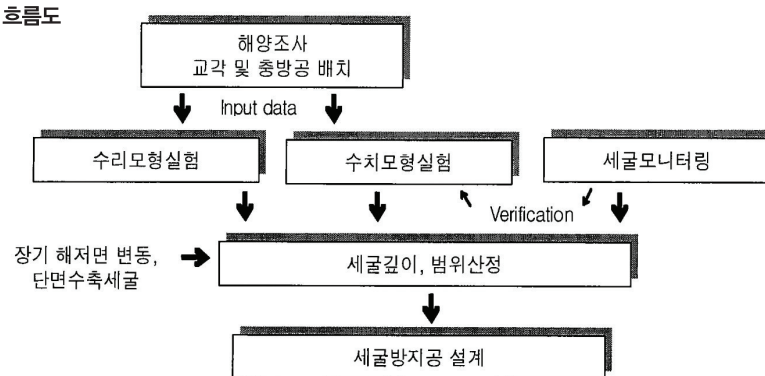


## 제4절 | 세굴방지공

### 4.1. 설계 현황

구조물 주위에 발생한 세굴은 교량 기초의 안정성에 심각한 영향을 미치고 때로는 교량을 붕괴시키기도 한다. 세굴방지공의 목적은 교각 및 충돌보호공 주변의 세굴 방지 대책을 제공하는데 있다. 세굴방지공 설계와 평가를 위하여 수치해석(수치모형시험), 세굴률실험, 수리모형실험(고정상 및 이동상), 현장 모니터링을 실시하였다.

#### > 세굴조사 흐름도



시공성, 재료구득의 용이성 및 경제성 등이 우수한 사석쌓기공을 적용하였으며, 세굴방지공을 적용한 교각은 아래와 같다.

- 사장교 및 선박 충돌방지공 (W1-W3 및 E1-E3)
- 충돌방지공이 있는 접속교 교각 (W4 및 E4)
- 충돌방지공이 없는 접속교 교각 (W5-W10 및 E5-E10)
- 파일캡 형식의 고가교 교각 (W11-W19 및 E11-E19)

기본적인 해양조사와 함께 해수 흐름, 퇴적, 부유사 이동, 항주파에 대한 3차원 수치모형 실험을 실시하였다. 또한 세굴특성(세굴심도, 세굴범위 등) 파악과 세굴방지공 설계를 위하여 별도의 수리모형실험을 수행하였다. 수리모형실험에서는 해저면 조건, 충돌방지공의 배열 및 유무, 세굴방지공 등을 고려하였다. 세굴방지공의 유지관리와 관련하여 세굴에 가장 취약한 부분에 대하여 10,000년 빈도 재현조건으로 추가적인 수리모형실험을 실시하여 세굴방지공의 적합성을 검토하였다.

총 세굴심은 장기 해저면 변동, 단면수축세굴, 국부세굴의 합으로 결정되는데, 국부세굴심은 CSU 공식과 3차원 수치모델에 의한 결과 중에서 3차원 수치모델에 의한 결과를 사용하였다.

#### > 100 년 빈도 총 세굴심

대상 교각		서측 고가교					동측 고가교		
		W11	W20	W25	W55	W80	E11	E20	E47
장기 해저면 변화		평형							
단면 수축 세굴		0.1					0.2		
국부세굴	CSU 공식	2.4	3.3	2.9	2.7	2.4	2.2	2.7	1.9
	Flow-3D	조류	2.9	3.3	3.6	3.2	1.9	2.2	1.8
		조류 + 파랑	4.0	4.0	4.2	3.6	2.4	2.9	2.9
	SRICOS	1.4~2.9					0.0~0.6		
총 세굴심		4.1	4.1	4.3	3.7	2.5	3.1	3.1	2.3



방법			서측 사장교			서측 접속교	
			W1	W2	W3	W4	W6
장기 해저면 변화			평형 상태				
단면수축세굴	Laursen(1960, 1963)		단면수축의 영향은 FLOW-3D 결과에 포함되어 있음				
국부세굴	CSU formula		19.1	19.0			9.6
	FLOW-3d	조류	8.8	7.7			4.5
		조류+파랑	깊은 수심으로 인해 파랑의 영향은 무시할 정도임				5.1
총 세굴심(세굴범위)			8.8(46)	7.7(44)			5.1(7)



