

영종도 연육교 적용 공법

(주) 삼성 건설 / 신 현양

영종도연육교 적용 공법

The Method of construction for YoungJong Grand Bridge

신현양

Shin, HyunYang

Abstract

영종대교는 2000년대 수도권 항공수요에 대비하여 영종도와 용유도 일원의 간석지에 건설되어, 인천국제공항과 인천 경서동을 연결하는 총연장 4,420m의 해상교량으로 현수교 3경간(550m), Truss교 18경간(2,250m), 강상형교 27경간(1,620m)로 구성되어 있다. 영종대교는 10개 차선, 철도 2개 차선의 교량으로 건설된다. 교량이 건설되는 해역은 10,000ton급 선박의 통행이 가능하도록 교하공간 35m의 현수교를 계획하였으며 경제성을 고려하여 Cable을 보강형에 정착시켰다. 미관을 고려한 경간 분할에 따른 교량의 부상을 방지하기 위하여 단부교각에 Link 구조를 설치하고 점속교를 Counterweight로 이용하였으며 Cable 장력이 저감되도록 Sag비를 $1/5(=f/l)$ 로 설정하였다.

1. 개요

영종대교 중 삼성이 담당했던 구간은 다음과 같다.

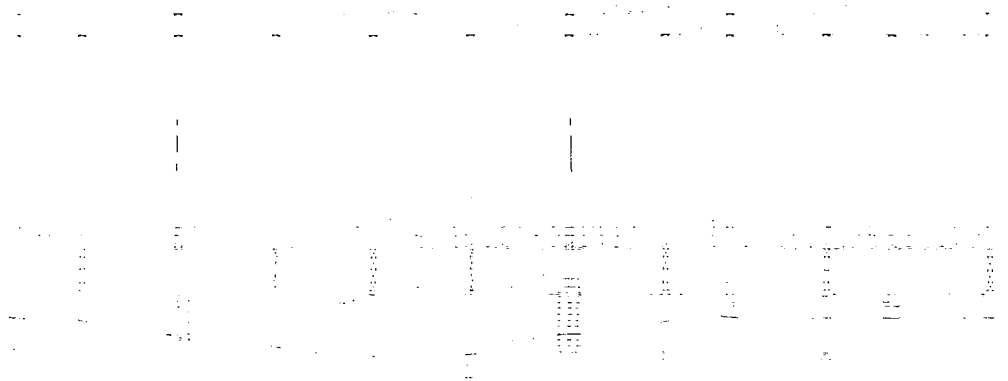


그림 1 종단면도

영종대교는 서울 강변북로 J.C에서 출발하여 한강의 방화대교, 개화터널, 김포공항 I.C, 노오지 J.C, 북인천 I.C로 이어지는 인천국제공항고속도로 구간 중 해상구역에 설치되는 것으로서, 영종대교를 지나서야 인천국제공항에 이르게 된다.

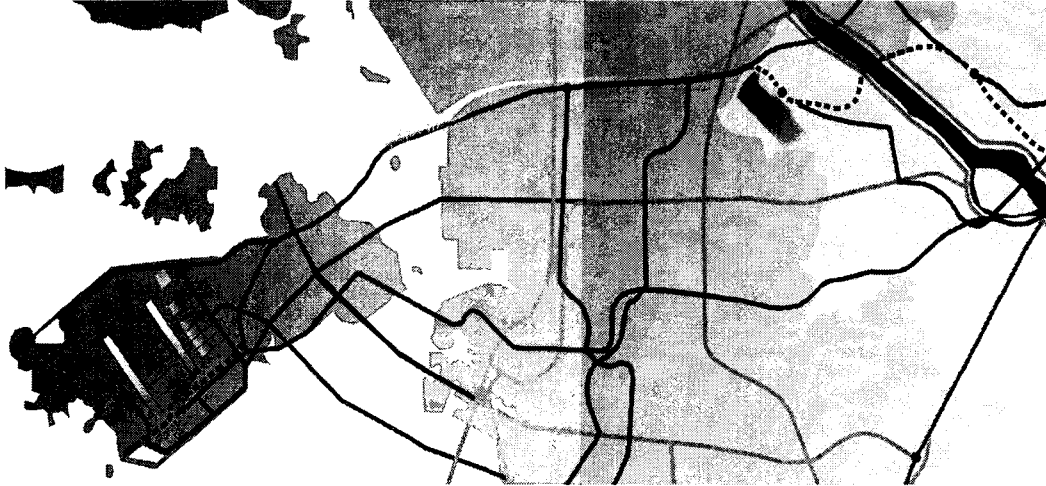


그림 2 영종대교 위치도

영종대교 공사는 1995년 11월 시공하여 2000년 11월까지 총 60개월 동안 진행되며 사업시행자는 한국도로공사와 신공항고속도로(주)이며 시공자는 공구별로 삼성물산, 한진건설, 동아건설, 코오롱건설 등이다. 또한 국내 최초의 민자유치 시설사업으로서 삼성물산을 주관사로하여 사업 시행자인 신공항고속도로주식회사가 30년간 운영하여 공사비를 회수하도록 하고 있다.

표 1. 영종대교 현수교의 특징

상부 구조	하부 구조
① 3차원 자정식 현수교	① 뉴메틱 Caisson 공법(주탑기초)
② 고속도로(10차선) 및 철도(복선) 병용의 복층교	② 해상 RCD 말뚝 공법(일반Truss 구간)
③ 보강형 대Block 가설공법(Truss)	③ 강관 Sheet Pile 공법(가물막이)
④ Air Spinning 공법(Cable)	

표 2. 공사 규모(삼성분)

규 모	현 수 교 구간 - 125 + 300 + 125 = 550m 접속Truss 구간 - 200 m
공사기간	1995.11 ~ 2000.11 (60 개월)
공사비	3300 억

표 3. 주요 공사용량(현수교 분)

