

# 영종대교(3차원 cable 자정식 현수교)의 시공관리

손 유 석\*

## 1. 설 계

### 1.1 설계일반1)

당초 현수교 주탑 기초의 원 설계 상에는 해상 가물막이 공을 설치하고 현장타설 Concrete말뚝(RCD)으로 설치하도록 계획되어 있었으나, 다음과 같은 설계, 시공상의 문제가 있어 Pneumatic Caisson공법으로 변경하였다.

① 말뚝이 유한장이며 지지층이 되는 경암이 부분적으로 얇게 출현하기 때문에 불안정한 구조물이 형성됨과 아울러 기초형상이 커진다.

② 시공장소의 조건은 최대수심(H.W.L시)이 E1 주탑에서 18.5m, W1 주탑에서 25.5m, 평균간만차 8.5m, 극조위간만차 약 10.0m, 유속 2.15m/sec인 열악한 해상조건으로, RCD 말뚝의 시공 및 가물막이의 지수성 확보가 곤란하므로 Footing 구축시 품질확보, 시공의 안정성, 확실성 등에 문제가 예상된다.

③ 토질은 풍화암, 연암, 경암이 대부분을 차지하고 있으며 특히 W1 주탑 기초는 경암이 일부 해저면하 3.0m 부근에 출현하여 기초와 대각선으로 11.5m 경사져 있는 불리한 조건을 가지고 있다.

이상의 문제점을 고려하여 Pneumatic Caisson안과 설치 Caisson안이 검토되었다. 이 중 설치 Caisson은 기초형상이 커지고 굴착범위도 늘어나며 대규모 수중발파도 시행해야 하는 등의 단점이 있어, 해상시공 및 암반굴착에 대한 시공성이 확실하고 일본에서도 대규모 교량기초의 시공실적도 많은 Pneumatic Caisson 안으로 결정하였다.

이 공법은 횡도압에 의한 지지력 증대로 구조적 안정성의 향상을 기대할 수 있다. 그리고 시공중 지반의 확인과 재하시험에 의한 지지력 확인이 가능하고, 소요지반의 지지력 확보를 위하여 소요심도까지의 굴착심도 조절이 가능하다. 그밖에 주변지반의 교란이 최소화된 상태로 지반에 근입되어 세굴의 영향이 적고 세굴 발생시 구조적 안정성 확보에 유리한 점 등의 장점이 있다.

한편 공기 및 공사비 측면에 있어서도 수평 지지력의 증대로 설치Caisson보다 작은 크기로도 지지력 확보가 가능하고, 지반에 대한 대규모 오픈준설이 없어 공기 및 공사비의 절감이 가능하다. 그리고 해상작업대의 설치와 작업실내 굴착으로 기상여건의 영향을 적게 받음으로 안정적인 공정 관리가 가능하며, 설치Caisson 보다 작은 크기의 구조물로 제작됨으로 공기, 공사비 면에서도 경제적인 점 등 많은 장점을 가지고 있어 주탑 기초공법으로 채용하게 되었다.

### 1.2 Caisson 기초형상 검토

기초형상의 검토는 상부공 구조검토 결과에 의한 Anchor

Frame 치수로부터 Caisson의 최소 평면형상(47.1m\*15.1m)에 대하여 표 1.에 명시된 세 가지 지지상태를 고려하여 비교하였다.

표 1. 지지지반별 Caisson 형상비교

경암착저 지지	47.1m*18.1m	848.0m <sup>2</sup>
경암근입 지지	47.1m*15.1m	706.7m <sup>2</sup>
연암착저 지지	47.1m*39.1m	1837.1m <sup>2</sup>

이 검토결과 E1 및 W1 기초에 대한 경암 굴착토량 및 전체 굴착토량이 최소가 되며 최대작업기압(H.W.L시)이 3.5kgf/cm<sup>2</sup> 이하로 현재의 설비로도 대응이 되며 공사비, 공기 등에서도 유리한 「경암 착저 지지」를 선택했다.

최종 침설깊이는 경암 출현깊이에서 E1 기초는 EL -33.0m, W1 기초는 EL -32.5m가 되었다.

세굴대책에 있어서는 상부토사의 세굴을 고려하여 설계 지반면은 풍화암 상단까지 내린 상태에서 검토하였다.

Caisson 설치 지반고의 결정은 현 지반고를 기준으로 Mound공 조성(준설, 치환공)을 고려하고 현장 시공조건 및 수심에 대한 각각 Caisson 높이 등을 고려하고 현장 시공조건 및 수심에 대한 각각 Caisson 높이 등을 고려하여 공사물량의 증감, 시공성과 공기 측면에서 종합적으로 판단하여 E1기초는 EL. -14.0m, W1 기초는 EL. -18.0m로 결정했다.

Caisson 구체의 형상은 Anchor Frame에 의한 Caisson의 최소치수를 고려하고 작용하는 조류력의 저감과 Concrete 체적의 저감을 고려하여 직사각형 형상으로 채용하였다.

### 1.3 부재설계

부재설계는 기본적으로 일본 시방서에 준하여 허용응력도법으로 설계한 결과를 주요부재를 한국의 강도설계법으로 다시 확인하는 것으로 했으며, 이 경우 모두 만족하였으므로 철근량 증가, 부재 치수의 변경 등은 필요로 하지 않았다.

또한 최소철근량, 철근의 이음길이 및 구조세목은 강도설계법을 기준으로 하였다. 아울러 Caisson 전체계의 FEM 해석과 정판부의 FEM 해석을 통하여 응력조사를 실시했다.

### 1.4 각각 Caisson 설계

각각 Caisson의 제작은 가장 중요한 공중으로써 실시설계가 종료됨을 기다리고 나서 자재발주, 제작을 하게 되면 전체공정에 문제가 되므로 일본 시라이시(白石)사의 협조로 신속하게 대응, 설계와 제작을 연계하여 추진하였다. 간만차가 큰 현장조건을 고려하여 Caisson의 착저시 필요한

수하중을 확보하기 위하여 측벽 및 격벽의 내부 거푸집도 강재의 Double Wall 구조를 채용하였으며, 각각높이는 E1에서 22.5m, W1에서 26.5m로 설계하였다.

\* 일반회원, 삼성물산(주) 건설부문

### 1.5 Jacket 및 Yard 작업대 설계

Jacket 작업대는 Caisson을 설치할 때 Guide 역할을 하며 Caisson 착저시까지 조류력, 파력, 풍압력 등에 의한 Caisson의 움직임을 잡아주며 이의 수평력에 대하여 저항할 필요가 있는 구조이기 때문에 해중부까지 사재, 수평재를 연결한 Jacket구조 형식으로 작업대를 설계하였다.

또한 Caisson의 외주 작업대로서 장비작업 등의 작업을 위한 공간(B=10.0m)도 고려하였다.

Yard작업대는 Caisson 시공에 필요한 가설설비 등의 설치, 적치를 위하여 필요한 것으로 Jacket작업대보다는 수평력이 적게 통용하는 바 통상의 강관 말뚝에 사재 및 수평재를 설치하는 방식으로 설계하였으며, 현장조건을 고려하여 W1의 경우에는 Yard 작업대로 현장에서 유용한 SEP(Self Elevated Pontoon)Barge를 사용하였다.

### 1.6 설계 조건

표 2. Caisson 설계조건

온도변화	무시
풍속	상시 V=12%(시공한계)(시공시,가설구조물) 무시(완성시) 폭풍시 V=25.5%(재현기간 10년)(시공시,가설구조물) V=40%(재현기간 100년)(완성시) 설계풍속=1.5*기본풍속(상기치)
조위	구조물설계시 HWOST EL. 4.085m(+9.235m) MSL EL. -0.175m(+4.975m) LWOST EL. -4.436m(+0.714m) 항로고,구조물고점토시 AHHWL EL. 4.799m(+9.949m) MSL EL. -0.175m(+4.975m) ALLWL EL. -5.150m(+0.000m)
조류속	V=2.15%
파랑	상시 H1/3=0.55m, H1/10=0.70m, T=3.60sec, L=20.2m 폭풍시 1)가설구조물(10년확률파) H1/3=1.37m, H1/10=1.74m, T=4.91sec, L=37.6m 2)영구구조물(100년확률파) H1/3=1.70m, H1/10=2.16m, T=5.40sec, L=45.5m Hmax=2.84m
토질정수	단위중량 $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> ), 변형계수 E(kg/cm <sup>2</sup> ) 내부마찰각 $\phi$ (°), 점착력 C(t/m <sup>2</sup> ) $\gamma$ =1.8, E=140, $\phi$ =30, C=0 (해저퇴적토) $\gamma$ =1.9, E=250, $\phi$ =30, C=0 (잔류토) $\gamma$ =2.0, E=800, $\phi$ =30, C=0 (풍화암) $\gamma$ =2.1, E=2000, $\phi$ =35, C=10 (연암) $\gamma$ =2.2, E=8000, $\phi$ =40, C=50 (경암)
지반지력	한국 도로교시방 적용
진도	수평 kh=0.14(가설구조는 1/2배), 수직 kv=0
허용회전각	3.73*10 <sup>-4</sup> rad(상부공조건)
시공오차	편심 e=0.3m (교축,교직)
하중조합	일본 본사공단기준 적용
사용재료	케이슨(콘크리트) 구체 270kg/cm <sup>3</sup> , 정판 300kg/cm <sup>2</sup> 강각, 가설작업대 SS400, SPS400(강각저판은 SM49CYA)

### 1.7 설계하중내의 상부공 반력

표3. Caisson 설계시 적용된 상부공 반력

표3. Caisson 설계시 적용된 상부공 반력						
교축	상시		26,000	500	14,000	0
	지진시		23,000	1,200	35,000	0
	폭풍시		19,000	900	24,000	0
교직	상시	①*	13,000	(2,500)	(19,000)	(1,000)
		②*	13,000	-3,000	-12,500	300
		계*	26,000	0(0)	0(0)	0(0)
	지진시	①	10,200	3,300	-1,000	-1,000
		②	11,800	-2,100	-30,000	600
		Mx			-25,600	
	계	22,000	1,200	-56,600	-1,520	
	폭풍시	①	8,500	3,100	-12,000	300
		②	10,500	-1,400	-32,500	-550
		Mx			-32,000	
계	19,000	1,700	-76,500	-890		

- \* ①, ②는 돌출부(h=16m부분)의 부재설계시 적용
- \* Mx=(①-②)\*16m
- \* 계는 기초전체의 안정계산 및 하단부(h=16m이하)의 부재설계시 적용
- \* 하중조합은 상시는 D + L + T + SD + E  
폭풍시는 D + W + T + SD + E  
지진시는 D + T + EQ(LL) or  
D + L(EQ) + T + SD + E + EQ(LL)
- \* 상기의 반력은 설계용 하중저감계수가 고려되어 있지않은 본래의 반력수치임.