> 모형 수조 전경



> W1 교각



> W2 교각

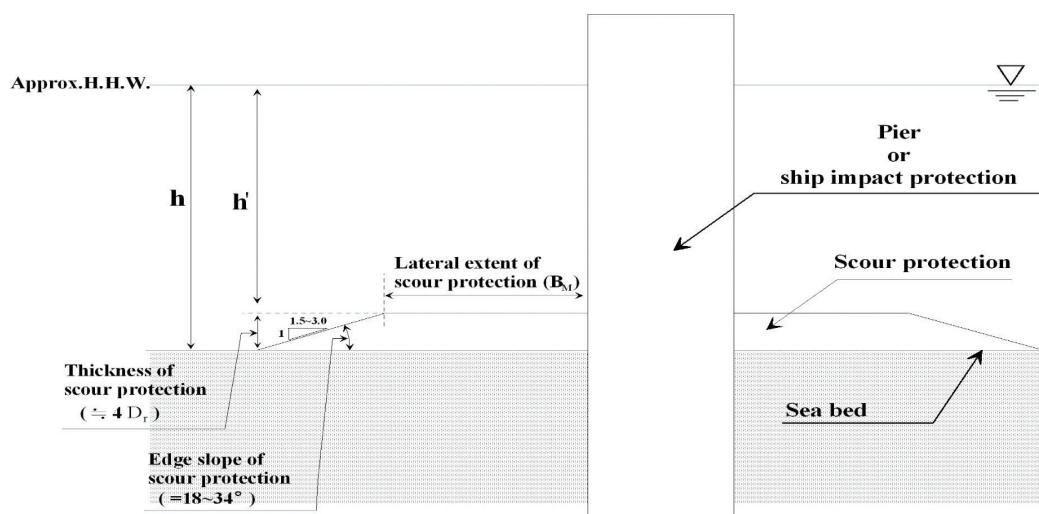
수리모형실험을 통하여 최대유속이 발생하는 낙조류일 때, W1 교각의 최대세굴심은 약 4.3m로 산정되었다. 교량의 하부구조물은 수중에 위치하므로 안정상태를 육안으로 확인하기가 쉽지 않아 정기적인 관측을 통한 별도의 모니터링 계획을 수립하였다.



세굴방지공의 설계기준은 다음의 설계 기준서에 제시된 내용을 참고로 하였다.

- 항만 및 어항 설계 기준 (해양수산부, 2005)
- 도로 설계 기준 (건설교통부, 2005b)
- 하천 설계 기준 (건설교통부, 2002)
- Shore Protection Manual, Vol. II (CERC, 2001)
- Hydraulic Engineering Circular-11 (FHWA, 1989)
- Hydraulic Engineering Circular-23 (FHWA, 2001)
  - CERC : U.S. Army, Coastal Engineering Research Center
  - FHWA : U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration

세굴방지공은 교각과 선박충돌방지공의 안전성 확보를 위해 수치 및 수리모형 실험 결과를 반영하여 시공 범위를 결정하였다. 사석의 두께는 시공범위 내에서 3~4 Dr으로 하며, 사석의 안정성을 고려하여 방지공의 사면 경사는 18~34° 즉 1:3~1:1.5로 유지하였다.



#### > 세굴방지공 단면도

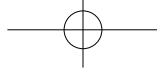
Isbash(1936)의 공식을 이용하여 유속이 강한 서측 사장교(W1-W3)와 접속교(W4, W6)의 사석 크기 범위를 15~51 cm로 계산하였다.

#### > 세굴방지공을 위한 사석의 크기

대상 교각	수심평균유속 (m/s)	결과	
		무게 (ton)	직경 (cm)
W1	2.49	9.56 x 10 <sup>-2</sup>	41
W2-W4	2.79	18.92 x 10 <sup>-2</sup>	51
W6	1.52	0.49 x 10 <sup>-2</sup>	15

