 정밀 조정이 가능한 신축기구를 구비한 거푸집 장치	특허 10-1482528
2	본 발명은 콘크리트 구조물을 시공하기 위한 거푸집 장치에 관한 것으로서, 구체적으로는 콘크리트 구조물의 단면크기가 줄어드는 변단면 형태로 콘크리트 구조물을 시공할 수 있도록, 콘크리트 구조물의 측면을 형성하는 거푸집 판재의 크기를 콘크리트 구조물의 단면크기 변화에 맞추어서 가변시킬 수 있는 신축기구(mechanism)를 구비한 거푸집 장치에 관한 것이다.	

번호	K-Spindle	프로그램 C-2013-027672
3	본 프로그램은 기존 인력에 의존하여 수행해오던 스핀들 작업을 전동식으로 수행하기 위한 제어 프로그램으로서, 모터의 회전속도, 회전방향 및 회전각도를 조절할 수 있도록 프로그램 되어있다.	

4. 소결론

가. 슬립폼 최적기 상승기술

초음파(표면파)를 이용하여 슬립폼시스템 거푸집 내에 타설되는 콘크리트의 경화 정도를 파악하여 슬립폼을 최적기에 상승시켜서 공기단축과 콘크리트 품질 향상을 도모하였다. 다양한 콘크리트 배합과 양생온도 조건에서 관입저항시험, 압축강도시험, 표면파 속도 측정 실험을 수행하였으며, 이를 통해 슬립폼시스템의 상승에 필요한 표면파 속도를 도출하였다. 그리고 제안된 표면파 속도를 이용하여 변단면 콘크리트 주탑을 성공적으로 시험 시공하였다. 이를 통해 제안한 표면파 속도가 슬립폼시스템 상승 기준으로 충분히 활용될 수 있음을 확인하였다. 시공 전 시공현장에 맞는 다양한 콘크리트 배합과 양생온도 조건에 대하여 본 연구를 토대로 표면파 속도를 설정한 후 슬립폼시스템을 상승시키면 매우 효율적이고 안전하게 콘크리트 주탑을 시공할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 슬립폼 변단면 자동화기술

기존 수동식 스핀들의 문제점을 보완할 수 있는 무선 다중 제어 전동식 스핀들(K-Spindle)을 개발하여 변단면 슬립폼시스템에 적용하였다. 개발된 K-Spindle을 이용하여 2번의 시험시공을 수행한 결과 무선으로 스핀들의 개별 및 동시 제어가 가능함을 확인하였다. K-Spindle은 회전 속도와 방향을 각각 조절할 수 있어 슬립폼시스템 운영 시 작업의 효율을 높임과 동시에 정밀한 형상관리가 가능한 것을 시험시공을 통해 확인하였다. 그리고 적용된 기어박스의 기어비에 따라 회전력을 증가시킬 수 있었으므로 인력보다 큰 회전력을 발생시켜 변단면 처리가 용이하였다. 24시간 연속해서 작업이 이루어지는 슬립폼시스템의 특성상 작업 현장에는 상시 예비 발전기가 준비되어 작업 매뉴얼에 따라 운용되고 있다. 그러나 모든 전원공급이 중단되는 아주 극단적인 상황에서도 변단면 작업이 가능하도록 수동 작동 기능도 포함되었으며 방우구조로 제작되어 기상조건에 관계없이 작업을 수행할 수 있도록 하였다. 이들은 시험시공에서 가상적으로 상황을 모사하여 실험하였는데 정

상적인 작동을 확인할 수 있었다.

제 3 절 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리시스템 개발

1. 개요

콘크리트 고주탑은 이동식거푸집시스템 시공법(ACS method)이나 슬립폼시스템 시공법(Slipform method)을 이용하여 단계별로 시공하기 때문에 가장 중요한 점은 시공정밀도라고 할 수 있다. 시공정밀도가 불량할 경우 주탑에 예상치 못한 추가모멘트가 발생하여 안전성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

기존의 레이저 광파기를 이용한 측량방식은 측량점간 가시거리가 확보되지 못하는 기후조건 하에서는 측량자체가 불가하여 공정의 진행이 중단되는 등의 문제점이 발생한다. 시공목표 달성에 불확실성이 존재함으로, 기후와 같은 외부요인에 영향을 받지 않는 진화된 시공 관리시스템의 개발이 필요하다.

현재 여러 분야에 걸쳐 활용범위가 많이 확대되고 있는 GPS를 이용한 장대교량 주탑의 시공정밀도를 향상시키는 기술을 개발하여 정밀한 계측을 통해 주탑의 시공정밀도를 향상시키고, 측정에 소요되는 인력과 시간을 절약하여 공기단축 및 공사비 등을 절감을 달성하고자 한다. 주탑 완공 이후에도 상부구조물의 시공 및 완공후 차량 하중에 따른 주탑의 거동을 지속적으로 모니터링할 수 있어 주탑의 안전성을 확보할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 GPS와 정밀경사계를 이용한 콘크리트 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리시스템(KICS : KICT Integrated Configuration control System)을 개발하였다. 그리고 현장검증실험을 수행하여 개선된 콘크리트 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리시스템의 실용화 기반을 마련하였다.

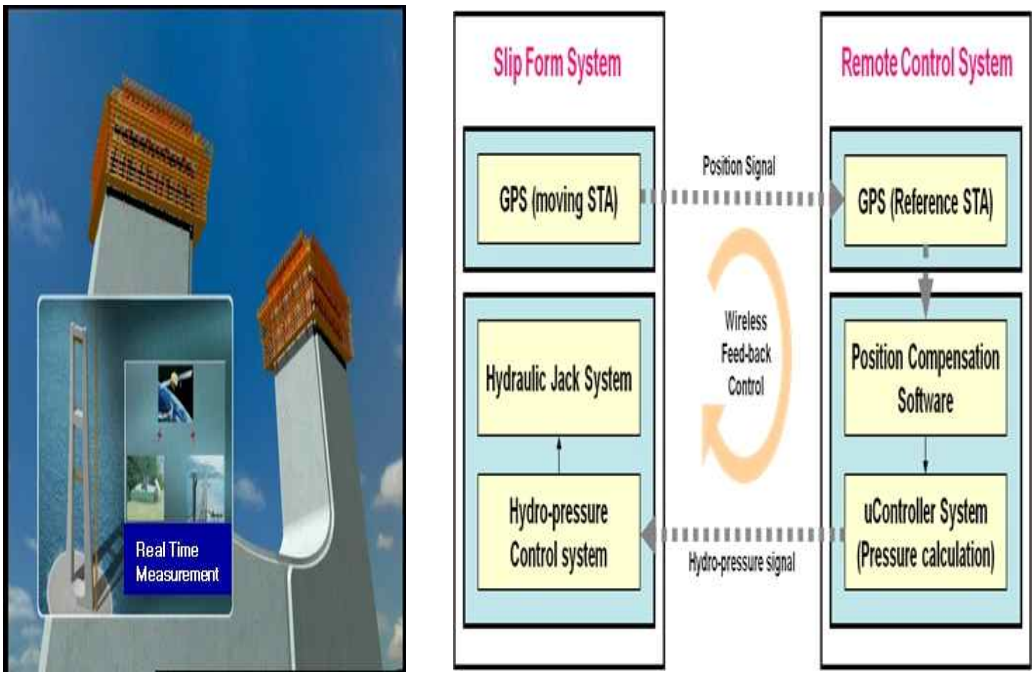
1단계에서는 변단면 슬립폼 공법에 의해 시공되는 콘크리트 주탑에서 GPS와 경사계를 이용한 자동 계측시스템을 도출하였고, PC 제어모듈, GPS 수신모듈, 데이터로거 송수신모듈, 유압기 controller 등의 하드웨어을 개발하였으며 이들을 연동해서 제어할 수 있는 통합 소프트웨어를 작성하였다. 고주탑 형상 및 시공관리 시스템(KICS)의 완성도를 높이기 위해서는 다양한 검증 실험이 필요하므로 KICS 소프트웨어 개발시 다수의 실내/외 검증실험을 수행하였다.

2단계와 3단계 연구에서는 KICS의 슬립폼 현장적용 시 정밀도 향상을 위해 여러 가지 GPS 측량기법 및 신호처리 방안 연구를 수행하였고, 4회에 걸친 콘크리트

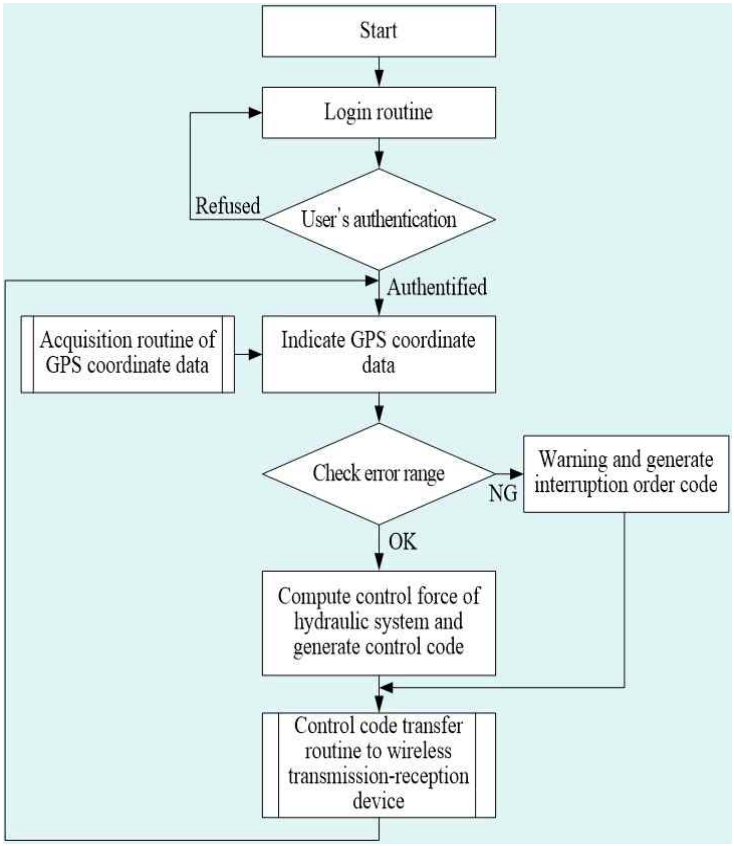
주탑 시험시공 현장에 적용하여 KICS 성능검증 및 보완을 실시하였다.

2. KICS(KICT Integrated Configuration control System) 개발

신형식 시공정밀도 및 형상관리 시스템(KICS : KICT Integrated Configuration control System)은 슬립폼에 고정된 GPS와 경사계로부터 계측 값을 수집하여 폐루프 제어를 통해 고주탑의 시공정밀도를 지속적으로 감시 및 제어할 수 있도록 구성하였다. KICS는 슬립폼 시공 시 GPS와 경사계의 데이터를 무선으로 수신하고 목표 상승높이와 연직도를 제어 PC에서 확인한 후 필요 시 유압전동펌프를 작동시켜 슬립폼을 상승시킨다. 유압 제어는 사용자가 유압잭을 개별적으로 실시하거나 전체적으로 동시 작동 명령을 무선으로 송출할 수 있다. 유압펌프가 가동하여 유압실린더의 상승을 유도하는데 목표한 상승높이에 도달 시 더 이상의 유압이 인가되지 않는다. 각 유압실린더에는 레벨링 장치(Level Device)가 설치되어 있어 슬립폼의 상승 및 수평도를 기계적으로도 제어할 수 있다. 슬립폼시스템의 시공정밀도 관리 개념은 그림 3.3.1과 같고 KICS의 알고리즘은 그림 3.3.2와 같다.



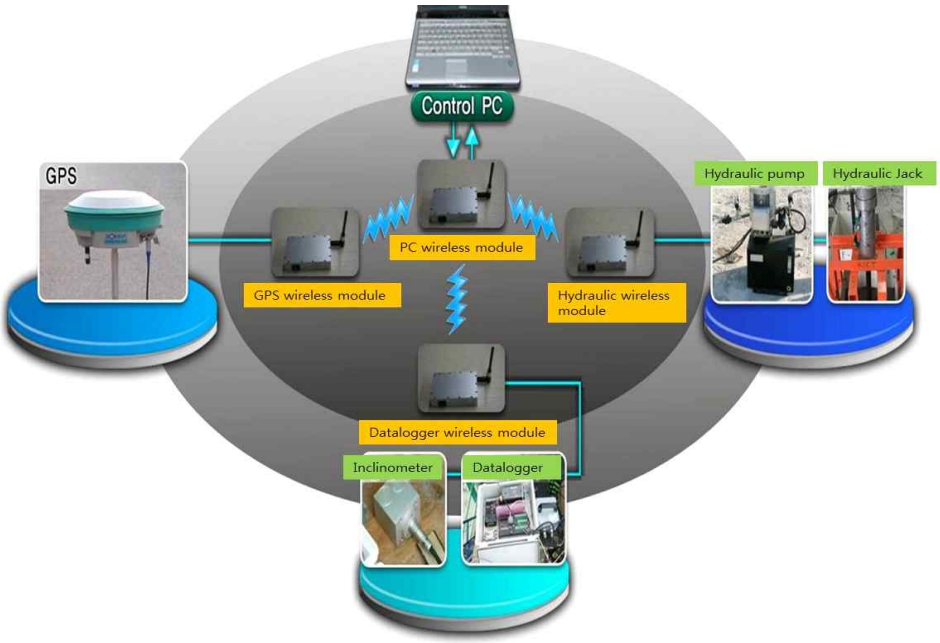
<그림 3.3.1> 슬립폼시스템의 시공정밀도 관리 개념



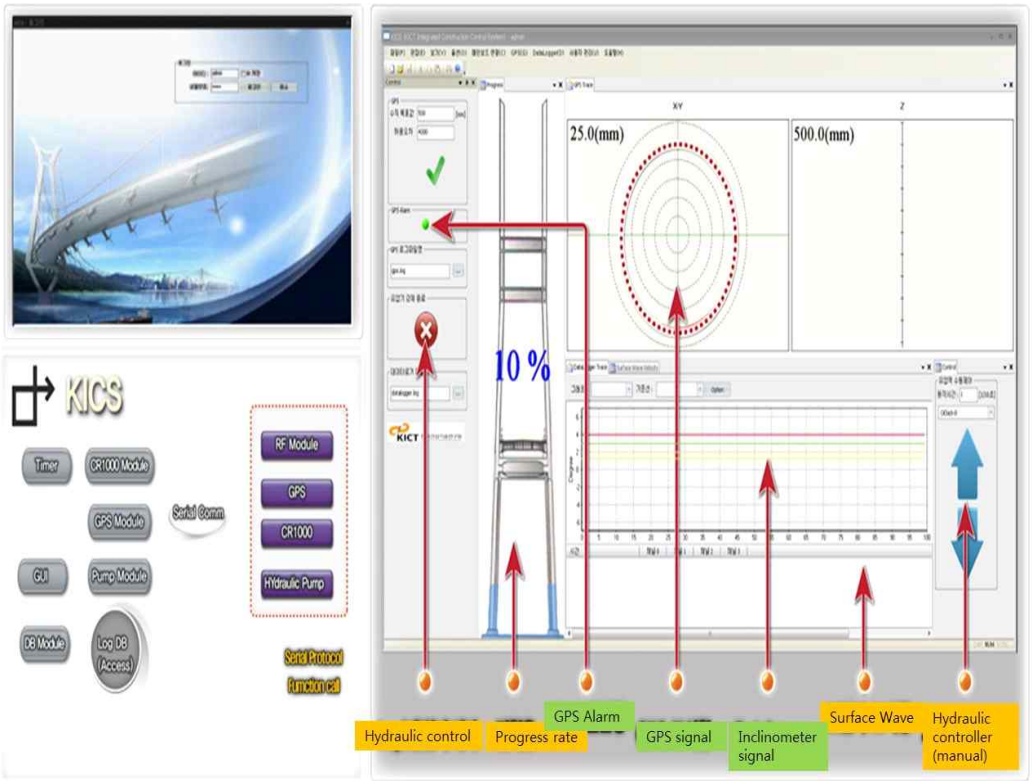
<그림 3.3.2> KICS의 Flow Chart

시공정밀도 관리 개념을 무선기반의 원격 제어를 구체적으로 나타내면 그림 3.3.3과 같다. 그리고 개발된 KICS의 메인 화면은 그림 3.3.4와 같은데 주탑의 시공 상황을 실시간으로 볼 수 있고 연직도가 관리한계내에 있는지 즉각적으로 확인할 수 있다. 또한 유압잭을 제어하고 경사계 데이터를 동시에 볼 수 있도록 하여 프로그램내에서 통합적으로 시공관리 수행할 수 있게 하였다.

KICS는 실제 시공 현장에 투입하여 성공적으로 운용되어야 하므로 기술적 완성도를 높이기 위한 다양한 검증 실험이 필요하다. 1단계 연구를 통해 KICS 소프트웨어 개발 시 다수의 실내/외 사전 검증실험은 물론이고 2단계 및 3단계 연구를 거치면서 울산대교 등에서 현장 적용성 실험을 수행하였다. 현장 실험을 통해 크레인 간섭현상이나 거푸집 진동 등 시공현장에서 발생할 수 있는 다양한 문제점을 사전에 해결하였다.



<그림 3.3.3> 무선기반 원격 시공정밀도 관리



<그림 3.3.4> KICS 메인화면

3. 시험시공 중 형상 관리를 통한 검증 및 보완

가. 1차 시험시공 중 검증 및 보완

콘크리트 주탑의 1차 시험 시공 중 KICS를 사용하여 형상을 관리하는 수행하였다. 여기서는 레이저 연직기, 토탈스테이션, 레이저변위계, 줄자 계측 등을 동시에 실시하여 서로 비교 검토하였다. GPS데이터와 여러 계측 데이터의 중복 확인을 통해 시공 중 형상 및 시공정밀도 관리시스템 KICS를 보완하였다. 그림 3.3.5는 시공중인 콘크리트 타워의 전경을 나타낸 것인데, 직사각형(하단 4m×4m, 상단 3.77m×3.6m) 중공단면을 가지는 1기의 콘크리트 타워이다. 높이 10m까지 시공하였으며 외부 40cm, 내부 23cm가 축소되는 변단면을 가지고 있다.

본 연구에서 개발한 변단면 슬립폼시스템이 적용되었으며 KICS를 이용하여 형상관리 및 폼 인상을 성공적으로 실시하였다.



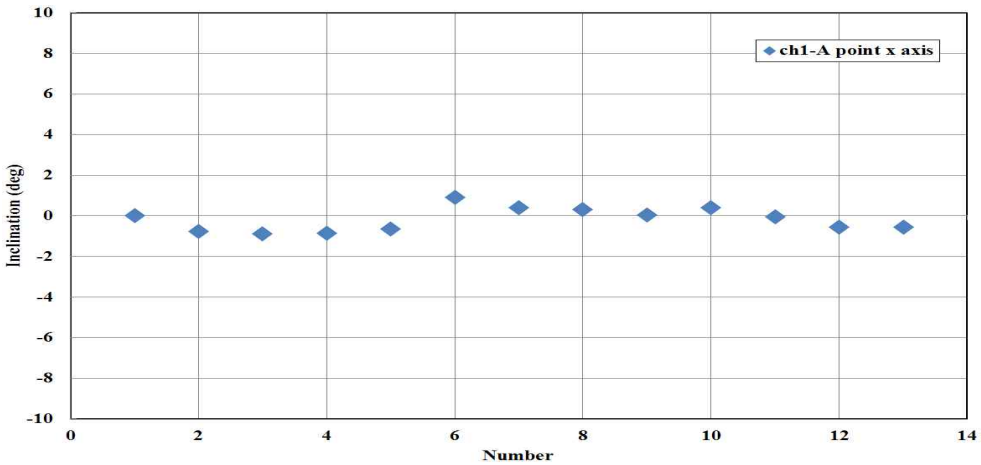
<그림 3.3.5> 타워 전경



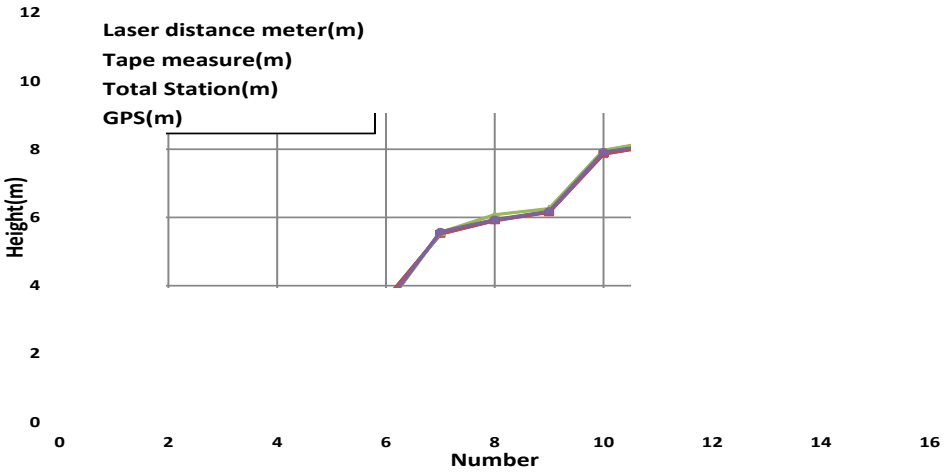
<그림 3.3.6> 센서 설치도



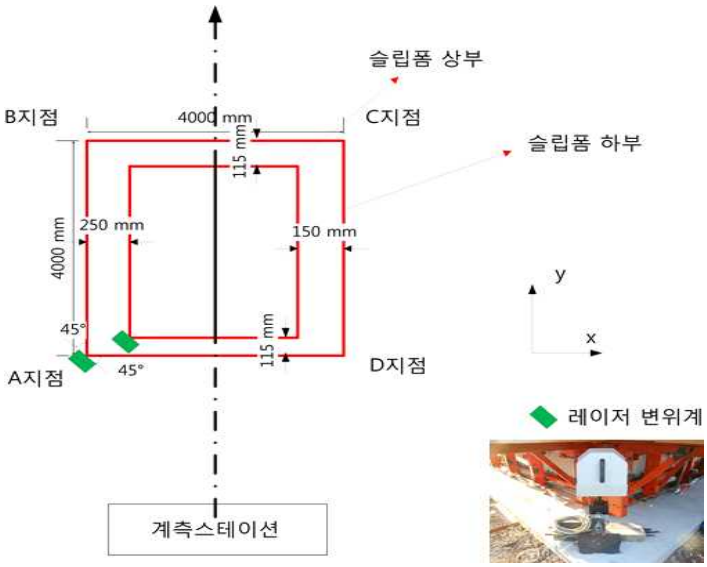
<그림 3.3.7> GPS 이동국 수신기 고정대 및 장착 모습



<그림 3.3.8> 슬립폼 waler x축 경사값



<그림 3.3.9> 시험 시공중 높이값 비교

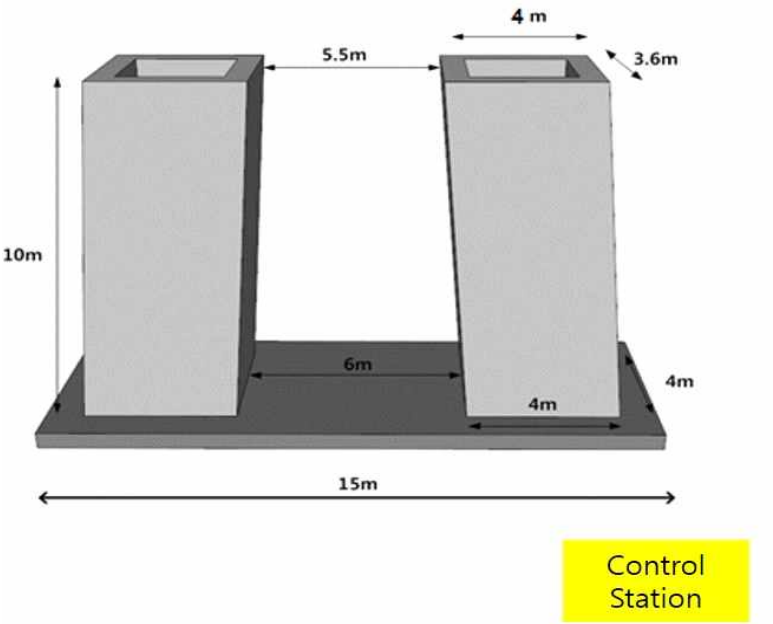


<그림 3.3.10> 모서리 레이저변위계

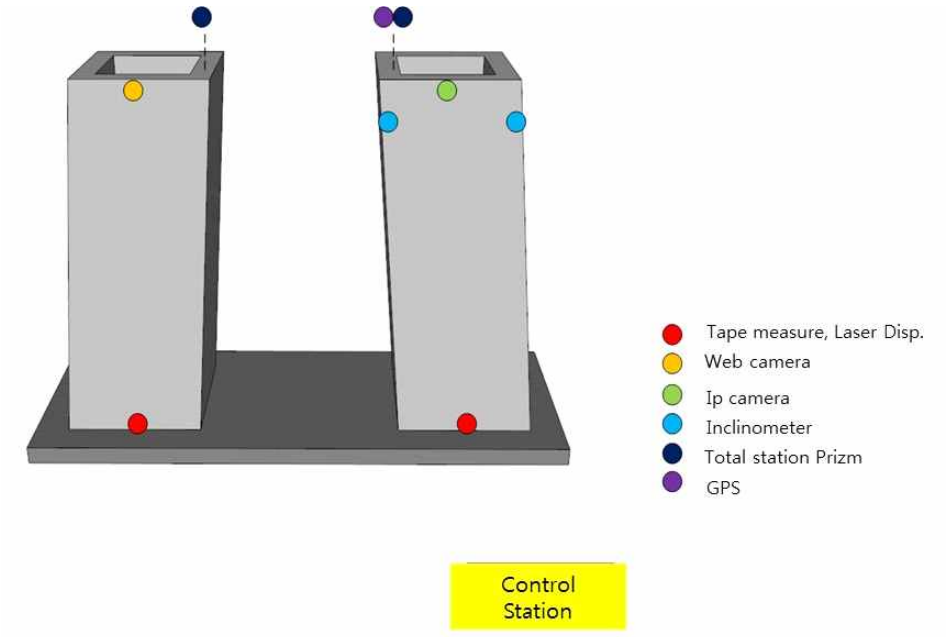
나. 2차 시험시공 중 검증 및 보완

일반적인 장대교량 주탑과 유사하게 래티스 거더와 주탑 Leg 2기를 갖는 변단면 콘크리트 주탑을 동시 시공할 때 KICS를 투입하여 성능을 검증하였다. 1차 시험시공과 동일하게 본 연구에서 개발된 K-슬립폼시스템을 적용하였으며, 시공 높이는 10m이다. 중공형 단면 Leg를 가지며 하단부 4m×4m, 상단부 4m×3.6m의 변단면 사각형 구조이다. 래티스거더를 설치하여 Leg간 거리를 하단부 6m에서 상단부 5.5m로 기울어지도록 시공하였다(그림 3.3.11). 그림 3.3.12는 계측 센서의 위치

이며 그림 3.3.13은 시공 전경을 나타낸다.



<그림 3.3.11> 콘크리트 타워 2기 제원



<그림 3.3.12> 센서 설치 위치



<그림 3.3.13> 2차 시공전경

정밀도 향상을 위하여 GPS 기준국과 이동국을 동시에 설치하였고 RTK(Real Time Kinemtic)로 실시간 데이터를 획득하였다. 기준국은 시공 시 간섭과 그 영향을 최소화하기 위해 주탑 현장에서 60m 정도 떨어진 지점에 설치하였고, 이동국은 슬립폼시스템 상단에 설치하였다.

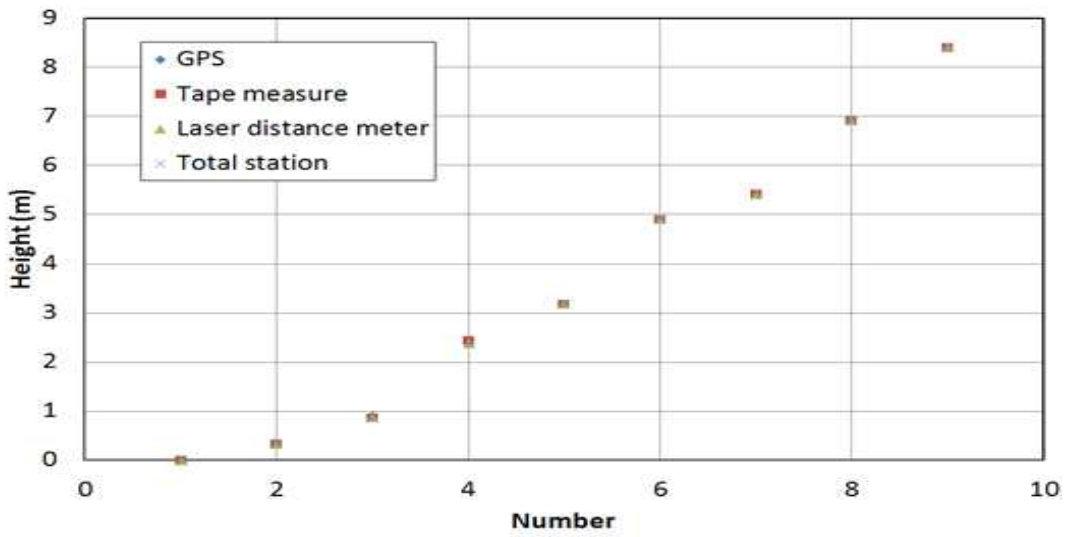


<그림 3.3.14> GPS 기준국과 이동국 설치



<그림 3.3.15> 토탈스테이션 계측장면

그림 3.3.16은 GPS, 줄자, 레이저 거리측정기, 토탈스테이션을 이용하여 측정한 슬립폼 시공 중 높이 값을 보여준다. 대부분 비슷한 수준의 계측높이를 나타내었으며 GPS의 정밀도를 확인할 수 있었다.



<그림 3.3.16> GPS, 줄자, 레이저 거리측정기, 토탈스테이션 높이

그림 3.3.17과 그림 3.3.18은 IP카메라 적용 레이저 연직기와 web 카메라를 적용한 레이저 연직기를 보여준다. 2가지의 레이저 연직기 계측 기법도 이 연구에서 개발하여 적용한 기술이다.



<그림 3.3.17> IP카메라를 적용한 레이저 연직기

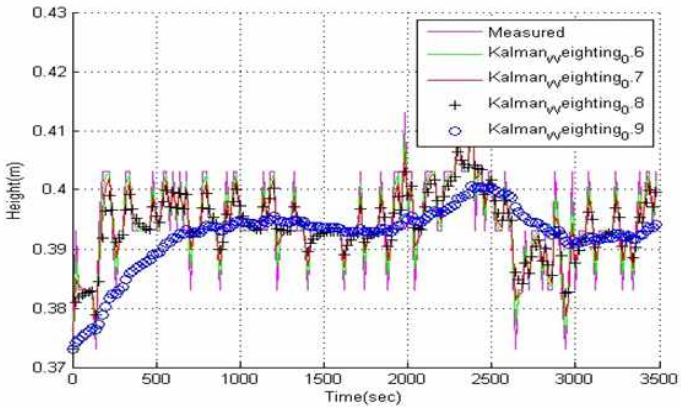


<그림 3.3.18> Web 카메라를 적용한 레이저 연직기

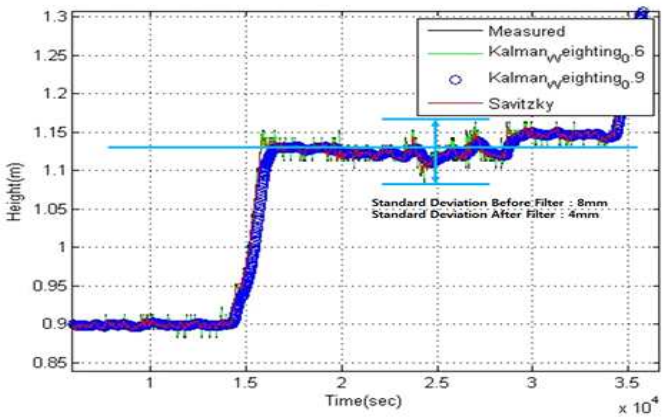
4. GPS 신호 처리 모듈 개발

가. GPS 계측 신호처리

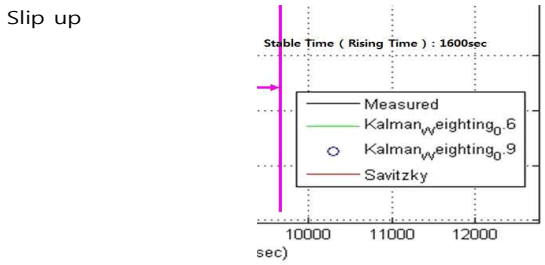
현재 KICS는 슬립폼 시공 중 실시간 측위 기법인 RTK-GPS(Real time Kinematics GPS)값을 사용하고 있다. 24시간 연속으로 콘크리트를 타설하는 슬립폼 시공의 경우 실시간 측위 기법 적용이 적절하다. 그러나 GPS 계측 신호의 보다 높은 정밀도를 확보하기 위하여 신호의 후처리 기법을 도입하였다. 이 연구에서는 콘크리트 주탑 슬립폼 시공 시 획득한 데이터를 가지고 4종류의 Kalman Filter 가중치와 Savizky-Golay Filter를 적용하여 데이터를 처리하였다.