구 조 물	규 모	수 량	형 식 / 재 량	시 공 방 법	
주탑기초	47x18x43	2ea	뉴매틱케이슨	케이슨 강각부 인양거치후 현장Concrete타설, 함내 기전굴착	
하부공	단부교각	8.7x44.6x44.5	2ea	중공벽식교각	Climbing Form에 의한 현장Concrete타설
	및 기초	18.75x5.0x37.5	2ea	푸팅 + RCD말뚝(1524)	SEP Barge상 해상 RCD 시공, 가물막이 후 기중 Concrete 타설
	가물막이	22x40.864x55.776	1ea	강 FRAME + 강관시트파일	해상Crane(3000ton)에 의한 Frame 일괄거치, 강관 Sheet Pile 타입
		19.75x38.1x18.0	1ea	강 FRAME + 강SKIN PLATE	해상Crane(3000ton)에 의한 Frame 일괄거치, 바닥 수중 Concrete 타설
주탑	48.27x6x104.572	2ea	다이아몬드형,강 Box	해상 Crane(3000ton)에 의한 Block 분할거치	
상부공	주Cable	467 mm	606m	PWR77B	Air Spinning
	Hanger Rope	84 mm	156격점	CFRC	Center Hole Jack에 의한 직접인입
	보강형 Truss	41x12x550	550m	2층 도로철도 병용, 강 Truss	해상 crane(3000ton)에 의한 Block 분할거치

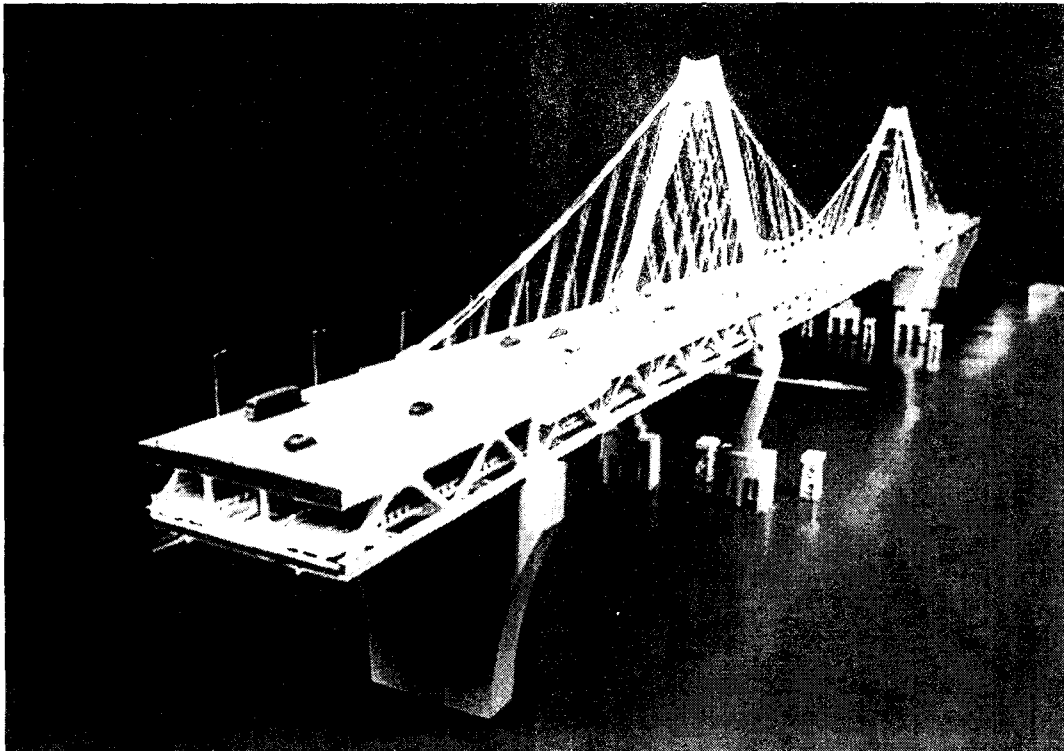


그림 3 영종대교 모형

2. 하부

영종대교의 기초공법은 단부(E2,W2) 및 접속Truss부(E3)에는 RCD말뚝기초를 적용하고 기건상태에서 시공하기 위해서 가물막이를 보조공법으로 적용하였으며 주탑부(W1, E1) 기초는 수심이 깊고 유속이 빨라 가물막이 설치에 어려움이 있어 별도의 가물막이가 필요 없는 Pneumatic Caisson 공법을 적용하였다.

2.1. 주탑 기초 (무인굴착식 Pneumatic Caisson 공법 적용 - W1,E1)

영종대교 주탑부(W1,E1)는 국내에서는 처음으로 시도되는 무인굴착식 Pneumatic Caisson 공법(규격:47m×18m×43m)으로 시공되어 Pneumatic Caisson 공법의 가장 큰 단점이었던 잠함병의 발생 위험을 없앴다.

Pneumatic Caisson 공법이란 지상에서 제작된 Caisson 하부에 밀폐된 작업실을 마련하고 여기에 지하수압에 상응하는 압축공기를 송기하여 지하수나 해수의 침입을 방지하면서 인력 및 장비를 이용하여 지반을 굴삭하여 구체를 지중에 침설시키는 공법이다.

Pneumatic Caisson의 주요 설비에는 토사반출 및 장비 투입을 위한 Material Lock, 대기압 상태로 함내 확인 및 조절을 위한 Capsule Lock, 작업원의 이동을 위한(작업원이 Caisson 작업실에 들고 나갈 때 Man-Lock에서 가압과 감압을 실시한다.) Man Lock 등의 의장설비로 구성되어 있으며 재압설비로 응급조치를 위한 Hospital Lock이 있다. 그 외에는 조명설비, 전력 공급을 위한 전력설비, 작업실내에 압축공기를 불어 넣어 주는 송기설비, 굴착된 토사를 밖으로 배출해 주는 배토설비와 급배수 설비, 하중수설비, 안전 및 통신설비 등이 있다.