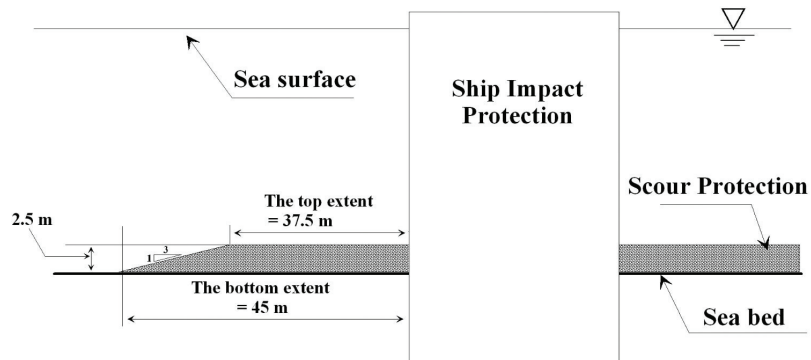
교각별 피복석의 크기는 외력 조건과 설계 조건을 고려하여, W1-W4, E1-E4 구간(WG1, WG2, EG1, EG2)에서는 흐름에 의해 계산된 사석을 그대로 적용하고, W5-W19, E5-E19 구간(WG3, WG4, EG3, EG4)에서는 파랑에 의해 계산된 피복석을 사석으로 적용하였다.

사석 크기(Dr)는 시공성을 고려하여 W1-W4, E1-E4 구간(WG1, WG2, EG1, EG2)의 사석 입경을 50~60 cm의 범위로, W5-W19, E5-E19 구간(WG3, WG4, EG3, EG4)의 사석 입경을 30~40 cm의 범위로 적용하였다.

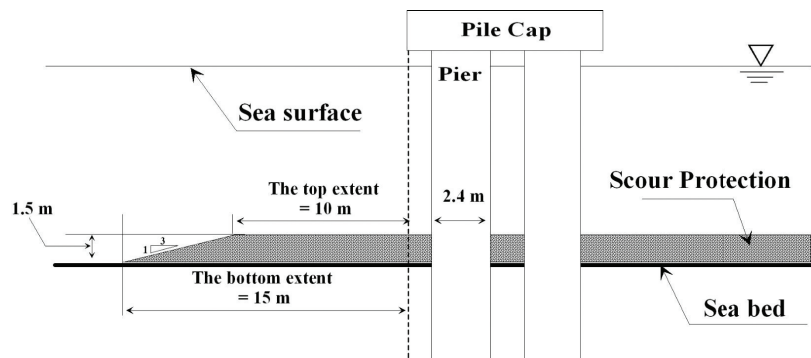


시공성을 고려하면, 제시된 입경 분포를 정확하게 유지하기 어려우므로 제시된 안정 사석 입경을 중심으로 세립 입경과 조립 입경이 고루 포함되도록 사석을 포설하여야 하며, 방지공의 안정성을 위해 방지공 상단에 큰 사석을 위치시켜야 한다. 하부(기초) 사석 상부의 피복석은 원칙적으로 2층을 표준으로 하고 있으므로 AASHTO(1999)의 최대 사석 입경을 고려하여, 최대 사석의 크기는 W1-W4, E1-E4 구간에서 70 cm, 그 외 구간에서 50 cm로 결정하였다.

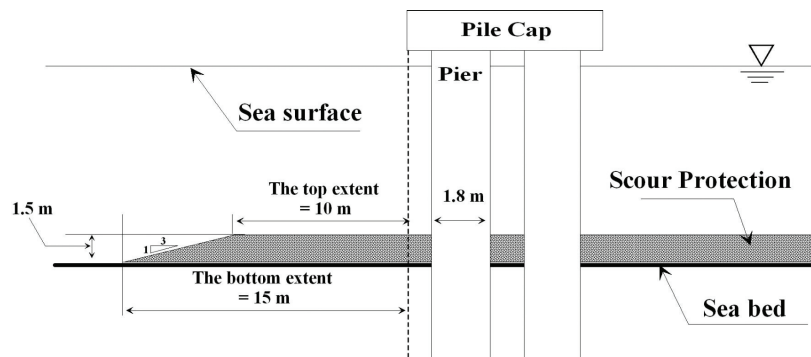
사석의 안정성 확보를 위해, 사석의 두께는 교각별 사석 크기 및 설계 조건을 고려하여 결정하였다. 따라서 W1-W4, E1-E4 구간(WG1, WG2, EG1, EG2)에서는 2.5 m( $\approx 4D_r$ ), W5-W19, E5-E19 구간(WG3, WG4, EG3, EG4)에서는 1.5 m( $\approx 4D_r$ )가 적절하다. 사석의 수평 범위는 최악의 조건하에서 수행된 수치 및 수리모형실험 결과를 기준으로 결정하였다. 그러나 수치 및 수리 모형실험은 일부 교각에 한하여 수행되었으므로 실험을 실시하지 않은 교각에 대해서는 외력 및 설계조건을 고려하여 결정하였다.