<그림 3.3.19> 칼만 필터 가중치 적용

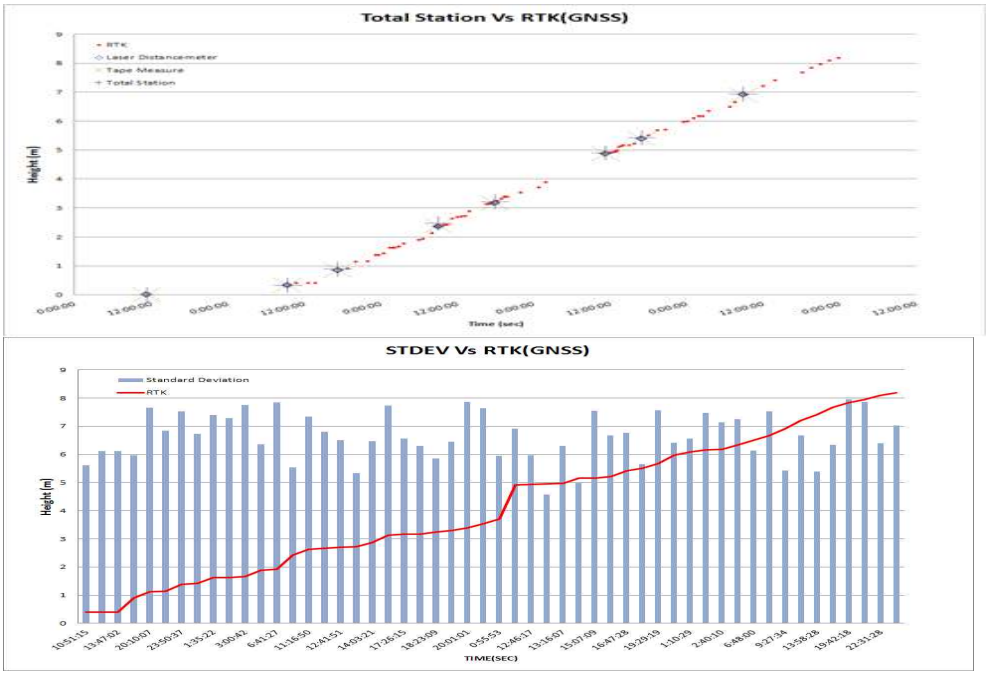


<그림 3.3.20> 슬립폼 정지시 후처리 계측값 비교



<그림 3.3.21> 슬립업 시 후처리 계측값 비교

그림 3.3.22에서 알 수 있듯이 전체 계측 구간 내에서 RTK 데이터 경향은 신뢰수준 95%에서 표준편차 ± 10mm 내에 계측 관리 되고 있으며, 전체 높이의 경우 상당히 정밀하게 계측 관리되고 있다. 실험데이터를 분석해보면 RTK 가 풀린 경우를 제외하고는 RTK 데이터가 ± 10mm 안쪽으로 충분한 관리 기준치 안에 데이터가 들어온다(표 3.3.1). RTK가 무선 환경이나 기타 장애 요인으로 인한 특이치를 제외하고는 현장 적용 시 충분한 정확도를 기대할 수 있다고 판단된다. 또한 Kalman Filter 사용시 4mm 까지 줄일 수 있다. 여기서 시공 현장에서는 거푸집의 진동의 영향을 최소화하기 위해 슬립업후 안정화 시간이 반드시 필요하였다. 칼만 필터를 후처리로 적용하여 정밀 계측이 가능하였는데 실시간으로 적용하는 부분에 있어서는 계측 안정화를 위한 시공 프로세스 정립이 선행 되어야 할 것으로 사료된다. Savitzky-Golay Filter 와 Kalman Filter 모두 적용 가능 하며, 실시간 프로그램을 통해 관리 가능할 것으로 판단된다. 다만 Savitzky-Golay Filter를 사용 시 표준편차의 획기적인 개선을 기대하기는 어려우며, 이 부분은 Kalman Filter 와의 연계를 통해 시공 시 기준치와 후처리 정밀 계측 데이터로 분류하여 데이터를 계측 관리하는 것이 필요함을 알 수 있었다.



<그림 3.3.22> 토탈스테이션과 실험 RTK-GPS 비교

<표 3.3.1> 데이터 결과분석

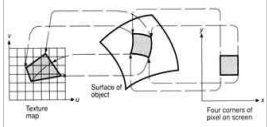
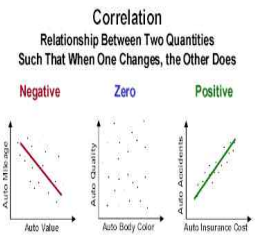
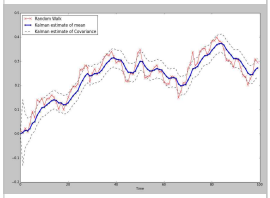
Data Type			Std(mm)	특기사항
Original Data			10	RTK 발산 데이터 포함
Estimation Data			10	Real Data
Kalman Filter Data	Weighting	0.6	9.3	Stable Time : 거의 유사
		0.7	8.7	
		0.8	7.2	
		0.9	4.1	Stable Time Over 1000 sec
Savitzky Golay Filter Data			8.3	Stable Time : 거의 유사

나. 실시간 칼만필터 처리 모듈 개발

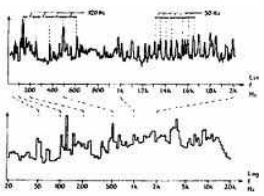
시공정밀도 관리시스템인 KICS에 GPS 데이터 신호를 칼만필터링 기법으로 후처리할 수 있도록 통합하여 개선하였다. 칼만필터 처리 모듈은 비정상적으로 획득

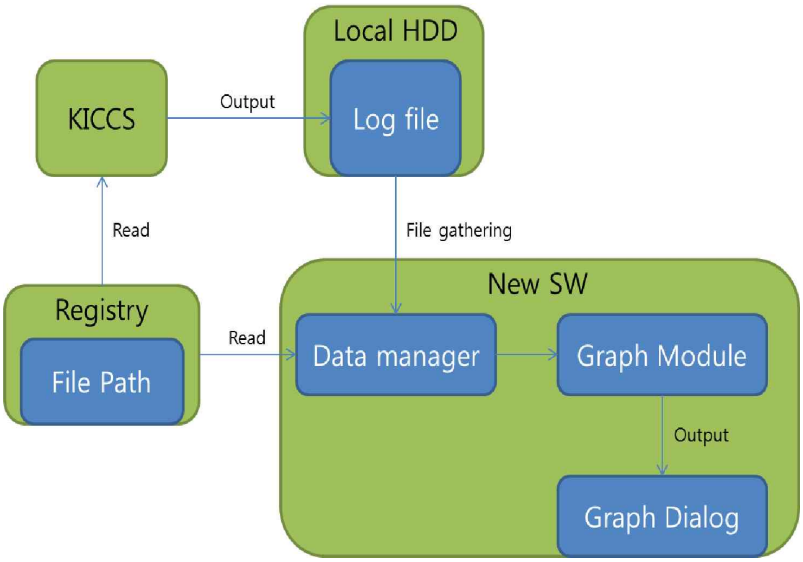
한 데이터 소거를 통한 계측데이터의 신뢰성을 확보하는 것이다.

▪ 데이터 처리 단계

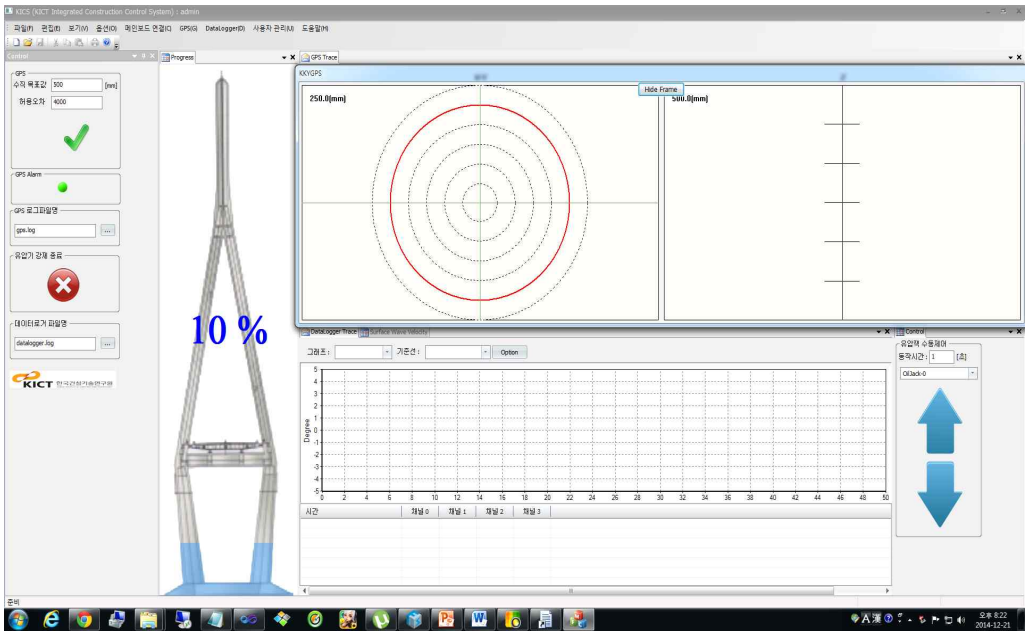
File 생성	Mapping	Correlation	Kalman Filter
			
• GNSS 시스템 프로그램으로 File 형식으로 데이터 전송 • 파일로부터 원하는 데이터 추출(WGS84 좌표 추출)	• WGS84 to XYZ • ENU 좌표 획득 • 초기설치좌표값을 기준으로 0점 처리	• 신호 자기상관성 분석 • 이상오차 데이터 소거 및 데이터 연결성 확보	• Kalman Filter 적용하여 데이터 필터링 • 필터링 데이터 디스플레이

▪ 개발 적용 순서

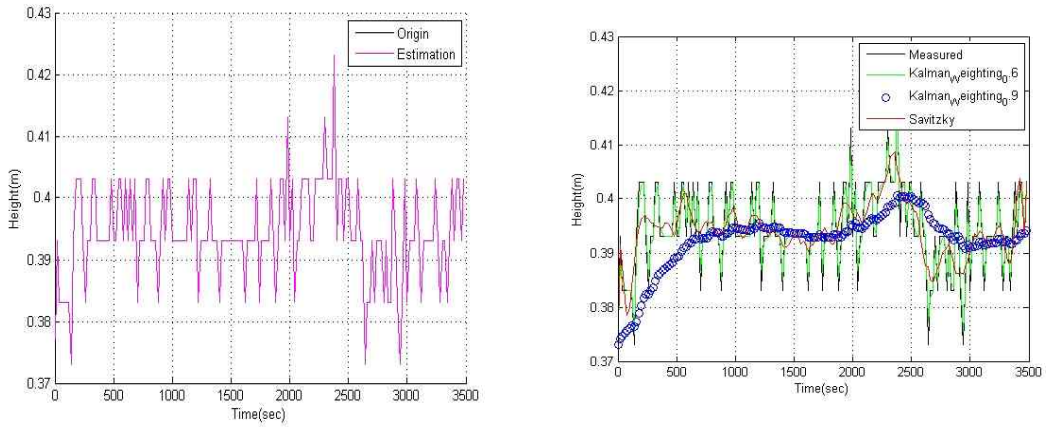
① 프로세스분석	② 신호처리모듈구성	③ 모듈 통합	④ 현장실험
			
• 데이터 처리를 위한 전체 프로세스 분석 • 각각의 프로세스에서의 모듈기능 정의 • 모듈 통합 방안 설계	• 신호처리 기법 및 적용방안 검토 • 신호처리 기법 모듈 프로그래밍	• 기능별 모듈 통합 및 동작상태 점검	• 현장실험 및 데이터 분석



<그림 3.3.23> Kalman Filter 모듈 프로그램 구조

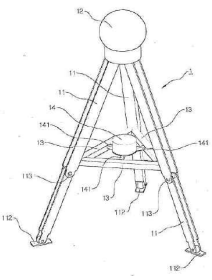


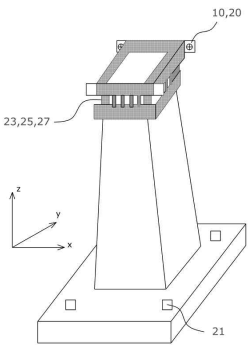
<그림 3.3.24> 칼만필터 모듈이 포함된 KICS

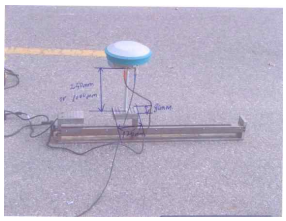


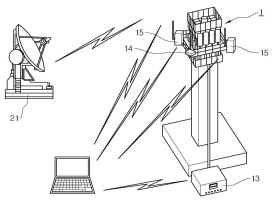
<그림 3.3.25> 필터링된 데이터

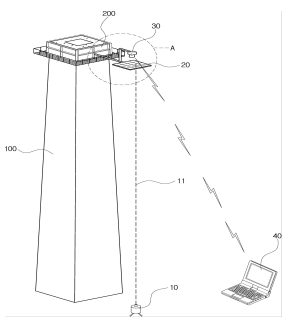
다. 특허(5건) 및 SW(1건)

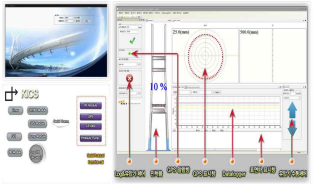
번호	교량의 콘크리트 주탑 시공시의 연직상태 측정기	특허 10-0994821
1	본 발명은 교량의 콘크리트 주탑 시공시의 연직상태 측정기에 관한 것으로서, 구체적으로는 콘크리트 타설용 이동식 거푸집을 이용하여 사장교, 현수교 등과 같은 교량의 콘크리트 주탑(케이블 지지용 주탑)을 시공함에 있어서, 콘크리트 교량 주탑이 설계된 연직상태를 가질 수 있도록 이동식 거푸집의 수평위치와 경사도를 측정함으로써 시공되는 주탑의 연직상태를 측정하는 연직상태 측정기에 관한 것이다.	

번호	고소시공물의 연직도 관리 시스템 및 이를 이용한 시공 방법	특허 10-1023469
2	본 발명은 교량 교각, 굴뚝, 고소시공물의 연직도 관리시스템 및 이를 이용한 시공방법으로써 폭조절장치. 측벽의 기울기를 조절하는 기울기 장치 및 수직이동 장치를 구비하는 슬립폼을 이용하여 고소구조물을 시공하는 연직도 관리시스템에 측벽에 설치된 두 개이상의 경사계와 레이저 거리측정기를 이용하여 측정하고 제어하는 방법이다.	

번호	GPS수신기의 변위장치 및 이를 이용한 GPS수신기의 평면 위치 좌표 검측 오차 시험방법	특허 10-1040273
3	본 발명은 GPS 수신기의 변위장치 및 이를 이용한 GPS 수신기의 평면 위치 좌표 검측 오차 시험방법에 관한 것으로서, 구체적으로는 GPS 수신기에 의하여 평면 위치 좌표를 검측함에 있어서, 검측된 평면 위치 좌표의 오차 발생 여부를 시험하고 오차 정도를 측정하기 위하여 GPS 수신기의 위치를 평면에서 정밀하게, 그리고 용이하게 이동시킬 수 있도록 하는 GPS 수신기 변위장치에 관한 것이다.	

번호	교량의 콘크리트 주탑의 연직도 관리를 위한 원격자동제어 기능을 가진 주탑 시공용 이동식 거푸집 장치 및 이를 이용한 교량의 콘크리트 주탑 시공방법	특허 10-1047527
4	본 발명은 교량의 콘크리트 주탑을 시공하기 위한 이동식 거푸집 장치 및 이를 이용한 콘크리트 주탑의 시공방법에 관한 것으로서, 구체적으로는 사장교, 현수교 등과 같은 교량의 콘크리트 주탑(케이블 지지용 주탑)을 시공함에 있어서, 콘크리트 타설용 이동식 거푸집 장치에 구비되어 이동식 거푸집을 이동시키는 잭 장치를 원격에서 자동적으로 제어하여 주탑의 연직도를 정밀하게 관리할 수 있도록 하는 콘크리트 교량 주탑의 연직도 관리를 위한 원격자동제어 기능의 이동식 거푸집 장치 및 이를 이용한 교량의 콘크리트 주탑 시공방법에 관한 것이다.	

번호	시공정밀도 향상을 위한 레이져 촬영 이용 콘크리트 구조물의 연직도 모니터링방법 및 이를 이용한 콘크리트 구조물의 연직도 관리방법	특허 10-1263658
5	본 발명은 콘크리트 기둥 구조물 또는 수평한 콘크리트 부재 등의 콘크리트 구조물을 슬립폼을 이용하여 시공할 때, 레이저 광선의 조사(照射)를 이용하여 그 연직도를 모니터링함으로써, 콘크리트 구조물의 계획된 연직도에 부합되는 상태로 시공되도록 정밀하게 관리할 수 있는 콘크리트 구조물의 연직도 관리방법에 관한 것이다.	

번호	KICS(KICT Integrated Configuration control System) Ver1.0	프로그램C -2013-003133
6	본 프로그램은 고주탑의 시공정밀도 및 형상관리를 수행할 수 있도록 작성되었다.	

5. 소결론

슬립폼으로 건설되는 콘크리트 주탑의 시공정밀도 관리는 교량구조물의 안정성 및 작업인력의 안전을 위하여 매우 중요한 요소이다. 더구나 장대교량에서 미관을 위해 주탑을 3차원 형상 및 변단면으로 설계하면 연직도 뿐만 아니라 형상에 대한 정밀한 관리가 필요하다. 따라서 정밀 계측에 의한 신속한 판단과 이를 근거로 슬립폼을 자동 제어할 수 있는 시공정밀도 관리시스템이 필요하다.

콘크리트 고주탑의 정밀한 시공을 위해서 기존 재래식 측량기법에서 탈피하여 기후 등 외부요인에 의한 영향 등을 최소화할 수 있는 무선기반 원격 고주탑 시공정밀도 및 형상관리 시스템을 개발하였다. 전천후 측정을 위해 GPS와 경사계를 적용하였으며, 무선으로 유압잭을 조정하여 슬립폼을 자동 제어할 수 있게 하였다. 또한 시공정밀도 확보를 위해 데이터 획득 및 처리방법을 개선하고 GPS와 정밀 경사계를 동시에 적용한 자동 계측시스템의 모듈을 개발하였다. 실시간 GPS 계측기법의 정밀도 향상과 보완을 위해 칼만필터링 기법을 이용한 신호처리 통해 신뢰성있는 데이터를 확보하였다. 이상과 같은 시스템에 대하여 실내·외 실험을 수행하여 성능을 검증하였다. 본 연구의 변단면 슬립폼시스템의 핵심 요소기술 중 하나인 KICS(KICT Integrated Configuration control System)를 4회에 걸친 변단면 콘크리트 주탑의 시험시공에 적용하였다. 시공 중 형상관리 및 슬립업을 성공적으로 수행함으로써 KICS의 현장 적용성을 확인하고 실용성을 확보하였다.

제 4 절 경량 슬립폼시스템 개발

1. 개요

장대 교량의 고주탑 시공은 주로 해상에서 이루어지고 있으므로 고려해야 할 점이 더욱 많다. 일반적으로 초장대 교량의 콘크리트 주탑 시공 시에는 거푸집 작업(Form work)은 고공 작업에 따른 안전성 확보가 중요하고 작업 기간도 길어 공사비에서 20~40% 정도의 비교적 높은 비중을 차지하고 있다. 거푸집 작업은 공기, 원가, 안전 측면에서 중점 관리 공종이라 할 수 있다.

기존 슬립폼시스템은 강재 거푸집 및 프레임으로 구성되어 있어 중량이 무겁고 조립이 복잡한 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 모듈화 및 경량화된 구조로 신속한 조립과 해체가 가능한 변단면 슬립폼 거푸집을 개발하였다. 이 연구에서는 슬립폼 거푸집을 경량화 시키기 위하여 GFRP로 제작되는 거푸집의 형상과 모듈을 개발하였다.

GFRP 거푸집의 연구 분석을 통해 국내·외에서 아직까지 슬립폼 공법에 GFRP를 적용한 사례는 없는 것으로 파악되었으며, GFRP 거푸집을 적용하기 위해 기존의 강재 거푸집의 성능을 확보할 수 있도록 구조해석 및 실험을 통해 분석하였다. 강재와 동일한 성능을 갖는 GFRP 거푸집을 개발하기 위해 GFRP판의 재료 특성을 실험을 통해 파악하였다. 이 연구에서 사용되는 GFRP판의 경우 다방향성의 섬유를 혼입한 것이다. 기존 방법에 의하면 이러한 다방향성 판의 인장 특성을 파악하기 힘들기 때문에 새로운 방법을 제안하였다.

GFRP를 슬립폼 거푸집에 적용하기 위해 슬립폼시스템의 구성요소들에 대해 분석하였으며, 슬립폼시스템의 강재를 대체하여 경량 GFRP 모듈형 패널 및 웨일러 연결부를 제안하였다. 제안된 GFRP 거푸집 모델을 직접 생산하여 시제품을 제작하였으며 구조특성과 연결부의 성능을 검증하기 위해 휨실험 및 연결부 특성 실험을 실시하였다. 또한 강재와 GFRP 거푸집의 재료 특성에 따른 콘크리트의 양생온도 차이를 확인하기 위해 온도 특성 실험을 함께 실시하였다. 마지막으로 이 연구에서 제안한 GFRP 거푸집 모듈의 성능 검증을 위한 현장적용성 실험을 수행하였으며, 개발 변단면 슬립폼시스템에 의한 콘크리트 주탑 시험 시공을 수행하였다.

2. GFRP 거푸집의 역학적 특성

가. GFRP판 인장 성능 시험

(1) 시험개요

GFRP 플레이트 재료의 인장성능을 검토하기 위해 D사에서 제작한 고순도 유리섬유와 각종 레진 매트릭스의 혼합구성으로 제작된 제품을 사용하였다. 일반적으로 1방향 또는 2방향성 GFRP plate의 시험방법은 ASTM, ACI, ISO등의 기준으로 표준화되어 있으나 다방향성의 경우 구체적인 규격이 없고 시험방법이 서로 상이하다. 특히 후판인 경우 그립의 영향을 배제할 수 있는 시험방법이 존재하지 않아 여기서는 FRP 보강근의 시험방법을 참조하여 시험을 실시하였다. 기존의 물림구를 유압잭으로 잡아주는 형태의 인장시험 방법이 아닌 정착장치를 새롭게 고안하여 시험을 실시하였다.

(2) 시험방법

노출부와 물림구의 길이를 GFRP Rod의 인장시험 방법과 동일한 1:2의 길이비로 제작한 시험체(SL-1, SL-2)로 각각 실시하였다. 또한, GFRP Plate의 형상을 아령형으로 제작한 SLE-1, SLE-2의 시험체를 추가로 제작하여 시험을 진행하였다. 물림구와 GFRP Plate의 접합을 에폭시로 실시하였으며 SL-2와 SLE-2의 경우 볼팅과 에폭시를 함께 이용하여 접합하였다.

<표 3.4.1> GFRP 인장 시험체

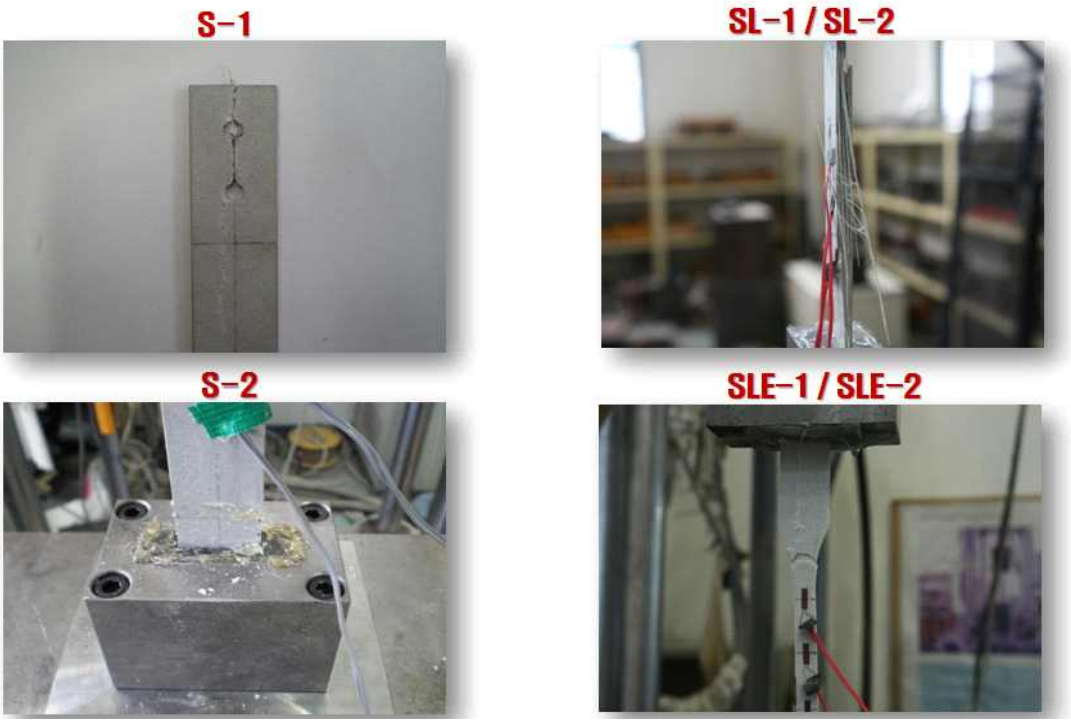
시험체	제원 (mm) (b x h x 물림 X 노출)	길이비 (물림구:노출부)	물림구 고정
K-1	25 X 250 X 50 X 150	1:3	
K-2	25 X 250 X 50 X 150	1:3	
S-1	25 X 250 X 50 X 150	1:3	에폭시
S-2	25 X 250 X 50 X 150	1:3	에폭시 + 볼트
SL-1	25 X 750 X 300 X 150	1:2	에폭시
SL-2	25 X 750 X 300 X 150	1:2	에폭시 + 볼트
SLE-1	25 X 1000 X 400 X 200	1:2	에폭시
SLE-2	25 X 1000 X 400 X 200	1:2	에폭시 + 볼트

(3) 시험 결과 및 분석

시험 결과, GFRP Rod 인장 시험체와 길이비를 동일하게 제작한 SL-1, SL-2 시험체의 경우 각각 평균 344.1MPa, 352.5MPa의 인장강도를 보였으며 SLE-1, SLE-2 시험체의 경우 각 평균 283.3MPa, 268.7MPa의 서로 다른 인장강도를 보였다. 응력-변형률 곡선을 통한 평균 탄성계수는 SL 시험체의 경우 평균 24.4GPa, SLE 시험체의 경우 평균 24.7GPa의 결과를 보였으며, 평균 변형률은 약 0.011~0.015의 결과를 나타내었다.



<그림 3.4.1> 제안된 인장시험체 시험전경



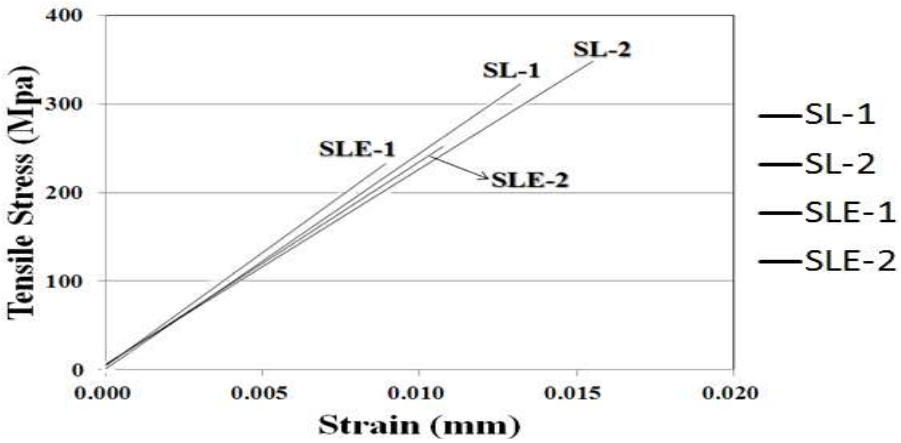
<그림 3.4.2> 제안된 인장시험체 파괴 양상

<표 3.4.2> GFRP 인장시험 결과

시험체	길이비 (물림구:노출부)	최대인장강도 (평균)	탄성계수 (평균)	파괴양상
K-1	1:3	-	-	물림구 미끌림
K-2	1:3	-	-	물림구 미끌림
S-1	1:3	-	-	물림구 찢김
S-2	1:3	-	-	물림구 봄힘
SL-1	1:2	약 334 MPa	약 25 GPa	전체적인 인장파괴
SL-2	1:2	약 343 MPa	약 23 GPa	전체적인 인장파괴
SLE-1	1:2	약 283 MPa	약 26 GPa	국부파괴
SLE-2	1:2	약 286 MPa	약 24 GPa	국부파괴

<표 3.4.3> GFRP 인장시험 요약

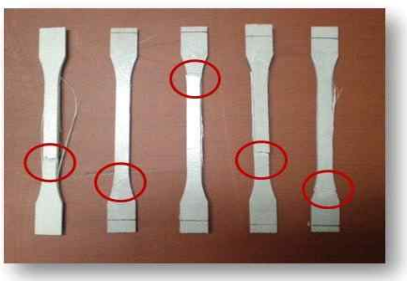
	SL-1	SL-2	SLE-1	SLE-2
Average of Breaking Load	25.8 kN	26.4 kN	8.5 kN	8.1 kN
Average of Tensile Strength	344.1 MPa	352.5 MPa	283.3 MPa	268.7 MPa
Average of Elastic Modulus	24.6 GPa	24.2 GPa	24.9 GPa	24.5 GPa
Average of Strain	0.014	0.015	0.011	0.011



<그림 3.4.3> 제안된 인장시험체의 응력-변형률

❖ 한국화학융합시험연구원 [ASTM D638-08]

시험체	인장강도	탄성계수
1	363 MPa	37.7 GPa
2	390 MPa	23.5 GPa
3	402 MPa	30.6 GPa
4	386 MPa	30.0 GPa
5	406 MPa	31.1 GPa
평균	389.4 MPa	30.58 GPa



<그림 3.4.4> ASTM D638-08에 의한 인장시험 결과

나. GFRP 거푸집 모듈의 휨 강도 실험

(1) 실험개요

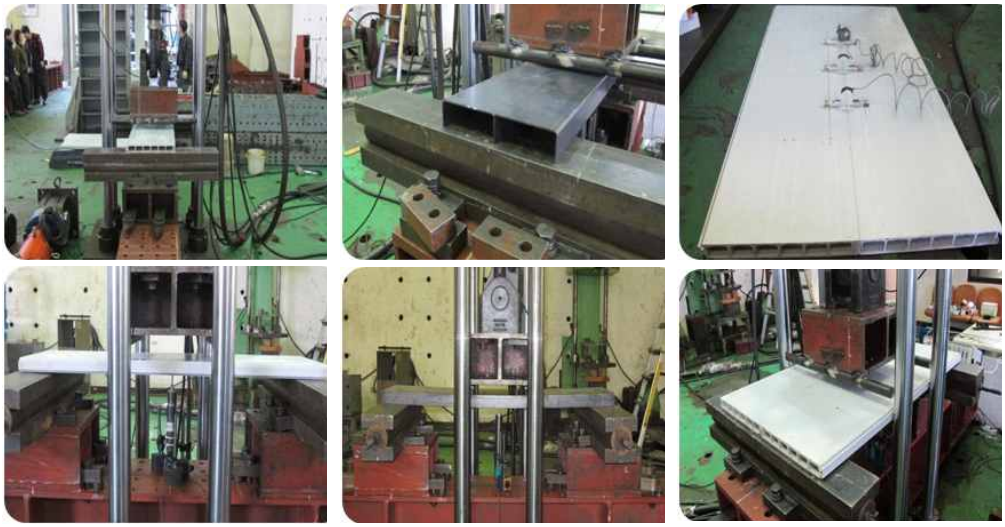
강재 거푸집과 GFRP 거푸집 모듈의 휨 성능 비교를 통해 GFRP 거푸집 모듈의 휨성능을 평가하고자 하였다.