### 1.8 Caisson 구조 일반도

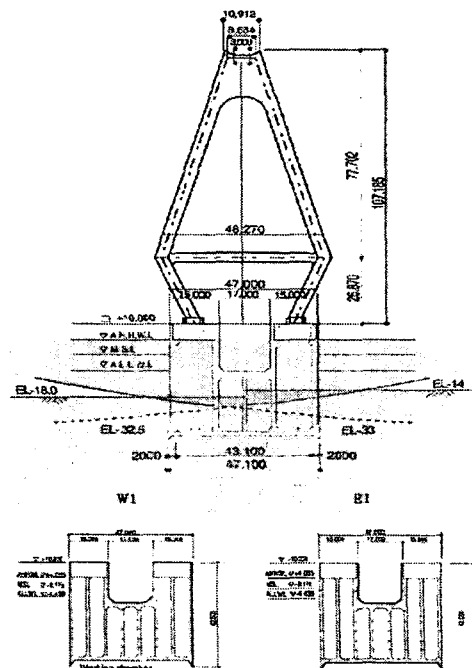


그림 1. Caisson 구조 일반도

## 2. 준비공

### 2.1 해양 및 수심조사

공사에 앞서 시공 조건을 확인하기 위하여 사전에 조위차, 조류속, 파고에 대한 조사를 실시하였다.

표 4. 해양 및 기상관측 자료

		측정		
유속	호도 서측	m/sec	1.47	2.15
	호도 남측	m/sec	1.82	2.15
파고	교량 시공시	m	-	1.74
	교량 완성시	m	1.70	2.84
풍속	교량 시공시	m/sec	-	25.50
	교량 완성시	m/sec	40.00	40.00

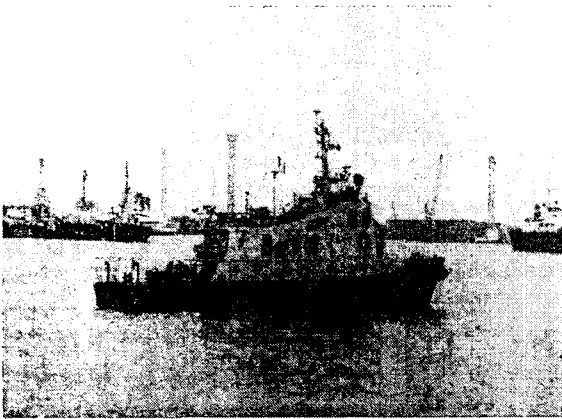


그림 2. 해양조사선



그림 3. 음향 수심측량기

### 2.2. 지질조사

주탑부의 지질학적 층두께, 암석학적 특성, 구조지질적 상태 및 지질학적인 사항을 평가 하기위하여 시추조사를 실시하였다. 시추조사와 병행하여 공내 재하시험을 실시하여 지반의 역학적, 공학적 상태를 고찰하였다.

본 현장에서의 지질 조사는 해저에서 실시되므로 조사용

작업대가 필요하다. 이 지역은 수심이 깊고 조류가 빠른 데다 조위차도 심하여(약 9m) 작업대로 SEP-Barge를 이용하였다.

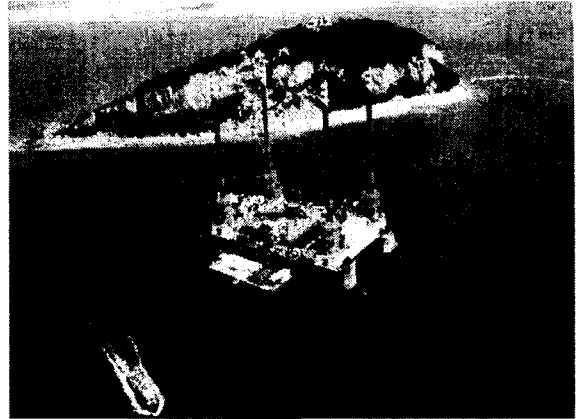


그림 4. 지질조사시 사용된 SEP

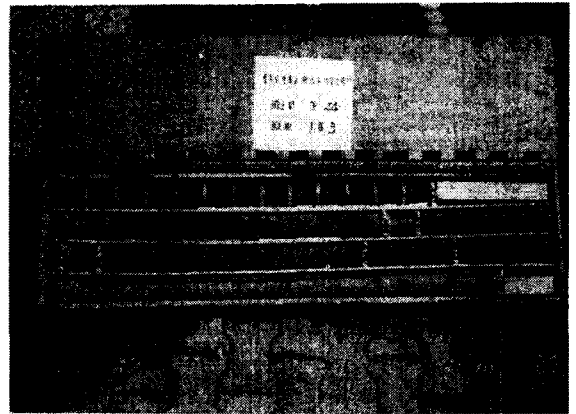


그림 5. 시추조사 결과

표 5. 시추조사 결과표

주 탑 부	E1	토사층	-14.5	14.5	-13.88~-14.19	12.75~15.40
		풍화암층	-29.0	3.2	-26.67~-29.59	0.57~4.35
		연암층	-32.2	3.8	-28.70~-32.02	0.50~1.60
		경암층	-36.0	4.0	-29.88~-32.59	- ~
	RCD 근입장	-40.0	30.0	굴착장	16.00~18.40	
W1	토사층	-18.5	5.8	-18.16~-20.29	3.80~4.50	
	풍화암층	-	-	-22.40~-24.30	0.35~0.80	
	연암층	-24.3	3.7	-22.80~-25.10	0.50~3.95	
	경암층	-28.0	2.0	-23.30~-28.39	-	
RCD 근입장	-30.0	30.0	굴착장	4.70~8.10		

### 3. 마운드공

Caisson, Jacket작업대 설치시에 수평을 유지하고 안전한 작업 수행을 위하여 해저면에 일정한 지지력을 가지는 지반을 확보하기위해 해저면에 마운드공을 실시하였다.

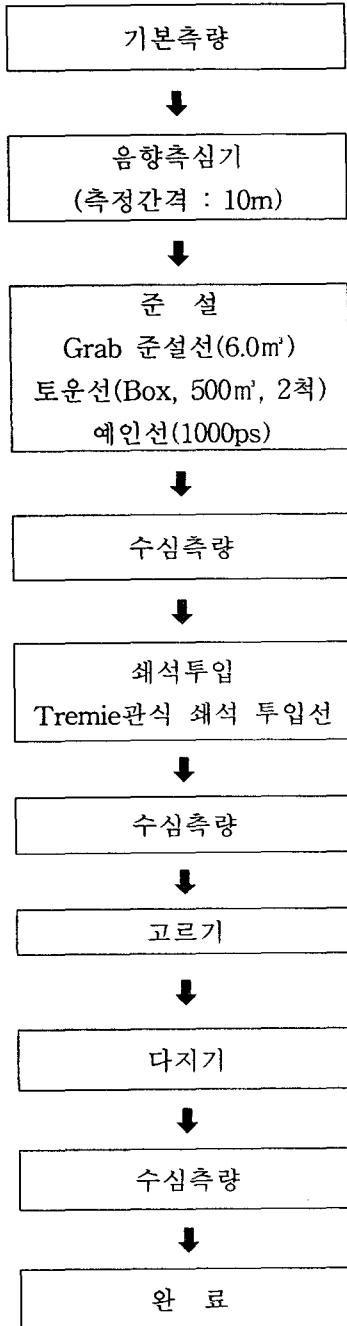


그림 6. 마운드공 시공 Flow

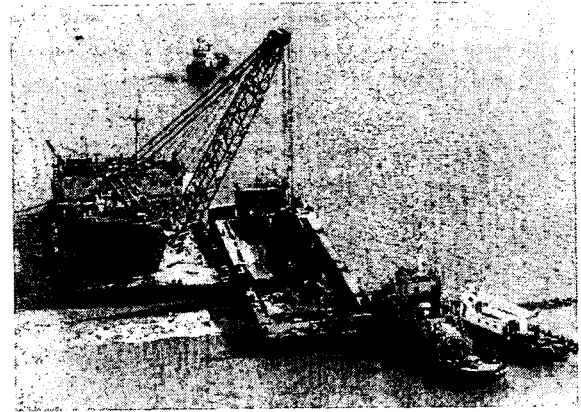


그림 7. 준설전경

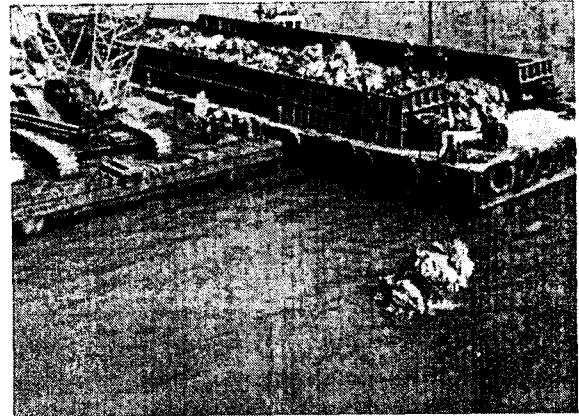


그림 8. 사석투입 전경

#### 3.1 준설공

준설은 E1 교각부의 Mound 조성에 앞서, 지반 요철수정을 겸해 실시하였다. 준설 깊이가 1.0m ~ 2.0m로 얕아, 큰 규모의 Grab 사용시 역으로 지반을 손상시킬 우려가 있어 8m'급의 Grab 준설선을 이용하였다.