(a) WG1, WG2 and EG1, EG2



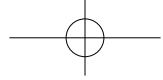
(b) WG3 and EG3



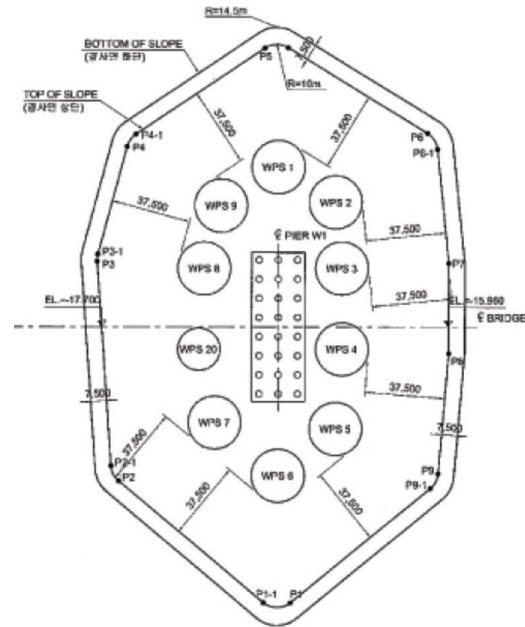
(c) WG4 and EG4

#### > 대상교각별 세굴방지공 단면

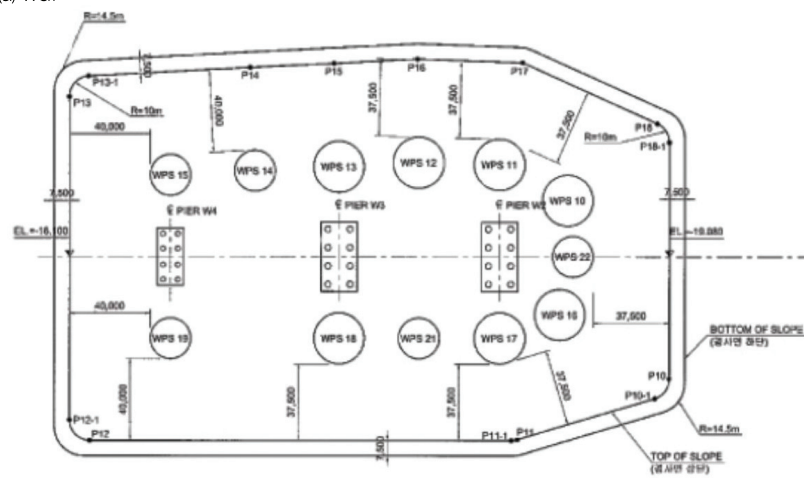




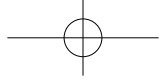
> 대상 교각별 세굴방지공의 평면도(단위: m)