(2) 실험변수 및 방법

실험변수는 강재 거푸집 3개, GFRP 거푸집 3개, 그리고 연결된 GFRP 거푸집 3개로 총 9개의 실험체에 대하여 실시하였다. 실험 방법은 국내외 기준을 비교하여 KS M ISO 178 실험방법을 통해 4점 재하 휨 실험을 실시하였으며 두 거푸집간의 비교를 위해 최대 처짐 20mm 까지 측정하였으며 마지막 실험체의 경우 파단까지 측정하였다.

<표 3.4.4> 거푸집 휨실험 변수

시험변수	강재	3EA
	경량 GFRP 모듈	3EA
	연결된 경량 GFRP 모듈	3EA
		총 9EA 시험체
시험속도	기준 : 0.6mm / sec 시험 : 0.1mm / sec	
시험방법	최대처짐이 20mm 까지 측정 – 3EA 최대처짐 20mm 측정 후 마지막 변수는 파단까지 측정	



<그림 3.4.5> 강재 및 GFRP 거푸집 휨실험 전경

(3) 실험결과

① 파괴양상

강재의 경우 휨에 의해 처짐이 발생하였으며 GFRP 거푸집의 경우 탄성에 의해 최대 처짐 이후에 다시 원형으로 복원되는 양상을 보였으며 파괴 시 양쪽 면에서의 파단은 일어나지 않고 거푸집 안의 스티프너가 파단되는 양상을 보였다.



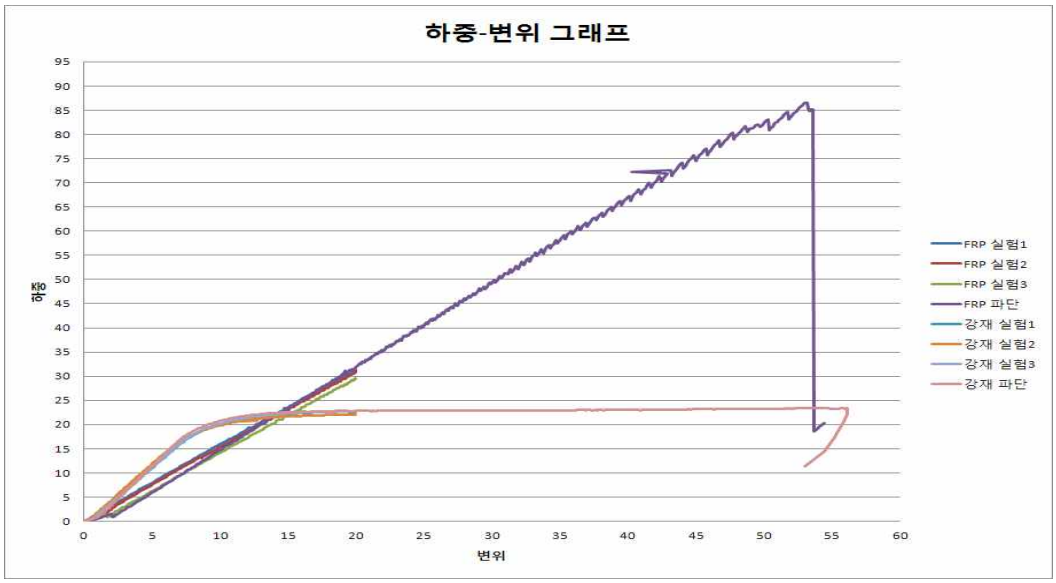
<그림 3.4.6> 강재 및 GFRP 거푸집 휨실험 전경

② 하중-변위 관계

실험결과 강재의 경우 20mm 처짐에 따른 최대 하중이 약 22kN으로 3개의 실험체가 거의 유사한 결과를 보였으며 GFRP 거푸집의 경우 약 32kN으로 강재에 비해 약 14.5%의 성능 향상 결과를 보였다.

③ 실험결과 분석

개발한 GFRP 거푸집의 성능을 검증하기 위해 기존 강재 거푸집과의 비교 및 GFRP 거푸집의 성능 검토 실험을 수행하였다. 휨 실험을 통해 콘크리트 측압으로 인해 발생되는 처짐을 비교, 분석한 결과 콘크리트표준시방서(국토해양부, 2009), 가설공사표준시방서(건설교통부, 2006)에서 제시하고 있는 조건을 만족하는 것으로 나타났다.



<그림 3.4.7> 강재 및 GFRP 거푸집 모듈의 휨성능에 따른 하중-변위 곡선

다. 소형 슬립폼시스템의 검증실험

(1) 개요

기존 슬립폼시스템은 강재로 구성되어 있어 중량이 무겁고 조립이 복잡한 단점과 강재 특성상 외기의 열전달이 잘 되는 특성으로 인해 겨울철 공사가 어려운 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하고 외기차단 효과 및 조립이 간편한 모듈화된 GFRP 경량거푸집을 개발하고자 하였다. 이 연구에서는 강재와 GFRP 거푸집 모듈의 시제품을 제작하고 소형 슬립폼시스템을 구성하여 콘크리트 타설 및 슬립업을 수행하였다. 실험을 통해 슬립업 시 GFRP 거푸집 모듈의 구조적 거동을 파악하고 모듈 연결부에서의 누수 상태를 관찰하였다. 또한 강재와 GFRP 거푸집에

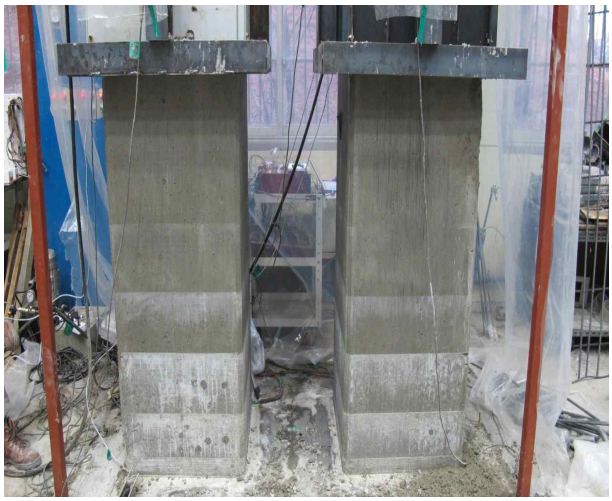
서 시간에 따른 콘크리트 온도를 측정하였고, 실험 후 강재 및 GFRP 모듈의 표면 상태를 확인하였다.

(2) 소형 슬립폼시스템 실험

강재와 GFRP 재료를 이용하여 1.2m 높이의 소형 슬립폼시스템 실험체를 제작하였다. GFRP 실험체의 GFRP 거푸집 모듈은 가로 30cm, 높이 1.2m로 총 8개를 인발법(pultrusion method)에 의해 제작하였다. 실험을 위해 콘크리트는 이순신대교 주탑 슬립폼 시공 시 적용한 고로슬래그 시멘트 배합을 사용하였고, 소형 콘크리트 믹서를 이용하여 40MPa강도의 콘크리트를 각 단계별로 배합 후 타설하였다. 2개 실험체 인상은 동시에 이루어졌고, 유압잭에 걸리는 인상하중, 변위를 측정하였다. 또한 위치별로 온도센서를 배치하였다. 실험체 외면 중앙에 변위계를 설치하여 거푸집 변형을 측정하였다.

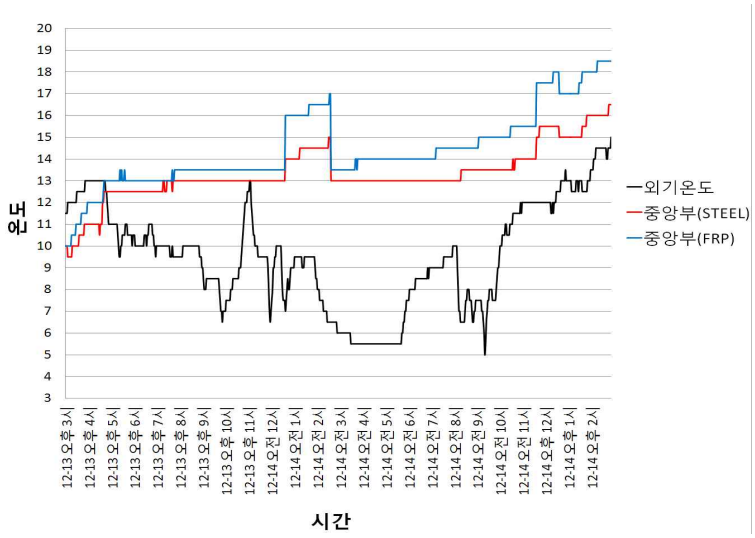


<그림 3.4.8> 실험체(GFRP, 강재)

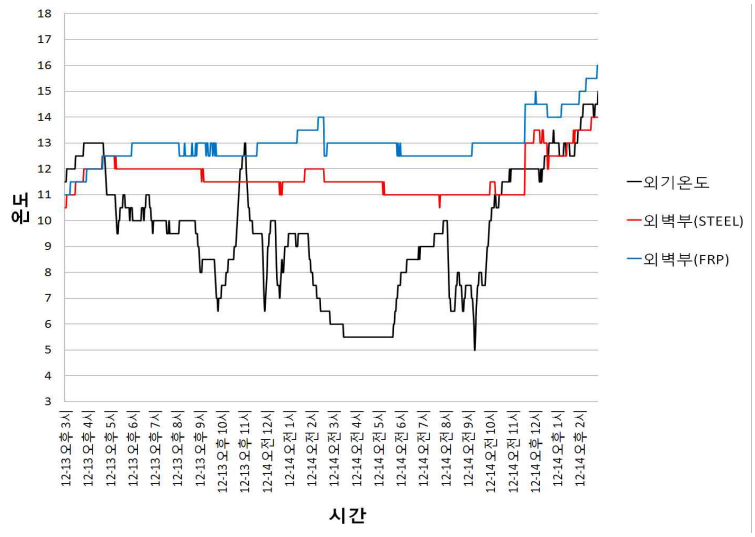


<그림 3.4.9> 슬립폼 인상

소형 슬립폼시스템 실험에서는 한 변에 GFRP 거푸집 모듈 2개를 연결하여 총 8개를 갖는 GFRP 및 강재 슬립폼시스템을 구성하고 총 높이 1.8m의 기둥 2개를 시공하는 실험을 실시하였다. 슬립업 후 콘크리트 구체의 표면 상태는 강재와 GFRP 거푸집 모두 양호한 양상을 보였고, 거푸집패널 내부의 마찰면도 콘크리트 부착물 없이 깨끗하였다. 이 실험을 통해 슬립폼시스템에 GFRP의 적용성을 확인하였고, 강재 슬립폼시스템보다 초기양생시 2℃정도 보온효과가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 실험체 제작시 2개의 GFRP 거푸집 모듈을 간편하게 조립할 수 있었으며, 콘크리트 타설 후 및 슬립업 후에도 연결부에서의 어떠한 변형이나 누수 등의 문제가 발생하지 않았다.



<그림 3.4.10> 실험체 중앙부 온도이력



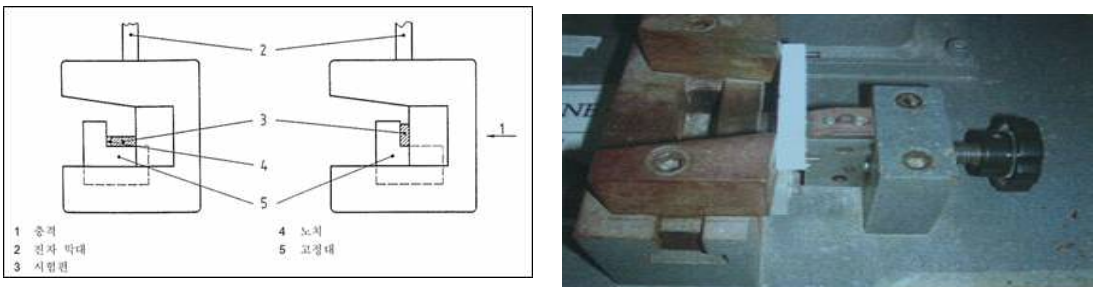
<그림 3.4.11> 실험체 외벽부 온도 이력

라. GFRP 거푸집의 재사용성 검토

거푸집 재사용성에 대한 연구로, 기존 강재 거푸집의 경우 부식에 의한 거푸집 손상으로 사용성을 잃고 교체되는 반면 GFRP 거푸집의 경우 부식에 대한 저항성은 강하나 그 외의 요인을 확인하기 위해 여러 시험을 통해 재사용성에 대한 분석을 수행하였다.

(1) 충격강도 시험

콘크리트 타설 시 발생할 수 있는 충격이나 기타 현장여건에 의해 발생되는 사고에 의해 거푸집이 깨지는 등의 충격에 의한 손상도를 검토하기 위해 충격강도 시험을 수행하였다. 시험방법은 KS M 179-1 샤르피 충격강도 시험방법에 준하여 실시하였다.



(a) 시험개요도 (b) 시험 전경

<그림 3.4.12> 샤르피 충격강도 시험 개요도 및 전경

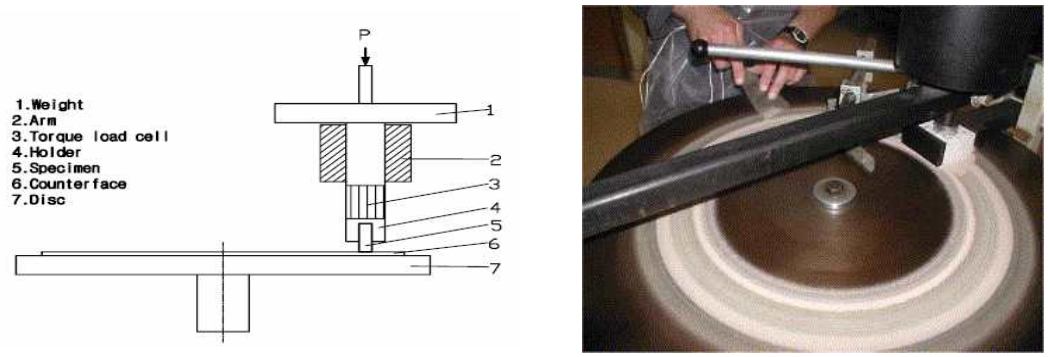
시험 결과 GFRP 재료의 샤르피 충격강도는 246(P) (kJ/m^2, 23±2 ℃)의 값을 얻을 수 있었다. 일반적으로 사용되는 SS400 강종의 거푸집은 GFRP와 비교하여 약 10배 이상의 값을 나타내는 것으로 나타났다.

콘크리트 표준시방서에 명시된 콘크리트 측압을 에너지로 표현하여 비교/분석한 결과, 2400kgf/m^{3}의 단위중량을 갖는 콘크리트가 약 2m 위에서 타설되어 거푸집에 수직으로 작용하여 에너지를 전달한다고 가정한 경우, 약 50 kJ/m^{2}의 충격에너지를 발생하므로 GFRP 거푸집은 콘크리트 타설에 대하여 충격강도 측면에서는 안전하다고 할 수 있다.

(2) 내마모 시험

콘크리트 타설 및 슬립업 시 콘크리트와 GFRP 거푸집의 마찰 마모 등에 의한 거푸집의 손상도/저항성을 평가하기 위해 마모 시험을 수행하였다. 시험방법은 pin-on-disc 마모시험기를 사용하여 GFRP 시편을 핀에 설치하고(시편 :

15×4.5×5.5mm) 디스크를 회전시키는 방법으로 하였다.



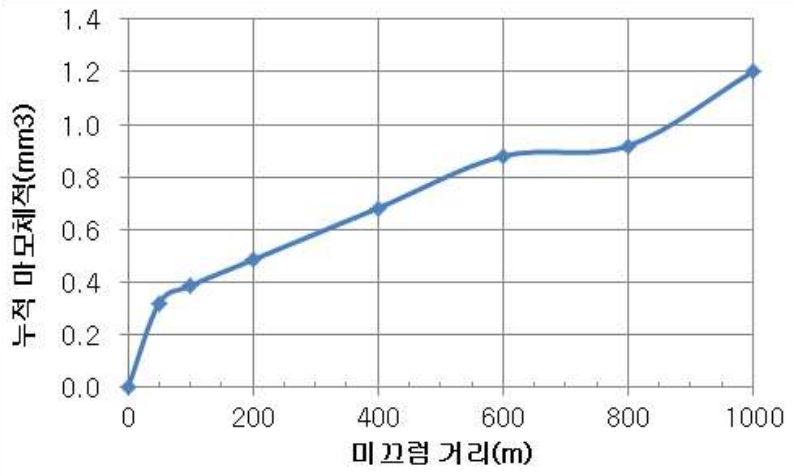
(a) 시험개요도 (b) 시험 전경

<그림 3.4.13> 내마모 시험 개요도

상대제인 SiC 연마지는 디스크의 표면에 접착하여 시험을 수행하였으며, 시험에 사용된 SiC 연마지의 입자지름은 9μm를 사용하였다. 또한, 시편에 적용된 하중은 10N을 재하하였고, 미끄럼 속도는 0.1 m/s로 미끄럼 거리 1000m 까지 마모시험을 실시하였다. 마모손실은 시험 전 및 시험도중 50m, 100m, 그리고 200m마다 무게손실을 구하여 누적마모체적을 측정하였다.

시험결과, 10N의 하중, 1m/s의 속도로 1000m까지 마모시험을 수행하였을 때까지 누적 마모체적량은 1.201mm3으로 시편 전체 체적의 약 0.32%가 손실되는 것으로 나타났다. 작용하는 콘크리트 측압을 거푸집 구조해석 시 25kN/m^2으로 사용하였는데, 이를 시편의 면적으로 계산하면 약 0.63N의 하중이 작용하는 것이지만 본 시험에서는 10N으로 설정하여 시험을 하였고 GFRP 거푸집을 1000m 슬립업에 사용하였다고 가정 시 약 0.32%의 체적 손실이 발생하였다.

본 시험에서 사용한 9μm입도의 연마지와 콘크리트와의 거칠기를 직접 비교할 수는 없지만, 시험 결과를 통해 10배가 넘는 하중 조건과 1000m의 사용거리에 따른 체적 감소량이 0.32%정도 발생하는 것으로 GFRP 거푸집의 콘크리트 면과의 마찰로 발생하는 마모 손상은 미미한 수준이라 판단된다.



<그림 3.4.14> 미끄럼 거리에 따른 누적 마모 체적량

(3) 결과 종합분석

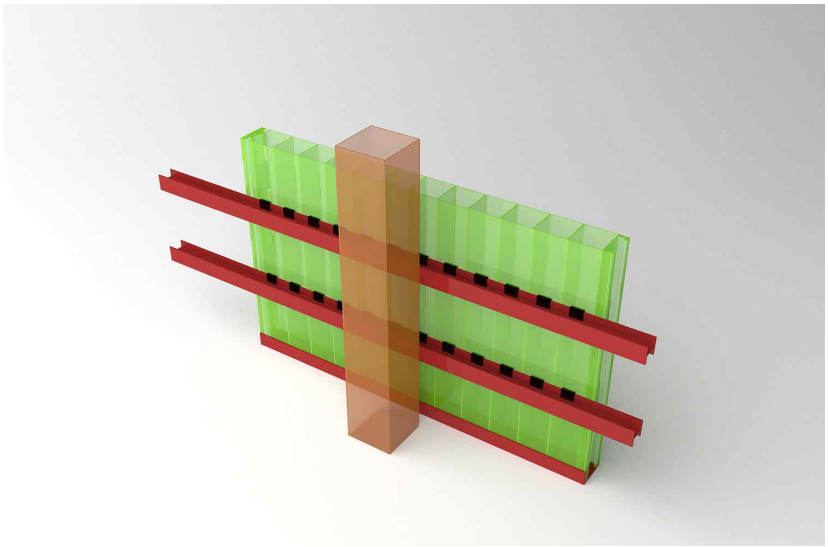
연구수행 결과 GFRP 거푸집의 재사용성은 콘크리트 시공 조건 하에서 우수한 것으로 나타났으며. GFRP 거푸집을 적용한 콘크리트의 내구성능 역시 문제가 없음을 알 수 있었다.

- 충격시험 결과, 비록 강재에는 못 미치는 결과를 나타내었으나 실제 거푸집 시공 시 발생되는 환경요인 및 발생조건에는 충분히 사용성을 만족하는 것으로 판단된다. 또한, 목업테스트를 실시한 결과 콘크리트 타설충격으로 인한 거푸집의 손상은 발생하지 않은 것으로 확인되었으며, 개발된 GFRP 거푸집은 슬립폼에 적용하는 데 문제가 없는 것으로 사료된다.
- 마모시험 결과, 콘크리트 측압에 해당하는 하중 0.63N을 크게 상회하는 10N의 하중의 조건으로 1000m의 마모거리동안 시험을 수행하였을 때, 손실되는 GFRP의 체적은 약 0.32%로 콘크리트의 측압에 의한 마모에 대한 GFRP 거푸집의 저항성은 우수한 것으로 판단된다. 마모거리 1000m는 이순신대교 주탑의 높이가 약 270m이므로 주탑 약 4개를 시공하여도 체적변화는 0.32% 발생하는 것으로 간주할 수 있으며, 이는 반영구적인 사용성을 의미한다고 사료된다.

3. GFRP 모듈형 패널 개발

GFRP를 슬립폼에 적용하기 위해서는 기존 강재의 성능을 검토하고 waler와의 접합면에 대응할 수 있는 GFRP 모듈 형상이 필요하며 조립과 해체가 용이한 형태로 고안되어야 한다. 기존의 강재 거푸집 모듈의 경우 콘크리트 측압에 따른 최대 처짐이 0.05mm로 나타났으며 GFRP 재료에서 동일한 성능을 갖는 모듈을 도출하기 위해 유한요소법에 의한 매개 변수 해석을 수행하였다. 6-cell BOX 형태로 이음부는 엇갈려 맞물림되는 구조로 시멘트 페이스트가 누출되는 것을 막고 조립이 간편한 형태로 설계되었다. 즉, GFRP 거푸집 모듈간에는 별도의 체결장치 없이 조립이 간편하게 이루어 질수 있게 제작되었으며 콘크리트 타설 후에도 이음부에서의 처짐이나 해체 시 문제점이 발생하지 않도록 하였다.

슬립폼시스템에서는 거푸집이 웰러에 용접 또는 볼트로 정착된다. GFRP거푸집을 적용할 때는 용접은 사용할 수 없고 볼트로 체결하더라도 반복적인 슬립업에 의해 체결력이 손실될 수 있다. 본 연구에서는 마찰과 기계적 물림 특성을 동시에 작용하고 현장에서 간편하게 조립하고 해체할 수 있는 체결구를 고안하였다. 이를 특허 출원하여 등록하였다. 실내외 실험 및 시험시공을 통해 체결구의 간편성과 견고성을 확인하였으며, 슬립폼 상승 및 변단면 대응 시 문제가 전혀 발생하지 않았다.



<그림 3.4.15> GFRP거푸집 조립 개념도

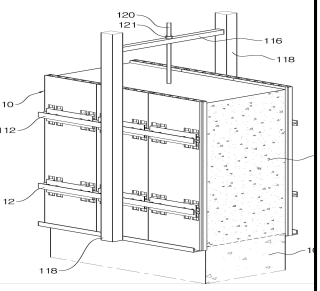


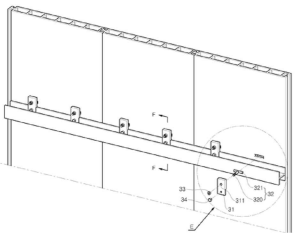
<그림 3.4.16> GFRP 모듈단면



<그림 3.4.17> 체결장치(2013년도 시험시공)

가. 특허(2건)

번호	섬유강화복합소재 판을 이용한 슬립폼	특허 10-1190150
1	본 발명은 섬유강화복합소재(GFRP)로 이루어지고 간편하게 조립 분해가 가능한 구성을 가지는 판부재를 이용하여 슬립폼 공법에 이용되는 콘크리트 타설용 슬립폼을 제작함으로써, 슬립폼의 경량화 및 그에 따른 작업성 향상을 도모하고, 염해 등에 대한 저항성 및 내부식성을 향상시키며, 조립 설치에 따른 크기 가변성 확대 및 규격화가 용이할 뿐만 아니라 재사용도 용이한 새로운 구조의 슬립폼에 관한 것이다. 본 발명에서는 콘크리트 축부재의 제작을 위한 콘크리트 타설용 슬립폼으로서, FRP 수직판과, 수평지지빔과, 수직기둥과, 하부지지부재와, 결합구를 포함하여 구성되며, 상기 결합구는, 지지빔 가압판과, 내부면 밀착판과, 가교부재와, 지지빔 밀착부재를 포함하여 구성되어 있으며, 내부면 밀착판이 FRP 수직판의 결합구 삽입공으로 삽입되고 FRP 수직판의 배면판에 밀착되어, 배면판과 수평지지빔이 지지빔 밀착부재와 내부면 밀착판 사이에 위치한 상태에서, 지지빔 밀착부재가 수평지지빔을 가압하여 FRP 수직판과 수평지지빔이 결합되는 구성을 가지는 것을 특징으로 하는 슬립폼이 제공된다.	

번호	섬유강화복합소재 거푸집판과 웨일러의 조립구조 및 이러한 조립구조에 의한 거푸집 조립체	특허 10-1436545
2	본 발명은 콘크리트 구조물을 시공을 위한 섬유강화복합소재 거푸집판과 웨일러(waler)를 분해조립이 가능한 상태로 결합하는 조립구조와, 이러한 조립구조에 의해 섬유강화복합소재 거푸집판과 웨일러(waler)가 분해조립이 가능한 상태로 결합되어 만들어지는 거푸집 조립체에 관한 것이다.	

4. 소결론

이 연구에서는 슬립폼 거푸집을 경량화 시키기 위하여 GFRP로 제작되는 거푸집 형상과 모듈을 개발하였다. 구조해석 및 실험을 통해 개발된 GFRP 거푸집이 기존 강재 거푸집 이상의 성능을 확보할 수 있는지 분석하였다.

구조해석 및 실험 결과 GFRP 거푸집이 강재 거푸집과 비교하여 뛰어난 구조 성능을 가지고 있으며 단열 효과 또한 뛰어난 것을 확인하였다. 단열 효과는 콘크리트 양생 시 온도를 일정하게 유지시켜 우수한 콘크리트 품질을 확보하는데 유리하게 작용한다.

그리고 GFRP 거푸집을 모듈화 하여 조립 및 해체가 용이하도록 하였고, 모듈화된 GFRP 거푸집과 슬립폼시스템과의 체결부를 개발하여 거푸집 설치에 소요되는 작업시간을 대폭 감소시킴으로써 본 연구에서 개발한 슬립폼시스템의 경쟁력을 향상시켰다.

GFRP는 흡수성이 없는 재료이므로 GFRP거푸집 표면에서 콘크리트의 수분을 밀어내게 된다. 반면에 강재는 수분이 표면에 흡수되어 시멘트 페이스트가 묻어나게 된다. 따라서 GFRP거푸집은 슬립폼 인상 시 거푸집과 콘크리트 사이의 마찰력을 감소시켜 안정한 슬립폼을 운용할 수 있고 우수한 콘크리트 표면 품질을 확보하는데 유리하다. 이는 GFRP거푸집과 강재거푸집에 대한 마찰실험을 통해 콘크리트 구조물의 표면을 관찰한 바, 강재 거푸집에 비해 우수함을 확인하였다.

이 연구에서 개발한 경량 GFRP거푸집 시스템이 실제 적용가능한지를 파악하고 문제점을 보완하기 위해 소형 슬립폼시스템을 제작하여 Mock-up 테스트를 수행하였다. 또한 현장적용성 실험도 수행하였고, 4회에 걸친 콘크리트 주탑의 시험시공에 투입하여 성공적으로 시공을 실시하였다. 이를 통해 개발된 시스템이 현장 적용에 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

제 5 절 목업실험 및 시험시공

1. 개요

이 연구에서는 “기술자립 및 국제 경쟁력 확보를 위한 공기 단축형 콘크리트 고주탑 가설 장비 및 공법 개발”을 목표로 3개 핵심연구분야에 대해 5개의 핵심요소기술을 설정하여 연구개발을 수행하였다. 첫 번째 기술은 변단면 슬립폼 장비의 설계기술이다. 변단면 슬립폼시스템의 구성요소들에 대한 철저한 분석을 수행하고, BIM(Building Information Modeling)을 도입하여 슬립폼 시공 단계를 사전에 시뮬레이션으로 미리 확인함으로써 보다 진보된 시스템으로 구조개선 및 최적 설계를 수행하였다. 이러한 슬립폼시스템 설계기술 개발로 독자적인 설계 능력을 확보하는 성과를 올렸다. 두 번째 기술은 슬립폼의 경량화 기술이다. 모듈화된 경량 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) 패널을 세계 최초로 개발하여 변단면 슬립폼시스템에 적용하였다. GFRP 패널은 콘크리트 타설을 위한 거푸집 역할 뿐만 아니라 전체 시스템의 구조적인 인장보강재 역할을 하고, 해상에서의 염해에 의한 손상을 방지할 수 있으며, 동절기에는 보온효과에 의해 콘크리트 초기 품질을 안정적으로 확보할 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다. 세 번째로 개발된 기술이 슬립폼 최적기 상승 시스템이다. 이는 세계 최초로 개발된 것으로 콘크리트의 경화정도를 정량적 뿐만 아니라 연속적으로 파악하는 것이 가능하여 원격지 제어실에서 슬립폼을 안전하게 자동 제어할 수 있게 하였다. 네 번째는 자동화된 변단면 대응기술이다. 다수의 숙련공이 인력으로 스핀들을 조절하는 기존 공법과는 달리, 전동으로 제어하는 전동식 스핀들을 독창적으로 개발하여 숙련공이 필요없이 작업을 간편하게 하고 역회전 및 미세조정으로 정밀한 시공 품질을 확보할 수 있게 하였다. 마지막으로 3차원 변단면 고주탑의 정밀한 시공을 위해 오차를 최소화하는 형상관리 및 시공정밀도 관리시스템 KICS(KICT Integrated Configuration control System)를 개발하였다. 이를 통해 기후 영향을 최소화 시키며 주탑 등 400m이상의 3차원 형상 타워 구조물의 연직도를 실시간으로 모니터링할 수 있게 되었다.