#### 3.2 마운드공

마운드공은 Jacket 작업대 및 강각 Caisson의 착저지반에 지지력 및 평탄성을 확보하기 위하여 실시한다. 원지반의 높이와 지형에 따라 E1은 일부 준설을 행한 후 조류의 영향을 고려해 먼저 400mm직경의 사석을 이용해 마운드공 주변에 제방을 설치 후 Tremie관식 쇄석투입선을 이용하여 20~60mm 직경의 쇄석을 투입하여 조성하였고 W1은 준설 없이 사석 및 쇄석을 이용하여 조성하였으며, 잠수부에 의해 수중고르기 작업을 실시하였다.

마운드공의 지지력은 Caisson 착저시에 있어서 극한 지지력으로서  $q_d=35.0\text{tf/m}^2$  이상 확보할 필요가 있으므로 다지기 Jig와 Vibro Hammer를 사용해 지반요철 수정을 겸해서 마운드 다지기를 수행하였다.

#### 4. Yard 작업대공

Yard 작업대는 Caisson의 시공에 있어서 Compressor 등의 송기설비, 전력 설비, 급·배수 설비, 각종 자재(철근, 거푸집, 비계) 등의 임시 적치장 및 사무실, Caisson Shovel 원격조정실 등을 설치하기 위한 곳이다. 당 현장에서 W1의 경우는 여건상 Yard 작업대의 설치가 어려워 대신 SEP-Barge를 사용하였다.

Yard 작업대의 시공은 전용 항타선에 의해 강관 Pile (직경700mm,12t)을 항타하고, 항두 정리 후 현장에서 운반되어 온 각종 Brace재를 용접 설치하여 실시하였다. Yard 작업대의 시공은 Jacket 작업대 설치에 앞서 시공 완료하여 Jacket 작업대 설치시 Guide의 역할을 하도록 하였다.

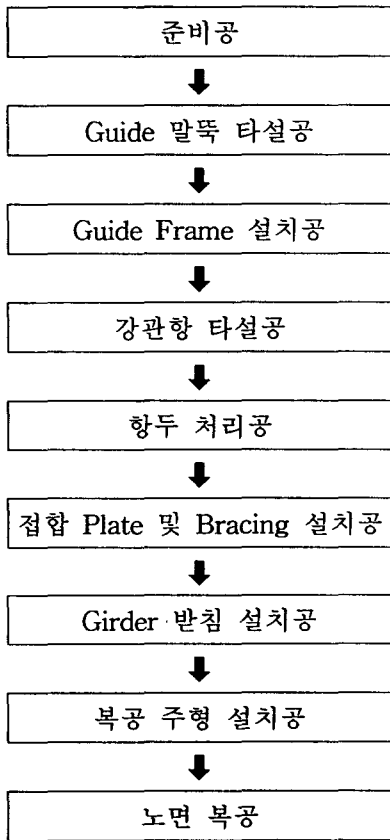


그림 9. Yard 작업대 작업 Flow



그림 10. Yard 작업대 강관 Pile 항타

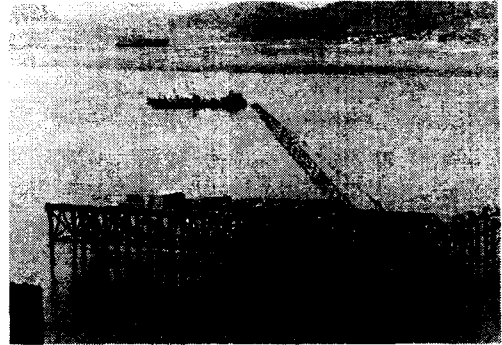


그림 11. Yard 작업대 복공판 설치

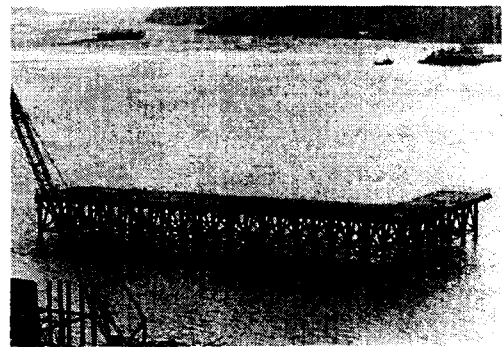


그림 12. Yard 작업대 설치완료

#### 5. Jacket 작업대공

Jacket 작업대는 각각 Caisson을 시공 장소에 거치할 때 Guide 역할을 하고, Caisson 부유시부터 착저시까지 조류력, 파력, 풍압력에 의한 Caisson의 움직임을 잡아줌과 동시에 위의 하중에 의한 수평력에 저항해 주는 역할을 하며 Caisson 구축 및 굴착용 Crawler Crane의 작업대 역할을 하는 외주작업대이다. 이 작업대는 구조적으로 적지 않은 수평력에 저항할 필요가 있기 때문에 해중부까지 사재, 수평재를 연결한 Jacket 방식을 채용하고 Caisson 침하굴착에 있어서 Caisson의 경사 및 이동을 방지하기 위해 Guide Roller(내력 50tf/개소)를 설치한 대형가설 구조물이다.

##### 5.1 Jacket 작업대 제작

Jacket 작업대의 제작은 인천항내의 석탄부두에서 시행하였다.

제작기간은 총7개월로 E1 Jacket 1,200ton, W1 Jacket 1,400ton의 구조물이다.

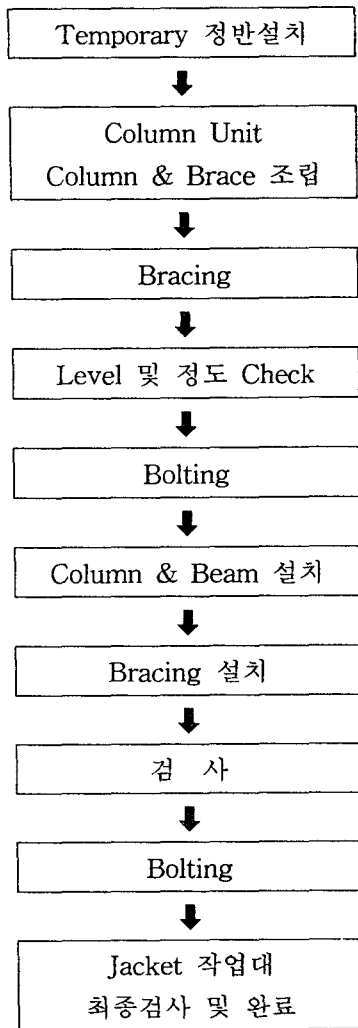


그림 13. Jacket 작업대 제작 Flow



그림 14. Jacket 작업대 제작 전경

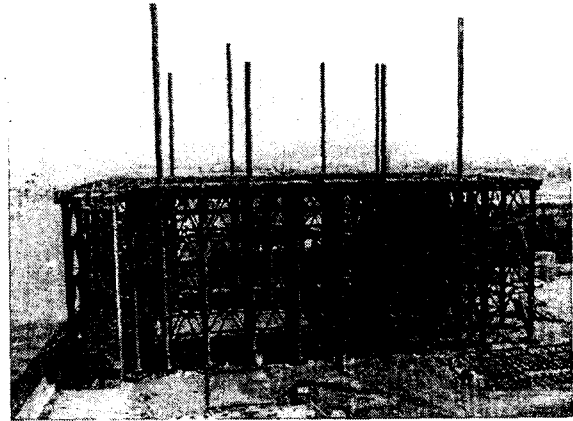


그림 15. Jacket 작업대 제작완료 후 전경

### 5.2 Jacket 작업대 인양 설치

Lifting Lug는 32개소에 설치하였으며 서해안의 간만차로 운반작업시 시간적 제한이 있으므로 Wire 걸기 작업시간을 단축시키기 위해 미리 Wire Socket과 Lug를 Pin으로 연결하여 두고, 3000ton F/C 진입시에 Main Hook에 Wire 걸기 작업만 실시하여 운반작업 시간을 단축시켰다.

Jacket 작업대의 예항을 위하여 선두에 인도선 1척과 예인선 4대(3600HP\*2대, 3000HP\*2대)가 동원되었다.