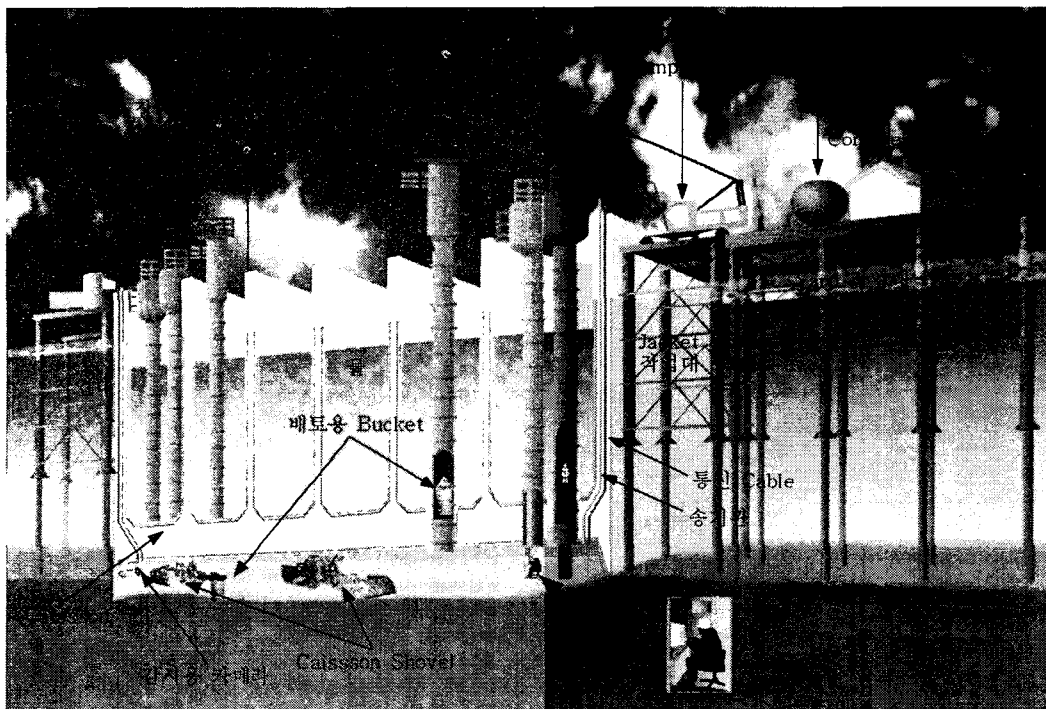


그림 4 Pneumatic Caisson 주요설비

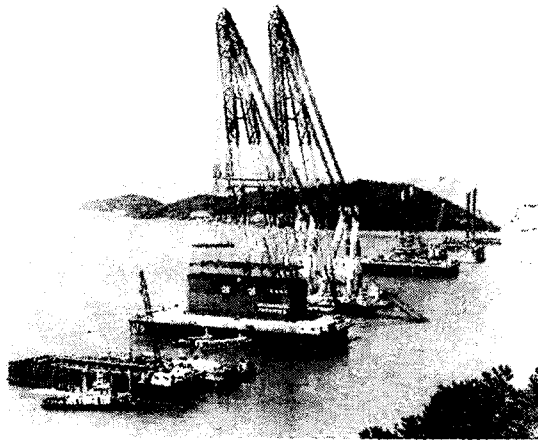


그림 5 3,000t F/C를 이용한 Caisson 거치



그림 6 무인굴착전경

본 현장의 함내 작업조건은 최종 작업기압 3.5kgf/cm² 이상 되므로 무인굴착시스템으로 시공하였다. 대심도 고기압 하에서의 작업을 무인화(함내설치된 Shovel을 지상원격조정실에서 조작)함으로써 안전성 및 효율성을 향상 시켰다.

표 4. 주요 공사물량

공	종	단 위	VI 케이슨	WI 케이슨
	준설	m ³	2,700	-
마운드공	쇄석 및 사석	m ³	7,890	18,855
	고르기	m ³	3,220	3,125
Yard 작업대	복공판	m ²	1,470	SEP-Barge로 대체
	강재	ton	680	
Jacket 작업대	복공판	m ²	1,780	1,780
	강재	ton	1,890	2,075
	Mortar	m ³	135	250
	강각 Caisson	ton	1,535	1,645
	철근	ton	1,625	1,620
구체 구축공	$\sigma_{sk} = 270\text{kg/cm}^2$	m ³	13,460	13,285
	$\sigma_{sk} = 300\text{kg/cm}^2$ (정판)	m ³	2,945	2,945
	마운드	m ³	135	1,205
	토사	m ³	9,465	3,560
침하 굴착공	풍화암	m ³	4,080	365
	연암	m ³	1,270	1,610
	경암	m ³	1,165	5,565

2.2. Pier부 (RCD, 가물막이 적용 - W2,E2,E3)

영종대교 단부(E2,W2)와 접속Truss부(E3)는 해상 RCD 현장타설말뚝과 중공식 Concrete교각으로 시공되었으며 기진 상태로 교각시공을 하기 위하여 가물막이 공법을 보조공법으로 채택하였다.

(1) Reverse Circulation Drill

현장타설말뚝공법의 하나인 RCD공법에서 RCD란 Reverse Circulation Drill의 약자로 엄밀하게는 Drill Bit의 회전으로 지반을 굴착하고 이 때 발생하는 Slime을 역회전 수를 이용하여 굴착공 밖으로 배출함으로써 원주형 굴착공을 형성하는 장비를 말한다. 그러나 현장타설말뚝공법을 실시할 때 RCD Machine을 이용하기 때문에 통상 RCD공법이라 부른다. RCD공법은 연속굴착이 가능하여 특히 암반에 지지되는 현장타설말뚝 공사에 널리 적용된다. 연약한 토층을 굴착할 때는 공벽에 붕괴가 발생할 수 있으므로 통상 토층에서는 강관 Casing을 선타입 후 굴착한다.

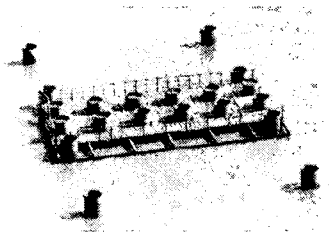


그림 7 RCD 시공 후 전경

해상 RCD시공은 교각 가물막이와의 간섭을 회피하기 위하여 해상 작업대인 SEP-Barge상에서 선시공 되어 육상에서 작업하는 것과 같이 시공이 가능하여 공기를 단축시키고 말뚝의 연직도를 확보할 수 있었다. 한편 말뚝본체는 해수의 유해한 영향을 피하기 위하여 Epoxy 도막철근과 내황산염 시멘트를 사용하였다.