이와 같은 핵심요소기술들은 3회의 목업실험을 통해 개발하였으며 4회의 시험시공을 통해 성능을 검증 및 개선하였다. 특히 4회의 시험시공은 실제 교량의 주탑

규모로 수행되었으며, 성공적으로 시공을 완료함으로써 개발된 핵심요소기술들이 현장 적용에 문제가 없음을 확인하였다.

2. 목업실험

가. 1차 목업실험

■ 개요

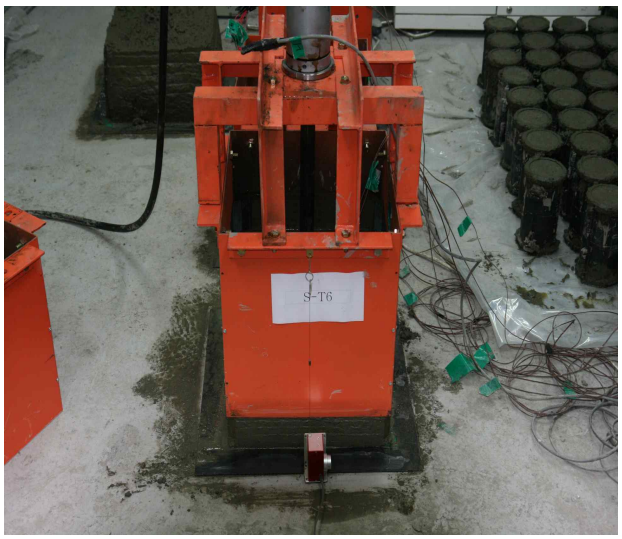
슬립폼시스템은 높이 1.2m 정도의 거푸집이 요크레그(yoke leg)에 부착되고 이 요크프레임에는 로드(rod)가 설치되어 있어 보통 6톤 용량의 유압잭이 스스로 타고 올라가면서 슬립폼시스템 전체를 인상하는 구조를 갖는다. 유압펌프에 의해 유압잭에 유압이 작용하면 유압잭이 로드를 물고 올라가는데, 이때 유압잭은 1 스트로크(stroke)에 약 2cm씩 10회에 걸쳐 약 20cm 정도 상승하게 된다.

이 연구에서는 슬립폼시스템의 경량화를 위해 기존의 강재 거푸집 대신 GFRP 거푸집을 적용하는 연구를 수행하였으며 고주탑 형상 및 정밀도 관리를 위해 유압펌프를 PC에서 제어하는 시스템을 개발하였다. 그래서 GFRP 거푸집을 사용하는 경우에 강재와 비교하여 인상(slip up)에 필요한 유압잭 하중을 파악하고 거푸집 종류에 따른 콘크리트 표면 특성을 알아보고자 소형으로 슬립폼을 만들어 실험을 실시하였다. 실험은 2차로 나누어 실시되었는데 먼저 소형 강재 슬립폼과 GFRP 슬립폼을 각각 개별적으로 따로 제어하여 각각을 비교하였다. 그리고 동일한 조건에서 강재 및 GFRP 슬립폼시스템을 동시에 인상하여 각 거푸집 적용 특성과 동시 인상제어를 확인하였다.

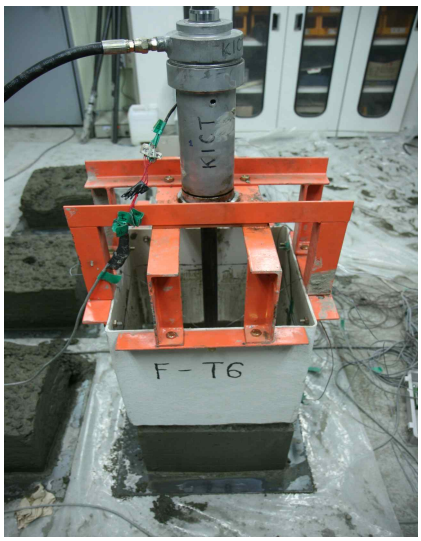
■ 개별 인상(slip up) 실험

슬립폼 시공 시 가장 중요한 요소 중 하나는 인상 시 콘크리트와 거푸집 면과의 마찰에 의한 단면손상 및 마찰하중에 따른 유압잭 용량 검토이다. 이 실험에서는 강재 및 GFRP 면의 마찰성능을 파악하고자 강재(SM 490)와 GFRP(glass fiber

reinforced plastic) 부재로 슬립폼 거푸집을 제작하여 실험을 수행하였다. 실제 슬립폼 공법과 유사하게 콘크리트를 타설한 후 각각 정해진 시간에 유압잭으로 거푸집을 인상하였다. 슬립폼시스템을 인상하는 유압잭은 6톤 용량으로 슬립폼 시공 현장에서 일반적으로 사용하는 것을 활용하였으며 로드셀을 장착하여 인상 시 유압잭의 하중을 동적데이터로거로 측정하였다. 슬립폼시스템의 크기는 가로 400mm, 세로 400mm, 높이 400mm이며, 거푸집 내에 250mm 높이까지 콘크리트를 일괄 타설한 후 소정의 콘크리트 재령에 거푸집을 인상하고 로드셀을 이용해 인상하중을 측정하였다. 강재 및 GFRP 거푸집의 마찰특성을 분석하기 위해 콘크리트 타설 후 30분부터 24시간까지 주기적으로 슬립폼시스템을 상승시켰다.



<그림 3.5.1> 강재 거푸집



<그림 3.5.2> GFRP 거푸집

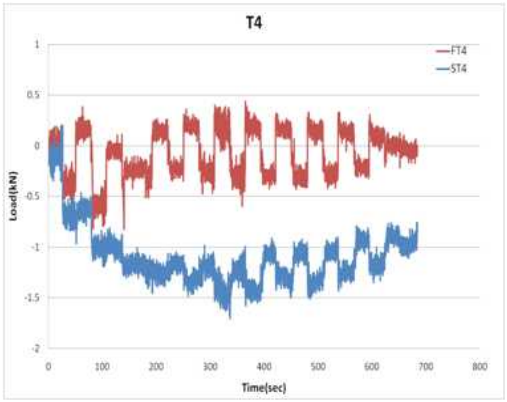
콘크리트 타설 후 3시간부터 6시간까지 강재 및 GFRP의 슬립업 표면 모두 양호한 것으로 나타났다. 6시간 이후에는 거푸집 인상 시 콘크리트 표면은 GFRP가 강재보다 약간 더 우수한 것으로 나타났다. 실험결과 GFRP 거푸집의 경우 시간에 따라 다소 차이는 있으나 강재에 비해 약 32%의 마찰하중 감소효과를 나타냈다. 거푸집 해체 후 거푸집 표면에 점착해있는 콘크리트의 잔량은 강재의 경우가 GFRP의 경우보다 눈에 띄게 많았다. 그러나 6시간이 경과한 경우에 GFRP 슬립폼 시스템 실험체에서 거푸집 상승으로 인한 표면 공극 및 표면 손상이 거의 없음을 알 수 있었다.

■ 동시 인상(slip up) 실험

슬립폼 공법에서는 많은 유압잭들이 설치되어 있으며 이들을 동시에 작동시켜 슬립폼시스템 전체를 상승시켜야 한다. 이 실험에서는 강재 및 GFRP 거푸집을 이용하는 슬립폼시스템 두 개를 동시에 인상하는 실험을 실시하였다. 강재 및 GFRP 시험체를 1시간 간격으로 12시간 경과 시까지 인상하여 마찰특성을 파악하기 위해 각각 12개씩 24개의 슬립폼 실험체를 제작하였다. 콘크리트를 각 슬립폼 실험체에 동시 타설한 후 소정의 시간이 경과한 뒤에 동시에 인상하였다. 강재 및 GFRP 재질에 따른 거푸집의 마찰력 특성은 거푸집 실험체 주위 온도에 따른 콘크리트 초기 강도 발현에 영향을 받는다. 강재 거푸집은 보온성이 거의 없어 콘크리트가 외기 온도와 동조되는 반면에 GFRP 거푸집은 단열성능이 우수하여 동절기 차가운 콘크리트 온도가 그대로 유지되었다. 따라서 강재거푸집 실험체는 타설 6시간 경과 후 이미 콘크리트가 상당히 경화하여 거푸집에 콘크리트 표면이 부착되어 구체의 뽑힘 현상이 발생하였다. 반면에 GFRP 슬립폼시스템은 12시간이 경과하여도 슬립업이 가능한 상태임을 알 수 있었다.



<그림 3.5.3> 실험 장면



<그림 3.5.4> T4 실험체 인상하중

나. 2차 목업실험

■ 개요

2차 목업실험은 변단면 슬립폼시스템의 핵심요소기술 중 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리기술, 초음파를 이용한 슬립폼 최적기 상승기술, GFRP거푸집 성능 등을 알아보기 위해 실시되었다. 이를 위해 가로 400mm, 세로 400mm, 높이 1.2m의 강재 및 GFRP 거푸집을 각각 제작하였다. 이들 거푸집이 적용된 슬립폼시스템을 설치하고 슬립폼 최적기 상승기술을 적용하여 초음파 모듈을 거푸집 최하단에 부착하였다.

■ 실험방법

콘크리트를 20cm씩 강재와 GFRP 거푸집 내에 1시간 간격으로 6회(1.2m) 타설한 후 거푸집을 인상하였다. 이후 콘크리트 타설과 거푸집 인상을 병행하며 2m 콘크리트 구체를 완성하였다. 이때 거푸집 인상은 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리시스템 KICS를 이용하여 무선으로 수행되었으며, 인상 시기는 초음파를 이용한 슬립폼 최적기 상승기술을 이용하여 측정된 초음파 속도를 이용하여 결정하였다.



<그림 3.5.5> 실험 장면

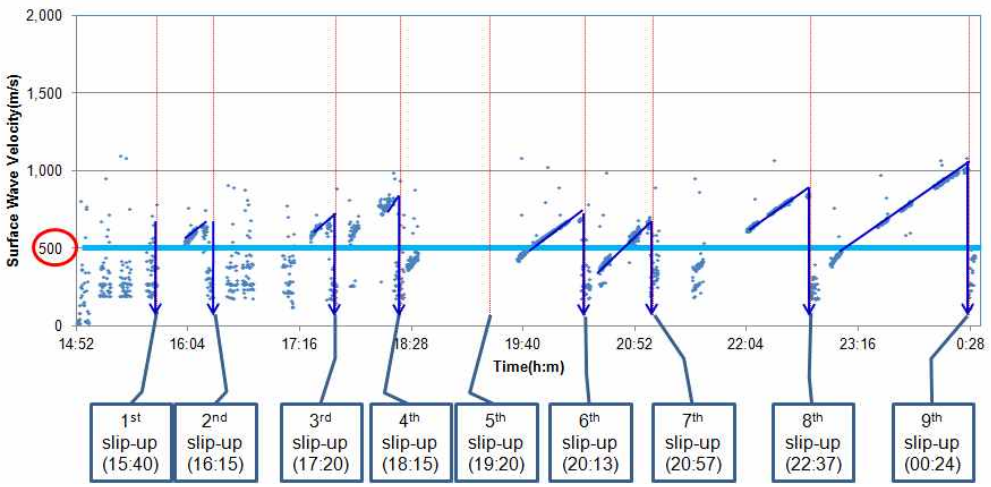


<그림 3.5.6> 콘크리트 배합 및 타설, 슬립업

실험을 진행하며 유압잭에 설치된 로드셀로부터 슬립폼 인상에 필요한 인상하중을 측정하였으며, 거푸집 최하단에 설치된 초음파 모듈로부터 초음파 속도를 측정하였다.

■ 실험결과

1차 목업실험과 마찬가지로 GFRP가 강재와 비교하여 콘크리트 구체 표면상태가 양호하였다. 그림 3.5.7는 슬립폼시스템 인상에 따른 초음파 속도를 보여준다. 초음파 속도가 지속적으로 증가하다가 슬립폼 인상 시 급격이 작아지는 것을 볼 수 있다. 최종 높이 2m까지 시공하면서 500 ~ 1100m/sec의 다양한 초음파 속도에서 슬립폼시스템을 상승시켰다. 이로부터 초음파 속도로 슬립폼 상승시기를 합리적으로 결정할 수 있음을 확인할 수 있었다.



<그림 3.5.7> 슬립폼 상승과 초음파 속도

다. 3차 목업실험

■ 개요

3차 실험에서는 GFRP거푸집 모듈의 시제품을 제작하고 소형 슬립폼시스템을 구성한 후 강재 슬립폼시스템과 성능을 비교하였다. 여기서 슬립업 시 GFRP 거푸집 모듈의 구조적 거동을 파악하고 연결부 이음에서 누수상태를 관찰하였다. 그리고 강재와 GFRP 거푸집에서 시간에 따른 콘크리트 온도를 측정하였고 실험 후 강재 및 GFRP 모듈의 표면 상태를 분석하였다.

■ 실험체 제작 및 실험방법

GFRP 거푸집 모듈은 가로 30cm, 높이 1.2m로 총 8개를 인발법(pultrusion method)에 의해 제작하였다. 이를 한변에 2개씩 조립하여 가로 60cm, 세로 60cm의 정사각형 단면을 갖는 GFRP 슬립폼시스템 실험체를 1.2m 높이로 제작하였다. 비교를 위하여 강재 슬립폼시스템도 동일한 제원으로 제작하였다. 구체 내부에는 보강 철근을 배치하였는데, 바닥강판에 용접 고정하여 콘크리트가 너무 경화된 경우 슬립업 시에 부착되어 올라가는 현상을 방지하였다. 기존 슬립폼시스템에서 거푸집 뒤의 Waler가 측압을 받고 있는 것과 동일하게 H형강을 배치하여 강재와 GFRP 거푸집 모듈의 측압을 지지하도록 실험체 시스템을 제작하였다.



<그림 3.5.8> 3차 목업실험체

온도센서를 각 시험체의 타설 층마다 내벽부와 보강철근, 중앙에 각각 1개 씩 모두 3개를 8단에 걸쳐 24개 설치하였다. 그리고 대기온도 측정을 위해 외부에 1개를 추가하여 총 49개의 온도센서를 배치하였다. 또한 실험체 외면 중앙에 변위계를 설치하여 거푸집 변형을 측정하였다.

콘크리트를 25cm씩 일정한 시간 간격으로 타설하며 슬립폼시스템을 수차례 상승시켜 높이 2m의 콘크리트 구체를 완성하였다. 이때 거푸집 인상은 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리시스템 KICS를 이용하여 무선으로 수행되었으며, 인상 시기는 초음파를 이용한 슬립폼 최적기 상승기술을 이용하여 측정된 초음파 속도를 이용하여 실시하였다.



<그림 3.5.9> 콘크리트 배합 및 타설



<그림 3.5.10> 표면파 속도 측정장치 부착 모습

■ 실험 결과

슬립업 후 콘크리트 구체의 표면 상태는 강재와 GFRP 거푸집 모두 대체로 양호한 양상을 보이고 있으나, 강재 거푸집의 경우 일부 모서리부의 콘크리트가 파괴되는 양상을 보였다. 이는 강재 거푸집의 경우 단열 성능이 GFRP 거푸집보다 떨어져 콘크리트 양생에 문제가 있었던데 기인한 것으로 판단된다.

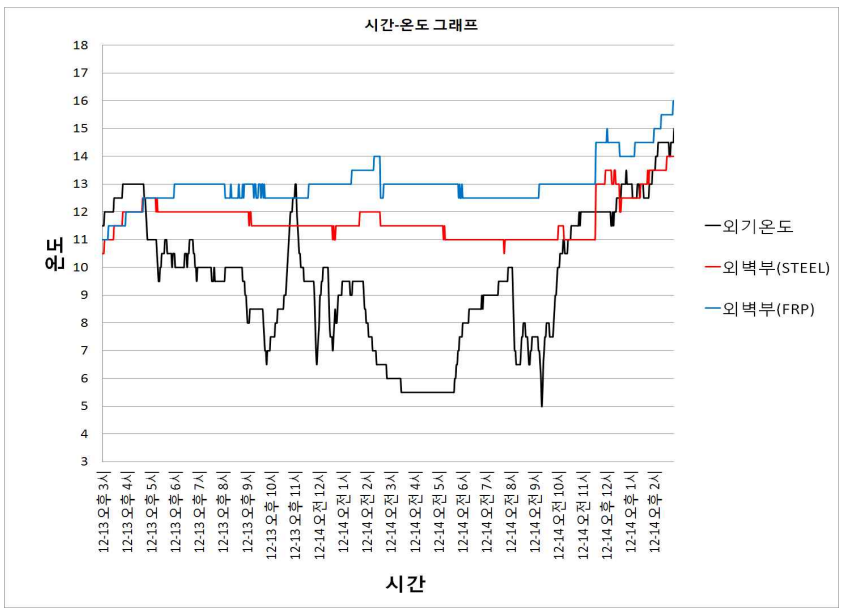
이상과 같이 GFRP모듈을 이용한 슬립폼시스템을 제작하여 실험을 수행하였다. 이 실험을 통해 슬립폼시스템에 GFRP의 적용성을 다시 한번 확인할 수 있었는데, 별도의 체결장치 없이 GFRP 거푸집 모듈을 간편하게 조립할 수 있었으며, 콘크리트 타설 및 슬립업 후에도 연결부에서 처짐이나 유해한 문제가 발생하지 않았다.



<그림 3.5.11> 슬립폼 인상 전경



<그림 3.5.12> 강재 슬립폼 시험체의 구체 모서리 손상



<그림 3.5.13 > 실험체 외벽부 온도 이력

3. 시험시공

가. 1차 시험시공 : 콘크리트 타워 1기

■ 개요

1차 시험시공은 개발된 핵심요소기술들의 검증을 위해 실시하였다. 슬립폼 공법으로 변단면 주탑 시공이 가능하도록 지금까지의 개발기술들을 반영하여 시스템을 설계하고 제작하여 현장 시험시공을 수행하였다. 콘크리트 타워 1기의 시험시공은 아래 표의 공정 순서로 진행되었고, 한국건설기술연구원내 나대지에서 공개적으로 실시되었다.

<표 3.5.1> 1차 시험시공 공정 요약

공 정	일자
주탑 기초 시공	2012년 10월 10일 ~ 2012년 10월 14일
폼조립 및 설치	2012년 10월 18일 ~ 2012년 11월 02일
슬립업	2012년 11월 05일 ~ 2012년 11월 10일
현장정리	2012년 11월 11일 ~ 2012년 11월 13일

■ 변단면 슬립폼 조립 및 설치

슬립폼시스템을 설치하기 위한 사전 작업으로 주탑 철근을 배근하고, 기초 거푸집을 설치하여 콘크리트를 타설하였다. 요크는 현장작업대에서 가조립을 거친 후 현장에 설치되었다. 패널은 일반적인 강재 패널과 경량 GFRP 패널을 함께 적용하였다. 내부 거푸집에는 강재 패널을 적용하였으며, 외부 거푸집에는 GFRP 패널을 사용하였다. 이 때 모서리부는 단면 변화를 수용하기 위해 강재 패널을 사용하였다. 유압잭은 요크채널의 하부에, 상부 발판에는 콘크리트 타설을 위한 분배기를 위치시켰다. 슬립폼시스템은 3단 작업대를 가지고 있는데 기상악화로 콘크리트 타설부에 빗물이 침투하지 못하도록 임시로 비닐천막을 사용하였다. 이들 중 상부 작

업대와 중간 작업대는 콘크리트 타설 전 조립을 완료하였으며, 하부 작업대는 슬립업이 진행되면서 설치가 가능한 높이를 확보한 뒤 부착되었다.



<그림 3.5.14> 철근 배근 및 기초 거푸집 설치



<그림 3.5.15> 요크 조립



<그림 3.5.16> 패널 설치

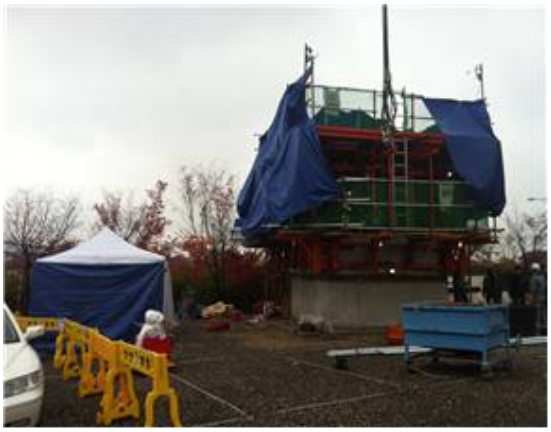


<그림 3.5.17> 설치가 완료된 슬립폼시스템

■ 슬립업

첫 번째 콘크리트 타설은 2012년 11월 5일에 실시하였다. 이후 콘크리트가 1.25m 높이의 거푸집 상단에 이르기까지 평균 두 시간마다 25cm씩 타설을 반복하였다. 첫 번째 슬립업은 초기 타설 시작시각으로부터 11시간이 지난 후 실시하였다. 이 때 개발된 초음파 최적기 상승 프로그램(KSWIS)로부터 슬립폼 상승 시기를 판단하여 첫 번째 슬립업을 수행하였다. 이 후 주탑 10m를 시공하기까지 소요된 슬립

업 기간은 5일이었으며, 하루 2m/day의 상승 속도를 나타내었다.



<그림 3.5.18> 슬립폼 상승



<그림 3.5.19> 시공 완료(H=10m)

시험시공을 통하여 현재까지 개발된 시스템의 성능을 확인하였다. 변단면 슬립폼 시스템의 요소기술들에 대한 연구 및 개발이 체계적으로 이루어졌다고 판단하지만 설계 단계에서 예상하지 못했던 문제점들을 발견하기도 하였다. 특히 설계단계에서 작업 편의 및 작업공간 확보에 대한 면밀한 검토가 필요함을 알 수 있었다.

나. 2차 시험시공 : 콘크리트 타워 2기

■ 개요

2차 시험시공은 슬립폼 공법에 의한 타워 2기의 시공을 위한 것으로서, 지금까지의 개발기술들을 반영하여 시스템을 설계하고 제작하여 현장 시험시공을 실시하였다. 시험시공은 다음 표의 공정 순서로 진행되었다. 시험시공은 한국건설기술연구원내 나대지에서 공개적으로 실시되었다.

<표 3.5.2> 2차 시험시공 공정 요약

공 정	일자
주탑 기초 시공	2013.10.07. ~ 2013.10.16.
폼조립 및 설치	2013.10.17. ~ 2013.11.01.
슬립업	2013.11.04. ~ 2013.11.08.
현장정리	2013.11.11. ~ 2013.11.13.

■ 슬립폼 조립 및 설치

2차 시험시공에서 슬립폼시스템은 다음의 조립 순서로 설치되었다. 가장 먼저 사전 작업으로 기초 거푸집을 설치하고, 주탑 철근을 배근한 후 기초콘크리트를 타설하였다. 부재들은 현장에 반입된 후 가조립을 거쳐 설치되었다. 요크레그의 설치 후, 월러는 2단으로 배치하였으며, 패널은 강재패널과 경량 GFRP 패널을 혼용하여 설치하였다. 두 개의 슬립폼시스템을 수평방향으로 가로지르도록 상부작업대와 요크채널 사이에 래티스 거더를 배치하였다. 3개의 작업대에는 목재 발판을 설치하였다. 유압잭은 요크채널에 위치시키고, 상부 발판에는 콘크리트 타설을 위한 분배기를 위치시켰다. 설치를 마무리한 후에는 설계에서 고려한 형상을 갖는 주탑 시공이 가능하도록 요크레그의 각도를 확인하였다. 또한 작업자의 안전을 고려하기 위하여 작업 발판 등의 수평부재에 대한 수평도를 확인하여 조립을 완료하였다. 이 시스템은 3단 작업대를 가지고 있는데 이들 중 상부 작업대와 중간작업대는 콘크리트 타설 전 설치를 완료하였으며, 하부 작업대는 슬립업이 진행되어 하부 작업대 설치가 가능한 높이를 확보한 뒤 조립하였다.



<그림 3.5.20> 기초 거푸집 설치



<그림 3.5.21> 배근 및 기초 타설



<그림 3.5.22> 월러와 패널 설치



<그림 3.5.23> 래티스 거더 설치



(a) 슬립폼 외부



(b) 슬립폼 내부

<그림 3.5.24> 설치가 완료된 슬립폼

■ 슬립업 실험

주탑은 주·야간에 걸쳐 연속적으로 시공하였으며 이 때 콘크리트는 두 개의 타워에서 동시에 같은 높이만큼 타설하였다. 1회 콘크리트 타설 높이는 200mm로 이는 콘크리트 4㎥ 분량에 해당한다. 여기서 콘크리트 배합비는 주간과 야간이 약간 차이가 있다. 원래 이순신대교의 주탑에 사용되었던 콘크리트 배합을 사용하는 것으로 기본으로 하였으나 1회 타설에 필요한 콘크리트양이 적어 레미콘회사에서는 납품을 기피하였다. 또한 야간에도 일반 콘크리트 납품을 거부하였다. 따라서 주간에는 레미콘회사의 일반 콘크리트를 사용하였고 야간에는 이순신대교 배합비의 콘크리트를 한국건설기술연구원이 소유하고 있는 수평 믹서로 소량씩 생산하여 사용하였다.

<표 3.5.3> 콘크리트 배합비

MIX Type		특성	W/C (%)	물 (kg)	시멘트 (kg)	모래 (kg)	자갈 (kg)	AE감수제 (kg)	유동화제 (kg)
주간	SC	25-40-120	33.6	161	479	786	956	3.35	0
야간	OPC	20-40-200	35.4	168	475	760	935	4.75	0

첫 번째 콘크리트 타설은 2013년 11월 4일에 실시하였다. 이후 콘크리트가 1.25m 높이의 거푸집 상단에 이르기까지 1.5 ~ 2시간 간격으로 타설을 반복하였다. 1.25m 높이까지 타설이 완료되고 나서 첫 번째 슬립폼 상승을 실시하였다. 거푸집 하단에 설치된 초음파 탐촉 장치에서 발생된 초음파 신호를 입력받아 슬립폼 최적기 상승 프로그램(KSWIS)에서 표면파 속도를 검토하였다. 첫 번째 슬립업은 최초 타설 시작 시각으로부터 11시간이 지난 후 이루어졌다. 이후 KSWIS로 초기강도를 추정한 후 슬립폼 상승시기를 판단하고 콘크리트 타설과 슬립업이 주간과 야간에 걸쳐 연속적으로 이루어졌다.

주탑의 변단면에 대응하기 위하여 슬립폼시스템에는 스핀들 32개가 설치되어 있는데 이 중에서 인력에 의한 수동 조정을 간편하고 효율적으로 변단면 처리를 위해 전동식 스핀들인 K-Spindle의 시제품 2개를 제작하여 시범 적용하였다. 주탑 5m 높이에는 실제 사장교에서와 같이 케이블 정착구를 설치하였다. 2기의 LEG를

갖는 주탑을 동시에 10m까지 시공하는데 소요된 기간은 5일이었고, 평균 일일 상승 높이는 2m라고 할 수 있다. 여기서도 초음파에 의한 슬립폼 최적기 상승기술(KSWIS), GFRP거푸집, 형상 및 시공정밀도 관리시스템(KICS), 전동 스핀들(K-Spindle) 등을 적용하여 검증하였는데, 모두 기대이상의 성능을 나타냈다.



<그림 3.5.25> KSWIS



<그림 3.5.26> 첫 번째 슬립업



<그림 3.5.27> 케이블 정착구 설치



<그림 3.5.28> 시공완료(H=10m)

다. 3차 시험시공 : K-Spindle을 적용한 슬립폼 추가 상승

■ 개요

3차는 2차 시험시공에서 시범적용된 무선 전동식 스핀들(K-Spindle)을 슬립폼 전체에 확대 적용하여 32개의 스핀들을 동시에 제어가 가능한 지 파악하기 위해 공개적으로 실시되었다. 기존 10m까지 시공한 주탑 2기에 설치되어 있던 변단면

슬립폼시스템의 수동 스핀들 30개를 무선 전동으로 교체하여 K-Spindle은 전체 32개가 적용되었으며, 각 K-Spindle에는 원격지 감시 CCTV가 설치되어 작동 여부를 제어 PC에서 실시간 확인할 수 있도록 였다. 10m 높이의 주탑에서 추가로 2m를 더 시험시공하였으며 공정 순서는 다음과 같다.

<표 3.5.4> 3차 시험시공 공정 요약

공 정	일자
폼 수정(K-Spindle 교체 설치)	2014.10.24.~2014.10.27
슬립업	2014.10.28.~2014.10.30
현장정리	2014.10.30.~2014.10.31

■ 수동스핀들의 K-Spindle로 교체 설치

기존 슬립폼에는 32개의 스핀들이 적용되어 주탑의 변단면에 대응하도록 되어 있다. 2차 시험시공에서 2개의 전동스핀들인 K-Spindle을 시범 적용하여 효율성이 좋다고 판단되었다. 그래서 3차에서는 30개 스핀들 모두를 K-Spindle로 교체하여 진정한 변단면 자동화를 도모하였다. K-Spindle은 월러의 모서리부에 있던 수동스핀들을 제거하고 그 자리에 이 설치하였다. 교체 설치 시 모든 스핀들을 동시에 작업하면 안전성에 문제가 발생할 수 있을 것 같아 1개씩 순차적으로 교체하였다.

K-Spindle의 오작동 여부를 작업자가 원격지 제어 PC에서 편리하게 확인할 수 있도록 각각의 스핀들에 CCTV를 설치하였다. 특정 높이에서 요구 슬립폼 벽체의 길이 변화량을 작업자가 제어 PC에서 조작하여 무선으로 명령을 송출하면, 전체 K-Spindle이 회전하면서 거푸집의 위치를 신속하게 이동시켜 변단면을 달성하게 된다.

■ 슬립업 실험

콘크리트 타워는 주·야간에 걸쳐 연속적으로 시공하였으며 이 때 콘크리트는 두 개의 타워에서 동시에 같은 높이만큼 타설하였다. 2차 시험시공과 마찬가지로 1

회 콘크리트 타설 높이는 200mm이며, 주·야간에 다른 배합비를 갖는 콘크리트를 사용하였다. 즉, 주간에는 레미콘 회사의 일반 콘크리트를, 야간에는 연구진이 직접 생산한 슬래그 콘크리트를 사용하였다. 첫 번째 콘크리트 타설은 2014년 10월 28일에 실시하였다. 이후 콘크리트가 1.25m 높이의 패널 상단에 이르기까지 1.5 ~ 2시간 간격으로 타설을 반복하였다. 그 후 슬립업을 실시하기 위해 거푸집 하단에 설치된 초음파 탐촉 장치로부터 초음파 신호를 받아 속도를 계산하는 KSWIS로 적용하였다. 첫 번째 슬립업은 최초 타설 시작 시각으로부터 10시간이 지난 후 이루어졌다.

그 후 슬립폼 상승시기를 KSWIS에서 지속적으로 검토하여 주간과 야간에 걸쳐 연속적으로 시공이 이루어졌다. 주탑의 변단면은 특정 높이에서의 목표 스핀들회전량에 맞게 작업자가 제어 PC에서 무선으로 조작하였다. 설치된 CCTV로부터 슬립폼의 이동을 관찰하고 정확한 치수대로 변단면이 구현되는 지 확인하였는데 K-Spindle은 오작동 또는 오차없이 정확하게 변단면 작업을 수행하였다. 결론적으로 주탑 2m를 추가 시공하는 동안 성공적으로 정밀한 변단면 형상을 구현할 수 있었다.

한편 이때에도 GPS를 사용한 형상 및 시공정밀도 관리가 KICS를 통해 수행되었으며 성공적인 적용 결과를 얻을 수 있었다.