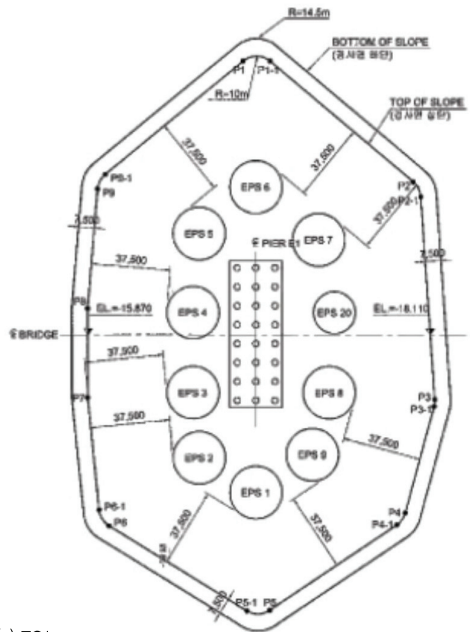
(a) WG1



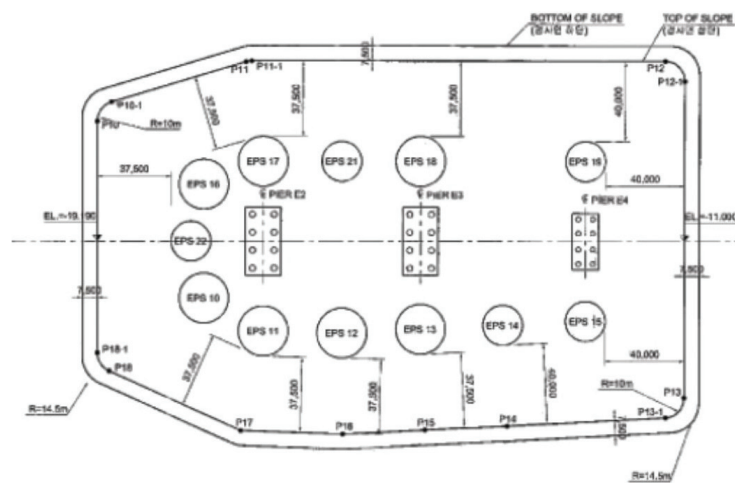
(b) WG2



> 대상 교각별 세굴방지공의 평면도(단위: m)

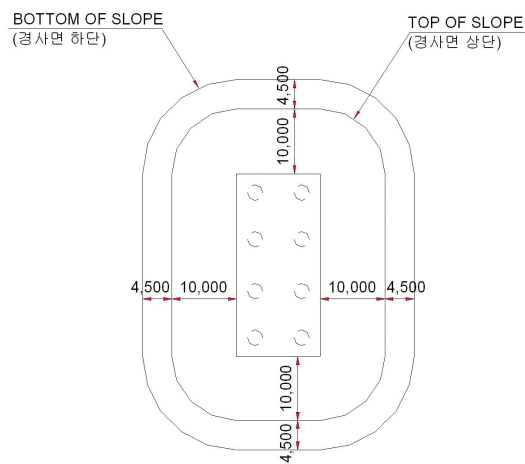


(c) EG1

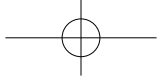


(d) EG2

> 대상 교각별 세굴방지공의 평면도(단위: m)



(e) WG3, WG4 및 EG3, EG4

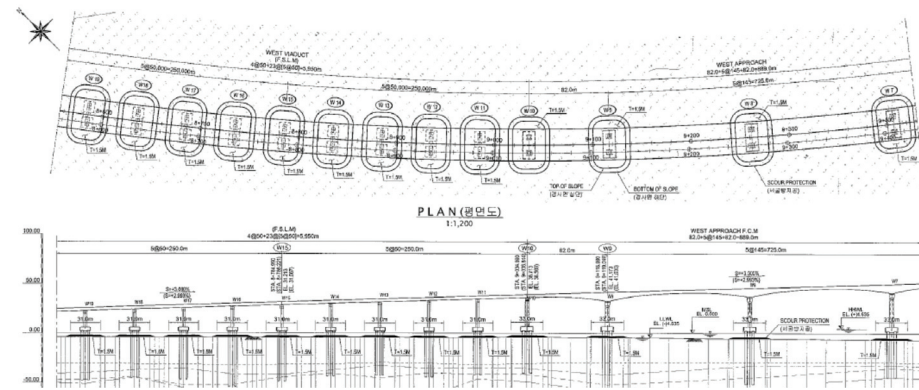


## 4.2. 시공

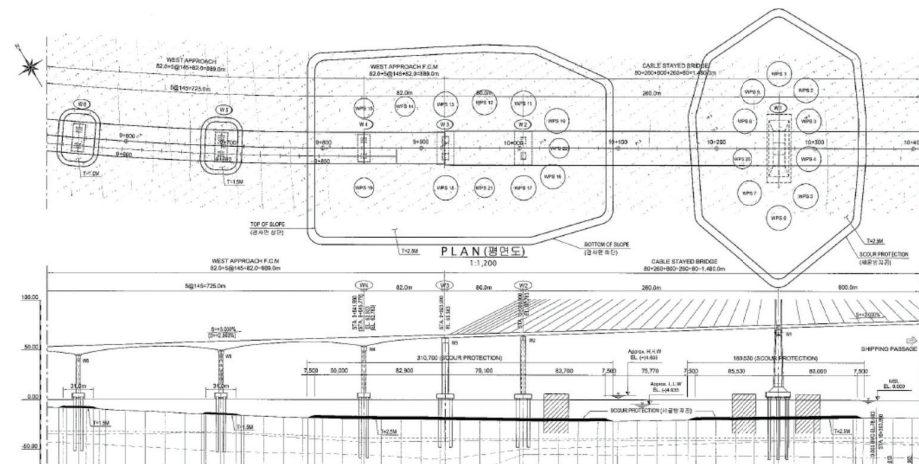
### 4.2.1 시공 단면 및 물량

세굴방지공의 시공오차는 다음과 같다.