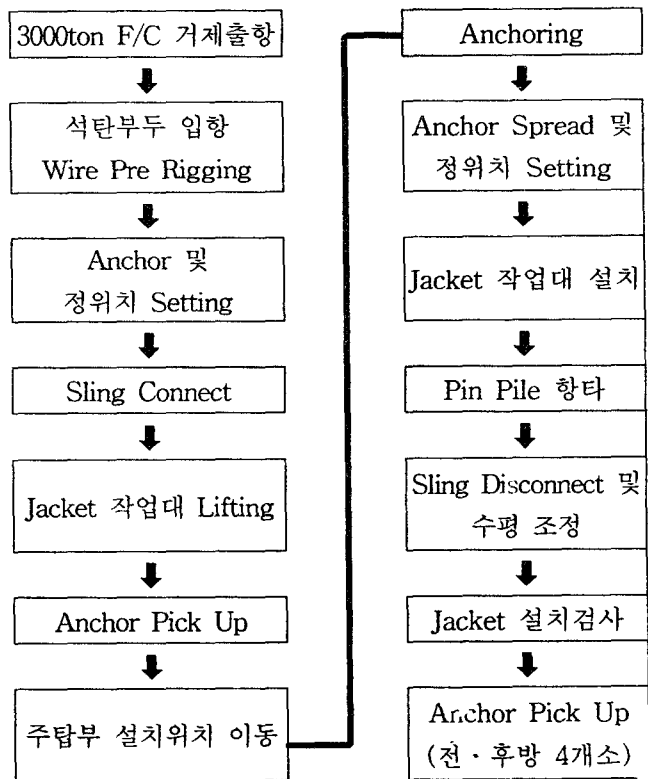


그림 16. Jacket 작업대 인양, 설치 Flow

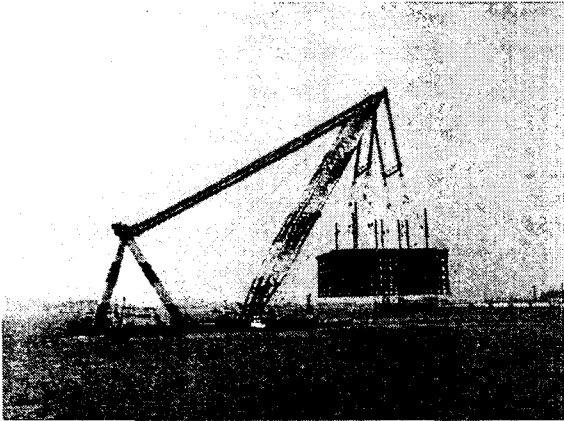


그림 17. Jacket 작업대 운반

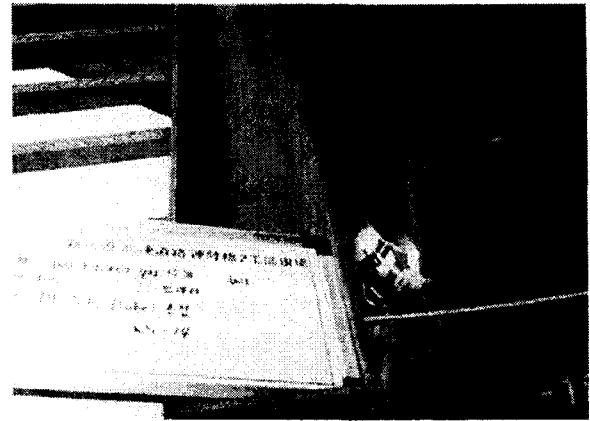


그림 20. Jacket Block Stud 용접

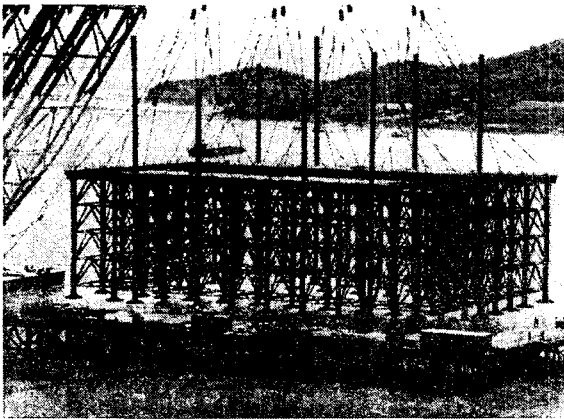


그림 18. Jacket 작업대 설치

### 5.3 Jacket 작업대 Pin Pile공

Jacket 설치 직후, 고정용 Pin Pile 8본(D800mm)을 타설하고 Jacket 설치 위치 및 경사를 재확인한 후 Pin Pile 상단을 가고정한다. 3000ton F/C 회항 후 잔여 Pin Pile을 배치 후 항타하고 Block Stud 고정용접, Mortar 주입을 하여 Jacket 본체와 Pin Pile을 일체화시킨다.

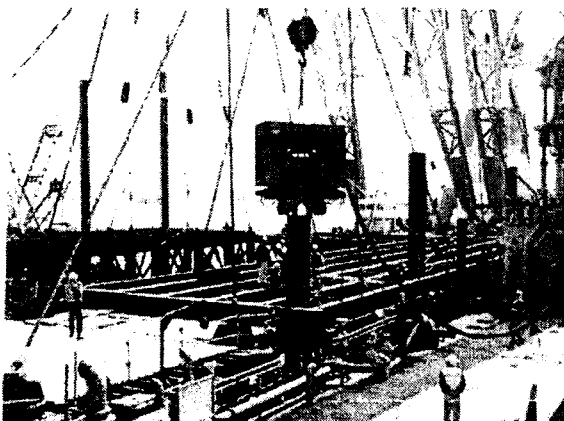


그림 19. Jacket 고정용 Pin Pile 항타

## 6. 강각 Caisson공

해상 Caisson 시공시 초기 예항을 위하여 인양 가능한 중량의 초기 구축용 Caisson Block을 제작할 필요가 있다. 영종대교 주탑의 경우 수심이 깊은 관계로 초기 구축용 Caisson Block을 우선 강각 Caisson으로 제작한 후 해상 부유 상태에서 강각 Caisson 내부 Concrete 타설을 함으로써 초기구축을 하였다. 강각 Caisson은 제작장에서 대 Block으로 분할 제작, 조립하며, 조립은 강각 뿐만 아니라 철근 및 의장 설비(Shaft), 전선 Cable, 계측 Cable을 동시에 실시한다.

### 6.1 강각 Caisson 제작공

강각 Caisson의 제작은 인천항내의 석탄부두에서 시행하였다. 제작기간은 총 8개월로 E1 Caisson 2,205ton, W1 Caisson 2,323ton의 구조물이다.

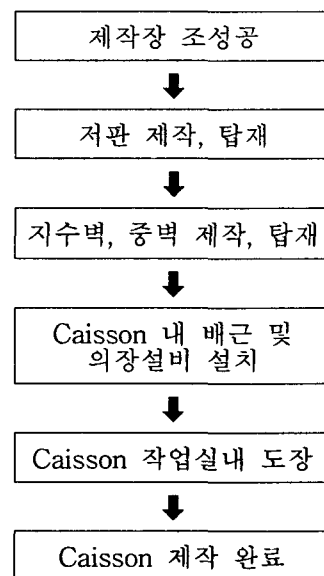


그림 21. 강각 Caisson 제작 Flow

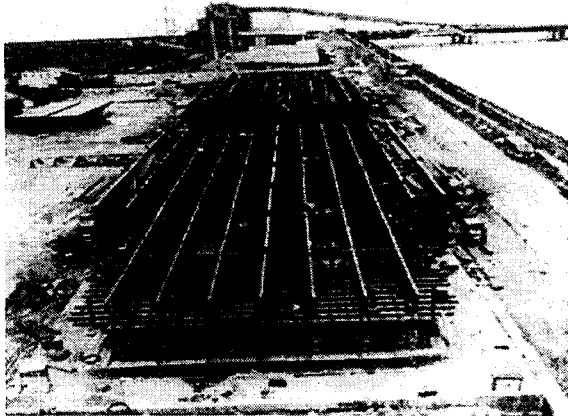


그림 22. 강각Caisson 저판조립

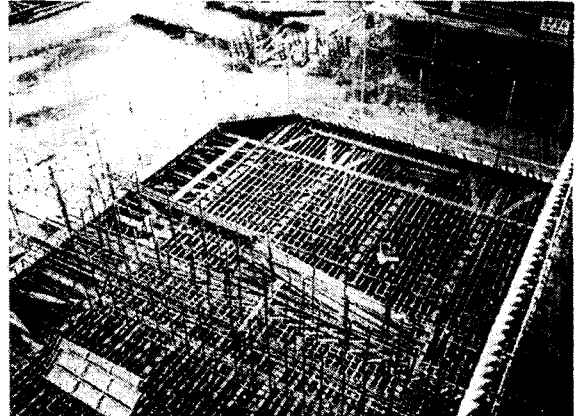


그림 24. 강각 Caisson 내부 철근조립

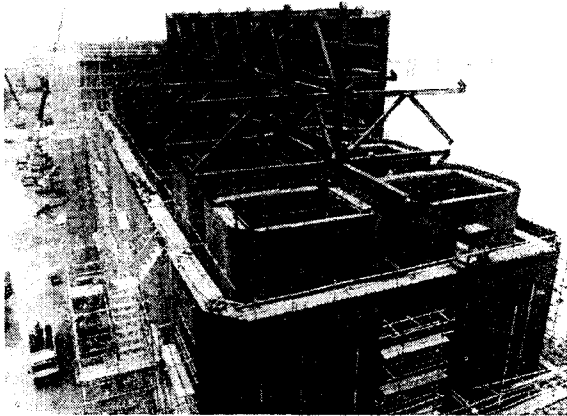


그림 23. 강각 Caisson 중벽, 지수벽 조립

강각Caisson은 Concrete 타설을 위한 거푸집이다. 착저 후 Caisson의 최 상단인 제 10Lot까지 Concrete를 타설하는 동안 수밀성이 요구된다. 따라서 저부(날끝부 및 천정 Slab)와 측벽부(지수벽부)가 판구조로 되어 있어 판에 강성을 갖도록 Rib가 설치되어 있고 Rib를 거의 등간적으로 배치한 격자보로 되어 있다. 격자보는 Truss에 의해 지지되어 있고 강 거푸집 Caisson 전체의 형상 유지를 위해서 중간 말뚝, 버팀보, 대경구(Sway Bracing) 및 횡구(Lateral Bracing)을 설치한 구조로 되어 있다. 전체적으로는 타설된 Concrete가 경화할 때까지 정수압, 파압, 풍압 및 지진시 동수압 등에 대해서 필요한 강도를 갖는다.

## 6.2 강각 Caisson내 배근 및 의장

강각 Caisson 내의 초기 구축용 Concrete 타설을 위해서는 강각 Caisson 제작과 동시에 철근 배근을 해야 한다.

강각 Caisson 제작시 함내 작업원, 장비의 투입 및 토사 반출을 위하여 Shaft 등의 의장을 설치한다. 또한 작업실내 장비 조작 Sensor 설치 등을 위하여 전력선, 통신선 등을 배선한다.