<그림 3.5.29> 스핀들 관리 CCTV



<그림 3.5.30> 상부 작업대에 설치된 GPS



<그림 3.5.31> K-Spindle을 적용한 추가 상승 완료(H=12m)

라. 4차 시험시공

■ 개요

3차 시험시공에서는 무선 전동식 스핀들이 32개가 설치되어 동시에 제어하여 변단면을 성공적으로 시공한 바 있다. 4차에서는 장기 내구 성능을 검증하고 국토교통부 건설신기술 현장실사단 위해 슬립폼시스템을 2m 추가 상승시켜 주탑을 시공하였다. 슬립폼시스템은 2차 시험시공 후 20개월 동안 외부 환경에 그대로 노출시

킨 상태이며 무선 전동식 K-Spindle은 2개는 20개월, 30개는 8개월 지난 상태였다. 시험시공은 다음과 같은 공정 순서로 진행되었다.

<표 3.5.6> 4차 시험시공 공정 요약

공 정	일자
폼 정비(유압펌프 및 전기배선 재설치)	2015.06.14.~2015.06.17
슬립업	2015.06.18.~2015.06.19
현장정리	2015.06.19.~2015.06.20

■ 슬립업 실험

콘크리트 타워는 2차, 3차와 동일하게 주·야간에 걸쳐 Leg 2개를 동시에 시공하였으며, 주간은 레미콘, 야간은 연구진 직접 생산한 콘크리트를 사용하였다.

첫 번째 콘크리트 타설은 2015년 6월 18일에 실시하였다. 이후 콘크리트가 1.25m 높이의 패널 상단에 이르기까지 1.5 ~ 2시간 간격으로 타설하였다. 그 후 거푸집 하단의 초음파 탐촉 장치에서 초음파 속도를 구하여 KSWIS로 상승 여부를 판단하였다. 첫 번째 슬립업은 최초 타설 시작 시각으로부터 7시간이 지난 후 이루어졌다. 그리고 CCTV를 이용하여 원격지에서 K-Spindle의 오작동 여부를 확인하면서 변단면 작업을 수행하였다. 또한 형상 및 시공정밀도 관리시스템인 KICS를 적용하여 시공관리를 수행하여 공개적인 신기술 현장실사를 성공적으로 마치고 국토교통부 건설신기술을 취득하는 성과를 올렸다.



<그림 3.5.32> 추가 상승 완료(H=14m)

4. 소결론

이 연구에서는 변단면 슬립폼시스템 개발을 위해 개발한 핵심요소기술들을 3회의 목업실험을 통해 보완하고, 4회의 시험시공을 통해 그 성능을 검증하였다. 특히 4회의 공개적인 시험시공은 실제 교량의 주탑 규모로 개발된 슬립폼시스템의 모든 기술이 적용되어 수행되었으며, 성공적으로 시공을 완료함으로써 개발된 핵심요소기술들이 현장 적용에 문제가 없음을 거듭 증명하였다.

가. 목업실험

1단계 연구에서 개발된 핵심요소기술들을 종합하여 3차에 걸쳐 소형 슬립폼시스템을 제작하여 실증 실험을 수행하였다.

1차에서는 가로 및 세로가 40cm인 단면을 갖는 강재와 GFRP 거푸집으로 이루어진 소형 슬립폼시스템을 제작하고 높이 25cm로 콘크리트를 각각 타설한 후 시공

정밀도 관리시스템의 유압잭 제어프로그램을 사용하여 실험을 실시하였다. 강재와 GFRP 슬립폼을 개별적으로 인상하는 경우와 동시에 인상하는 경우를 각각 실시하고 슬립폼 상승에 따른 거푸집 마찰하중을 측정하였다. 이를 통해 GFRP 거푸집의 보온성과 시공 후 콘크리트 면이 우수함을 확인하였다.

2차에서는 40cm 단면의 강재 및 GFRP 거푸집을 높이 1.2m로 제작하고 콘크리트를 높이 25cm로 1시간마다 타설하였다. 실제 콘크리트 주탑에서 슬립폼 공법과 유사하게 시공정밀도 관리시스템의 유압잭 제어프로그램을 사용하여 강재와 GFRP 슬립폼 시스템을 동시에 인상하여 총 높이 2.0m의 기둥 2개를 시공하는 실험을 실시하였다. 이때 거푸집 하단에 초음파 모듈을 설치하여 초음파 전파 속도를 측정하며 슬립폼 상승 시기를 결정하였다. 이로부터 초음파를 이용하여 슬립폼시스템의 상승시기를 결정할 수 있다는 확신을 얻게 되었다.

3차에서는 GFRP 모듈을 이용하여 슬립폼 거푸집을 제작하여 목업실험을 수행하였다. 시공정밀도 관리시스템을 이용하여 원격으로 슬립폼시스템을 상승시켜 총 높이 1.8m의 콘크리트 기둥 2개를 동시에 시공하는 실험을 실시하였다. 이를 통해 콘크리트 타설 후 및 슬립업 후에도 연결부에서 처짐이나 유해한 문제가 발생하지 않음을 확인하였다.

나. 시험시공

시험시공은 2단계까지 개발한 핵심요소기술들의 성능을 검증하고 개선하기 위한 것으로서 총 4차례에 걸쳐 공개적으로 수행되었다.

1차 시험시공의 목적은 변단면 슬립폼시스템 개발을 위해 이 연구에서 개발된 핵심요소기술들을 종합적으로 검증하는 것으로서, 슬립폼 공법으로 변단면 주탑 시공이 가능하도록 지금까지의 개발기술들을 반영하여 시스템을 설계하고 제작하여 시험시공을 수행하였다. 시험시공을 통하여 현재까지 개발된 시스템의 성능을 확인하였으며 현장 적용에도 문제가 없음을 알 수 있었다.

2차 시험시공에서는 2개의 주탑을 건설하기 위해 래티스거더로 연결된 변단면 슬립폼시스템을 동시에 인상하였다. 여기서 10m 높이의 변단면 콘크리트 주탑 2기를 성공적으로 완공하였다. 2차 시험시공에서는 그동안 인력에 의해 수행되던 변단면 작업의 자동화를 위해 전동식 스핀들 2기를 시범 적용하였다. 또한 GFRP 거푸

집 모듈의 체결부를 개선하여 작업의 편의성을 증진시켰고, 시공 중 케이블 정착구를 삽입하였다. 이를 통해 사장교와 같은 복잡한 주탑 시공 시에도 이 연구에서 개발한 변단면 슬립폼시스템이 잘 적용될 수 있음을 입증하였다.

3차 시험시공은 슬립폼시스템의 변단면 완전 자동화를 위한 것으로서, 2차 시험시공에서 적용가능성을 확인한 전동식 스핀들을 모든 부분에 적용하여 성공적으로 시공을 완료하였다. 이를 통해 작업시간을 단축하고 인력을 절감하며, 정밀한 형상관리를 수행할 수 있음을 확인하였다.

4차 시험시공은 개발된 슬립폼시스템의 장기 내구성 성능 검증과 국토교통부 건설신기술 현장실사단을 위해, 3차 시험 시공된 12m 높이의 주탑을 추가로 2m 상승시켰다. 외부 환경에 그대로 20개월간 노출된 슬립폼시스템과 8개월간 노출된 무선 전동식 스핀들은 전혀 문제없이 정상 상태로 작동하여 신기술 현장실사를 무사히 마치고 국토교통부 건설신기술을 성공적으로 취득하게 되었다.

제 6 절 결론

이 연구는 초장대교량사업단의 전체적인 TRM(Technical Road Map)에 따라 2차년도부터 8차년도까지를 3단계로 나누어 구성되었으며 2009년 11월 6일에 시작하였다. 연구 목표는 “기술자립 및 국제 경쟁력 확보를 위한 공기 단축형 콘크리트 고주탑 가설 장비 및 공법 개발”이며, 효과적인 연구추진을 위해 “변단면 고주탑을 위한 슬립폼 장비 및 공법”, “GPS를 이용한 400m 이상 고주탑 시공 정밀도 관리”, “변단면 대응이 가능한 경량 슬립폼 모듈” 등 3개 핵심분야로 구분하여 추진하였다.

1단계 연구는 2차년도부터 4차년도까지 총 28.7개월로 구성되었으며, 핵심기술에 대한 원천기술을 독자적으로 도출하고 그 상세를 개발하였다. 구체적으로는 BIM 기반 3D 설계 및 디지털 가상 시공을 적용하여 변단면 슬립폼시스템을 개발하여 제작오차 및 시공 시 시행착오를 최소화하였다. 또한 슬립폼 최적기 상승기술을 개발하여 공기단축, 안전성 및 콘크리트면 품질을 향상을 유도하였다. 그리고 변단면에 대한 자동화기술을 개발하여 정밀 형상 관리, 공사비 절감 및 작업 시간 단축을 가능하게 하였고, GPS를 이용한 시공정밀도 및 형상관리 기술을 개발하여 시공정밀도를 확보하고 기후 영향과 시준점 영향을 최소화하였다. 경량 GFRP 모듈형 패널기술을 개발하여 거푸집 설치 및 해체 시간을 단축시키고 고소작업 안전성을 향상시켰으며 고른 콘크리트 품질을 확보하였다.

2단계 연구는 5차년도부터 6차년도까지 총 24개월로 구성되었으며, 1단계에서 개발한 핵심요소기술을 검증하고 보완하는 것을 연구목표로 하였다. 1주탑 및 2주탑에 대한 변단면 슬립폼시스템을 설계 및 제작하여 2회의 시험시공을 성공적으로 완료함으로써 핵심요소기술에 대한 검증 및 보완을 수행하였다.

3단계 연구는 7차년도부터 8차년도까지 총 21개월로 구성되었으며, 1단계 및 2단계 연구를 통해 개발되고 검증된 변단면 슬립폼시스템에 대한 자동화 보완과 실용화를 목표로 하였다. 이를 위해 2회의 시험 시공을 추가로 수행하였으며, 3건의 기술실시계약을 체결하고 건설신기술을 등록하는 성과를 얻었다.

이상과 같은 1단계 ~ 3단계 연구를 수행하고 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 이 연구에서는 변단면 슬립폼시스템의 설계와 제작을 위한 연구를 수행하였다. 슬립폼시스템의 구성요소를 분석하고, 변단면 시공을 위한 슬립폼 대응 방안을 도출하였다. 개발된 요소 기술들을 바탕으로 2회에 걸친 시험시공을 위한 슬립폼시스템의 설계도면을 작성하고 BIM을 이용한 설계 검토를 수행하였다. 설계도면을 바탕으로 제작된 슬립폼시스템을 설치하고 변단면 콘크리트 주탑을 성공적으로 시험시공함으로써 이 연구에서 개발된 슬립폼시스템의 효율성을 입증하였다.

(2) 기존 슬립폼 공법에서는 경험적 방법 또는 탐침봉에 의한 재래적 기술에 의존해 시공하고 있다. 이 연구에서는 초음파(표면파)를 이용하여 슬립폼 거푸집 내에 타설된 콘크리트 경화정도를 파악하고 최적 시점에 슬립폼을 상승시킬 수 있는 연구를 수행하였다. 이를 위해 각종 콘크리트 배합과 양생온도 조건을 변수로 해서 관입저항시험, 압축강도시험, 표면파 속도 측정 실험을 동시에 수행하였으며, 그 결과 콘크리트 품질을 안정적으로 확보할 수 있는 표면파 속도를 도출하였다. 도출된 표면파 속도를 시험 시공에 적용하여 변단면 콘크리트 주탑을 성공적으로 시공하였다. 4차례에 걸친 시험시공에 적용함으로써 이 연구에서 제시한 표면파 속도로 슬립폼시스템을 상승시키면 매우 효율적인 시공이 가능함을 확인할 수 있었다. 실제 프로젝트에서는 현장 기후상황에 맞춰 다양한 콘크리트 배합이 준비되고 있으며, 따라서 시공 전 양생온도 및 습도 조건에 대한 표면파 속도를 파악하여 슬립폼시스템 상승에 필요한 정량적인 기준을 설정할 수 있게 되었다.

(3) 기존 공법에서는 수동식 스핀들을 인력으로 조정하여 변단면 주탑을 시공하고 있다. 이는 매우 비효율적일 뿐만 아니라 정밀한 형상 관리에 문제가 생길 수 있다. 이 문제점을 보완할 수 있는 무선 제어 전동식 스핀들(K-Spindle)을 개발하고 변단면 주탑 시공에 적용하여 효율성을 입증하였다. 개발된 K-Spindle을 이용하여 2번의 시험시공을 수행한 결과 무선으로 스핀들의 개별 및 동시 제어가 가능하고 변단면 대응을 신속하게 수행함을 확인하였다. K-Spindle은 회전 속도와 방향을 자유자재로 조절할 수 있어서 정하여진 주탑 형상에 맞게 슬립폼을 확대하거나 축소하는 것이 가능하다. 적용된 기어박스의 기어비에 따라 회전력을 증가시킬 수 있는데, 이는 인력보다 매우 큰 회전력으로 스핀들을 조이거나 풀어주어 어떠한 상황

에서도 변단면 처리를 신속하게 수행하는 것을 보장하였다. 또한 방우구조를 채택하여 기상조건에 관계없이 작동할 수 있도록 하였고 24시간 연속해서 작업이 이루어지는 슬립폼 특성을 반영하여 비상시 수동 작동도 가능하게 하였다. 보통 작업현장에서는 상시 예비 발전기가 준비되어 있어 응급상황에도 정상 운용할 수 있으나, 모든 전원공급이 중단되는 극단적인 비상 상황에서도 무리없이 슬립폼 작업을 할 수 있도록 수동 조작 기능을 추가하였다. 이러한 극단 상황에 대한 대응 상황을 시험시공에서 시뮬레이션하여 정상 시공이 가능함을 확인하였다. 이와 같이 변단면 콘크리트 고주탑 시공 시 슬립폼 조정 작업의 효율성을 극대화함과 동시에 정밀한 형상관리를 실현하게 되었다.

(4) 콘크리트 고주탑의 정밀한 시공을 위해서 기존 재래식 측량기법에서 탈피하여 기후와 같은 외부요인에 의한 영향 등을 최소화할 수 있는 무선 및 원격 기반의 고주탑 시공정밀도 및 형상관리 시스템을 개발하였다. 여기서는 전천후 측정을 위해 GPS와 경사계를 적용하였으며, 무선으로 유압잭을 자동 제어할 수 있다. 또한 시공정밀도 확보를 위해 데이터 획득 및 처리방법을 연구하였다. 변단면 슬립폼 시공 시 보다 효율적인 시공정밀도 관리를 하기 위해서 GPS와 정밀 경사계를 이용한 자동 계측시스템의 모듈을 개발하였고 실내·외 성능검증을 수행하였다. 개발 변단면 슬립폼시스템의 핵심 요소기술 중의 하나인 KICS(KICT Integrated Configuration control System)를 이용하여 4회에 걸친 콘크리트 주탑 시험 시공 중 형상관리 및 슬립업을 성공적으로 수행함으로써 KICS의 현장 적용성을 확인하였다. 슬립폼 시공 시 적용되는 실시간 GPS 계측 기법의 정밀도 향상과 보완을 위해 칼만필터링 기법을 이용한 신호처리 연구를 수행하였고, 신뢰성 있는 데이터를 확보하였다.

(5) 슬립폼 거푸집을 경량화 시키기 위하여 GFRP로 제작되는 거푸집의 형상과 모듈을 개발하였다. 구조해석 및 실험을 통해 개발된 GFRP 거푸집이 기존 강재 거푸집 이상의 성능을 확보할 수 있는지 분석하였다. 구조해석 및 실험 결과 GFRP 거푸집이 강재 거푸집과 비교하여 보다 뛰어난 구조 성능을 가지고 있으며 단열효과 또한 뛰어난 것을 확인하였다. 단열 효과는 콘크리트 양생 시 온도를 일정하게 유지시켜 우수한 콘크리트 품질을 확보하는데 유리하게 작용한다. 그리고

GFRP 거푸집을 모듈화 하여 조립 및 해체가 용이하도록 하였고, 모듈화된 GFRP 거푸집과 슬립폼시스템과의 체결부를 개발하여 거푸집 설치에 소요되는 작업시간을 대폭 감소시킴으로써 슬립폼 작업에 소요되는 전체 공기를 단축시킬 수 있도록 하였다. 개발된 GFRP 거푸집 모듈은 차수성 재로로서 콘크리트 양생 시 습기를 밀어내게 된다. 이러한 성질은 슬립폼 인상 시 거푸집과 콘크리트 사이의 마찰력을 감소시켜 우수한 콘크리트 품질을 확보하는데 유리하게 작용한다. 그리고 실험을 통해 GFRP 거푸집을 이용하여 시공한 콘크리트 구조물의 표면이 강재 거푸집에 비해 보다 우수함을 확인함으로써 이러한 사실을 확인하였다.

(6) 이 연구에서는 변단면 콘크리트 주탑을 위한 슬립폼시스템 개발을 위해 개발한 핵심요소기술들을 3회의 목업실험을 통해 검증하고, 4회의 시험시공을 통해 그 성능을 보완 및 개선하였다. 특히 4회의 시험시공은 실제 교량의 주탑 규모로 수행되었으며, 성공적으로 시공을 완료함으로써 개발된 햄심요소기술들이 현장 적용에 문제가 없음을 거듭 확인하였다. 구체적인 검증 및 적용내용은 다음과 같다.

1단계 연구에서 개발된 핵심요소기술들을 종합하여 3차에 걸쳐 목업 슬립폼시스템을 제작하여 실증 실험을 수행하였다. 1차 목업실험에서는 가로 및 세로가 40cm인 단면을 갖는 강재와 GFRP 거푸집으로 이루어진 소형 슬립폼시스템을 제작하고 높이 25cm로 콘크리트를 여러 층 타설한 후 형상 관리시스템의 무선 유압잭 제어 프로그램을 사용하여 실시하였다. 강재와 GFRP 슬립폼을 개별적으로 인상하는 경우와 동시에 인상하는 경우를 각각 실시하고 슬립폼 상승에 따른 거푸집 마찰하중을 측정하였다. 이를 통해 GFRP 거푸집의 보온성과 시공 후 콘크리트 면이 우수함을 확인하였다. 2차 목업실험에서는 40cm 단면의 강재 및 GFRP 거푸집을 높이 1.2m로 제작하고 콘크리트를 높이 25cm로 1시간마다 타설하였다. 실제 콘크리트 주탑에서의 슬립폼 공법과 유사하게 여기서도 형상 관리시스템의 유압잭 제어프로그램을 사용하였으며 강재와 GFRP 슬립폼시스템을 동시에 인상하여 총 높이 2.0m의 기둥 2개를 시공하는 실험을 실시하였다. 이때 거푸집 하단에 초음파 모듈을 설치하여 초음파 속도로 슬립폼 상승 시기를 결정하였다. 이로부터 초음파 최적상승장치를 이용하면 슬립폼시스템의 효율적인 운용이 가능함을 확인하였다. 3차 목업실험에서는 GFRP 모듈을 이용하여 슬립폼 거푸집을 제작하여 목업실험을 수행하였다. 시공정밀도 관리시스템을 이용하여 원격으로 슬립폼시스템을 상승시켜 총 높

이 1.8m의 콘크리트 기둥 2개를 동시에 시공하는 실험을 실시하였다. 이를 통해 콘크리트 타설 후 및 슬립업 후에도 연결부 등에서의 처짐이나 유해한 문제가 발생하지 않음을 확인하였다.

목업실험과 별도로 시험시공은 개발한 핵심요소기술들의 성능을 검증하고 현장 적용성을 개선하기 위해 총 4차례에 걸쳐 수행되었다. 1차 시험시공의 목적은 이 연구에서 개발된 핵심요소기술들을 통합적으로 적용하여 검증하는 데 있었다. 개발된 슬립폼시스템으로 변단면 주탑 시공이 가능함을 입증하기 위해 핵심요소기술들 모두를 반영하여 시스템을 설계하고 제작하여 시험시공에 투입하였다. 여기서, 변단면 슬립폼 공법의 핵심 요소기술들에 대한 연구개발이 체계적으로 이루어졌다고 생각하였지만 설계 단계에서 예상하지 못했던 문제점들을 발견하여 보완하기도 하였다. 특히 설계단계에서 고려하지 못한 작업자 편의 및 작업공간 확보에 대한 면밀한 검토가 필요함을 확인하였다. 2차 시험시공은 래티스거더를 이용하여 2개의 변단면 슬립폼시스템을 동시에 시공하는 것이었다. 일반적인 장대교량 주탑과 유사하게 변단면 콘크리트 타워 2기를 10m 높이까지 동시 시공을 성공적으로 실시하였다. 여기서는 당초 연구목표에는 없었지만 인력에 의해 수행되던 변단면 대응 작업을 자동화하는 전동식 스핀들 시스템의 시제품을 만들어 적용하였다. 그리고 GFRP거푸집 모듈의 체결부를 개선하여 작업의 편의성을 증진시켰고, 일반 사장교 주탑과 같이 시공 중 케이블 정착구를 삽입하여 현장 적용성을 입증하였다. 3차 시험시공에서는 본격적으로 슬립폼시스템의 변단면 자동화를 검증하였다. 2차 시험시공에서 적용가능성 여부를 확인한 전동식 스핀들의 자동화 시스템을 변단면 작업이 수행되는 모든 부분에 적용하였다. 이를 통해 작업시간을 단축하고 인력을 절감하며, 정밀한 형상관리를 수행할 수 있음을 확인하였다. 4차 시험시공은 무선 전동식 스핀들의 내구성 성능 검증과 건설신기술 현장실사를 위해 실시되었다. 3차 시험시공 후 8개월간 방치된 슬립폼시스템의 변단면 자동화시스템이 제대로 작동하는 지 검증하였다. 기 시공된 주탑 실험체에서 추가로 2m를 더 상승시켜 시공을 수행하였다. 3차 시험시공 후 설치된 무선 전동식 스핀들을 철거하지 않은 상태로 8개월 동안 외부 환경에 그대로 노출된 상태였는데 32개의 자동화시스템 모두 정상 작동하여 변단면 대응을 효율적으로 실시하였다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기대성과

제 1 절 연구목표 달성도

1. 연차별 성과지표 달성도

가. 총괄 성과지표 달성도('09.11.06~'15.12.25, 6년 2개월)

3-2 세부 총괄					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	현장적용에 따른 비용절감 건수	1	1	100%	
	건설신기술신청	1	1	100%	
	국내외 학술회의 발표	8	31	388%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	4	11	275%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	2	6	300%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	2	8	400%	초과달성
	프로그램 등록	3	5	167%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	핵심과제TestBed적용건수	1	1	100%	
	사업단통합TestBed적용건수	1	0	0%	
	Prototype설계성과물	1	1	100%	
	시공기술 개발	1	1	100%	
	슬립폼장비운용지침(안)	1	1	100%	
	콘크리트고주탑슬립폼시공지침(안)	1	1	100%	
	변단면슬립폼장비Prototype장비개발	1	1	100%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	

3-2 세부 총괄					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	기술실시 계약 건수	1	3	300%	초과달성
	국내외 학술회의 발표	8	19	238%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI급)	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	2	3	150%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	2	2	100%	
	프로그램 등록	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	핵심과제TestBed적용건수	1	1	100%	
	사업단통합TestBed적용건수	1	0	0%	
	콘크리트고주탑형상관리지침(안)	1	1	100%	
	시공정밀도관리시스템Prototype성과품	1	1	100%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 학술회의 발표	4	4	100%	
	국내외학술지게재(비SCI급)	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	1	2	200%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	경량거푸집Prototype장비개발	1	1	100%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	
	해당분야 석박사 배출	1	1	100%	
	해당분야 취업	1	1	100%	
실용화 추진	건설신기술		2		추가

3-2-1 세세부-주관-한국건설기술연구원					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	현장적용에 따른 비용절감 건수	1	1	100%	
	건설신기술신청	1	1	100%	
	국내외 학술회의 발표	8	31	388%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	4	11	275%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	2	6	300%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	2	8	400%	초과달성
	프로그램 등록	3	5	167%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	핵심과제TestBed적용건수	1	1	100%	
	사업단통합TestBed적용건수	1	0	0%	
	Prototype설계성과물	1	1	100%	
	시공기술 개발	1	1	100%	
	슬립폼장비운용지침(안)	1	1	100%	
	콘크리트고주탑슬립폼시공지침(안)	1	1	100%	
	변단면슬립폼장비Prototype장비개발	1	1	100%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	기술실시 계약 건수	1	3	300%	초과달성
	국내외 학술회의 발표	8	19	238%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI급)	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	2	3	150%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	2	2	100%	
	프로그램 등록	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	핵심과제TestBed적용건수	1	1	100%	
	사업단통합TestBed적용건수	1	0	0%	
	콘크리트고주탑형상관리지침(안)	1	1	100%	
	시공정밀도관리시스템Prototype성과품	1	1	100%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 학술회의 발표	4	4	100%	
	국내외학술지게재(비SCI급)	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	1	2	200%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	경량거푸집Prototype장비개발	1	1	100%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	
	해당분야 석박사 배출	1	1	100%	
	해당분야 취업	1	1	100%	
실용화 추진	건설신기술		2		추가

나. 2차년도 성과지표 달성도('09.11.06~'10.04.25)

3-2 세부 총괄					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	기술 격차 축소	10	10	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	1	1	100%	
	기술 격차 축소	10	10	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	기술 격차 축소	10	10	100%	

3-2-1 세세부-주관-한국건설기술연구원					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	기술 격차 축소	10	10	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	1	1	100%	
	기술 격차 축소	10	10	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	기술 격차 축소	10	10	100%	

다. 3차년도 성과지표 달성도('10.04.26~'11.03.25)

3-2 세부 총괄					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	0	2	200%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	25	25	100%	
	기술 격차 축소	50	50	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	0	2	200%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	25	25	100%	
	기술 격차 축소	50	50	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 학술회의 발표	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	25	25	100%	
	기술 격차 축소	50	50	100%	

3-2-1 세세부-주관-한국건설기술연구원					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	0	2	200%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	25	25	100%	
	기술 격차 축소	50	50	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	0	2	200%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	25	25	100%	
	기술 격차 축소	50	50	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 학술회의 발표	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	25	25	100%	
	기술 격차 축소	50	50	100%	

라. 4차년도 성과지표 달성도('11.03.26~'12.03.25)

3-2 세부 총괄					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	1	3	300%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	1	2	200%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	65	65	100%	
	기술 격차 축소	70	70	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	65	65	100%	
	기술 격차 축소	70	70	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 학술회의 발표	2	2	100%	
	국내외학술지게재(비SCI급)	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	65	65	100%	
	기술 격차 축소	70	70	100%	

3-2-1 세세부-주관-한국건설기술연구원					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	1	3	300%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	1	2	200%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	65	65	100%	
	기술 격차 축소	70	70	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	65	65	100%	
	기술 격차 축소	70	70	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 학술회의 발표	2	2	100%	
	국내외학술지게재(비SCI급)	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	65	65	100%	
	기술 격차 축소	70	70	100%	

마. 5차년도 성과지표 달성도('12.03.26~'13.03.25)

3-2 세부 총괄					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	3	5	167%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	1	1	100%	
	국내외 특허 등록건수	0	1	100%	
	프로그램 등록	1	3	300%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	80	80	100%	
	기술 격차 축소	80	80	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	2	4	200%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	1	1	100%	
	프로그램 등록	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	80	80	100%	
	기술 격차 축소	80	80	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 학술회의 발표	1	1	100%	
	국내외 특허 등록건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	80	80	100%	
	기술 격차 축소	80	80	100%	
	해당분야 석박사 배출	1	1	100%	
	해당분야 취업	1	1	100%	

3-2-1 세세부-주관-한국건설기술연구원					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	3	5	167%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	1	1	100%	
	국내외 특허 출원건수	1	1	100%	
	국내외 특허 등록건수	0	1	100%	
	프로그램 등록	1	3	300%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	80	80	100%	
	기술 격차 축소	80	80	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	2	4	200%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	1	1	100%	
	프로그램 등록	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	80	80	100%	
	기술 격차 축소	80	80	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 학술회의 발표	1	1	100%	
	국내외 특허 등록건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	80	80	100%	
	기술 격차 축소	80	80	100%	
	해당분야 석박사 배출	1	1	100%	
	해당분야 취업	1	1	100%	

바. 6차년도 성과지표 달성도('13.03.26~'14.03.25)

3-2 세부 총괄					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	2	8	400%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	1	5	500%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	0	2	200%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	1	3	300%	초과달성
	프로그램 등록	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	90	90	100%	
	Prototype설계성과물	1	1	100%	
	시공기술 개발	1	1	100%	
	변단면슬립폼장비Prototype장비개발	1	1	100%	
	기술 격차 축소	90	90	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	기술실시 계약 건수	1	2	200%	초과달성
	국내외 학술회의 발표	2	4	200%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	0	1	100%	
	국내외 특허 등록건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	90	90	100%	
	콘크리트고주탑형상관리지침(안)	1	1	100%	
	시공정밀도관리시스템Prototype성과품	1	1	100%	
	기술 격차 축소	90	90	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 특허 출원건수	0	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	90	90	100%	
	경량거푸집Prototype장비개발	1	1	100%	
	기술 격차 축소	90	90	100%	

3-2-1 세세부-주관-한국건설기술연구원					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	2	8	400%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	1	5	500%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	0	2	200%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	1	3	300%	초과달성
	프로그램 등록	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	90	90	100%	
	Prototype설계성과물	1	1	100%	
	시공기술 개발	1	1	100%	
	변단면슬립폼장비Prototype장비개발	1	1	100%	
	기술 격차 축소	90	90	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	기술실시 계약 건수	1	2	200%	초과달성
	국내외 학술회의 발표	2	4	200%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	0	1	100%	
	국내외 특허 등록건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	90	90	100%	
	콘크리트고주탑형상관리지침(안)	1	1	100%	
	시공정밀도관리시스템Prototype성과품	1	1	100%	
	기술 격차 축소	90	90	100%	
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	국내외 특허 출원건수	0	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	90	90	100%	
	경량거푸집Prototype장비개발	1	1	100%	
	기술 격차 축소	90	90	100%	

사. 7차년도 성과지표 달성도('14.03.26~'15.03.25)

3-2 세부 총괄					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	현장적용에 따른 비용절감 건수	1	1	100%	
	건설신기술신청	1	1	100%	
	국내외 학술회의 발표	0	7	700%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	0	3	300%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	0	1	100%	
	국내외 특허 등록건수	1	4	400%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	95	95	100%	
	핵심과제TestBed적용건수	1	1	100%	
	슬립폼장비운용지침(안)	1	1	100%	
	콘크리트고주탑슬립폼시공지침(안)	1	1	100%	
	기술 격차 축소	95	95	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	기술실시 계약 건수	0	1	100%	
	국내외 학술회의 발표	1	4	400%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	95	95	100%	
	핵심과제TestBed적용건수	1	1	100%	
	기술 격차 축소	95	95	100%	

3-2-1 세세부-주관-한국건설기술연구원					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치 /목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	현장적용에 따른 비용절감 건수	1	1	100%	
	건설신기술신청	1	1	100%	
	국내외 학술회의 발표	0	7	700%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	0	3	300%	초과달성
	국내외 특허 출원건수	0	1	100%	
	국내외 특허 등록건수	1	4	400%	초과달성
	기술 성능 목표 달성도	95	95	100%	
	핵심과제TestBed적용건수	1	1	100%	
	슬립폼장비운용지침(안)	1	1	100%	
	콘크리트고주탑슬립폼시공지침(안)	1	1	100%	
	기술 격차 축소	95	95	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	기술실시 계약 건수	0	1	100%	
	국내외 학술회의 발표	1	4	400%	초과달성
	국내외 특허 등록건수	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	95	95	100%	
	핵심과제TestBed적용건수	1	1	100%	
	기술 격차 축소	95	95	100%	

아. 8차년도 성과지표 달성도('15.03.26~'15.12.25)