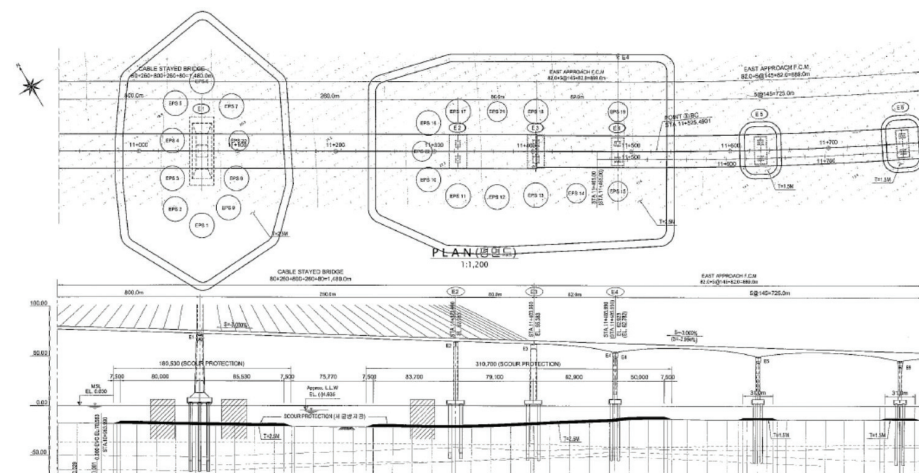
- 높이 :  $\pm 30$  cm
- 폭 : 20 cm 이하



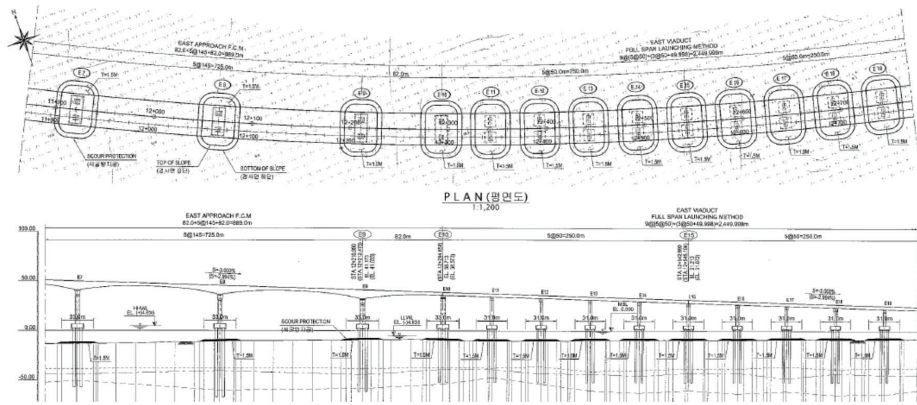
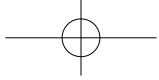
#### > 서측 W19~W7 구간



#### > 서측 W6~W1 구간



#### > 동측 E1~E6 구간



> 동측 E7~E19 구간

> 공사물량

단위 : m³

구분		W1 / E1	W2~W4 / E2~E4	W5~W19 / E5~E19	계	비고
서측 구간	상부사석	40,767	64,713	25,235	130,715	
	하부사석	37,470	61,401	14,190	113,061	
	계	78,237	126,114	39,425	243,776	
동측 구간	상부사석	40,767	64,713	25,235	130,715	
	하부사석	37,470	61,401	14,190	113,061	
	계	78,237	126,114	39,425	243,776	
합계	동측 뒷채움	57,120	10,306	—	67,426	
	상부사석	81,520	129,426	50,470	261,416	
	하부사석	74,940	122,802	28,380	226,122	
	계	213,674	262,692	78,850	555,216	

작업제한 조건은 다음과 같다.