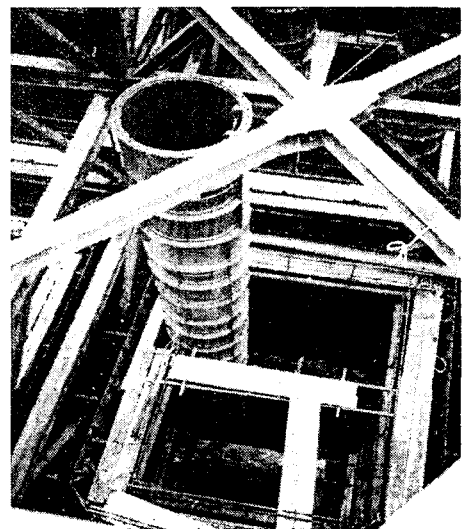


그림 25. 의장설비(Shaft) 설치

## 6.3 강각 Caisson 인양, 거치공

제작 완료된 강각 Caisson을 육상 제작장(인천남항 석탄 부두)에서 3000ton급 Floating Crane으로 인양, Jacket 작업대 운반 시와 같은 요령의 예항선단으로 운반하여 주탑 기초(W1) 위치에 기설된 Jacket 작업대 내에 거치한다.

작업장인 인천항은 조위 변화가 매우 커서 작업기간동안의 최저 조위는 MSL 기준 EL(-)4.79, 최고 조위는 MSL 기준(+ )4.69이다.



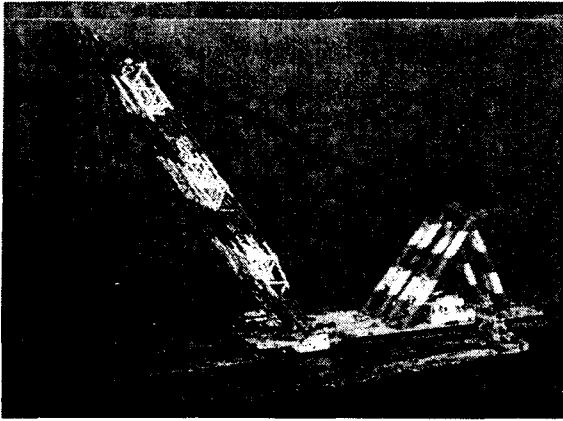


그림 26. 강각 Caisson 운반

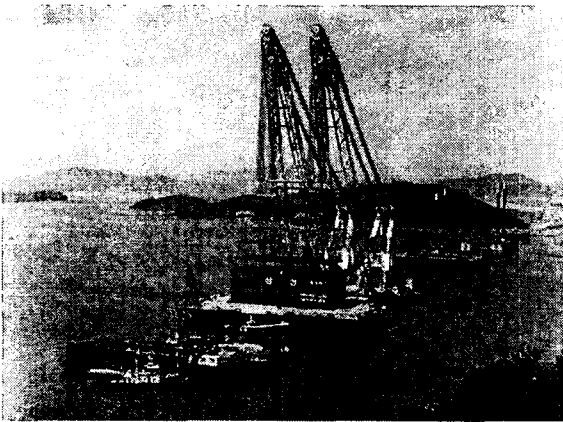


그림 27. 강각 Caisson 설치

강각 Caisson 설치시 Jacket 작업대와의 충돌을 방지하기 위하여 방현재를 설치하고, Caisson 설치 후 즉시 Concrete 타설을 위하여 Pump Car를 Caisson 설치 전에 미리 Jacket 작업대 위에 배치하여 두었다.

강각 Caisson 설치 장소는 최대 간만차가 약 8.5m이고, 조류가  $V=2.1m/s$ 로 매우 빠르기 때문에 강각 Caisson을 Jacket 작업대 내에 내리는 작업은 조위표에 따라 간조시에 조수의 흐름이 없을 때 시행한다. 강각 Caisson을 내릴 때 Jacket에 방충공을 설치하여 조류력에 의한 충돌 에너지를 감소시킨다. 강각 Caisson은 부유시에 조류력에 의해 경사가 발생하고 조수의 흐름이 없는 H.W.L과 L.W.L 시는 정위치 상태로 되는 상황을 반복한다. 최대 경사량은 Caisson 설치 후 제1Lot Concrete 타설 전에 L.W.L에서 M.S.L로 향할 때 발생한다. 강각 Caisson은 간조시보다 만조시가 조류에 대해 안정한 상태가 된다.

## 7. Caisson 초기 구체구축 및 착저공

### 7.1 Caisson 초기 구체구축공

초기 구체구축공은 착저 전 Caisson이 부상된 상태에서 E1축 제 1Lot에서 제 2Lot까지, W1축 제 1Lot에서 제 3Lot까지 시공한다. Concrete 타설에 사용되는 Pump Car의 사용대수는 각 타설장소의 타설량 및 Pump의 타설능력

에 의해 결정되지만 4대를 표준으로 한다. Concrete는 해상 B/P선 위의 Pump Car 2대로부터 압송되어 2대의 Pump Car로 타설되며 타설도중에는 타설량의 분담, 타설 두께 및 타설 속도 등의 타설관리를 행하여 Cold Joint가 발생하지 않도록 한다. 또한 Caisson이 착저 전 부상된 상태에 있거나 Concrete 타설시 편재하중에 의해 경사가 생기지 않도록 경사등에 의한 계측관리를 하면서 균등하게 Concrete를 타설, 시공하여야 한다.

Concrete 타설에는 43m급 Pump Car 2대와 210m<sup>3</sup>/hr 생산능력의 Batch Plant선 1대 및 60m<sup>3</sup>/hr 생산능력의 Batch Plant선 1대가 투입되었다.

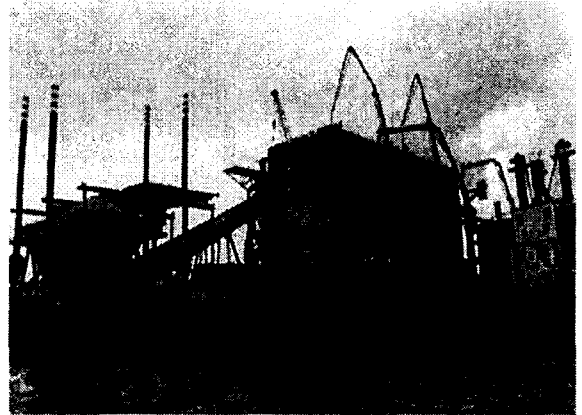


그림 28. 해상 B/P에 의한 Concrete 타설

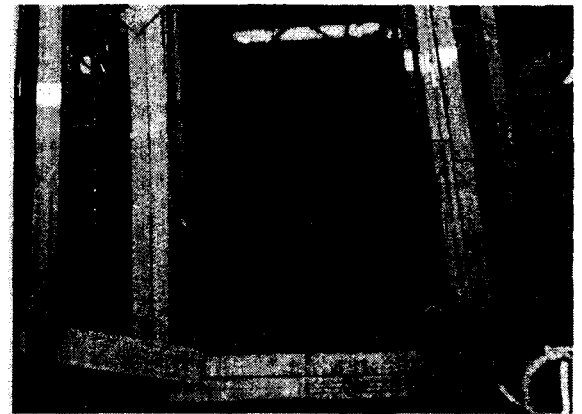


그림 29. 하중수 Pumping

### 7.2 Caisson 착저공

Jacket 작업대 내에 거치된 강각 Caisson내에 Concrete 타설(E1 2Lot, W1 3Lot)에 의해 자중이 증가하면 중벽(Double Wall)내에 하중수(약 6,600ton)를 주입하여 강각 Caisson을 Mound 상면(해저면)에 안착시키는 착저작업을 실시하였다.(하중수는 Caisson 침하관계에 있어서 부족한 침하력을 증가 시킨다. 하중수로는 해수를 사용하였다.)

착저작업에 의해 Caisson의 위치가 결정되므로 착저작업 시에는 유압Jack및 착저용 Guide를 사용하여 Caisson 위치 조정 작업도 시행하였다.

## 8. Caisson 침하 굴착공

E1, W1 Caisson 하단의 작업실 내부에서 침하굴착을 시행하여 Caisson을 계획심도까지 침하시킨다. (E1 : -33m, W1 : -32.5m)

### 8.1 공사 물량

표 6. 침하굴착공사 물량

구분	단위	수량	비고
Mound(쇄석)		135	1,205
토 사		9,463	3,557
풍화암		4,079	363
연 암		1,268	1,606
경 암		1,164	5,562
합 계		16,111	12,295

### 8.2 침하 굴착 작업 일반사항

- ① 전체적으로 무인굴착 설비와 정보화 시공 등을 결합하여 안전하고 확실한 침설관리를 하였다.
- ② 간만차에 대한 작업기압 조정은 조위변동형 자동 압력조정장치로 하였다.
- ③ 착저 시 Caisson의 날끝부의 위치 설정을 위해 착저 Guide를 설치함과 아울러 침설 시에도 Guide를 설치하여 초기 Caisson의 경사를 방지하였다.
- ④ 굴착 개시 시는 침하력이 날끝부 조위의 토사를 파다 남은 토사 Sandal 상태에서의 굴착이 되므로 계측 관리에 의한 날끝부 반력계측 결과 등을 이용하여 확실한 침설관리를 하였다.
- ⑤ 고기압 대책으로, 굴착 작업은 초기의 개구 굴착과 Maintenance 등의 특정 작업을 제외하고는 Capsule 또는 지상에서 원격조작 하였다.
- ⑥ 잠함병 대책으로, Man Lock에서의 감압은 자동감압장치를 사용하였다.
- ⑦ 경암 발파 작업에서, 천공은 기계로 하고 발파 시스템은 전기식 뇌관을 사용한다. 화약은 함내에서 사용할 때 발파 후 Gas에 대해서도 안전한 Emulsion계 함수 폭약을 사용하였다.
- ⑧ 굴착 작업의 경우, 굴착 개시 시는 날끝부 2.3m가 완전히 관입한 상태가 되고 개구는 인력 굴착이 된다. 또한 초기 침하의 3.0m는 Caisson이 경사지기 쉽기 때문에 침하제어가 어려우므로 유인 기계굴착으로 한다.
- ⑩ 굴착 작업의 경우, 인력 작업 후 무인굴착을 원칙으로 한다

### 8.3 초기굴착공 (최초 인력굴착)

굴착개시시는 날끝부 2.3m가 관입한 토사SANDAL 상태에서의 굴착이 된다. 따라서, 굴착기계의 설치공간을 확보하기 위해, Material Lock에서 송기후, Material Lock에서 작업원이 내려가서, CAISSON SHOVEL의 RAIL을 향해

인력굴착을 하고 서서히 작업공간을 넓혀간다. 배토는 0.5 m' Earth Bucket를 사용하는것으로 한다. 최초 인력굴착은 Material Lock 2개소에서 하기로 한다.