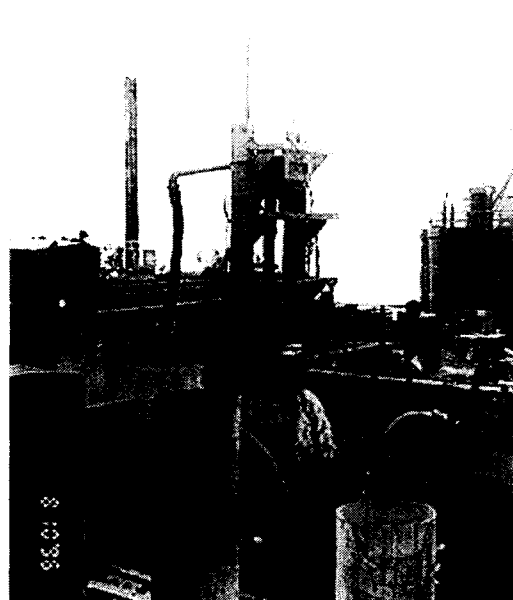


그림 7 RCD 시공

표 5. 시공 물량

공종	구분	단위	W2	E2	E3	비고	
RCD	강관	본	50	50	60		
		ton	504	612	572	φ 1500 × 12T	
	철근	ton	163	315	274	Epoxy 도막 철근	
		Concrete	m ³	980	1750	1896	sck=240kg/m ² 수중 Concrete 호칭 강도 : 300 kg/m ²
	토사	m	0.89	7.69	0	본당 평균 굴착 길이	
		모래	m	0	0		5.34
		굴착 풍화암	m	1.28	5.52		5.44
		연암	m	1.86	1.45		4.0
	경암	m	2.98	2.0	0		
		Guide Frame	ton	1,400	1,200	1,100	W2 Skin Plate 포함, SWS490Y H-400 × 408 × 21 × 21
가물막이	본	0	120	124			
	Sheet Pile	m	0	3270	2795		

(2) 가물막이

교각별 가물막이는 E2,E3의 경우 강관 Sheet Pile 형식으로 강관 Sheet Pile을 가물막이 Frame 외주에 1열로 타입하여 주열벽을 형성하고 강관 사이를 Pack Grouting으로 지수함으로써 완성시켰으며 W2의 경우는 암반의 출현 심도가 높은 관계로 강관 Sheet Pile 형식의 시공성이 떨어져 대신 강각 가물막이 공법을 적용하였다. 당 현장에서 적용한 강각 가물막이 공법은 삼성에서 독자 개발한 신 공법으로 가물막이 Frame 외주에 벽상으로 Skin Plate를 부착하여 수중거치하고 가물막이 바닥에 수중 Concrete를 완성 시키는 공법이다.

가물막이는 1열 강관 Sheet Pile과 이 Sheet Pile의 Guide 역할을 하는 Guide Frame으로 시공되었다.