- 풍속 : 10 m/sec 이하
- 조류 : 2.5 Knot 이하
- 파고 : 1.0 m 이하
- 시정 : 1.0 km 이상

> 투입장비

장비명	제원 / 규격	수량	작업내용
백 호 우	1.0m³	5	사석 적치 / 투하
FLOATING BARGE	5000P	2	사석 운반
	2700P	2	사석 운반
SETTING BARGE	3000P	1	현장 SETTING(컨베이어설치)
	2000P	1	현장 SETTING
예 인 선	1300HP	2	FLOATING BARGE 사석 운반
	600HP	1	SETTING BARGE ANCHOR 작업
통 선	99인승	1	인력수송(충보공 공통사용)
잠수장비	식	1	잠수장비, 교신장비 등
발 전 기	75KW	2	야간 조명 및 생활전기





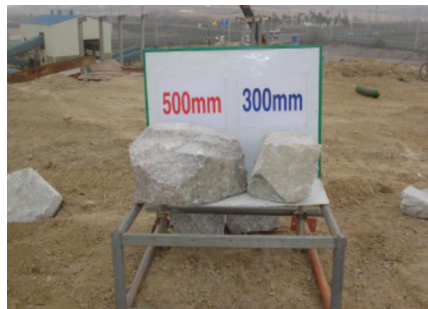
#### 4.2.2 사석 생산 및 품질관리

사석은 미립분 제거를 위하여 Jaw Crusher 하부에 Screen을 설치하여 생산하고 정기적으로 스크린의 이상 유무를 점검하였다. 미립분을 별도 배출하기 위하여 컨베이어 이송장치를 설치하여 미립분의 혼입을 방지하였고, 생산지에 표준규격의 상부사석을 비치하여 소할 작업시 작업 기준을 정립하였다. 소할 작업 후 규격별로 옮겨 쌓고, 운반된 사석은 투하하기 전 및 투하 후에 규격을 확인하였다.

사석이 생산 및 선적은 영종도 삼목2도로 공사위치인 인천대교까지의 거리는 약 34km로 운반 Cycle Time을 산정하면 다음과 같다.

- 1일 선적량 3,000m³.
- Barge 5,000P=1600m³, 700m³/대 기준 선적시간 4시간이므로 선적시간 5시간.
- 운반속도 7.2 Km/hr기준 약 5시간.
- 회항속도 9.0 Km/hr기준 약 4시간.
- 투하시간 8시간(평균)
- 기타시간 2시간(선적대기, 투하대기 등)

따라서 1회 운반 Cycle은 24시간으로 산출 되었으며, 무의도와 영종도 사이는 해저면 레벨이 낮기 때문에 시간 때를 고려하여 운행을 하였다.



> 사석 생산 전경



> 사석 규격 확인(300mm~500mm)



> 사석 규격 확인(500mm~700mm)