그림 30. 초기 인력 굴착

### 8.4 초기굴착공 (개구기계 병용굴착)

인력 개구 굴착으로, CAISSON SHOVEL 설치 공간을 확보하면, CAISSON SHOVEL을 설치하고, 파다 남은 토사SANDAL 부분의 굴착을 기계병용굴착으로 한다. 또, 상황에 따라 소형의 전동 BACK HOE를 함내에 투입하여, 개구 굴착을 보조하는 것으로 한다.

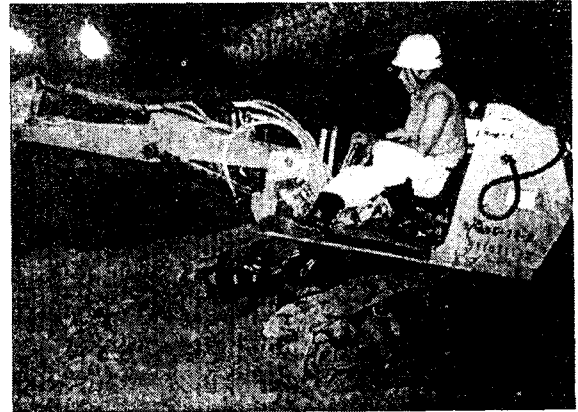


그림 31. 초기 기계굴착



그림 32. 유인기계굴착

### 8.5. 기계굴착공 (유인)

개구기계병용굴착으로, 서서히 개구를 넓혀가고, CAISSON SHOVEL의 설치가 완료되면, 날끝부 아래 3.0m 까지의 굴착은 특히 경사지기 쉽고, 침하제어가 어렵기 때문에, 굴착작업은 함내에서 직접 CAISSON SHOVEL을 조작하는 유인 굴착으로 한다. CAISSON SHOVEL의 배치계획은 「6-4-7 의 2.CAISSON 함내굴착설비배치계획」을 참조한다. 배토는 1.0m<sup>3</sup>의 Earth Bucket을 2개 사용하여, 교대로 배토한다. 하나의 Earth Bucket가 함내의 배토되어 있는 사이에, 다른 Earth Bucket에 적재함으로써, 배토작업시간의 단축을 꾀한다.

### 8.6 기계굴착공(무인)

날끝부 아래 3.0m까지의 굴착이 종료하면, 굴착작업은 Maintenance등 특종작업을 제외하고, 무인굴착으로 한다. 무인굴착은 Capsule 또는 지상원격조작실에서, CAISSON SHOVEL을 원격조작함으로써, 함내를 무인화하는 System이다.

배토는 1.0m<sup>3</sup>의 Earth Bucket를 1개 사용한다. (본 Caisson은 함내에서 발파작업을 하기 때문에, 토사자동적재 장치는 사용하지 않는 것으로 한다.)

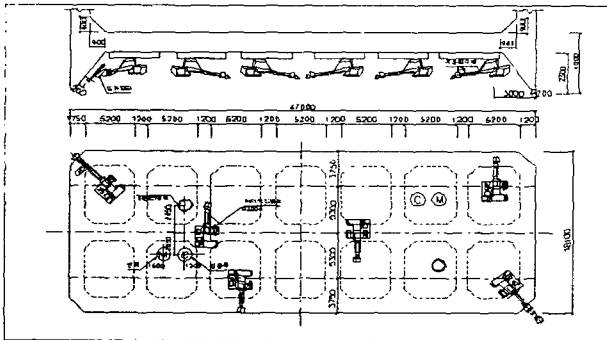


그림 33. 무인굴착작업시 Shovel 배치



그림 34. 무인 기계굴착



그림 35. 무인굴착시 원격조작

### 8.7 선행굴착공

W1에 관해서는 경암의 출현이 최대로 11.5m나 경사져 있기 때문에, Caisson 침하시에 경사가 발생하기 쉽다. 또, 경사에 따라 CAISSON의 이동 가능성이 높았다. 따라서, 경사(경사)져 있는 경암(경암)의 높은 측을 각각 Caisson 예방전에 선행천공하여, 발파시의 자유면을 사전에 만들어 둠으로써, Caisson의 횡이동 발생요인을 저감시키고 고정단축을 꾀한다.

또, 선행굴착의 범위는 설계상 연암으로써 평가하는 토층위까지 (EL-26.0m 까지) 로 한다. EL-26.0m까지의 경암을 선행천공함으로써 CAISSON 날끝부 전체중에, 1/2 이상이 경암 지지가 되고, 그 외의 부분도 풍화암 또는 연암 지지가 되기 때문에, 지반의 지지력 차이에 의한 CAISSON의 경사를 비교적 방지하는 것이 가능하게 된다.

선행굴착은 날끝부위를 정확히 천공할 필요가 있기 때문에, SEP를 사용하여, Guide를 설치하여 PRD Machine(Air Percussion Type)으로 시공하였다.

### 8.8 경암 발파공

Caisson에 있어서의 발파는 함내 미주전류가 있을 때의 염려가 있고 또, 본 현장은 해상시공이고 낙뢰등의 위험이 있기 때문에 전기식의 발파System은 사용하지 않고, 통상의 도폭선을 사용한다. 여기에서 본 Caisson에서는 이하의 점을 고려하여 비전기식 발파System의 Nonel System을 채용하는 계획으로 한다.

지반 발파의 경우, 경암의 경도와 소분할되는 크기에 좌우되지만, 본 Caisson의 경우 원칙으로써 80cm간격으로 깊이 80cm의 격자형 천공을 실시한다. 화약의 1공당 사용량은 현장에서 반복 시험하고 최적의 화약량을 결정하여 공당 125g을 사용하였다.

천공은 CAISSON SHOVEL 및 작업실내 Backhoe에 설치한 Drifter로 한다. 한번에 발파하는 범위는 암석의 현장 상황, 작업실내 설비의 방호등을 고려하여 결정한다.

발파에 있어서는 방폭Sheet등에 의해, 설비를 방호함과 함께 부분적으로 필요에 따라 Cable이나 설비의 철거를 한다.

날끝부 아래의 발파는 한번에 하면 발파후의 침하시에 날끝부에 큰 하중이 작용하고, 날끝부의 파손에 직결될 경우가 있으므로 발파를 수회에 나누어 실시하였다.



그림 37. 장 약

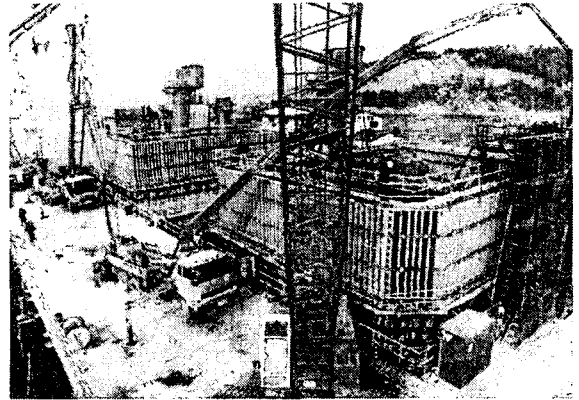


그림 39. Coenrete 타설



그림 36. 발파를 위한 천공

### 9. 구체 구축공

Caisson의 구체구축공은 E1측 제 1Lot~제 2Lot과 W1측 제 1Lot~제 3Lot는 착저 전 부유된 상태에서 시공하며(초기 구축공) E1측 제 3Lot~제 6Lot과 W1측 제 4Lot~제 8Lot는 Caisson 착저 후에 시공한다.

E1측 제 7Lot~제 10Lot과 W1측 제 9Lot~제 10Lot는 Caisson 침설 작업과 병행 작업으로 시공한다. Caisson 내의 작업은 편심하중이 발생하지 않도록 작업 중량의 균형을 고려하면서 시공해야 한다. 구체구축시 Concrete 1개 Lot 타설고는 대략 4m 정도이다. 또한 Caisson의 단면은 비교적 일정하게 구성되므로 표준단면으로 구성된 Sliding Form을 사용하였다.



그림 38. 거푸집 조립

### 10. 의장설비공

Pneumatic Caisson에서의 의장(纒裝)이란 Air Lock, Shaft, 거푸집, 거푸집 지보공, 비계 등 Caisson에 장착할 설비 등의 준비를 말한다.

Caisson의 주요 설비에는 토사반출 및 장비 투입을 위한 Material Lock, 대기압 상태로 작업실내 확인 및 조정을 위한 Capsule Lock, 작업원의 이동을 위한(작업원이 Caisson 작업실에 들어갈 때는 Man-Lock에서 가압을 하며 작업 후 나올 때도 여기서 충분한 감압을 실시한다.) Man Lock 등의 의장설비로 구성되어 있으며 재압설비로 응급조치를 위한 Hospital Lock이 있다.