3-2 세부 총괄					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치/목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	2	6	300%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	1	1	100%	
	프로그램 등록	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	사업단통합TestBed적용건수	1	0	0%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	1	3	300%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI급)	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	사업단통합TestBed적용건수	1	0	0%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	
실용화 추진	건설신기술		2		추가

3-2-1 세세부-주관-한국건설기술연구원					
연구목표	성과지표	목표치	달성치	달성도(%) (달성치/목표치)	비고
변단면 슬립폼 설계기술 및 가설장비 개발	국내외 학술회의 발표	2	6	300%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI)	1	1	100%	
	프로그램 등록	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	사업단통합TestBed적용건수	1	0	0%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발	국내외 학술회의 발표	1	3	300%	초과달성
	국내외학술지게재(비SCI급)	1	1	100%	
	기술 성능 목표 달성도	100	100	100%	
	사업단통합TestBed적용건수	1	0	0%	
	기술 격차 축소	100	100	100%	
실용화 추진	건설신기술		2		추가

2. 연차별 주요 산출물

가. 총괄 주요 산출물('09.11.06~'15.12.25)

목 표	달성도 (%)	내 용
변단면 슬립폼 설계 기술 및 가설장비 개발	100%	▪ 슬립폼시스템 구성 개선 방안 연구 보고서 ▪ 콘크리트 고주탑 시공법 DB 1건 ▪ 슬립폼시스템 품질 특성 연구 보고서 ▪ 슬립폼시스템 개선사항 도출 보고서 ▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공을 위한 시작품 설계도면 ▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공을 위한 시작품 ▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공 동영상 ▪ 슬립폼시스템 시작품 목업실험 보고서 ▪ 변단면 슬립폼시스템 2차 시험시공을 위한 시작품 설계도면 ▪ 변단면 슬립폼시스템 2차 시험시공을 위한 시작품 ▪ 슬립폼 장비 목업실험 보고서 ▪ 경제성 분석 보고서 ▪ 건설신기술 신청 건수 1건 ▪ 핵심과제 Test Bed 적용 건수 1건 ▪ 슬립폼 장비 운용 지침(안) ▪ 콘크리트 고주탑 슬립폼 시공지침(안) ▪ BIM 가상설계 구축 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 31건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 11건 ▪ 국내외 특허 출원 건수 6건 ▪ 국내외 특허 등록 건수 8건 ▪ 프로그램 등록 건수 5건
고주탑 시공정밀도 관리시스템 개발	100%	▪ 광학식 계측에 의한 시공 정밀도 관리 시스템 분석 보고서 ▪ GPS 방식 시공 정밀도 관리 시스템 분석 보고서 ▪ 계측센서 신호처리 기법 연구 보고서 ▪ 시공 정밀도 관리 SW 오차보정 알고리즘 ▪ 시공 정밀도 통합 시스템 모듈 구성방안 도출 보고서 ▪ 슬립폼 위치제어 시스템 개선 사항 도출 보고서 ▪ 시공 정밀도 관리 시스템 개선 사항 도출 보고서 ▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공 동영상 ▪ 시공 정밀도 관리 시스템 목업 실험 보고서 ▪ 시공 정밀도 관리 시스템 목업 실험 보고서 ▪ 콘크리트 고주탑 형상관리 지침(안)

목 표	달성도 (%)	내 용
		▪ 시공 정밀도 관리 시스템 Prototype 성과품 ▪ 슬립폼 위치제어 시스템 개선기술 현장 적용성 검토 보고서 ▪ 시공 정밀도 관리 통합시스템 개선기술 현장 적용성 검토 보고서 ▪ 핵심과제 Test Bed 적용 건수 1건 ▪ 슬립폼 위치제어 시스템 개선기술 현장 적용성 검토 보고서 ▪ 시공 정밀도 관리 통합시스템 개선기술 현장 적용성 검토 보고서 ▪ 기술실시 계약 건수 3건 ▪ 국내외 학술회의 발표 19건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 1건 ▪ 국내외 특허 출원 건수 3건 ▪ 국내외 특허 등록 건수 2건 ▪ 프로그램 등록 건수 1건
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	100%	▪ 경량 거푸집 연구동향 및 슬립폼 구성부재 대체 방안 분석 보고서 ▪ 슬립폼 경량화 방안 도출 보고서 ▪ 경량 플레이트 재료 특성 Data ▪ 경량 거푸집 모듈화 적용 방안 보고서 ▪ 경량 거푸집 문제점 및 개선사항 도출 보고서 ▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공 동영상 ▪ 경량 거푸집 목업 실험 보고서 ▪ 경량 거푸집 Prototype 장비 개발 ▪ 국내외 학술회의 발표 4건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 1건 ▪ 국내외 특허 출원 건수 2건 ▪ 국내외 특허 등록 건수 1건

나. 2차년도 주요 산출물('09.11.06~'10.03.25)

목 표	달성도 (%)	내 용
변단면 슬립폼 설계 기술 및 가설장비 개발	100%	▪ 슬립폼시스템 구성 개선 방안 연구 보고서 ▪ 콘크리트 고주탑 시공법 DB 1건
고주탑 시공정밀도 관리시스템 개발	100%	▪ 광학식 계측에 의한 시공 정밀도 관리 시스템 분석 보고서 ▪ GPS 방식 시공 정밀도 관리 시스템 분석 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 1건
경량 거푸집 설계 및 가설장비 개발	100%	▪ 경량 거푸집 연구동향 및 슬립폼 구성부재 대체 방안 분석 보고서 ▪ 슬립폼 경량화 방안 도출 보고서

다. 3차년도 주요 산출물('10.3.26~'11.03.25)

목 표	달성도 (%)	내 용
변단면 슬립폼 설계 기술 및 가설장비 개발	100%	▪ 슬립폼시스템 품질 특성 연구 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 2건
고주탑 시공정밀도 관리시스템 개발	100%	▪ 계측센서 신호처리 기법 연구 보고서 ▪ 시공 정밀도 관리 SW 오차보정 알고리즘 ▪ 시공 정밀도 통합 시스템 모듈 구성방안 도출 보고서 ▪ 국내외 특허 출원 1건 ▪ 국내외 학술회의 발표 2건
경량 거푸집 설계 및 가설장비 개발	100%	▪ 경량 플레이트 재료 특성 Data ▪ 경량 거푸집 모듈화 적용 방안 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 1건 ▪ 국내외 특허 출원 1건

라. 4차년도 주요 산출물('11.3.26~'12.03.25)

목 표	달성도 (%)	내 용
변단면 슬립폼 설계 기술 및 가설장비 개발	100%	▪ 슬립폼시스템 개선사항 도출 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 3건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 1건 ▪ 국내외 특허 출원 건수 2건
고주탑 시공정밀도 관리시스템 개발	100%	▪ 슬립폼 위치제어 시스템 개선 사항 도출 보고서 ▪ 시공 정밀도 관리 시스템 개선 사항 도출 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 1건
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	100%	▪ 경량 거푸집 문제점 및 개선사항 도출 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 2건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 1건

마. 5차년도 주요 산출물('12.3.26~'13.03.25)

목 표	달성도 (%)	내 용
변단면 슬립폼 설계 기술 및 가설장비 개발	100%	▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공을 위한 시작품 설계도면 ▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공을 위한 시작품 ▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공 동영상 ▪ 슬립폼시스템 시작품 목업실험 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 5건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 1건 ▪ 국내외 특허 출원 건수 1건 ▪ 국내외 특허 등록 건수 1건 ▪ 프로그램 등록 건수 3건
고주탑 시공정밀도 관리시스템 개발	100%	▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공 동영상 ▪ 시공 정밀도 관리 시스템 목업 실험 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 4건 ▪ 국내외 특허 출원 건수 1건 ▪ 프로그램 등록 건수 1건
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	100%	▪ 변단면 슬립폼시스템 1차 시험시공 동영상 ▪ 경량 거푸집 목업 실험 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 1건 ▪ 국내외 특허 등록 건수 1건

바. 6차년도 주요 산출물('13.3.26~'14.03.25)

목 표	달성도 (%)	내 용
변단면 슬립폼 설계 기술 및 가설장비 개발	100%	▪ 변단면 슬립폼시스템 2차 시험시공을 위한 시작품 설계도면 ▪ 변단면 슬립폼시스템 2차 시험시공을 위한 시작품 ▪ 슬립폼 장비 목업실험 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 8건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 5건 ▪ 국내외 특허 출원 건수 2건 ▪ 국내외 특허 등록 건수 3건 ▪ 프로그램 등록 건수 1건
고주탑 시공정밀도 관리시스템 개발	100%	▪ 시공 정밀도 관리 시스템 목업 실험 보고서 ▪ 콘크리트 고주탑 형상관리 지침(안) ▪ 시공 정밀도 관리 시스템 Prototype 성과품 ▪ 기술실시 계약 건수 2건 ▪ 국내외 학술회의 발표 4건 ▪ 국내외 특허 출원 건수 1건 ▪ 국내외 특허 등록 건수 1건
경량 거푸집 설계 및 가설 장비 개발	100%	▪ 경량 거푸집 목업 실험 보고서 ▪ 경량 거푸집 Prototype 장비 개발 ▪ 국내외 특허 출원 건수 1건

사. 7차년도 주요 산출물('14.3.26~'15.03.25)

목 표	달성도 (%)	내 용
변단면 슬립폼 설계 기술 및 가설장비 개발	100%	▪ 경제성 분석 보고서 ▪ 건설신기술 신청 건수 1건 ▪ 핵심과제 Test Bed 적용 건수 1건 ▪ 슬립폼 장비 운용 지침(안) ▪ 콘크리트 고주탑 슬립폼 시공지침(안) ▪ 국내외 학술회의 발표 7건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 3건 ▪ 국내외 특허 출원 건수 1건 ▪ 국내외 특허 등록 건수 4건
고주탑 시공정밀도 관리시스템 개발	100%	▪ 기술실시 계약 건수 1건 ▪ 슬립폼 위치제어 시스템 개선기술 현장 적용성 검토 보고서 ▪ 시공 정밀도 관리 통합시스템 개선기술 현장 적용성 검토 보고서 ▪ 핵심과제 Test Bed 적용 건수 1건 ▪ 국내외 학술회의 발표 4건 ▪ 국내외 특허 등록 건수 1건

아. 8차년도 주요 산출물('15.3.26~'15.12.25)

목 표	달성도 (%)	내 용
변단면 슬립폼 설계 기술 및 가설장비 개발	100%	▪ BIM 가상설계 구축 보고서 ▪ 프로그램 등록 건수 1건 ▪ 국내외 학술회의 발표 6건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 1건
고주탑 시공정밀도 관리시스템 개발	100%	▪ 슬립폼 위치제어 시스템 개선기술 현장 적용성 검토 보고서 ▪ 시공 정밀도 관리 통합시스템 개선기술 현장 적용성 검토 보고서 ▪ 국내외 학술회의 발표 3건 ▪ 국내외 학술지 게재(비SCI급) 1건
추가		▪ 국토교통부 건설신기술 1건 ▪ 수자원공사 신기술 1건

3. 연차별 연구비 집행 내역

가. 총 연구년도 비목별 총괄('09.11.06~'15.12.25) : 집행율 99.27%

(단위 : 천원)

항목	비목 \ 금액			계획금액	사용액	잔액	비고
직접비	인건비	미지급용		0	0	0	
		지급용	현금	1,150,621	1,146,875	3,746	
			현물	252,390	252,390	0	
	학생인건비			0	0	0	
	소 계			1,403,011	1,399,265	3,746	
	연구장비·재료비	현금		643,341	717,560	-74,219	
		현물		474,910	474,910	0	
	연구활동비			249,079	188,278	60,801	
	연구과제추진비			26,821	16,688	10,133	
	연구수당			269,767	268,967	800	
	소 계			1,663,918	1,666,403	-2,485	
	위탁연구개발비			398,000	398,000	0	
간접비				474,471	474,471	0	
연구비 총액				3,939,400	3,938,139	1,261	

나. 2차년도 비목별 총괄('09.11.06~'10.04.25) : 집행율 99.54%

(단위 : 천원)

항목	비목 \ 금액			계획금액	사용액	잔액	비고
직접비	인건비	미지급용		0	0	0	
		지급용	현금	58,746	58,746	0	
			현물	27,540	27,540	0	
	학생인건비			0	0	0	
	소 계			86,286	86,286	0	
	연구장비·재료비	현금		2,500	2,869	-369	
		현물		64,260	64,260	0	
	연구활동비			18,278	16,664	1,614	
	연구과제추진비			0	0	0	
	연구수당			17,257	17,257	0	
	소 계			102,295	101,050	1,245	
	위탁연구개발비			58,300	58,300	0	
간접비				24,119	24,119	0	
연구비 총액				271,000	269,755	1,245	

다. 3차년도 비목별 총괄('10.04.26~'11.03.25) : 집행율 100%

(단위 : 천원)

항목	비목 \ 금액			계획금액	사용액	잔액	비고
직접비	인건비	미지급용		0	0	0	
		지급용	현금	171,092	171,092	0	
			현물	30,660	30,660	0	
	학생인건비			0	0	0	
	소 계			201,752	201,752	0	
	연구장비·재료비	현금		43,217	60,878	-17,661	
		현물		44,540	44,540	0	
	연구활동비			47,214	29,553	17,661	연구장비·재료비로 활용
	연구과제추진비			0	0	0	
	연구수당			40,350	40,350	0	
	소 계			175,321	175,321	0	
	위탁연구개발비			79,100	79,100	0	
간접비				48,227	48,227	0	
연구비 총액				504,400	504,400	0	

라. 4차년도 비목별 총괄('11.03.26~'12.03.25) : 집행율 100%

(단위 : 천원)

항목	비목 \ 금액			계획금액	사용액	잔액	비고
직접비	인건비	미지급용		0	0	0	
		지급용	현금	164,987	164,987	0	
			현물	46,150	46,150	0	
	학생인건비			0	0	0	
	소 계			211,137	211,137	0	
	연구장비·재료비	현금		79,685	88,890	-9,205	
		현물		46,150	46,150	0	
	연구활동비			45,801	36,582	9,219	
	연구과제추진비			0	0	0	
	연구수당			42,227	42,227	0	
	소 계			213,863	213,849	14	
	위탁연구개발비			85,000	85,000	0	
간접비				76,100	76,100	0	
연구비 총액				586,100	586,086	14	

마. 5차년도 비목별 총괄('12.03.26~'13.03.25) : 집행율 100%

(단위 : 천원)

항목	비목 \ 금액			계획금액	사용액	잔액	비고
직접비	인건비	미지급용		0	0	0	
		지급용	현금	222,501	222,501	0	
			현물	46,220	46,220	0	
	학생인건비			0	0	0	
	소 계			268,721	268,721	0	
	연구장비·재료비	현금		133,112	155,740	-22,628	
		현물		131,680	131,680	0	
	연구활동비			67,223	44,595	22,628	
	연구과제추진비			0	0	0	
	연구수당			44,500	44,500	0	
	소 계			376,515	376,515	0	
	위탁연구개발비			86,000	86,000	0	
간접비				99,064	99,064	0	
연구비 총액				830,300	830,300	0	

바. 6차년도 비목별 총괄('13.03.26~'14.03.25) : 집행율 100%

(단위 : 천원)

항목	비목 \ 금액			계획금액	사용액	잔액	비고
직접비	인건비	미지급용		0	0	0	
		지급용	현금	254,937	254,937	0	
			현물	46,220	46,220	0	
	학생인건비			0	0	0	
	소 계			301,157	301,157	0	
	연구장비·재료비	현금		186,509	192,496	-5,987	
		현물		131,680	131,680	0	
	연구활동비			34,400	31,053	3,347	
	연구과제추진비			12,000	9,358	2,642	
	연구수당			60,231	60,231	0	
	소 계			424,820	424,818	2	
	위탁연구개발비			89,600	89,600	0	
간접비				105,723	105,723	0	
연구비 총액				921,300	921,298	2	

사. 7차년도 비목별 총괄('14.03.26~'15.03.25) : 집행율 100%

(단위 : 천원)

항목	비목 \ 금액			계획금액	사용액	잔액	비고
직접비	인건비	미지급용		0	0	0	
		지급용	현금	160,689	156,943	3,746	
			현물	36,090	36,090	0	
	학생인건비			0	0	0	
	소 계			196,779	193,033	3,746	
	연구장비·재료비	현금		139,614	154,070	-14,456	
		현물		34,410	34,410	0	
	연구활동비			30,483	26,952	3,531	
	연구과제추진비			10,500	4,121	6,379	
	연구수당			37,767	36,967	800	
	소 계			252,774	256,520	-3,746	
	위탁연구개발비			0	0	0	
간접비				81,647	81,647	0	
연구비 총액				531,200	531,200	0	

아. 8차년도 비목별 총괄('15.03.26~'16.03.25) : 집행율 100%

(단위 : 천원)

항목	비목 \ 금액			계획금액	사용액	잔액	비고
직접비	인건비	미지급용		0	0	0	
		지급용	현금	117,669	117,669	0	
			현물	19,510	19,510	0	
	학생인건비			0	0	0	
	소 계			137,179	137,179	0	
	연구장비·재료비	현금		58,704	62,617	-3,913	
		현물		22,190	22,190	0	
	연구활동비			5,680	2,879	2,801	
	연구과제추진비			4,321	3,209	1,112	
	연구수당			27,435	27,435	0	
	소 계			118,330	118,330	0	
	위탁연구개발비			0	0	0	
간접비				39,591	39,591	0	
연구비 총액				295,100	295,100	0	

제 2 절 기대성과 및 파급효과

1. 기술적 측면

◦ 변단면 슬립폼 공법은 거푸집을 탈착하지 않고 콘크리트를 24시간 연속 타설할 수 있는 최첨단 공법임.

◦ 변단면 슬립폼 설계 기술 및 가설장비 제작 기술은 국외의 소수 기업이 독점적으로 보유하고 있으며 높은 기술 장벽으로 인하여 이들 소수 기업이 세계적으로 콘크리트 타워 시공을 주도하고 있음.

◦ 변단면 슬립폼시스템의 설계기술 확보로 선도국가와의 기술 격차를 해소하고 기술 자립화에 기여함.

◦ 해외에 의존하는 변단면 슬립폼 가설 장비의 국산화와 장비 운용에 대한 자율성 확보로 초장대교량의 세계시장 경쟁력 확보가 기대됨.

◦ 슬립폼시스템의 상승속도를 결정할 수 있는 기술은 슬립폼 공법의 시공 품질 및 시공효율성을 극대화시키는 것을 목표로 하고 있으며, 이는 향후 국내 기업의 해외사업 수주 시 경쟁력 향상에 기여할 수 있음.

◦ 초음파를 이용하여 슬립폼 콘크리트의 경화정도를 신뢰성 있게 정량적으로 산정함으로써 시공품질 개선, 작업효율성 향상, 경제성 향상 등의 장점으로 기술경쟁에서 우위를 점할 수 있음.

◦ 초음파를 이용하여 슬립폼시스템의 상승 시기를 결정하는 기술은 아직까지 전세계 어느 기업도 보유하지 못한 기술로써 본 연구를 통하여 도출된 성과는 세계 최고 기술(World's Best Technology)임.

◦ 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리 기술은 GPS 및 무선제어기술을 활용한 첨단 형상관리 기술이며, 높은 구조 안전성이 요구되는 주탑의 형상관리를 위한 핵심기술로서 국내외적으로 기술개발이 활발히 진행되고 있음.

◦ GPS 센서 계측결과에 대한 신호처리 기법 및 센서 상호 보완 기법, 슬립폼 시공 시 형상 오차 보정 및 위치 제어 기술을 확보하여 고주탑 시공 정밀도 관리 및 형상제어 기술 분야를 선도하게 됨.

◦ 고주탑 형상관리 핵심기술 확보는 시공품질의 향상이 기대되는데, 이러한 시공

관리 기법과 시스템 운용기술에 의하여 콘크리트 고주탑 건설 시장에 있어서 경쟁 우위를 확보함.

2. 사회·경제적 측면

지금까지 국내에서는 슬립폼시스템에 대한 설계와 제작을 수행한 경험이 없고 로열티를 주고 오직 외국 기술에 의존해 왔다. 이에 서해대교, 마창대교, 이순신대교 등에서는 세계적으로 독점적인 기술을 보유하고 있는 오스트리아의 GBG사의 설계 및 제작기술을 전적으로 수입함에 따라 막대한 로열티를 지불해왔다. 본 개발기술은 설계·제작·시공에 있어서 100% 기술 자립을 이룬 국내 최초의 기술이므로, 개발 기술을 기존의 국내 기술과의 설계 및 시공비 절감 효과를 비교 분석하는 것은 불가능하다.

해외 독점기술과의 비교 분석을 위해 다방면으로 설계·제작·시공 관련 비용을 입수하려 하였으나 해외 독점기업이 공개를 거부하는 바람에 비교 자료 확보가 불가능하였다. 기존 해외 독점 슬립폼 공법은 국내 적용할 때에 막대한 로열티를 요구해 왔다. 이 부분만 절약하더라도 큰 경제성 효과가 있을 것으로 판단되며, 또한 첨단 기술 적용으로 부수적인 시공비 절감이 기대되므로 경제성은 매우 우수한 것으로 예상된다.

전술한 바와 같이 해외 독점기술의 가격 원가를 확보할 수 없으므로 본 보고서에서는 개발 기술의 우수한 경제성에 대한 이해를 돕기 위해 콘크리트 주탑의 또 다른 건설 공법인 ACS 공법과의 비교를 수행하여 보았다. 본 개발기술인 슬립폼 공법은 다소 비싸더라도 공기가 촉박하여 급속하게 시공할 필요가 있는 곳에 적용하는 것이고 ACS공법은 비교적 저렴하지만 장기간이 소요된다. 따라서 서로 다른 조건 속에서 적용되는 두 공법의 직접적 비교에는 무리가 따르지만 본 개발기술의 경제성을 판단하는데 도움을 주고자 공인된 원가계산용역기관인 (재)현대산업정보연구원에 의뢰하여 경제성을 분석하였다.

일단 개발기술의 시공절차별 품셈을 작성하고, 이를 바탕으로 일위대가를 작성하였다. 이를 바탕으로 국내에 실제 시공 계획 중인 OO대교의 주탑 시공에 대한 원가계산을 실시하였다. ACS공법의 시공단계 절차는 본 개발기술과 유사하지만

ACS 폼은 거푸집(2 ~ 4m)과 발판이 일체로 블록화된 조립거푸집을 1롯드(Lot)씩 타설하고, 약 7일 양생 후 크레인 또는 자동으로 상향 이동하여 시공하는 것이다. 이 때문에 시공이음이 필수적으로 발생하게 되고 거푸집 상향 이동시 발판의 추락 사고에 대한 위험 등으로 추가적인 비용이 발생하지만 이는 포함하지 않았다. 본 개발기술과 참고기술인 ACS Form 적용의 원가계산을 수행한 결과 OO대교는 주탑 형상 등 여러 가지 여건 상, ACS Form 적용에 따른 공사비 대비 **약 92%**로서 8%의 공사비 절감 효과가 나타남을 확인하였다.

(단위: 원)

품명	개발 기술 (변단면 Slip-Form)	기존 기술 (국외 Slip-Form)	참고기술 (ACS Form)	절감액 (기존기술 - 개발기술)
OO대교 주탑 시공 금액	12,034,573,000* (92%)	파악 불가 (독점기업 원가 공개 거부)	13,043,285,000* (100%)	1,008,712,000 (8%)
이순신대교		파악 불가 (로열티 약 70억원)		
서해대교		파악 불가 (로열티 약 56억원)		

변단면 슬립폼 시공 기술은 세계적으로 오스트리아의 GBG사가 기술을 독점하고 있으며 이순신대교 주탑 공사에서는 오스트리아의 GBG사로 약 70 억원 정도의 로열티가 지불된 것으로 알려져 있다. 본 개발기술의 적용에 따른 기존 해외 공법 대비 공사비 절감 효과를 확인하기 위해서는 이순신대교에서 소요된 총 주탑 공사비 정보가 필요하지만 시공사에서 가격 공개를 꺼리기 때문에 한계가 있다. 하지만 본 개발기술을 적용할 경우 해외로의 막대한 로열티 지불을 줄일 수 있다는 점에서 막대한 경제적인 효과를 얻을 수 있는 것은 자명하다.

① 개발기술의 고유영역에 해당하는 시공절차 구분

번호	개발 공법	기존 국외 독점공법	참고기술 (ACS Form)	개발기술의 고유영역 해당여부
1	변단면 슬립폼 설치 **(BIM에 의한 설계 및 제작)**	변단면 슬립폼 설치 **(2D 설계 기반)**	ACS 폼 설치	○
2	슬립폼 인상 **(초음파 최적기 상승기술)**	슬립폼 인상 **(탐침봉)**	해체 및 이동	○
3	슬립폼 변단면 조정 **(전동스핀들)**	슬립폼 변단면 조정 **(수동 거푸집조절)**	ACS 폼 재설치	○
4	철근조립 및 콘크리트 타설	철근조립 및 콘크리트 타설	철근조립 및 콘크리트 타설	
5	변단면 슬립폼 해체	변단면 슬립폼 해체	ACS 폼 해체	

② 시공절차별 품셈(주간 기준)

(m^2당)

시공절차 세부항목	소요 인력 장비 자재		단위	소요량	출처
	품명	규격			
① 변단면 슬립폼 설치	비 계 공		인	0.199	표준품셈 토목 6-3-12
	보통인부		인	0.091	표준품셈 토목 6-3-12
	기계설비공		인	0.120	자사기준
	크 레 인		hr	0.132	표준품셈 토목 6-3-12
② 변단면 슬립폼 해체	비 계 공		인	0.154	표준품셈 토목 6-3-12
	보통인부		인	0.064	표준품셈 토목 6-3-12
	기계설비공		인	0.092	자사기준
	크 레 인		hr	0.170	표준품셈 토목 6-3-12
③ 변단면 슬립폼 인상 (SLIP-UP)	기계설비공		인	0.034	표준품셈 토목 6-3-12
	보통인부		인	0.073	표준품셈 토목 6-3-12
④ 슬립폼의 변단면 조정	기계설비공		인	0.372	자사기준
	보통인부		인	0.154	자사기준
⑤ 철근조립	철근공		인/ton	0.887	표준품셈 토목 6-3-12
⑥ 콘크리트 타설	콘크리트공		인/m^3	0.125	표준품셈 토목 6-3-12

③ 시공절차별 일위대가

(m^2당)

시공절차 세부항목	소용인력,장비,자재		단위	소요량	단가			금액(소요량 X 단가)				단가출처
	품명	규격			재료비	노무비	경비	재료비	노무비	경비	계	
① 변단면 슬립폼 설치	비계공		인	0.199		158,014			31,444		31,444	대한건설협회
	보통인부		인	0.091		87,805			7,990		7,990	대한건설협회
	기계설비공		인	0.120		114,481			13,737		13,737	대한건설협회
	크레인	50 ton	hr	0.132	17,452	25,758	63,037	2,303	3,400	8,320	14,023	대한건설협회
	공구손료	인력품의3%	식	0.030	53,171				1,595		1,595	대한건설협회
	소계		m2								68,789	
② 변단면 슬립폼 해체	비계공		인	0.154		158,014			24,334		24,334	대한건설협회
	보통인부		인	0.064		87,805			5,619		5,619	대한건설협회
	기계설비공		인	0.092		114,481			10,532		10,532	대한건설협회
	크레인	80 ton	hr	0.170	27,778	25,758	88,252	4,722	4,378	15,002	24,102	대한건설협회
	공구손료	인력품의3%	식	0.030	40,485				1,214		1,214	대한건설협회
	소계		m2								65,801	

시공절차 세부항목	소용인력,장비,자재		단위	소요량	단가			금액(소요량 X 단가)				단가출처
	품명	규격			재료비	노무비	경비	재료비	노무비	경비	계	
③ 변단면 슬립폼 인상(Slip-up)	기계설비공		인	0.034		114,481			3,892		3,892	대한건설협회
	보통인부		인	0.073		87,805			6,409		6,409	대한건설협회
	소계		m2								10,301	
④ 슬립폼의 변단면 조정	기계설비공		인	0.372		114,481			42,586		42,586	대한건설협회
	보통인부		인	0.154		87,805			13,521		13,521	대한건설협회
	소계		ton								56,107	

시공절차 세부항목	소용인력,장비,자재		단위	소요량	단가			금액(소요량 X 단가)				단가출처
	품명	규격			재료비	노무비	경비	재료비	노무비	경비	계	
⑤ 철근조립	철근공		인	0.887		140,157			124,319		124,319	대한건설협회
	소계		ton								124,319	
⑥ 콘크리트 타설	콘크리트공		인	0.125		139,853			17,481		17,481	대한건설협회
	소계		m3								17,481	

④ 순공사비 비교(○○대교)

구분	개발기술	참고기술(ACS폼)	비용 산정 출처
사진			
투입 장비 및 자재비 (Ⓐ)	3,368,945,446원	3,461,352,122원	원가계산서의 재료비에 해당
노무비 (Ⓑ)	4,241,543,756원	4,674,935,436원	원가계산서의 노무비에 해당
경비 (Ⓒ)	2,941,076,456원	3,253,901,594원	원가계산서의 경비에 해당
일반관리비 및 이윤 (Ⓓ)	1,483,007,894원	1,653,096,094원	원가계산서의 일반관리비 및 이윤에 해당
합계비용 (Ⓐ+Ⓑ+Ⓒ+Ⓓ)	12,034,573,000원	13,043,285,000원	
콘크리트 타설 품질비교	24시간 연속 콘크리트 타설로 시공이음이 없으며 콘크리트 타설 품질이 우수함	1롯드(Lot)씩 타설하고, 약 7일 양생 후 크레인 또는 자동으로 상향 이동하여 시공하기 때문에 시공이음이 필수적으로 발생함	

3. 전략적 측면

가. 전문 인력 양성을 위한 인프라 구축

◦ 기술강습회, 기술자 교류/해외연수 프로그램 및 Career Map에 따른 체계적인 전문가 교육을 통하여 국내최고 수준의 슬립폼 전문가 양성
◦ 인적 인프라뿐만 아니라 전방위 시스템인프라 구축을 위한 지속적 슬립폼 시공 기술교육 지원 체계 구축
◦ 고효율 가설장비의 국산화 및 가설기술 자립을 달성함으로써 건설분야의 전문 인력뿐만 아니라 건설기계 및 장치산업 분야의 전문 인력 육성

나. 산업구조 개선

◦ 국제 인적 네트워크를 활용한 발주 정보 획득, 진입장벽 해소, 아웃소싱 등 보유역량을 극대화한 전략적 국제 컨소시엄에서 경쟁력 확보로 세계시장 진출
◦ 국제시장 진입을 통하여 기존의 내수시장 위주의 산업구조를 개선함.
◦ 본 연구는 전통적인 건설산업 뿐만 아니라 건설기계 및 장치 산업과도 밀접한 관계를 가지므로 산업간 인적 및 기술 교류가 과제 내에서 활발히 이루어질 수 있는 환경을 제공할 수 있을 것으로 기대되며, 이를 통한 산업간 동반 성장을 이룰 수 있는 기회가 됨.

다. 국가 이미지 제고

◦ 국제건설시장에서 외국 기술을 도입하여 단순 시공하는 국가 이미지로부터 고부가가치 건설기술 보유 국가로 자리매김
◦ 초장대 교량 건설에 관한 진정한 건설 능력 및 기술을 보유한 기술주도 국가로서의 국가이미지 향상

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구결과의 활용방안

1. 활용방안 종합

◦ 3핵심 2세부과제의 연구내용은 변단면 슬립폼 가설장비 및 공법 개발, 고주탑 시공 정밀도 관리 시스템 개발 및 GFRP 재료를 이용한 경량 거푸집 시스템 개발로 구성되어 있음

◦ 참여기업의 계획/시공 중인 케이블 교량의 주탑 시공 현장을 활용하여 연구 결과물의 Test Bed 적용을 통한 성과검증과 실용화를 추진함.