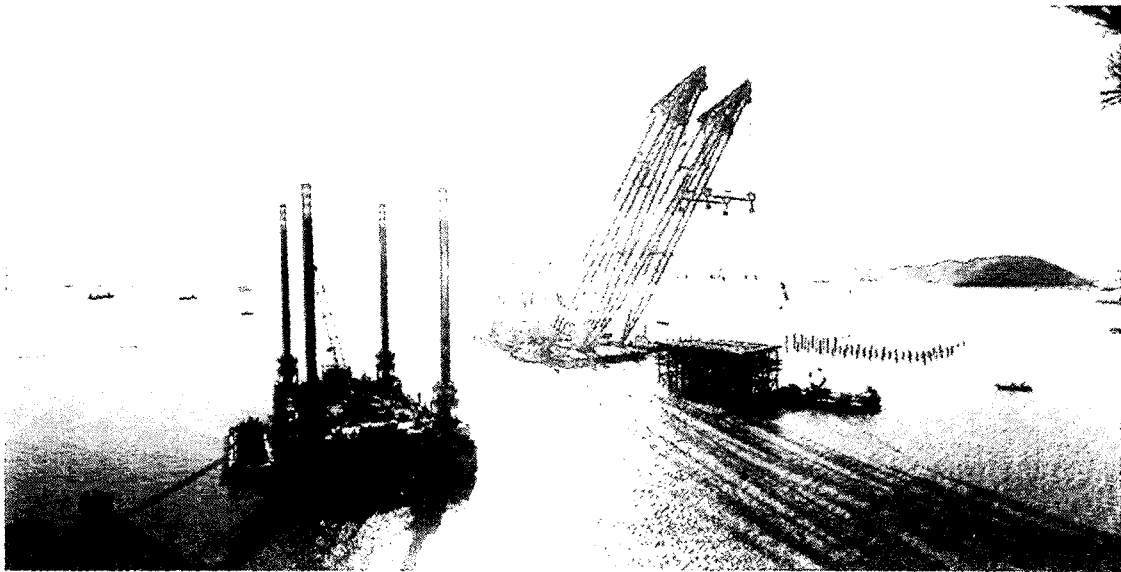


그림 9 3000ton Crane을 이용한 Guide Frame 거치 전경

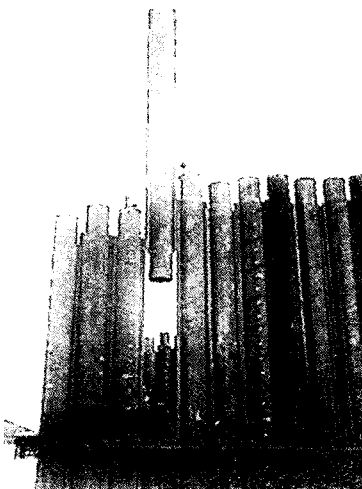


그림 10 강관 Sheet Pile
항타

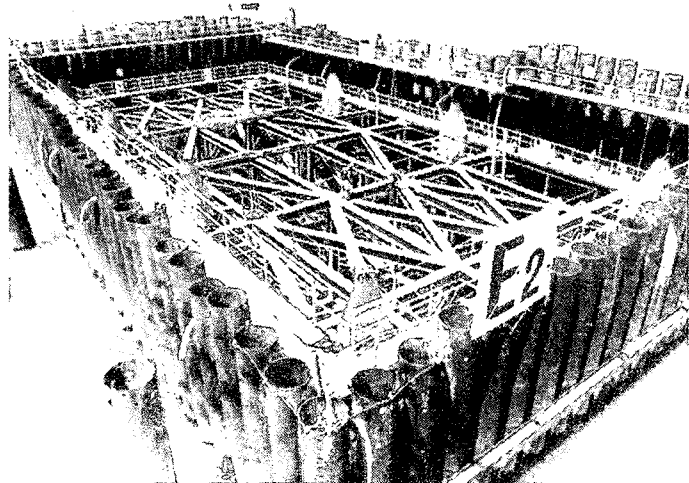


그림 11 가물막이 완료전경

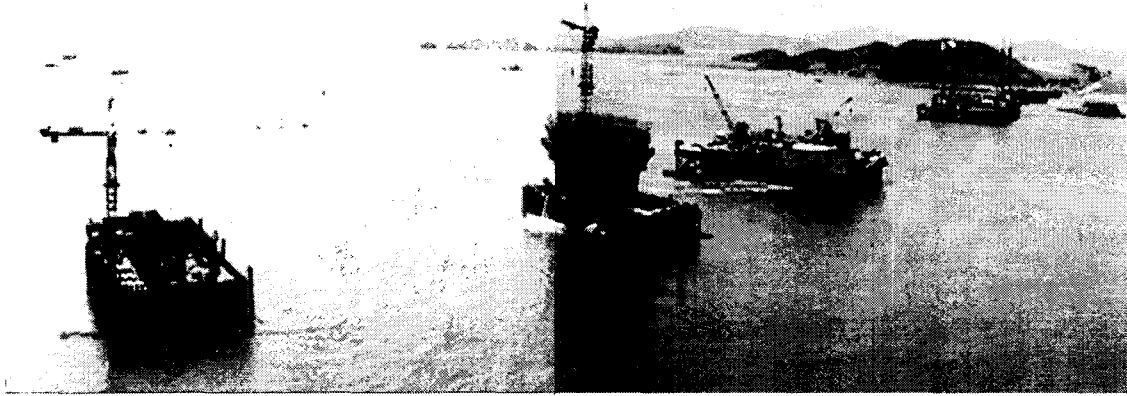


그림 12 하부공 시공 전경

Footing 및 교각 Concrete 타설은 국내 최초로 해상 Batch Plant선(210m³/hr)을 운영함으로써 순조롭게 진행되었으며 E2 확대기초부에서는 수화열 제어를 위하여 Pipe Cooling System을 적용하였다.

3. 상부

주탑 형식은 관문성, 국력신장 및 전통문화의 상징성을 구현하기 위하여 Diamond 형식의 탑주구조를 채택하였고 탑정부에는 상향 및 하향 곡선을 사용하여 한국지방의 대표적 특징인 팔각정 형식을 표현하였다. 이를 위하여 영종대교의 현수교는 3차원 형식의 자정식 Cable을 채용하고 있다.

보강형 상층은 Box구조로 하층은 Truss 구조를 배치하여 입체 구조물에 의한 음영의 효과를 나타내도록 하였다.

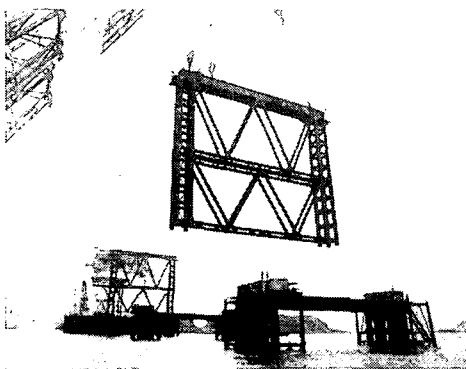


그림 13 가벤트 설치 전경

가벤트는 현수교 보강형의 가설과 관련하여 측경간에 2기 중앙경간에 3기가 설치된다. 통상의 타정식 현수교는 우선 주탑과 단부의 Anchor Block 사이에 주Cable을 가설하고 여러 개의 Hanger를 늘어뜨린 후 Hanger 끝에 차례로 소 Block 단위의 보강형을 연결해 나아감으로써 현수교를 완성해 나아가지만 영종대교의 현수교는 자정식으로 보강형을 우선 가설 완료한 후 주Cable을 보강형에 정착시킨다. 따라서 보강형 가설시 해상에 가벤트를 선시공하고 그 위에 보강형을 설치한다.

표 6. 가벤트 물량

Bent 1	Bent 2	Bent 3	Bent 4	Bent 5	Bent 6	단위	합계
735	843	853	891	725	745	ton	4,842

엄격한 정도관리 하에 강교 전문 제작공장에서 설치 단위별 Block으로 완성된 주탑 및 보강형은 영중대교 강교 Block을 운송할 수 있도록 특수 제작된 15,000ton급 대선을 사용하여 거치 현장으로 해상 운송하여 3,000ton급 해상 Crane으로 일괄 가설하였다.

3.1. 주탑

주탑의 주요 가설 단계는, Anchor Frame, Base Plate, 탑기부, 탑하부, 탑상부로 구분되며, 탑하부 및 탑상부의 가설은 1척의 해상 Crane으로 공중 회전 기술을 구사하는 고난도의 기술이 필요한 가설 공사이다.