그 외의 설비로는 조명설비, 전력 공급을 위한 전력설비, 작업실내에 압축공기를 불어 넣어 주는 송기설비, 굴착된 토사를 밖으로 배출해 주는 배토설비와 급·배수설비, 하중수설비, 안전 및 통신설비 등으로 구성되어 있다. 여기서 전력설비, 송기설비 등의 설치에 E1은 Yard 작업대에 인접해서 Jacket 작업대를 설치하여 그 위에 가설비를 배치한다. W1의 경우는 현장의 토질조건 및 공정으로 인해 Yard 작업대 설치가 곤란하기 때문에 SEP-Barge를 사용해 그 위에 설비를 배치하였다.

각 Special Shaft 및 필요 본수의 Shaft는 육상 제작하여 각각 Caisson 운반 전에 Yard에서 의장하고 각 Lock은 Caisson 예항 후 굴착 전에 하며 침하마다 순차적으로 Shaft의 이음내기를 한다. 또한 Blow Pipe, 전선 및 계측 Cable 등은 Caisson의 침하에 맞춰 이음내기하거나 송출한다.

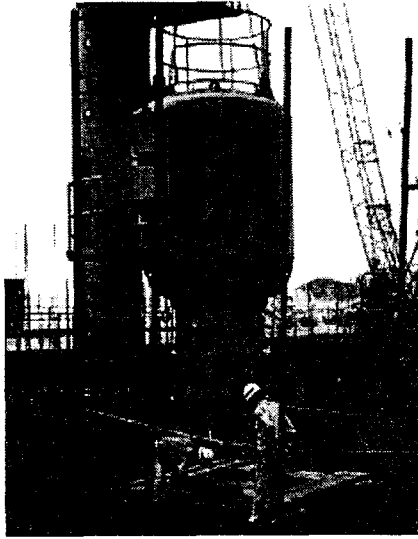


그림 40. Man Lock

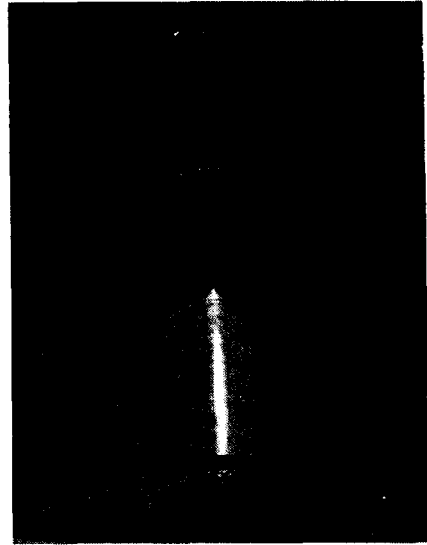


그림 41. Capsule Lock

또한, 송기용 의장설비는 조위를 Real Time으로 계측하여 작업실내에 필요한 압축 공기의 양을 산정하여 자동으로 송기한다. 인력조작을 배제하고 조위에 연동하는 자동송기 System을 적용함으로써 안정성 및 정밀성을 향상 시켰다.

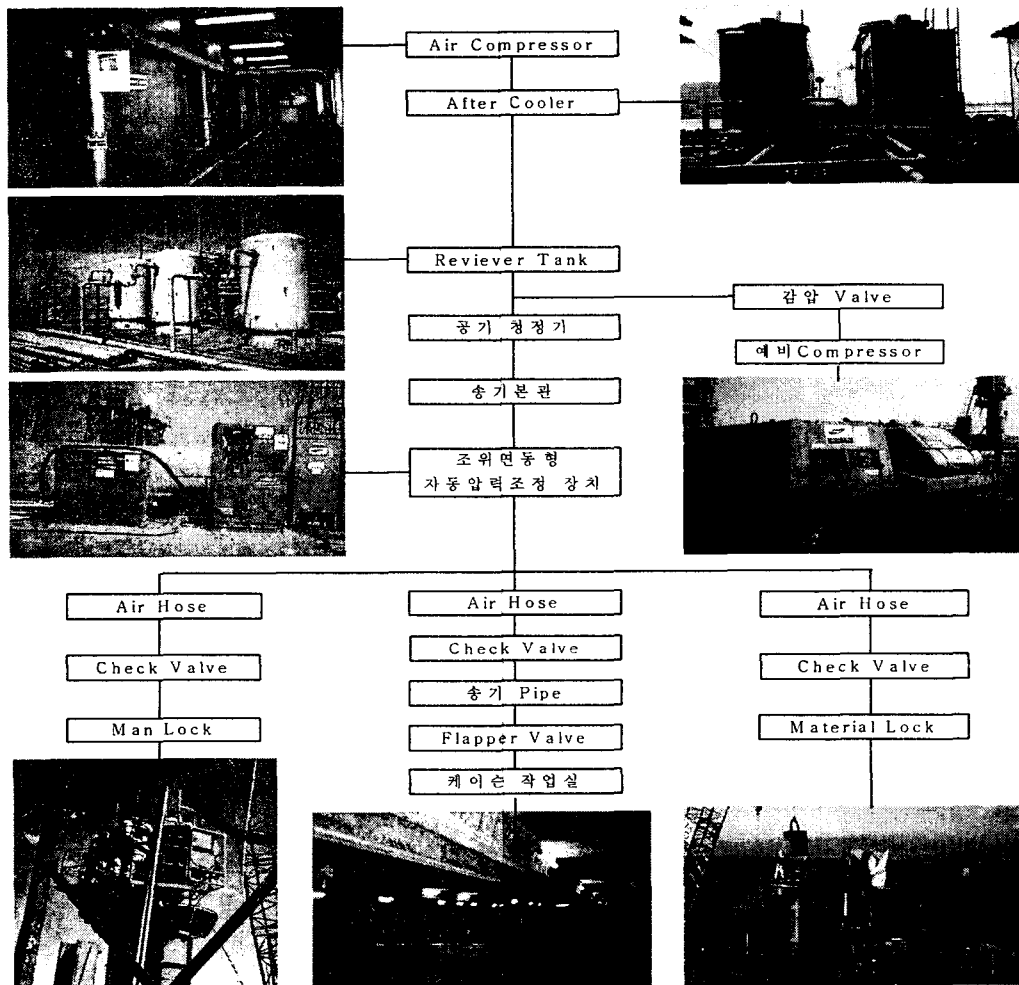


그림 42. 송기설비 System

## 11. 계 측

본 Pneumatic Caisson 공사에서는 원격조정실과 함께 Micro Sec 단위의 Real-Time 계측 System 및 함내 감시용 Monitor를 갖추어 즉각적으로 Caisson의 침하굴착 거동을 확인하고 대처할 수 있도록 하였다.

각각 Caisson 제작시 계측 Sensor를 부착한 후 초기 착저시부터 최종 침하 완료까지 중앙조정실에서 필요한 Data를 수집, 분석하여 시공관리에 활용한다. 초기 착저시의 위치, Caisson의 자세, 반력, 재하하중, 침하량, 함내기압, 유해가스 등을 계측하여 시공 Feed Back함으로써 안정성 및 정확성을 높였다.

### 11.1 계측 항목

주탑 Caisson은 총 18m \* 폭 47m \* 높이 43m(W1은 42.5m)로 대형이고 해상 조건 등 시공 환경에도 어려움이 따르며 최대 작업 기압도 3.7kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 높다. 따라서 전 시공 과정에 있어 다음과 같은 정보를 얻는 것은 매우 중요하다.

#### 11.1.1 Caisson의 자세(姿勢)

Caisson의 굴착침하의 정밀도를 나타내는 것으로 모두 6개의 자유도를 갖는다. 그러나 굴착 침하시 현저한 변위는 연직변위와 2개의 수평축방향의 회전 변위 임으로 이에 대해서만 측정한다.

#### 11.1.2 Caisson에 작용하는 외력(外力)

연직 방향의 힘 : Caisson의 자중, 수하중, 공기압, Caisson 날끝부 반력, Caisson 주변 마찰력

수평 방향의 힘 : 수평 방향 유효 토압, 수평 방향의 수압

#### 11.1.3 함내 작업 환경

Pneumatic Caisson이 무인굴착식이긴 하지만 발파 등의 경우 작업자가 함내에 들어가야 하는 경우가 있다. 이 때 가장 중요한 것은 공기압으로 볼 수 있으며 작업실에 가하는 공기압은 작업실 바닥의 수압과 평형을 이뤄야 하므로 외측 수위와 밀접한 관련이 있다. 따라서 공기압 관리를 위해 공기압 측정과 조위 측정이 필요하다.

## 11.2 계측기

### 11.2.1 경사계

Caisson의 기울음을 측정기 위한 장비로 2방향의 기울음을 측정기 위해 2개 1조로 설치되었다. 설치 위치는 Caisson 천정 슬래브의 현치부로 매립되는 Sensor이므로 유사시 보수가 불가능하다.

따라서 그 중요성에 비추어 예비로 1조를 추가 매립 설치하였다.

### 11.2.2 침하계

Caisson의 침하 정도를 측정하기 위한 장비로 설치 위

치는 Jacket 작업대의 주정보이다.

본 현장에서 사용된 침하계는 Wire식 침하계로 Drum에 감긴 Wire를 기준 위치에서 침하 물체에 연결해 돌로써 침하시 Drum의 회전각으로 침하 정도를 확인한다.