◦ 초고층 빌딩 코어구조물, LNG 탱크 외조, 사이로, 연돌, 콘크리트댐 구체, 신도시 콘크리트 타워형 구조물 등 다양한 분야에 활용될 수 있음.

◦ 신속하게 수직으로 시공할 수 있는 본 기술은 고품질을 확보하면서 공사기간을 더욱 단축할 수 있어 활용가능성은 매우 큼.

<표 5.1.1> 세부 연구내용별 목표성과물 및 활용방안(3-2 세부과제)

세부과제	세부 연구내용	목표 성과물	활용 방안			
			공법특화	기술특화	장비실용화	시스템실용화
콘크리트 고주탑 가설장비 및 공법 개발	변단면 슬립폼장비 및 공법 개발	변단면 슬립폼 장비 설계 기술		O		
		슬립폼시스템 상승 시기 결정 기술		O	O	
		변단면 슬립폼 가설 장비			O	
	고주탑 시공 정밀도 관리 시스템개발	고주탑 시공중 형상관리 기법		O		
		고주탑 시공 정밀도 관리 시스템				O
	경량 거푸집 시스템 개발	경량 재료를 이용한 거푸집 대체 모듈		O		
		경량 변단면 슬립폼 가설 장비			O	

2. 성과물 특성에 따른 활용방안

◦ 참여기업 협조로 Test Bed로 선정된 특수교량 가설현장에 본 연구 수행결과로 개발된 변단면 슬립폼 가설장비 및 고주탑 시공 정밀도 관리 기술을 적용하여 연구 성과물의 효율성 및 사용성을 검증하고 필요시 보완함.

◦ 해외 의존도가 높은 변단면 슬립폼 가설 장비의 국산화를 통하여 수입대체 효과를 얻고, 슬립폼을 GFRP재료를 이용하여 경량화하여 대외 경쟁력을 높임으로써 해외 시장진출 시 국제경쟁력 확보에 기여함.

◦ 본 개발 기술은 외국기술보다 시공속도가 빠르고, 형상관리 등에 첨단 IT 기술을 적용하여 매우 향상된 슬립폼시스템임. 슬립폼시스템의 구조물 3차원 변단면 형상 대응 설계기술을 확보하였고, 경량 GFRP 거푸집 패널을 적용하여 고품질을 확보하게 되었으며, 초면파를 이용하여 시스템을 효율적으로 자동 운용하게 되었음.

◦ 국내에서 슬립폼공법에 대한 원천기술을 보유하게 되었으므로 국내외 건설 시장에서 독보적인 경쟁력을 확보하여 해외 건설 프로젝트를 국내 기술만으로 수주할 수 있는 발판을 마련하게 되었음.

◦ 한국형 슬립폼시스템을 이용한 변단면 슬립폼공법은 핵심기술에 의한 효율적 시공이 가능하여 총 공사기간은 국외 슬립폼시스템 대비 10% 단축되는 것으로 평가되었음.

<표 5.1.2> 세부 연구내용별 활용방안 계획(3-2 세부과제)

세부연구내용	성과물	주요 활용 형태	활용방안 및 절차
변단면 슬립폼 장비 및 공법 개발	◦ 변단면 슬립폼 장비 설계 기술 ◦ 변단면 슬립폼 가설 장비	◦ 핵심기술 T/B 적용 ◦ 통합기술 T/B 적용 ◦ 국내외 현장 적용	◦ 특허/신기술 등록 ◦ 기술이전 및 T/B수행 ◦ 장비 실용화
고주탑 시공 정밀도 관리 시스템개발	◦ 고주탑 시공 중 형상관리 기법 ◦ 고주탑 시공 정밀도 관리 시스템	◦ 핵심기술 T/B 적용 ◦ 통합기술 T/B 적용 ◦ 국내외 현장 적용	◦ 특허/신기술 등록 ◦ 정밀계측, 정확성 등 평가 ◦ 시스템 실용화 ◦ 기술이전 및 T/B수행
경량 거푸집 시스템 개발	◦ 경량 재료를 이용한 거푸집 대체모듈 ◦ 경량 변단면 슬립폼 가설 장비	◦ 핵심기술 T/B 적용 ◦ 통합기술 T/B 적용 ◦ 국내외 현장 적용	◦ 특허/신기술 등록 ◦ 작업효율성 및 사용성 평가 ◦ 기술이전 및 T/B수행

제 2 절 연구결과의 기업 활용방안

1. 참여기업의 현황분석

위탁연구 기관	학계 1개 기관	2세부	한양대학교
단순참여 기업	대기업 2개 업체	2세부	금호산업(주), GS건설(주), 진성토건(주)
	중소기업 5개 업체	2세부	청진건설(주), (주)영화키스톤건축사사무소, (주)서현컨스텍, (주)뉴컨스텍, (주)EDCM, (주)코아이엔씨, (주)유림이엔디, (주)삼림엔지니어링

◦ **금호산업(주)**은 공항시설과 물류시설, SOC사업 등에서 축적된 기술경쟁력과 30년 Know-how를 갖고 있는데, 주택사업 분야 등 다방면에서 고도의 기술을 바탕으로 비약적인 성장을 거듭해 온 40년 전통을 가진 종합 건설회사임. 금호산업(주)는 2008년 매출 2조5천억 원을 달성하였으며 다양하고 풍부한 연구개발 경험을 바탕으로 하여 콘크리트 고주탑 공법개발을 수행하였으며, 본 연구실적을 바탕으로 국내외의 초장대교량 사업 진출을 통하여 다양한 분야의 사업 진출을 도모할 수 있을 것으로 예상됨. 주관기관인 한국건설기술연구원과의 기술계약을 수행하였고, 신기술을 공동으로 등록하였음. 현재 인천 LNG 탱크 외조 콘크리트 시공에 본 기술을 적용하고자 노력중임.

◦ **GS건설(주)**은 토목, 건축, 주택, 발전, 환경, 플랜트 사업을 수행하는 종합 건설회사로서 토목분야에서는 도로, 교량, 터널, 지하철, 항만, 부지조성, 개발사업 시설 등 국가 기반시설 건설을 수행하고 있으며, 2008년 매출 6조 8천억 원을 달성하였고 상시종업원수는 4,348명임. GS건설(주)은 연구개발비 및 인재개발비용으로 매년 50억 원 이상을 투자하고 이를 바탕으로 정부주도 연구사업에 참여하고 있으며 자체연구 개발사업도 적극적으로 수행 중에 있음. GS건설(주)은 장대케이블교량분야에서 다수의 시공 수행과 국내외 공동연구개발 경험을 바탕으로 본 연구에서 콘크리트 고주탑 가설공법 및 정밀도 관리시스템 개발에 참

여함.

◦ **진성토건(주)**은 터널, 교량 및 특수구조물 공사 등 전문특화된 기술력을 바탕으로한 전문건설업체로서 서해대교 주탑시공, 인천대교 주탑시공, 인천대교 접속교 FCM시공 등 국가기반 시설 건설을 수행하고 있으며 자체적으로 연구전담부서를 설립하여 정부 주도 연구과제 및 자체연구 개발사업에도 적극적으로 수행중에 있음. 진성토건(주)은 주탑분야의 풍부한 시공실적과 노하우를 바탕으로 초장대교량 고주탑 시공분야의 연구과제를 수행하여 변단면 고주탑 시공분야의 슬립폼 설계 및 시공의 기술자립을 위한 토대로 활용하고자 함.

◦ **청진건설(주)**은 특수교량의 기초 및 주탑 공사 분야에서 국내의 전문건설업체 중 독보적 실적과 기술을 보유한 전문건설업체임. 시공 당시 콘크리트 주탑으로 국내 최고 높이를 자랑하는 이순신 대교(주탑 높이 :270m)를 슬립폼 공법을 적용하여 일 인원 300여명의 근로자를 투입하여 11개월 만에 안전사고 없이 공사를 마무리 하였고, 국내 특수교량 중 세번째 경간장인 적금대교(주탑높이 130m)를 기초는 우물통 공법을 적용하고, 주탑은 ACS(Auto Climbing System method) 공법을 적용하여 공사를 완공하였음. 또한 국내 특수교량 중 두 번째 경간장인 울산대교(주탑높이 200m)와 1주탑 세계 최대의 경간장이며 AD형(돛단배 형상의 기하하적인 형상)의 단등대교 주탑 및 앵커리지 공사를 수행하였다. 이 밖에도 터키 보스포러스 3교(주탑 높이 : 329m)를 슬립폼과 ACS 공법을 적용하여 공사를 수행하였음, 현재 국내외 다수의 상징성 있는 특수 교량의 시공경험을 토대로 축적된 지식과 기술을 바탕으로 국토해양부에서 발주한 “공기단축형 고주탑 시공기술 개발” 사업에 참여기업으로 등록하여 현장 시공경험에서 체득한 살아있는 정보와 지식을 연구에 접목시키는 역할을 하고 있음. 또한 5~7차년도에 한국건설기술연구원내에서 콘크리트 타워 시험 시공을 수행함으로써 본 연구과제 기술개발에 적극 참여하였음. 주관기관인 한국건설기술연구원과의 기술계약을 수행하였고, 신기술을 공동으로 등록하였음. 현재 인천 LNG 탱크 외조 콘크리트 시공에 본 기술을 적용하고자 노력중임.

◦ **(주)영화키스톤건축사사무소**는 종합건설감리, 건설사업관리, 건축설계, 전기 및 기계설비의 설계감리, 소방시설 감리를 주로하는 건설엔지니어링 종합서비스 회사로서 토목시설의 설계 및 감리 분야에 진출을 모색하고 있으며, 2008년에 매출목표 180억원을 달성하였고 상시종업원은 185명임. (주)영화키스톤건축사사무

소는 매출액 대비 연구개발 투자 비율이 약 3.99%로써 자체 기술개발 사업으로 기술력 축적을 위한 공법 및 신자재 개발사업을 추진하고 있으며, 정부주도 연구과제에 참여하고 있음. (주)영화키스톤건축사무소는 풍부한 시공경험을 바탕으로 건설관리기법을 축적한 우수한 기술인력을 중심으로 본 연구에서 초장대교의 고효율시공을 위한 공법개발을 위해 전문지식을 제공할 계획이며, 본 연구과제에서 얻어진 기술을 건축분야에 적극 활용하여 최근 부각되고 있는 초고층 건축 및 첨단건축 분야의 시공에 적극 반영하여 고품질 시공, 최저가 공사가 될 수 있도록 활용 할 계획임.

◦ **(주)서현컨스텍**은 토목. 건축. 플랜트의 주요 구조물 설계 및 시공업체로서 자체 개발한 조립식 PC 옹벽공법(건설 신기술 513호)을 중심으로 사업의 범위를 확장하고 있음. 2008년 기술연구소를 설립 후, 년 매출의 7%를 연구 개발 사업에 투자하고 있으며, 이를 바탕으로 각종 연구개발 사업을 진행하여 PC옹벽, 파이프렉 공법, PC암거, PC안벽, PC지하차도 등 각종 구조물 공법에 대한 연구개발에 집중하고 있음. 또한 이를 바탕으로 2010년 해외 건설 및 플랜트 분야 진출을 준비하고 있으며, 신기술을 바탕으로 각종 대형 공공 토목현장에서부터 민간공사에 이르기 까지 다양한 현장에 개발기술을 접목하고 있음. (주)서현컨스텍은 상시 직원 30명으로서 2009년 매출 100억 원을 달성하였고, 당 연구과제에서 신소재분야의 연구 개발 및 신공법의 개발을 통해서 신기술 확보 및 해외 플랜트 및 해외 공사수주에 적극 활용할 예정임.

◦ **(주)뉴컨스텍**은 크게 계측시스템 부분과 고속축중계 부분에 뛰어난 기술을 가지고 있으며, 계측시스템부분은 계측장비 국산화 부분과 계측 소프트웨어 개발에 중점을 두고 있음. 이러한 계측시스템 부분에서는 타 계측회사와 연계를 통해 국내 여러 교량에 계측 소프트웨어를 구축한 실적을 가지고 있고, 고속으로 주행하는 차량의 축중을 측정하는 고속 WIM(Weight-in-Motion)분야에서는 뛰어난 계측기술 노하우를 보유하고 있음. 특히, 그 기술을 교량에 적용하기위한 BWIM(Bridge Weight-in -Motion) 부분에 뛰어난 기술을 보유하고 있으며, 계측기 국산화에 대한 연구도 함께 수행하고 있음

◦ **(주)이디시엠**은 토목구조설계 및 안전진단 용역을 수행하는 엔지니어링 회사로서 교량, 지하철, 수리구조물 등의 토목구조설계 및 안전진단을 수행하고 있음. 2008년에는 벤처기업에 등록되었고, 2009년에는 부설 기술연구소를 설립하고 자

체 연구개발 사업을 적극적으로 수행하고 있으며, 풍부한 기술인력 및 연구개발 경험을 바탕으로 본 연구에 참여하여 국내 및 해외의 초장대교량 설계 수주를 위한 토대로 활용하고자 함.

◦ **(주) 코아이엔씨**는 도로, 구조, 토질, 안전진단, 감리 등의 사업을 수행하는 엔지니어링업체로서 주로 토목구조인 특수교량(연도교, 연육교)설계를 전문으로 수행하고 지하철 및 도로 일반교량 등에도 설계에 참여하고 있음. 상시종업원수는 구조인원 25인, 도로 4인, 토질3인 안전진단인원 등 35명으로 구성되어있으며, 부설 기술연구소를 두어 신기술 및 기술개발에도 연매출대비 5%정도 투자하여 정부주도의 R&D사업에도 적극 동참하고 있음.

◦ **(주)유림이엔디**는 토목구조설계, 토목시설물 연구개발 및 가설엔지니어링에 관한 컨설팅 사업을 수행하는 신생업체로서 벤처기업인증을 받은 중소기업임. 현재 상시종업원수는 14명이며 인원의 50%이상이 토목구조분야로 석사학위 이상을 취득하였으며, 이런 인적 인프라를 통해 새로운 형식의 교량 및 하부구조에 대한 특허를 출원 또는 취득하였음. 본 연구에 있어 (주)유림이엔디는 국내외 콘크리트 고주탑 가설공법을 분석하여 설계시 보완책을 강구할 것이며 나아가 경제적이고 합리적인 가설기술을 정립할 것임. 또한 연구개발에 참여함으로써 선진화된 우수인력을 배출할 것으로 기대됨.

◦ **(주)삼림엔지니어링**은 2001년에 설립된 토목시설물 정밀안전진단 전문회사로서, 2009년 매출목표 73억원을 달성하였고, 상시종업원은 65명임. 기업부설 (주)삼림엔지니어링 기술연구소는 2006년부터 4년간 국가 주요시설물 안전관리 네트워크 시범구축 및 운영시스템 개발 과제를 수행하였고, 현재 3차원 가상 모델 및 스마트 이동 단말기를 이용한 차세대 교량 관리시스템의 디지털 컨텐츠 제작 및 유통기술 개발 연구를 수행중임. 톱니벨트와 감지기를 이용한 구조물 안전진단용 계측장치, 교량 횡방향 변형계측 안전진단장치 개발, 교량 신축이음구간의 안전진단장치 설치구조 개발 등의 우수한 계측기술 노하우를 보유하고 있고, 계측기 국산화에 대한 연구를 수행하고 있음.

2. 참여기업별 연계방안 및 추진전략

◦ 과제수행을 통해 개발된 기술에 대한 기술이전 및 사업화.

◦ 고효율 시공기술의 현장적용을 통한 실용화.

◦ 기 보유 및 향후 수주할 케이블교량 현장의 설계변경을 통한 Test Bed 현장적용.

<표 5.1.3> 참여기업별 연계방안 및 추진전략

구분	번호	기업명	과제에 대한 기업 관심영역	연계방안								
				기업활용	장비활용	교육연계	기술상담	정보제공	기술지도	기술이전	공동연구	창업지원
2세부	1	GS건설(주)	변단면 슬립폼 기술 개발 시공 정밀도 관리시스템	V	V	V	V	V	V	V	V	
	2	금호산업(주)	변단면 슬립폼 기술 개발 시공 정밀도 관리시스템	V	V	V	V	V	V	V	V	
	3	청진건설(주)	변단면 슬립폼 기술 개발 시공 정밀도 관리시스템	V	V		V	V	V	V		
	4	㈜영화키스톤건축사사무소	경량 거푸집 시스템개발 시공 정밀도 관리시스템	V	V		V	V	V			
	5	㈜서현컨스텍	경량 거푸집 시스템개발 시공 정밀도 관리시스템	V	V		V	V	V			
	6	(주)뉴컨스텍	변단면 슬립폼 기술 개발 시공 정밀도 관리시스템	V	V		V	V	V			
	7	㈜EDCM	변단면 슬립폼 기술 개발 시공 정밀도 관리시스템	V	V		V	V	V			
	합계			7	7	2	7	7	7	3	2	

제 3 절 타 산업에 미치는 효과

◦ 개발된 슬립폼 가설장비 및 공법은 장대교량 및 특수교량 분야뿐만 아니라 일반 교량의 교각에도 활용 가능

◦ 초고층 빌딩 코어구조물, LNG 탱크 외조, 사이로, 연돌, 콘크리트댐 구체, 신도시 콘크리트 타워형 구조물 등 다양한 분야에 활용될 수 있음. 신속하게 수직으로 시공할 수 있는 본 기술은 고품질을 확보하면서 공사기간을 더욱 단축할 수 있어 활용가능성은 매우 큼.

◦ 슬립폼 가설 장비의 개발을 통하여 건설기계 장비, 유사 기계산업 및 장치산업의 활성화에 기여 가능

◦ 초음파를 이용한 슬립폼 상승시기 결정 기술은 콘크리트 주탑 시공분야뿐만 아니라 교각이나 건축분야의 시공관리에 활용 가능

◦ 경량 거푸집 시스템 개발은 경량 소재 개발 분야와의 연계가 가능하며, 알루미늄 등의 기타 경량 소재와의 기술 접목이 가능

◦ 형상 및 시공 정밀도 관리 시스템은 주탑시공 시 형상관리뿐만 아니라 장지간 상부구조의 캠버관리 및 형상관리, 건축분야 고층건물의 시공관리에도 활용가능

◦ 시공 정밀도 관리 시스템은 변위 정밀계측을 위한 센서개발, 원격제어를 위한 IT산업, 로봇산업 등의 첨단산업과의 기술접목이 가능



<그림 5.3.1> 고효율 시공기술 개발의 타 산업 활용

제 4 절 정부 정책과의 연계 방안

1. 정부 정책과의 연계 방안

<표 5.4.1> 정부 정책 방향 및 연계 방안

정책	정책 방향	연계 방안
건설교통부 4차 국토종합개발계획 (2000~2020)	◦ 환남해축과 환황해축 개발계획과 관련한 연륙-연도교 건설 추진 ◦ 해양 내륙 포괄 광역개발벨트 ◦ 부산영남권 동북아 물류항만 유통축 형성	◦ 환황해축과 환남해축의 개발 교량에 연구결과 적용 ◦ 해상교량 건설사업은 도로망의 확충 뿐만 아니라 서남해안 관광거점 개발과 맞물려 관광자원으로 활용되어야 하므로 조형미를 향상시키기 위한 미학적 교량 설계 프로세스 적용
전라남도 서남해안 관광레저 도시개발계획 (2005~2016)	◦ 압해-암태 연도교 신안 다이아몬드 제도 연도교 건설 ◦ (국도 2호선) 대형 해상교량 추진	

2. 정부 및 관련 공공기관과의 협조 방안

◦ 개발된 핵심기술을 국가가 시공 중인 교량에 적용하기 위해서는 국가 관련부서(초장대교량사업단↔국토부 도로국)간 또는 시행청인 국토관리청(도로시설국)의 협조가 필요

◦ 연구결과를 실제 교량프로젝트에 적용하기 위해서는 연구결과에 대한 신뢰성 보증을 통하여 최초 적용에 따른 불이익 해소, 공사비 감소에 대한 불이익 해소, 설계변경 및 적용 공법 변경에 관한 규제완화 등 제도 변경 필요

◦ 신뢰도기반 장경간 케이블교량 설계기준 정립 및 보완에 도입·적용될 수 있도록 국토해양부 및 학계·산업계 전문가 집단과의 협조체제를 강화·유지함.

◦ 국가(국토해양부)가 시공 중인 교량에 대해 기술개발 단계별로 적용대상 교량 선정 협의 필요

◦ 공사과정에서의 VE과제에 포함하여 논의
◦ 기존 설계보다 적은 공사비로 가치를 향상할 수 있는 기술만 적용 가능
◦ 절감된 공사비는 관련법령에 따라 국가와 시공사가 50%씩 이익을 취할 수 있는 제도 마련
◦ 개발된 기술을 건설기술관리법에 따라 “신기술”로 등록하였음
◦ 건설신기술 776호로 등록됨으로써 설계(변경 포함)에 반영할 수 있도록 추진
◦ 지자체(도로건설 부서)와 기술개발 지원 및 적용 가능 협약 체결
◦ 지자체 관련부서를 적극 활용하여 협의체계 일원화(사업단 → 도 → 시군, 공사현장)
◦ 지자체에 핵심기술 개발을 지원할 수 있는 Task Force Team을 구성하고 협의일정 정례화
◦ Test Bed 추진과 총괄기관의 제도개선 및 관련법 개정 추진 협조
◦ 국가 R&D 연구결과에 대하여는 국내외 전문가의 충분한 검토를 통한 체계적인 검증절차를 마련하여 검증된 기술은 교량 시공자가 안심하고 적용할 수 있도록 하는 방안 마련



<그림 5.4.1> Test Bed 추진 기관별 역할

제 5 절 관련 후속연구개발의 전망

◦ 초장대교량 시공기술 및 핵심 엔지니어링 기술 등을 일반 교량구조물로 적용 범위를 확대하여 타당성 검증 연구에 활용할 수 있음.

◦ 고주탑 설계/시공/형상관리 기술은 초고층 빌딩 및 콘크리트 타워형 구조물 설계/시공 연구에 활용할 수 있음.

◦ LNG 탱크 외조 콘크리트, 사이로, 복합화력발전소 연돌 구조물 설계/시공 연구에 활용할 수 있음.

◦ 센서를 이용한 고정밀 계측 기술 및 측정 데이터 처리 기법 등은 특수구조물의 시공 중 형상관리, 사용 중 모니터링 기술 개발, 정밀 센서 개발을 위한 기계산업과의 융합 연구가 가능함.

◦ 가설장비의 제어기술은 건설기계와 IT기술의 융복합 연구와 기계산업과 연계한 다양한 융복합 연구가 가능함.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 중국 장대교량 주탑시공 현황 분석

초장대 교량 건설 분야에 있어서 80년대까지는 유럽, 미국이 기술 패권을 가지고 있었고 90년대에는 일본이 주도하였으나 2000년대 이후에는 중국이 건설기술을 선도하고 있다. 중국은 전세계 최장 사장교인 수통대교(경간장 1088m)를 2008년에 완공하였고 세계 2위 현수교인 시호우멘대교(경간장 1650m)를 2009년에 완공하고, 세계 최대의 다경간(2×1,080m) 현수교를 건설하고 있는 등 초장대교량 건설기술을 독보적으로 발전시키고 있다. 한편 중국의 장대교량 시장은 2020년 완성을 목표로 한 '7918 국가도로망 계획'에 따라 지속적인 투자 확대가 전망되고 있는 데, 2011년 이후 중국 장대교량 시장은 약 4.7조원 정도로 예상되고 있어, 당분간 전세계 장대교량 분야를 지속적으로 선도할 것으로 예상된다. 장대교량의 주탑은 90년대까지 강재 주탑이 대세를 이루었으나 경제성과 교량의 초장대화에 의해 200m이상의 고주탑이 필요하게 됨에 따라 2000년대 이후에는 콘크리트 고주탑만으로 건설되고 있다. 국내에서 계획되어 있는 다수의 장대 교량에서도 거의 콘크리트 주탑을 채용하고 있는데, 이 콘크리트 주탑 시공을 위한 이동식 거푸집 장비 및 관련 기술을 해외에 전적으로 의존하고 있다. 서해대교 총공사비 1881억원 중 주탑 공사비가 370억원 정도이고 전체 공사비의 2.7%인 약 50억원이 슬립폼 공법의 로열티로 지급되었다. 국내 장대교량 시장은 2011년 이후 약 6.7조원 규모로 성장할 것으로 예상되는 바 콘크리트 고주탑 시공법의 국산화만으로도 약 1,700억원 이상의 수입대체 효과를 기대할 수 있다. 콘크리트 고주탑 시공을 위한 슬립폼공법 및 오토클라이밍공법 등의 장비 및 기술 등은 전량 해외 기술에 의존하고 있는데, 기술 유출을 꺼리는 해외 전문업체는 국내로의 기술이전을 극도로 기피하고 있다. 따라서 국내에서는 장대 교량 및 콘크리트 고주탑 시공 관련 정보를 수집하는 것은 거의 불가능하여 장대교량 기술 선도국인 중국 방문을 통해 장대 교량 전문가와의 협의 및

자문을 통해 관련 정보를 수집하고 장대 교량 및 콘크리트 고주탑 시공 현장을 방문하여 중국 장대교량 현황을 파악하였다. 이를 통해 장대교량 및 콘크리트 고주탑 건설 기술을 국산화하는데 필요한 기초 자료를 확보하고자 하였다.

1. 수통대교

◦ 상해시내에서 1시간 30분거리에 위치한 수통대교는 강소지역과 남통지역을 연결하는 세계 제1의 사장교임. 주경간거리가 1088m이고, 콘크리트 주탑으로 시공되었음. 2003년 6월 착공하여 2008년 7월2일에 개통하였음. 대교의 전체 길이는 약 7.7km, 그 중 접속교의 길이는 5.6km임. 상부형식은 스틸박스 거더 사장교이며, 교량폭은 34m이고, 6차선도로임. 100+100+300+1088+300+100+100m인 7경간 연속거더 구조임. 주거더는 Aerodynamic Streamline Shape 박스 거더를 채택하여 내풍안전성을 갖추고 있음. 전체공사비는 11억 5천만불이 소요되었음.

◦ 수통대교 홍보관 관계자로부터 수통대교 시공과 관련한 상세한 설명을 들을 수 있었음. 주탑시공 및 케이블가설 등의 사장교 시공과 관련된 많은 정보를 획득할 수 있었음.

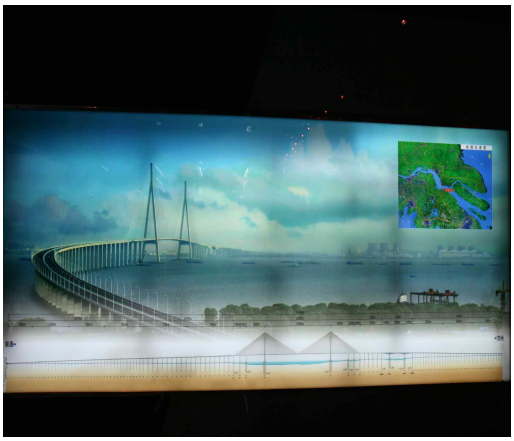
◦ 수통대교의 주탑 높이는 300.4m이며, 콘크리트 주탑임. 시공은 ACS 공법으로 시공되었으며 총 68개 Lot로 이루어졌음. 표준세그먼트의 높이는 약 4.5m임. 주탑시공은 16개월이 소요되었음. 탑정부의 편차는 7mm이며, 주탑 수직오차는 1/4000 이내에서 제어되어 1/3000인 설계요구치보다 양호하게 관리되었음.



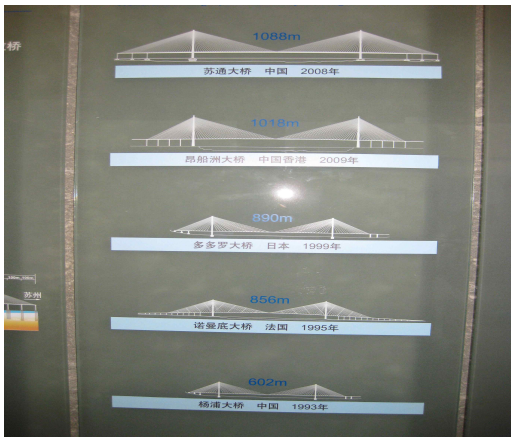
<그림 6.1.1> 수통대교 위치



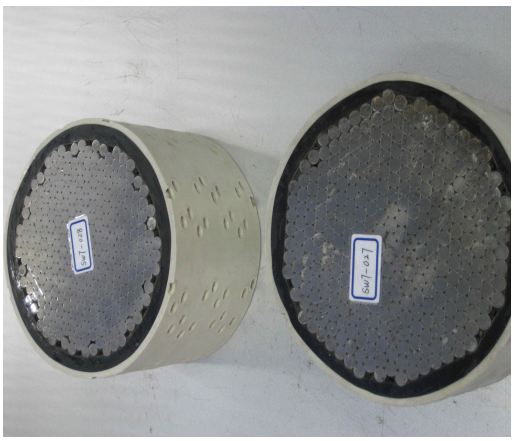
<그림 6.1.2> 수통대교 전경



<그림 6.1.3> 수통대교 조감도



<그림 6.1.4> 수통대교 경간장 비교



<그림 6.1.5> 수통대교 케이블



<그림 6.1.6> 수통대교 댐퍼



<그림 6.1.7> 수통대교 주탑 ACS 공법 시공

2. 강소양자대교

◦ 강소양자대교는 1999년 개통된 세계 제 3위의 현수교이며, 현재 국내에서 시공중인 영남적금대교와 유사한 형식의 교량임.

◦ 주경간 길이 1385m이고, 주탑 높이는 189m(ACS 시공)임.

◦ 현재 설계시에는 고려되지 않았던 댐퍼를 설치하였음.

◦ PPWS 169다발이며, 편도 3차로 교량

◦ GPS 센서, 응력계, 광섬유센서를 사용하여 유지관리하고 있음.

◦ 1년 1회 수준측량 수행

◦ GPS는 Leica 제품을 사용하고, 기준국 1개 이동국 8개임. 측경간 1/4지점에 2개, 중앙부 1개, 주탑에 4개가 설치되어 있음.

◦ 설계시 허용처짐은 3m인데 현재까지 약 1m정도 처짐이 계측되었고, 고유진동수는 0.0549 Hz임.



<그림 6.1.8> 강소양자대교 전경



<그림 6.1.9> 앵커리지



<그림 6.1.10> 케이블 정착부



<그림 6.1.11> 주탑내부 엘리베이터



<그림 6.1.12> 유지관리용 진동센서



<그림 6.1.13> 유지관리용 GPS 센서

3. 태주장강대교

◦ 태주장강대교는 상해에서 장강을 위로 거슬러 올라가 강소양자대교에서 57km 거리에 위치한, 현재 시공중인 세계 최초의 3주탑 2경간 연속 현수교임. 경간배치는 375+1080+1080+420m임. 이는 국내 최초 시공 예정으로 유사한 형식인 새천년대교(주경간길이 600m)보다 월등히 큰 규모로서, 향후 시공경험 습득을 위해 벤치마킹할 필요가 있다고 판단됨. 하중 분담이 복잡한 중탑은 95m 높이의 세로 '인(人)'자형 강주탑을 채용하였고, 남탑과 북탑은 ACS 공법으로 시공한 콘크리트 주탑임. 현재 케이슨공법으로 시공한 하부기초가 다 완공되고, 남탑과 북탑은 시공이 마무리 작업중임. 장강 중간에 위치한 중탑 케이슨 기초의 시공은 어렵게 시공이 진행되었음. 콘크리트 블록 크기 52m × 67.9m, 총 높이 76m (하부 38m는 double-wall steel-shelled concrete structure 이며, 상부 38m는 reinforced concrete structure)임. 공장제작, 하수, 육지연결, 전체 운수, 위치, 정확한 시공, 콘크리트 연결, 가라앉음, 바닥밀폐시공을 거쳐 시공회사는 조류영향, 항운간섭과 지질문제, 침식등의 불리한 조건을 극복하고 2009년 9월에 완공하였음. 중탑은 2010년 현재 80%정도 공정율을 보이며 시공중임.