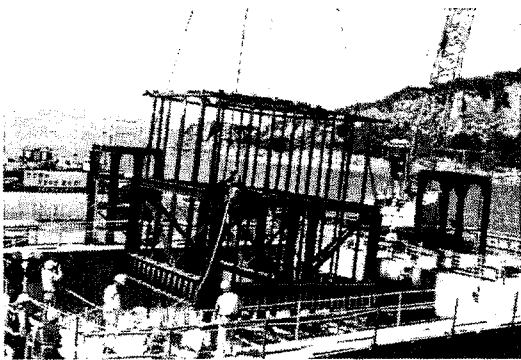


그림 14 Anchor Frame 설치

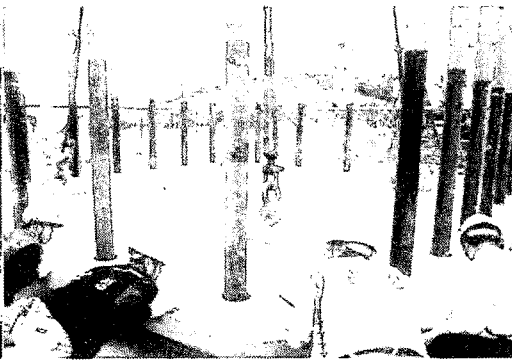


그림 15 Base Plate 설치

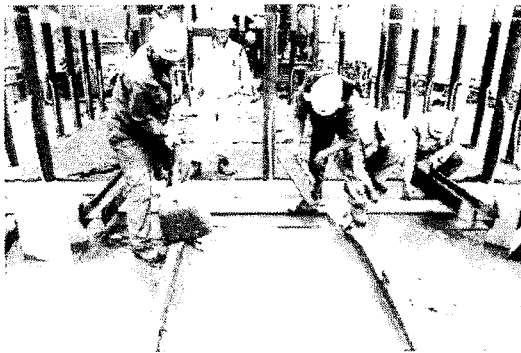


그림 16 Grouting

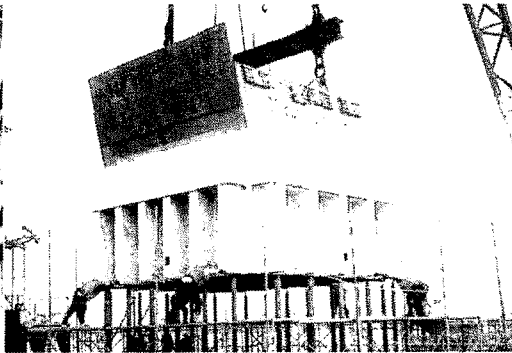


그림 17 탑기부 설치

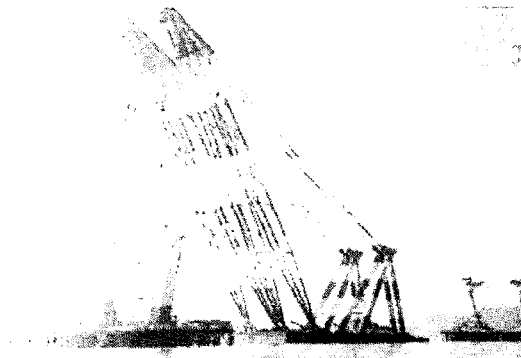


그림 18 탑하부 설치

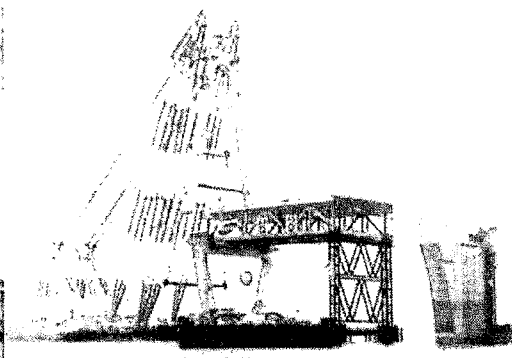


그림 19 탑상부 설치

표 7. 주요 공사물량

공종	규모		
Anchor Bolt	M125 × 6,78ton	46ea	
Base Plate	7,500 × 6,815 × 130ton	2ea	
탑기부 Grouting	실계량 3.8m ³ , 타설량 6.6m ³		Over Flow 양, Dummy Plate부 Grouting
Anchor Frame	120ton		
탑기부	880ton		
탑하부	1.880ton		
탑상부	2.207ton		

3.2. 보강형

현수교 구간의 보강형은 75m 단위로 총 8개의 대Block으로 분할 거치하며 보강형의 주요 가설 단계는 G2-> G7-> G8-> G1-> G6-> G3-> G5-> G4로 구성되며, 마지막 Block의 설치 세계 최대의 폐합 Block 공사로 강교 대Block 가설공사 중 가장 어려운 공사로 기록될 것이다.

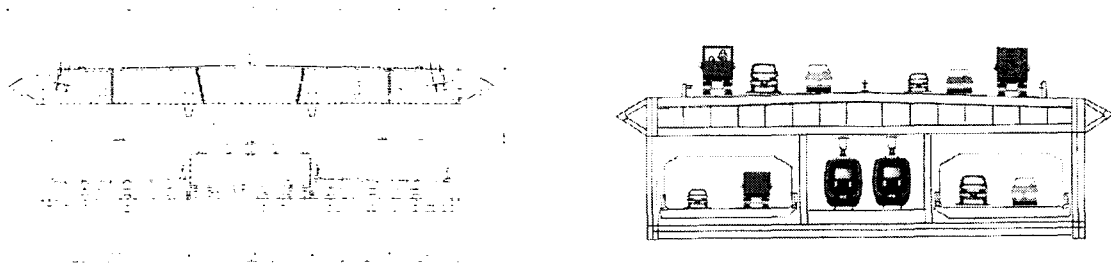


그림 20. 보강형 표준 단면도

현수교 구간의 단면은 상층은 도로 6차선 강상판, 하층은 도로 4차선 강상판 도로와 복선 철도로 이뤄져 있으며 주경간의 길이는 300m로 중량은 10,490ton이다. 이는 세계 최대의 단면으로 폭 41m, 높이 12m로서 단일 Block으로는 제작, 설치가 불가능하여 75m와 50m로 분할하여 제작, 가설하는 대Block 가설공법으로 시공되었다.

표 8. 주요 공사물량

G1	G2	G3	G4	G5	G6
2,230	2,970	2,570	2,650	2,700	2,570
G7	G8	G9	G10	G11	합계(단위)
2,970	2,230	2,259	1,684	2,526	27,459(ton)