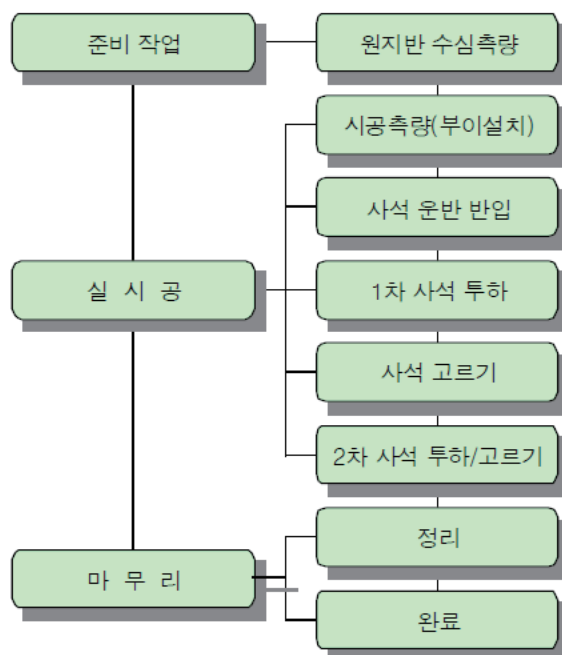
> 사석 선적 전경





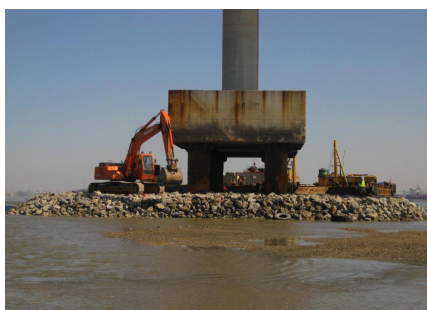


#### 4.2.3 주요 공종별 시공



##### > 시공 흐름도

사석 투하는 백호우, 슈트, 컨베이어 등을 이용하여 진행하였다. 백호우를 이용한 투하는 해상에서 직접 기초 사석을 투하하므로 조류의 영향에 의해 투하지점 외부에 기초 사석이 투하될 수도 있으므로 사전에 유속 및 조류의 방향을 인지하여 투하하여야 하며, 가능하면 정조 전후를 이용하여 조류의 영향을 적게 받는 시간에 기초 사석을 투하하였다. PC House의 하부는 만조시 해수면이 PC House 하면 보다 수위가 높기 때문에 썰물시 해수면의 높이가 E.L=-2.0m 이하로 떨어질 때 슈트를 이용하여 투하 하였다. 충돌방지 돌핀이 설치된 사장교 구간(W1(E1)~W4(E4))의 PC House 하부, PC House와 돌핀 사이 및 돌핀과 돌핀 사이는 별도의 컨베이어를 제작, 바지선에 설치하여 사석을 투하하였다. 서측 고가교 구간의 W7에서부터 W19까지는 간조에는 수심이 0~2m로 낮다. 하부사석을 투하 후 상부사석을 투하하기 위해 사석이 선적된 바지선을 셋팅시 기 투하된 하부사석 상면에 바지선이 얹게 되므로 바지선의 밑바닥이 손상을 입을 우려가 있다. 그리하여 W7에서부터 W19까지는 PC House 하부에 하부사석을 투하 후 바로 상부사석을 투하하였다.

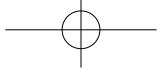


> PC House 외부 사석 투하 전경



> 고가교 W7~W19 구간 사석 고르기 완료

사석 투하시 최종적인 고르기면을 고려하여 1, 2차 투하로 구분하며 1차 투하시에는 B/H로 투하를 우선으로 하고, 사석의 규격에 따라 1차로 H=0~1.3m 구간에 0.5m 이하사석을 투하하고 고르기를 한 후, 2차로 H=1.3~2.5m 구간에 0.5~0.7m 규격의 사석을 투하하고 최종 고르기를 하였다. 잠수부를 투입하여 계획고를 확인하여 계획고가 허용오차 범위 보다 높거나 낮은 부분은, 크람셀 버켓을 사용하여 정리를 하였다.



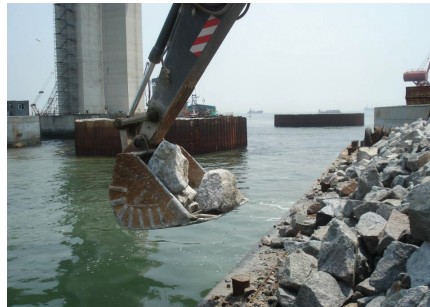
주탑 및 교각 하부에서 사석분포 상태를 파악하기 위해 음향측심기(Eco- Sounding)와 Net(줄자)를 사용하여 측량을 하였다. 충돌방지공이 설치된 사장교 W1(E1)~W4(E4)구간, 접속교 W(E)5~W(E)10구간 및 동측 고가교 E11~E19구간은 수심이 깊고 유속이 빨라 탐사장비의 접근이 어려워서 물의 흐름이 없는 정조 시간에 측량을 실시하였다. 서측 고가교 W11~W19구간은 수심이 낮아 평상시 사석투하 구간이 노출이 되어 있어 육안검사가 가능하여 광파기 및 레벨기를 이용하여 측량을 실시하였다.



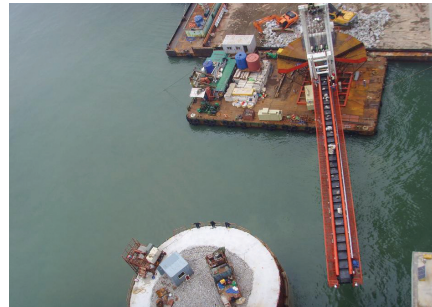
1. 시공전 수심측량



2. 사석 생산



3. 사석투하(백호)



4. 사석투하(컨베이어선)



5. 사석 고르기



6. 시공완료 전경(W11~W19)