◦ 중국교통그룹 제1, 제2분사 대교국, 교통국, 도로국 공동진행으로 시공중이며, 정확한 도로명은 중앙2공구 태주장강공로임.

◦ 주탑 높이 : 콘크리트 주탑(180m), 강주탑(200m)

◦ 주탑기초부 제일 깊은 수심은 38m이고, 600톤×6개 파일기초이고, 46파일은 직경 2.8m로 이루어짐.

◦ 콘크리트 주탑 로트(4.6m)당 5일 소요(중국 자체 기술의 ACS 공법)

◦ 도카 폼 사용 : 룬양대교 참고하여 시공함.



<그림 6.1.14> 태주장강대교 위치

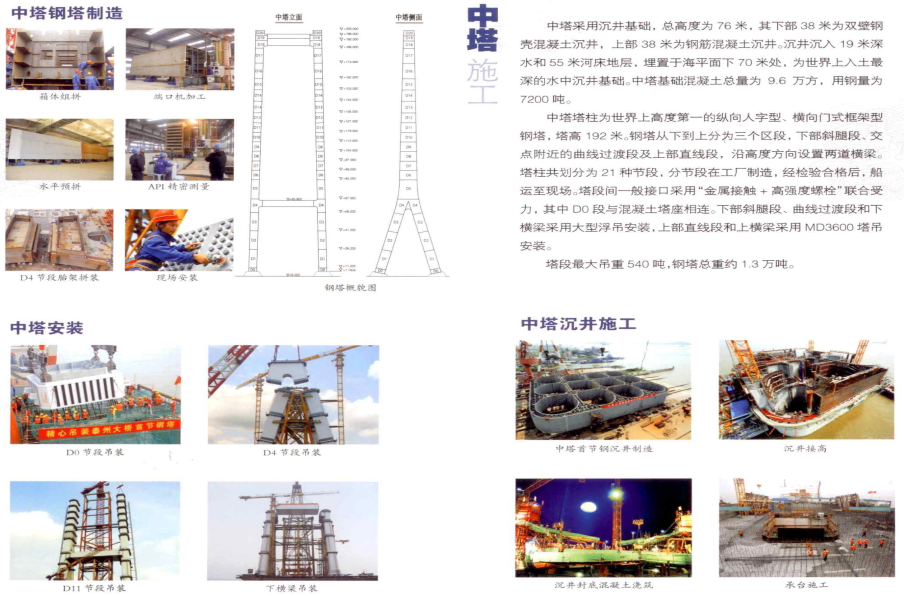


<그림 6.1.15> 북탑 시공사진





<그림 6.1.16> 남탑과 북탑 시공사진



<그림 6.1.17> 중탑 시공사진



<그림 6.1.18> 콘크리트 주탑 상부



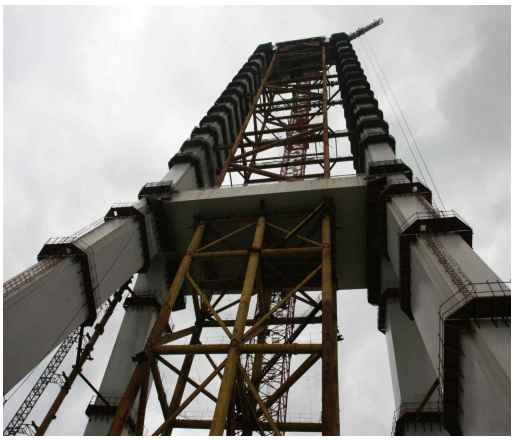
<그림 6.1.19> 강주탑 시공1



<그림 6.1.20> 콘크리트 주탑



<그림 6.1.21> 강주탑



<그림 6.1.22> 강주탑 시공2



<그림 6.1.23> 태주대교 주탑시공

4. 상해소재 사장교

◦ 남포대교 : 1991년 준공되었고, 전체길이 8346m로 높이 46m, 무게 5.5만톤의 선박이 지날 수 있음. 세계 37위의 사장교임. 주경간장은 423m이고, 150m 높이의 콘크리트 H형 주탑으로 이루어져 있음. 6차선으로 교폭은 30.35m임. 약 1500억원을 투자하여 시공되었음.

◦ 양포대교 : 상해시 황푸강의 하류쪽에 위치해 남포대교와 함께 자매대교로 불리움. 전체길이 7658m, 주경간장 602m, 측경간장 144m임. 1993년 개통된 세계 3위 강합성 사장교(Edge Girder)이고, 폭원은 30.5m임. 콘크리트 주탑 높이는 223m이고, 역 Y형임. 케이블은 PWS 아연도금+Filament +HDPE관 방식

임. 주탑에 빨강색으로 페인팅이 되어 있음.

◦ 서포대교 : 상해시 남부에 1997년 개통된 세계 4위 강사장교로서 주경간장은 590m이고, 폭원은 35.95m임. 보강형은 강상판이고, 콘크리트 A형 주탑은 높이 217m임. 총 240개의 케이블은 PWS 아연도금+Filament +HDPE관 방식으로 시공되었음.

◦ 민포대교 : 세계 최대규모의 복층 사장교로서, 2009년 12월 상층도로가 개통되었고, 2010년 4월에 하층도로가 개통되었음. H형 콘크리트 주탑 높이가 210m임. 상층도로는 교폭이 43.8m이고, 양방향 8차선으로 최고시속 120km의 고속도로 교량임. 하층은 양방향 6차선이고, 교폭이 28m인 지방도로임.



<그림 6.1.24> 양포대교, 남포대교, 서포대교 위치



<그림 6.1.25> 남포대교



<그림 6.1.26> 양포대교



<그림 6.1.27> 서포대교



<그림 6.1.28> 민포대교

중국 사장교의 콘크리트 주탑은 ACS 공법으로 시공되었음을 알 수 있었고, 대부분이 도카Form을 사용하였다. 현재 시공중인 태주장강대교 주탑의 경우는 룬양대

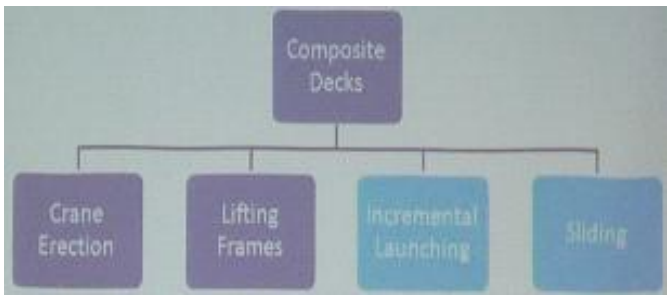
교 주탑 시공시 ACS 공법을 습득한 후, 해외기술진의 도움 없이 중국 자체 기술력으로 콘크리트 주탑을 더욱 빠르게 시공하였다. 또한 태주장강대교는 교량시공과 관련한 모든 공정을 중국 기술로 국산화하여 시공하고 있다고 하였다.

제 2 절 교량의 시공방법 현황 분석

초장대교량사업단 3핵심 2세부 과제는 고주탑 가설장비의 경량화 설계 및 제작기술, 운용기술, 고주탑 형상 및 연직도 관리를 위한 시공정밀도 향상 기술 등으로 구성되는 고효율 고주탑 시공기술로서 초장대교량 고주탑 시공기술의 자립 및 국제 경쟁력 확보를 최종 목표로 하고 있다. 변단면 슬립폼 장비 및 가설공법 개발 분야는 시공장비 설계 및 제작과 관련한 기술기반이 취약하며, 국내에서 변단면 슬립폼 장비의 제작 실적이나 국내 제작된 장비의 현장 적용 실적이 없으므로, 본 연구를 통하여 시공 장비 설계 및 제작과 관련한 핵심 기술의 확보가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 고주탑 형상 및 시공정밀도 관리 시스템 개발과 관련하여 GPS 등의 첨단 장비를 이용한 형상관리 기법은 해외에서도 최근 들어 현장적용을 시도하고 있으며, 국내에서는 IT기술을 이용한 시공 중 형상 관리 기법이 시도된 바 있으나 체계적인 시스템 개발, 운용, 관리를 위한 전문인력 및 연구 인프라는 선진국에 비해 미진한 상태이다. 경량 거푸집 설계 및 가설장비 개발 분야 역시 연구개발 인프라는 선진국대비 동등한 수준이나 이를 응용한 시스템 모듈개발 및 시공법 관련 전문인력 및 관련 기준, 인증제도는 미진한 상태이다. 특히, 장대교량의 주탑은 90년대까지 강재 주탑이 대세를 이루었으나 경제성과 교량의 초장대화에 의해 200m 이상의 고주탑이 필요하게 됨에 따라 2000년대 이후에는 콘크리트 고주탑만으로 건설되고 있다. 그러나 전술한 바와 같이 콘크리트 고주탑 시공을 위해 본 과제의 연구를 통해 개발하고자 하는 슬립폼 공법은 장비 및 기술 등을 전량 해외 기술에 의존하고 있는데, 기술 유출을 꺼리는 해외 전문업체는 국내로의 기술이전을 극도로 기피하고 있다. 따라서 국내에서 콘크리트 고주탑 시공 관련 정보를 수집하는 것은 거의 불가능하며, 전 세계 교량관련 전문가들이 모이는 이번 국제교량구조공학회의 기술세미나(IABSE WG-6 Seminar) 참석을 통해 현 기술수준에 대한 지식을 습득하고 콘크리트 고주탑 전문가와의 협의 및 자문을 통해 관련 정보를 수집하고자하였으며, 이를 통해 콘크리트 고주탑 건설 기술을 국산화하는데 필요한 기초 자료를 확보하고자 하였다.

1. 교량 형식과 시공 방법

◦ Composite deck의 건설 방법으로는 Crane Erection, Lifting Frames, Incremental Launching, 그리고 Sliding 방법 등이 있으며, 현재 Crane Erection 방식을 제외한 나머지 세 가지 방법이 사용되고 있음.



<그림 6.2.1> Composite deck의 건설 방법

◦ 콘크리트 deck은 현장 타설 방식과 Precast 방식으로 나눌 수 있으며 Precast 방식은 다시 Segmental 방식과 Full Span 방식으로 나눌 수 있음.

◦ 현장 타설 방식은 span by span 방식과 캔틸레버 방식이 있으며 span by span 방식은 Scaffold 방식과 MSS(Moveable Scaffold System) 방식이 있음. 캔틸레버 방식은 Form traveller를 사용하는 방식으로서 다시 Underslung 방식과 Overhead 방식으로 나눌 수 있음. 이중 현재 Scaffold 방식은 공사기간이 많이 걸리고 장지간 공사에 적합하지 않으므로 현재 사용되지 않으며 나머지 세 가지 방법(MSS, Underslung, Overhead)이 사용되고 있음.



<그림 6.2.2> MSS 방식

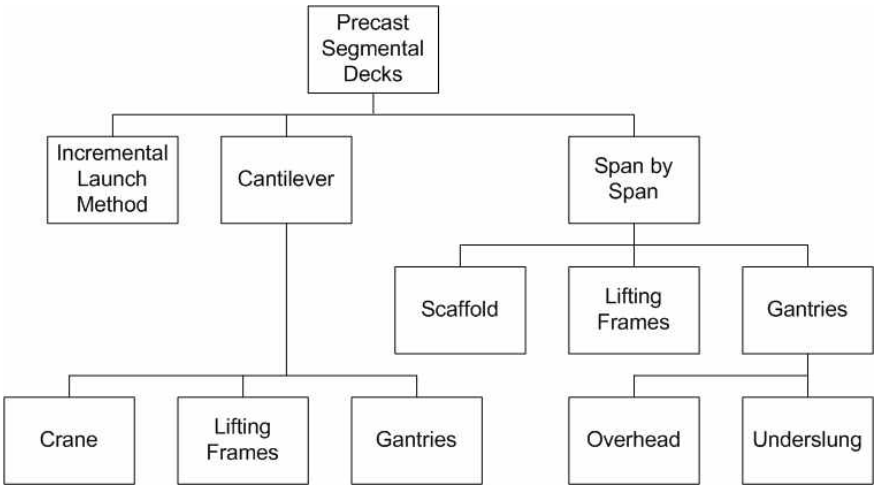


<그림 6.2.3> Overhead 방식



<그림 6.2.4> Underslung 방식

◦ Precast 방식은 다시 그림 6.2.5와 같이 나눌 수 있음.



<그림 6.2.5> Precast Segmental Decks

◦ 그림 6.2.5에서 경제성과 공기단축 등을 고려하였을 때 현재 Incremental Launch Method, Lifting Frames, Gantries, Overhead, 그리고 Underslung 방식이 가장 많이 사용되고 있는 추세임.



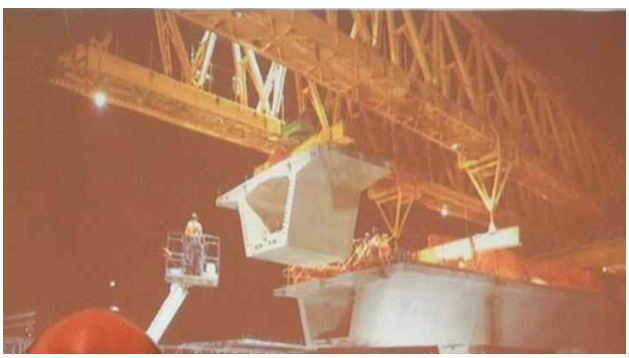
<그림 6.2.6> Incremental Launch Method



<그림 6.2.7> Lifting Frames



<그림 6.2.8> Scaffold



<그림 6.2.9> Gantries

◦ 이상과 같은 교량 deck 건설 방법과 장비들을 선택하는 중요한 요소로는 공사 특성, 초대형구조물 설계, 접근성과 위치 조건 등을 들 수 있음.

◦ 공사 특성으로는 공사 일정, 조기 달성의 필요성, 그리고 지역적 특징(작업시간, 소음, 환경단체 등) 등을 들 수 있음.

◦ 초대형구조물 설계는 지간장 길이, 교각과 deck의 높이, 설계의 균등성(지간장

길이, 교각 높이, 구조물 형식 등), 연속적 건설, 그리고 시공 하중 등을 들 수 있음.

◦ 접근성과 위치 조건으로는 기초와 지하구조물, segment의 이동, 보조 공정의 용이성, 교량이 강 또는 바다를 지나는 경우 물의 깊이와 유속, 육지를 지나는 경우 도로를 가로지르는지의 여부, 철도, 환경적 이슈, segment 배달의 용이성 등을 들 수 있음.

◦ 이러한 종류의 교량건설을 위해 발주처, 설계자, 감리단, 그리고 시공사는 경험, 자질, 창의성 등을 갖추고 있어야 하며 위험에 대한 명확한 기준을 가지고 있어야 함.

2. Jacking and Skidding

◦ 지상 또는 지하로 지나가는 교량들은 사회를 위한 기반시설물로서 공학 또는 건축학적 설계가 이루어져야함.

◦ 교량을 건설하기위해서는 설계, 건설 방법과 유지계획이 종합적으로 검토되어야 하며, 조사, 유지보수, 그리고 사회에 대한 요구가 반영되도록 설계되어야함.

◦ 교량건설에 사용되는 이동식 기법들은 6개의 자유도, 크레인, Jacking과 Skidding 시스템, 그리고 SPMT(Self-Propelled Modular Transporters)의 사용이 가능함.

◦ Jacking과 Skidding 시스템을 위한 방법으로는 Elevated building method, Rotation method, Launching, Launching over girders, 그리고 Installing bridges with SPMT 등이 있음.



<그림 6.2.10> Elevated Building Method



<그림 6.2.11> Rotation Method



<그림 6.2.12> Box Jacking Method

3. Movable Scaffolding Systems

◦ MSS(Movable Scaffolding Systme) 공법은 1. 교량으로의 접근에 방해가 되는 지역(인간에 의한 또는 자연적인 방해물에 의해), 2. 긴 계곡, 3. 깊은 계곡에 최적의 적용 조건을 가지고 있음.

◦ MSS 공법은 일정하지 않은 곡률반경과 단면의 높이, 30~70m 사이의 지간장, 다양한 교각의 높이 및 지지점을 가지는 교량에 적용이 가능함.

◦ MSS 공법은 거대한 장비 사용으로 인한 구조물-장비의 상호작용을 시공시 고려하여야 함. 즉, MSS 장비로 인해 교각이 추가 연직하중을 받으므로 기초 및 교각의 지점부가 약해질 수 있으며, 교축방향으로 MSS 자중의 3~8% 하중이 작용하고 이로 인한 축방향으로의 구배가 발생 할 수 있음. 또한 MSS 장비에 작용하는 풍하중, 온도변화 및 진동 등이 MSS 공법으로 시공시 반드시 고려되어야 함.

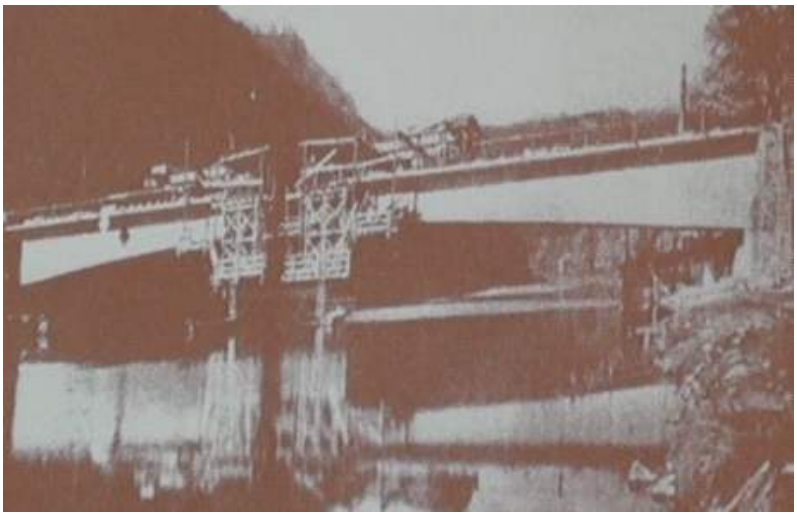
◦ MSS 공법의 작업 cycle은 50m 지간장 시공을 가정하였을 때 약 2주 간격으로 이루어 짐.

4. Form-Traveller Systems

◦ Form-Traveller 시스템은 post-tensioned box girder, 케이블 지지 교량, 그리고 arch 교량에 대해 캔틸레버 공법으로 건설되는 현장타설 콘크리트 교량에 사용되는 공법임.

◦ Form-Traveller 시스템은 거의 모든 단면에 적용이 가능하며 세그먼트 길이, 박스 높이, web의 두께, deck의 폭과 하중 적용(gradient, curvature, super-elevations) 등의 다양한 조건에 대해 쉽게 조정이 가능 함.

◦ Form-Traveller는 1950년~1951년 독일의 Balduinstein 지역에 건설된 Lahn 교량에 처음으로 적용됨.



<그림 6.2.13> Lahn 교량(62.09m)

5. Precast Full Span Method

◦ Precast Full Span Method의 교량가설 속도는 일일 최대 150m(Taiwan High Speed Railway Line)에 이를 정도로 빠름.



<그림 6.2.14> Precast Full Span Method

◦ Precast full span method는 prefabricated 콘크리트 교량의 span-by- span 건설에 사용되고 있으며, 교량 상판은 교량과 떨어진 별도의 공간에 설치된 고정된 formwork에서 제작됨.

◦ Formwork에서 제작된 span은 보조 크레인이나 운송장비(transport carrier)에 의해 교량까지 운송된 후 viaduct(그림 6.2.14 참조)에 의해 설치될 지점까지 이

동됨. 이후 추가적인 장비에 의해 교각에 위치하게 됨.

◦ Full Span Method의 적용

1. 정교한 품질이 요구되는 경우
2. 지간 사이의 joint 부분이 교량의 강도를 저하 시킬 수 있는 경우
3. 현장 타설이 허용되지 않는 환경
4. 지진 발생 구역

◦ Full Span Method의 장점

1. 높은 품질
2. 공기 단축(1 span 당 2~3일)
3. 기상조건에 영향을 받지 않음

◦ Full Span Method 장비의 선택 기준

1. 운송시 beam의 허용 하중
2. 장비가 위치하는 span의 최대 허용 하중
3. span 제작장의 위치

◦ 최근 Special carrier with underbridge와 Transport trolley with launching gantry가 FSM 장비로서 가장 많이 사용되고 있음.



<그림 6.2.15> Transport trolley with launching gantry



<그림 6.2.16> Special carrier with underbridge

◦ Special carrier with underbridge 장비의 장점

1. 틀보다 더 큰 PC beam을 옮길 수 있음
2. 운송중 deck으로의 손상이 적음
3. 수압이나 전기 장치가 거의 없음.

◦ Special carrier with underbridge 장비의 단점

1. 지간 길이에 제한이 있음.
2. 장비가 매우 좁은 공간에 지지 되므로 안정성에 문제가 발생할 수 있음.
3. 하중이 커질수록 휠의 크기가 커져야 하므로 보다 넓은 공간이 요구됨.

◦ Trolley with launching gantry 장비의 장점

1. 긴 거리에서 보다 빠름(하나의 launching gantry에 대해 여러대의 운송 장비를 사용할 수 있음).
2. 매우 빠른 placing 시간
3. 높은 안정성

◦ Trolley with launching gantry 장비의 단점

1. PC beam을 운반하기 위해 큰 gantry 크레인이 요구됨.
2. 많은 기계적 요소들이 필요하나 적게 사용됨.

◦ Full Span Method 장비의 구조물과의 상호작용은 단지 최대하중과 구조물에 전달되는 축 당 하중과 관계가 있음. Special carrier의 경우 2개의 빔 위에서 거동하며 상부구조물에서의 최대반력은 trolley 형식에서 보다 작음. Trolley 형식

은 전체 하중이 deck 위에 작용함.

◦ Special carrier underbridge 장비는 교각에서 anchoring에 의존하여 지지되므로 매우 강한 anchoring이 요구됨.

◦ Launching gantry 장비는 보다 안전하며 교량이 가설되는 전방 교각에 보다 많은 하중이 작용 됨.

제 7 장 참고문헌

◦ 강용균(1995), “두 대의 GPS 수신기를 이용한 DGPS 정밀 측위”, 한국지형공간정보학회지, 제 16권 3호

◦ 강준묵(1997), 건설분야에 있어서 GPS의 응용, 대한토목학회지 제 45권 11호

◦ 건설교통부(2000), “GPS(Global Positioning System) 개요 및 활용”

◦ 건설교통부(2005) 도로교설계기준, 사단법인 한국도로교통협회

◦ 건설교통부(2006) 가설공사표준시방서, 건설교통부

◦ 국토해양부(2009) 콘크리트표준시방서, 국토해양부

◦ 국토해양부(2009) 터널표준시방서, 국토해양부

◦ 김성호(2004), “SLIP FORM 시공시 콘크리트 관입저항시험에 의한 인상시기 결정”, CONSTRUCTION TECHNOLOGY REVIEW, SSANGYONG

◦ 김정호(1998), “외국의 장대교량 유지관리 시스템”, 한국강구조학회지 제 10권 3호

◦ 김희석, 이종세(2007) “파진행 문제를 위한 Paraxial 경계조건의 유한요소해석”, 한국전산구조공학회논문집, 한국전산구조공학회, 제20권 제3호, pp. 303-309.

◦ 대림산업(주)(2004) “적금-영남간 연륙교 가설공사 설계도”

◦ 대림산업(주)(2007) “여수국가산단 진입도로 개설공사(제3공구) 구조물도”

◦ 대림산업(주)(2009) “고군산군도 연결도로 (2공구) 건설공사 기본설계도”

◦ 문종훈(2008), “지구곡률을 고려한 현수교케이블의 해석 및 형상관리 기법” 서울대학교 박사학위 논문

◦ 문종훈, 장승필(2008), “현수교 케이블의 형상조정”, 한국강구조학회지, 제20권, 제2호, 통권 제75호

◦ 박기정(2007), “교통인프라 관리를 위한 실시간 GNSS 상시기준국 데이터 활용에 관한 연구”, 아주대학교 석사학위논문

◦ 박운용(1999), “교량의 실시간 거동 모니터링을 위한 GPS의 적용”, 동아대학교 논문집 제 24호

◦ 박운용(1999), “GPS 연속관측점을 이용한 결합블럭조정의 정확도”, 한국측량학

회지 제 17권 1호
◦ 박운용(2003), “RTK-GPS를 이용한 지하시설물의 위치 정확도 분석”, 한국측량학회지 제 21권 3호
◦ 박운용(2004), “RTK GPS를 이용한 대형구조물의 실시간 경보시스템”, 한국측량학회지 제 22권 1호
◦ 박필호(1999), “GPS의 변위 검출 능력에 대한 실험”, 한국측량학회지 제 17권 2호
◦ 박효선(2005), “GPS를 이용한 고층건물의 수평변위 모니터링시스템”, 대한건축학회논문집 구조계 21권 5호
◦ 삼부토건(주), Sliding Form원리 및 시공방법
◦ 손유신, 이승훈(2007), “인발법(Pull-out Test)을 활용한 콘크리트 구조물의 강도 추정 연구”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회논문집, pp1045-1048
◦ 윤홍식(2003), “건설분야에서의 위성기술과 그 응용”, 전산구조공학지 제 16권 2호, pp30-39.
◦ 이경성(2009),“관측데이터 처리의 품질제어를 통한 GOPS 측위의 신뢰성 향상”, 대한토목학회지,제29권 제1호, pp319-327
◦ 이영철, 윤자걸, 김도균(2005), "GPS를 이용한 건설기술 현황 및 고교각 시공관리기술 개발 계획", 대림기술정보
◦ 이회근, 이광명(2002) 초음파 속도 모니터링에 의한 고강도 콘크리트의 응결 평가, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.14, No.6, pp973-981
◦ 정연백, 석원균(2008), "GPS계측을 이용한 거푸집 연직도 관리에 관한 연구", 롯데건설기술 논문집 No.57, pp63-72
◦ (주)삼성물산 건설부문(2006), “인천대교 주탑 형상관리 계획서”
◦ 진성토건(주), Slip-Form System 시공 및 품질관리
◦ 진원종 외 3인(2010),“사장교 주탑 시공시 적용이 가능한 신형식 연직도 관리 및 무선 제어시스템 개발”, 한국방재학회 학술대회 발표논문집
◦ 천재원, 이영철(1997) “서해대교현장 슬립폼공법 시험시공(Mock-up Test)”, 대림기술정보 ‘97 여름, pp. 99-107
◦ 최병선(2005) Wavelet해석, 세경사.
◦ 최병길(2008), “멀티 GPS 센서를 이용한 장대교량의 형상관리 시스템 개발에

관한 연구", 한국측량학회지 제 27권 3호
◦ 최병길(2008), "장대교량의 거동 분석을 위한 GPS모니터링 시스템 개발에 대한 연구", 한국지형공간정보학회지, 제 16권 3호최현석, 김재홍 (2008) "현수교 주케이블의 시공방법", 한국강구조학회지, 제20권, 제2호, 통권 제75호
◦ 한국콘크리트학회(2002) 콘크리트 건설 제요령, 한국콘크리트학회
◦ 한국건설교통기술평가원 (2008) 초장대교량사업단 상세기획연구
◦ 한국건설기술연구원(2001) "GPS분야의 선진기술 도입방안연구"
◦ 한국건설기술연구원(2008) 저비용 장수명 하이브리드 사장교 기술개발, 2차년도 연구보고서
◦ 한국건설기술연구원(2009), 하이브리드 사장교 주탑 및 정착부 기술 개발, 한국건설기술연구원 연구보고서
◦ 한국도로공사(2009) 고속도로공사 전문시방서, 한국도로공사
◦ 현대건설주식회사, (주)유신코퍼레이션 (2006) "2006 Suspension Bridge in the World"
◦ ACI Commitee 318(2004) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318
◦ ACI Commitee 347(2005) Formwork for concrete, ACI 347
◦ ACI 347-04(2005) Guide to Formwork for concrete, ACI 347-04
◦ A. Okukawa, N. Hirahara "Cable spinning for shimotsui-seto bridge", 本 四技,報, 45号, pp7-20
◦ Bedford, A. and Drumheller, D.S.(1996) Elastic wave propagation, John Wiley & Sons Ltd. New York.
◦ B.Hofmann-Wellenhof,H.lichtengger, J.Collins(1992)."GPS 이론과 응용"
◦ Clement Ogaja et al(2001), "GPS and Building Monitoring Case Study: Republic Plaza Building, Singapore",
◦ EM 1110-1-2009(1997) Engineering and Design Architectural Concrete, EM
◦ Graff, K.F.(1975) Wave motion in elastic solids, Ohio State University Press.
◦ Hurd, M.K.(2005) Formwork for Concrete, ACI 347
◦ http://www.gps.re.kr/outline/outline_2.asp
◦ http://www.howhow.co.kr/html/gps03.html

◦ http://joongyup.egloos.com/m/9173909
◦ http://joongyup.egloos.com/9173838
◦ http://joongyup.egloos.com/m/9173832
◦ http://factor.gps.caltech.edu/node/61
◦ M. Akiyama, Y. Kobayashi(1999) "Erecting technology for suspension bridge cables", KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, vol. 49, No.2, pp. 2-7.
◦ M.J Ryall, G.A.R. Parke, J.E Harding(2000) "The manual of bridge engineering", Thomas Telford Ltd
◦ N.E. Cazzaniga et al(2006), "Structural monitoring with GPS and accelerometers: the chimney of the power plant in Piacenza, Italy", 3rd IAG/12th FIG Symposium
◦ Nippon Steel Corporation(2003) "Civil Engineering & Marine Construction Division", Nippon Steel News, No. 305
◦ N. J. Gimsing(1998) "Cable supported bridges concept & design 2nd edition", WILEY
◦ Pauw, A.(1960) Static modulus of elasticity of concrete as affected by density, Proceedings, ACI Journal, Vol. 57, No. 6, pp. 679-687.
◦ Pessiki, S.P., and Carino, N.J.(1988). "Setting time and strength to concrete using the impact-echo method", ACI Materials Journal, vol. 85, no. 5, pp389 - 399
◦ Pessiki, S., Johnson, M.(1994)." In-place determination of concrete strength by the impact-echo method", In Baker, N. C., B. J. Goodno (Eds.), Proceedings of the Structures Congress XII. Lehigh Univ, Bethlehem, PA, USA, American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, vol. 2, pp1340 - 1345
◦ Reddy, J.N.(2006) An introduction to the finite element method, McGraw-Hill, New York.
◦ Reichverger, Z. and Jaegermann, C.(1980) "Optimal regime in slip form concreting", Materiaux et Constructions, Vol. 13, No. 74, pp109-113
◦ Shin, S.W., Yun, C.B., opovics, J.S. and Kim, J.H.(2007) Improved Rayleigh

wave velocity measurement for nondestructive early-age concrete monitoring, Research in Nondestructive Evaluation, American Society for Nondestructive Testing, 18, pp45-68

◦ Thomas Dum, Slipform works for pylons - Machang Bridge, GBG

◦ V.Ashkenazi et al(1998), “Monitoring Vertical Land Movemenats at Tide Gauges in the UK”, Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1998)

◦ Viktorov, I.A.(1967) Rayleigh and Lamb waves, Physical theory and applications, Plenum Press, New York.

◦ Woods, R.D.(1968) Screening of surface waves in soils, J. Soil Mech. Founds Div., ASCE, July 94, pp951-79

◦ Y. Yamasaki, M. Yamashina(1996) "Cable Construction-Now and Future", 15th Congress of IABSE, Copenhagen, pp721-726

◦ Y. Yasutsugu, F. Rouvillain(1997) "Cable construction of the grate beld east bridge", 橋梁の 基礎, 97-5号, pp15-22

◦ 新日本製鐵(1996) “超長大吊橋ケーブルに關する檢討”, 本州・北海道架設シンポジウム

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설기술연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.