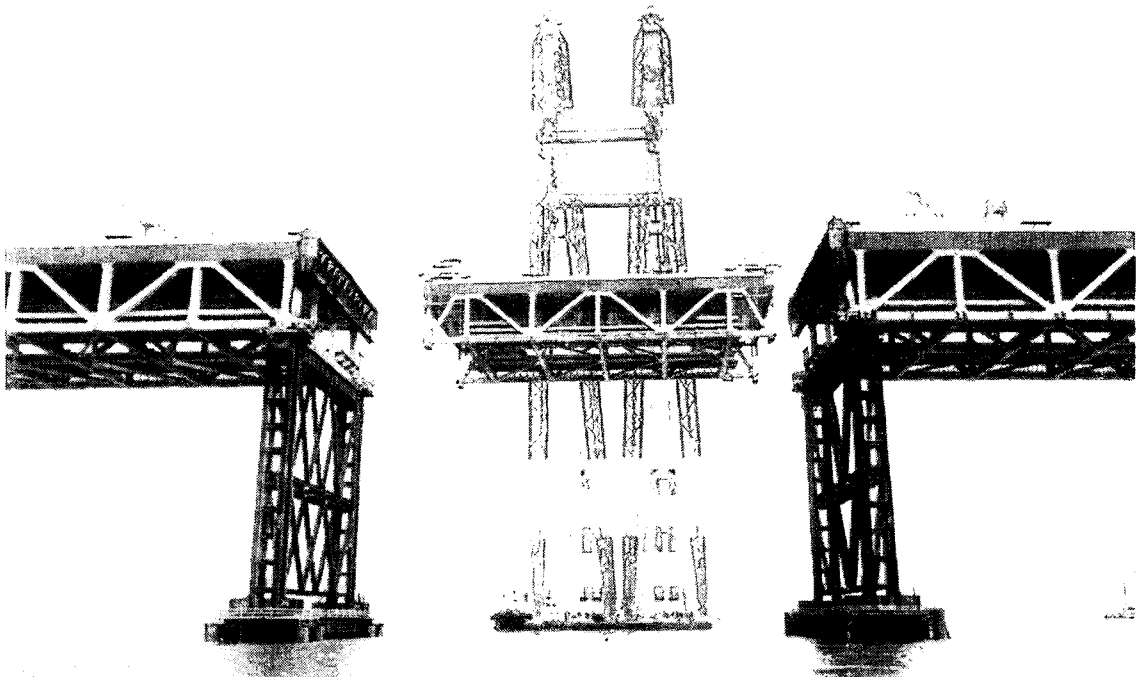


그림 21. 3000ton 해상 CRANE에 의한 대block 가설 전경

영종대교 현수교 보강형은 2개의 주구 Truss(수직재가 있는 Warren형)와 상로상형(상형제), 하횡구 Truss(K형), 그리고 중간 수직재로 이뤄져 있다. 본 교량은 도로 및 철도 병용의 복층교로서 상층의 전용고속도로는 강상형을 이용하고 하층의 도로 및 철도는 하횡구 Truss 에 하로도로 및 Rail을 부설하여 이용한다. 한편 본 교량은 보강형에 주Cable을 직접 정착시키는 자정식 형태이므로 보강형은 Cable 가설에 우선하여 설치한다. 보강형의 가설 방법은 75m 단위의 대Block으로 분할하여 가벤트 상에 연속 거치하고 Block 간 형장이음을 실시한다.

3.3 보강형내 제습 SYSTEM

보통 보강형 내면의 방청대책은 Primer(20 μm)의 바탕에 3층의 도장을 실시하나 본 영종대교는 보강형 내면 장을 실시하지 않고 내부의 습도를 일정하게 유지하기 위한 제습시스템을 채용하고 있다. 보강형 외면에 비하여 약 4배의 도장 면적을 가지는 보강형 내면 도장을 생략함으로써 초기 투자비 및 유지관리에 필요한 비용 절감을 도모하고 있다. 제습시스템은

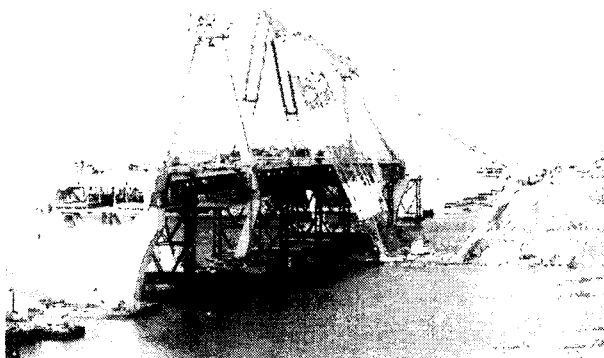


그림 22. 보강형 폐합 전경

각 보강형 내에 건식제습기를 배치하여 강상판 RIB를 송기용 배관으로 상용함으로써 건조공기를 순환시켜 보강형 내에 상대습도를 60% 이하로 유지하여 녹의 발생을 방지한다.

4. Cable

영종대교 Cable은 3차원 Cable과 경사행어를 갖고 있어 교량의 내풍안정성이 뛰어나 미래의 초장대교 Cable 형식으로 사용될 Mono-Duo Type의 Cable을 채용하고 있으며 이는 한국 전통가옥의 처마 모양과 유사하여 그 의미를 더하고 있다. 또한 주Cable은 자정식 현수교의 특성상 보강형 단부에 정착되는 특징을 갖고 있다.

자정식현수교란 주Cable의 정착을 자체 보강형 Truss에 고정, 정착시키는 형식으로 주로 단지간 현수교에 적용된다.