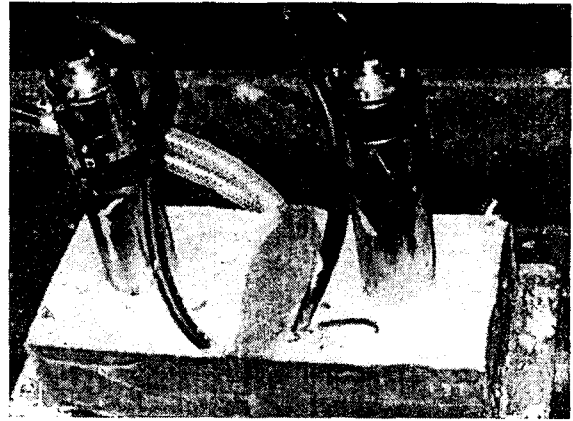


그림 43. 경사계

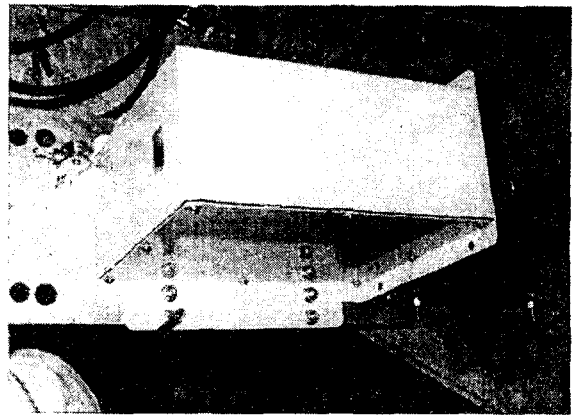


그림 44. 침하계

### 11.2.3 조위계

조위를 측정기 위한 장비로 Caisson의 Jacket 작업대 Leg에 부착한 Strannier관에 삽입함으로써 설치 하였다. 측정원리는 일반 수압계와 동일하게 Diaphragm에 붙어 있는 변형계가 조위 변동에 따른 수압변화에 반응하는 것을 측정하는 것이다. 본 현장에서는 조위차가 특히 크므로 Caisson 작업실에 연속적으로 기압 조절이 필요하다. 따라서 Mass Controller에 연결하여 자동적인 기압조절을 실시 하였다.

### 11.2.4 작업실내 기압계

작업실내의 기압을 측정기 위한 장비로 함내 기압은 작업자의 안전에는 물론 Caisson의 안정에도 매우 중요한 항목이다. Caisson의 자중, 수하중등의 연직 침하력에 저항하는 저항력 중 작업실내기압은 큰 반력을 제공한다. 따라서 공기압이 작아지면 Caisson이 침하하거나(배기침하공법) 공기압이 커지면 부상하기도 한다.

측정원리는 일반 수압계와 동일하게 Diaphragm에 붙어

있는 변형계가 기압 변동에 따른 공기압의 변화에 반응하는 것을 측정하는 것이다. 설치위치는 작업실내 천정부이다.

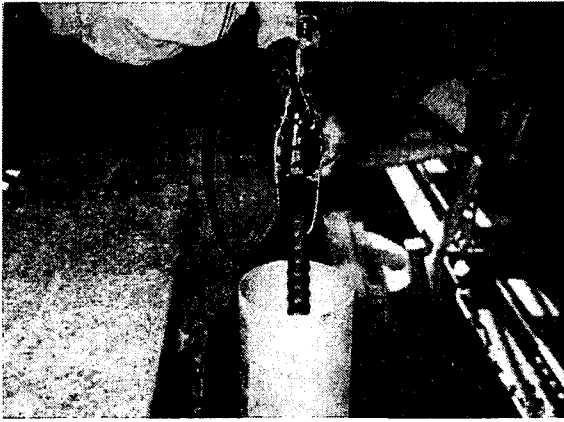


그림 45. 조위계

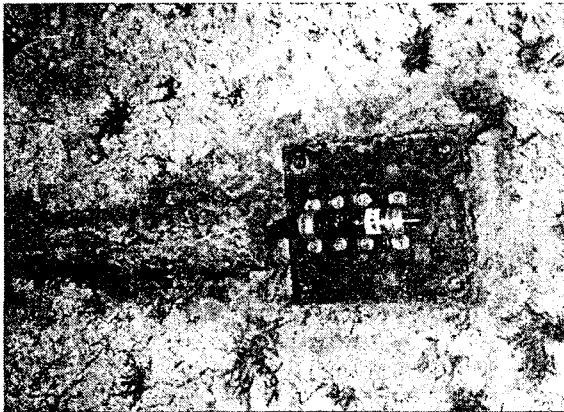


그림 446. 작업실내 기압계

### 11.2.5 반력계

Caisson 날끝부의 선단에 반력계를 설치하여 시공단계별 지지지반의 지지력을 산출하여

Caisson의 경사 조정 등을 위하여 굴착 위치 및 방법을 결정시에 이용하였다.

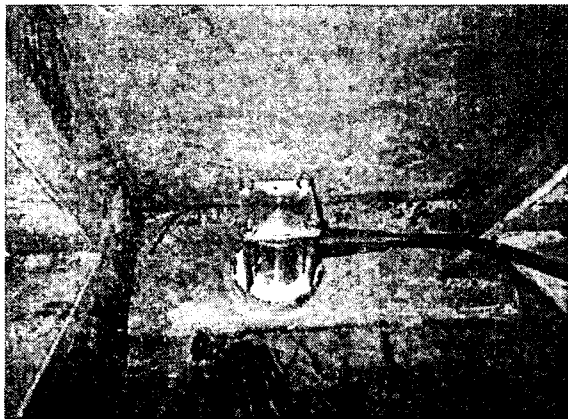


그림 47. 반력계

## 12. 평판재하시험

Caisson을 설계심도까지 침하 시킨 후 지지반력계수를 측정하기 위해 평판재하시험을 수행한다.

### 12.1 시험방법 및 측정 방법

재하시험은 도로교 시방서의 공기케이슨의 평판재하 시험방법에 따라 실시하였으며, Caisson 천정부를 재하 반력 장치로 이용하여 케이슨 작업실내에서 평판재하 시험을 시행하였으며, 고기압의 상태에서 시험 시간의 제약을 받으므로 급속 재하시험으로 실시하였다.



그림 48. 지지지반 평판재하시험

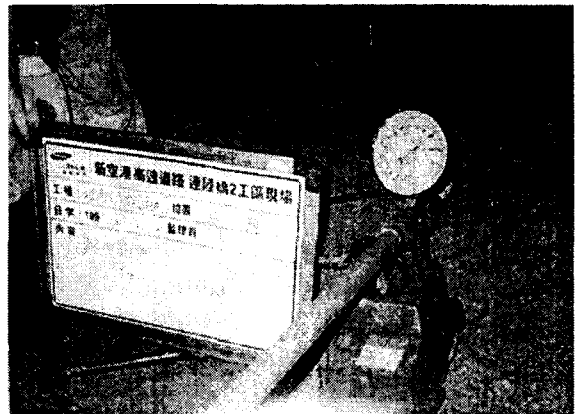


그림 49. 최대시험하중 500tonf/㎡

## 12.2 최대 설계반력 및 최대 재하하중

표 7. 최대 설계반력 및 최대 재하하중

구분	시수	최대 설계반력 (tonf/㎡)	최대 재하하중 (tonf/㎡)	비율 (%)	
상 시	3	115.92	347.80	114.82	344.5
지진시	2	239.30	478.60	223.73	447.5
폭풍시	2	136.48	272.90	134.66	269.3

### 12.3 지지력

E1, W1 Caisson의 측정위치 모두에서 시험하중 500tonf/m'의 범위 내에서 항복지지력이 나타나지 않았으며, 지반반력계수는 설계치 이상으로 나타났다.

### 13. 속채움 콘크리트

작업실 기기의 해체, 철거를 완료해 작업실내와 지지지반면의 청소가 끝난후 속채움 Concrete(1,637m<sup>3</sup>)를 작업실내에 타설한다. 속채움 Concrete는 Caisson 구체 내에 미리 설치한 Concrete 압송관(∅125)을 통하여 타설한다. 이때 Caisson 내에는 공기가 갇혀 있으므로 Concrete가 작업실에 차올라 오면 함내 공기압이 높아지므로 적당히 배기하여 공기압을 조절하여야 한다. 기압이 너무 높아지면 Caisson이 부상할 우려가 있으며 반대로 너무 낮으면 용수를 초래해 Concrete 안에 물이 혼입될 우려가 있다.

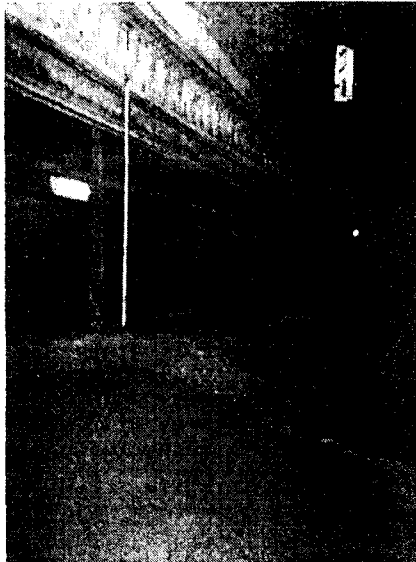


그림 50. 속채움Concrete 타설전경



그림 51. Shaft부 충전상태

Concrete가 어느 정도 작업실내에 충전 될 때까지는 작업원이 작업실에 들어가서 Concrete 타설을 실시한 후에 작업원을 함외로 대피시킨다. Concrete가 작업실 내에 충전했다는 것은 Man Shaft 내에서 확인할 수 있다. 이와 같이 Concrete가 작업실 천정까지 충전된 것을 마지막까지 확인한 후, Valve를 부착한 Blow Pipe를 단계적으로 개폐하면 분출하는 공기를 따라 Concrete가 Blow Pipe쪽으로 빨려나온다. 콘크리트의 충전완료는 Blow Pipe에서 분출하는 공기와 함께 처음에는 물, Mortar, 마지막으로 조골재가 섞인 Concrete가 분출하는 것으로 확인할 수 있다.

### 14. 결론

국내에서 최초로 시도되는 대규모,대심도 뉴메틱케이슨 기초를 시공함에 있어서 철저한 공정관리로 주탑 기초공형식의 변경에도 불구하고 설계와 시공을 일부 병행하여 당초 주탑 기초공사 완료 예정 시점인 98년6월보다 2개월빠른 98년4월에 Caisson 2기의 침하굴착 작업을 완료 하였다.

또한, 무인굴착 시스템의 적용 및 자동 감압장치의 적용으로 잠함병(잠수병)발생이 전혀 없었다.

향후, 본 공사실적을 토대로 국내 장대교량의 기초공법으로 적용되기를 기대한다.