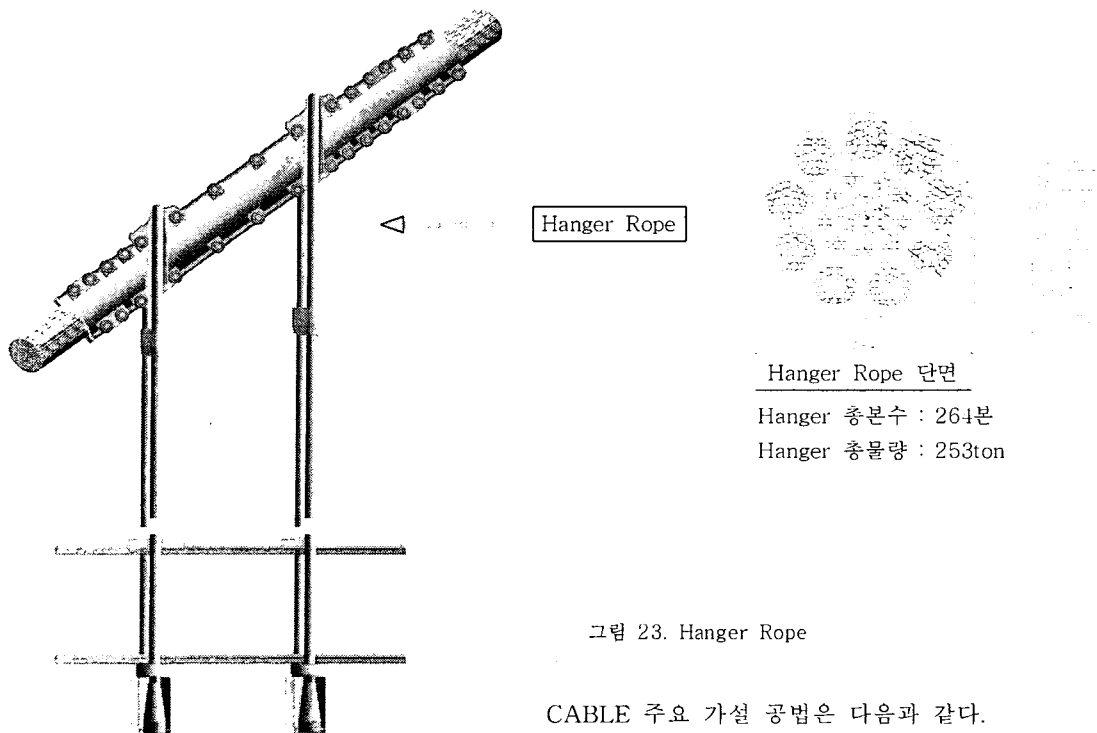


그림 23. Hanger Rope

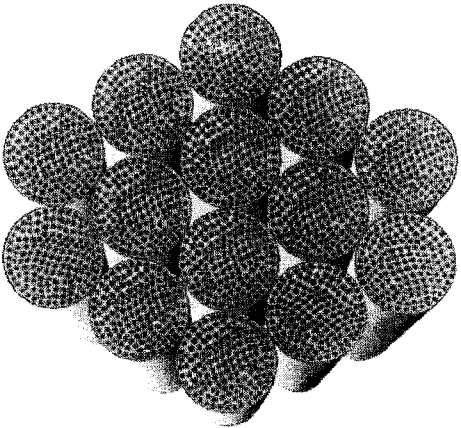
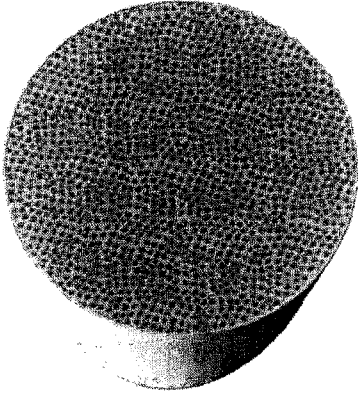
CABLE 주요 가설 공법은 다음과 같다.

① A/S(Air Spinning) 공법 : 현장에서 활차를 이용하여 소선을 하나하나 공중으로 가설, 주Cable 가설을 완성해 나아가는 공법으로 남해대교 등에서 사용되었다. 영종대교의 Air Spinning공법은 소선의 Free-Hanging 장력이 낮은 자정식 현수교의 특성을 고려하여 가설장력을 소선의 Free-Hanging장력으로 가설하는 고장력공법 (Free-Hanging Method)을 사용한다.

② 3차원 Cable(MonoDuo Type) : 세계 최초로 시도되는 Cable 가설방법으로 주Cable이 자정식 단부에서는 교량폭 만큼 벌어져 있다가 주탑 위에서는 약 3m로 좁아진 후 다시 주경간 사이에서 벌어지는 형태이다. 이에 따라 Hanger Rope도 수직이 아니라 3차원으로 주Cable과 보강형 Truss 양단부로 연결되는 것이 가장 큰 특징이다.

③ Hanger 인입/정착공법 : Hanger의 정착은 Hanger를 Strand Jack으로 직접 인입하여, 정착하는 직접인입공법을 적용한다.

④ 건조 제습 장치 : 고온건조 공기의 강제 배송에 의한 Cable의 녹을 방지한다.

	
<p>Squeezing 전 Cable 단면(장폭 $\phi 557.6$)</p>	<p>Squeezing 후 Cable 단면(장폭 $\phi 467.4$)</p>
<p>$\phi 5.1 = 1$ 소선 소선 480본 = 1 strand 14 strand = 1 cable</p>	<p>소선 총본수 : 6,720본(480×14) 소선 총연장 : 8,145km(서울~부산 10회 왕복가능) 소선 총물량 : 1,315ton</p>

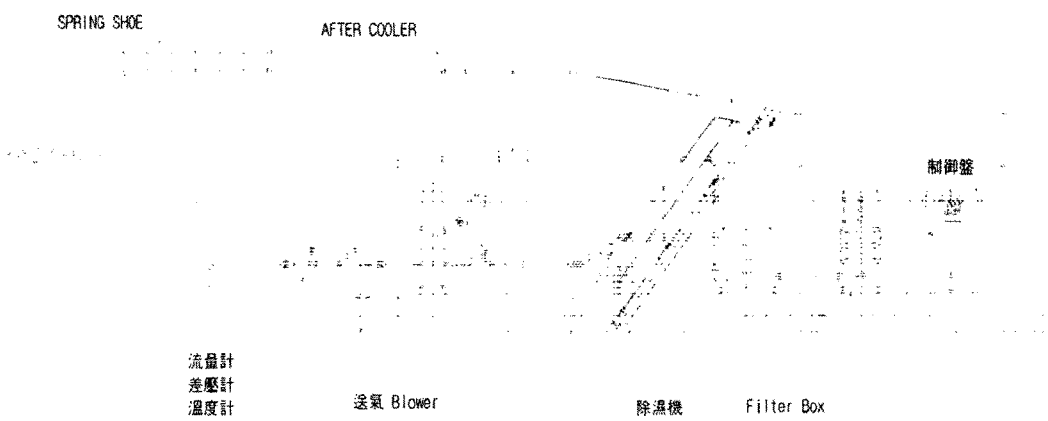
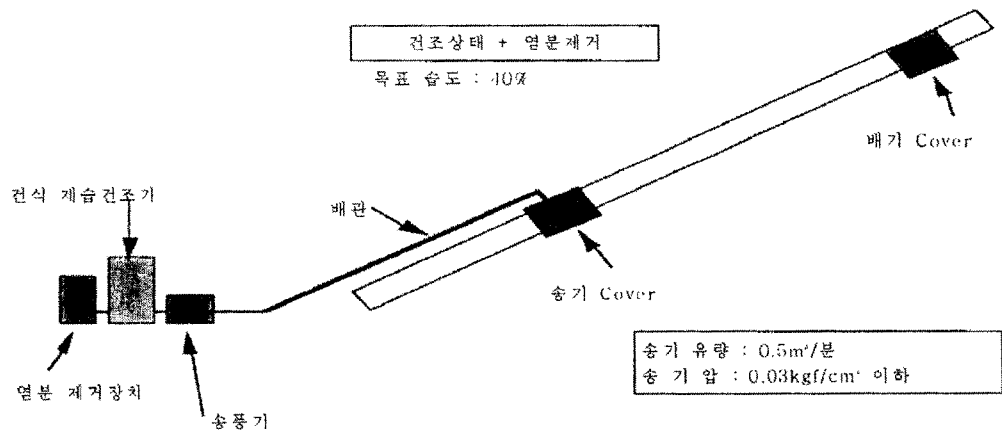


그림 24. 건조 제습 설비 배치도