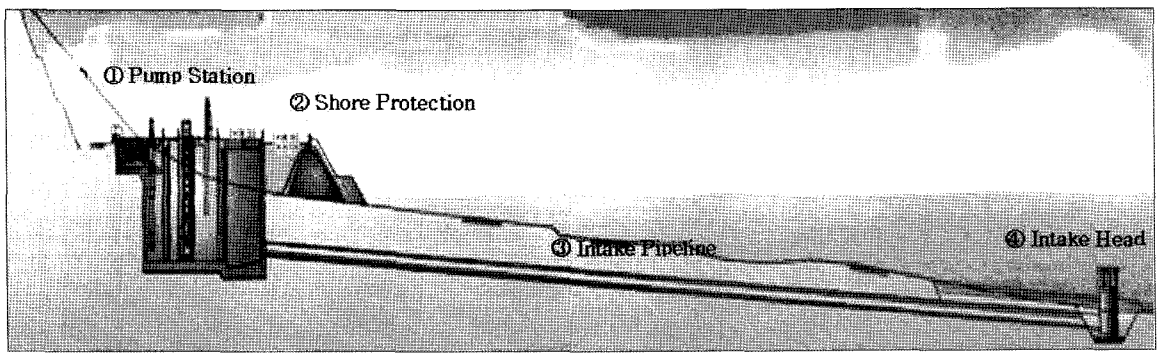
Oman SMP 시공사례에서 본 Seawater Intake 시설의 기술적 소고

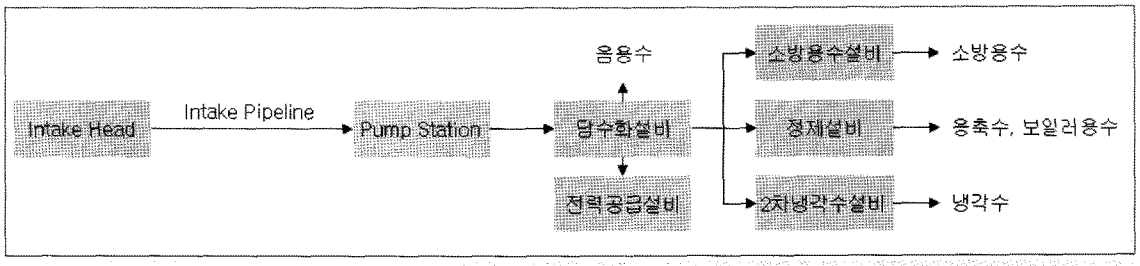
이 우 진
GS건설(주) 기술본부 SOC지원팀 과장
leewj@gsconst.co.kr

1. 서 언

〈그림 1〉과 〈그림 2〉에 나타낸 바와 같이 Seawater Intake (이하, SWI) 시설은 플랜트 내 각종 용수의 공급을 위해 인근 연안에 설치되는 시설로, 외해 저면에 Pipeline을 매설하여 저온의 해수를 취수, 담수화 과정을 거친 뒤 Pump Station을 통해 용수를 공급하는 기능을 한다. 따라서 SWI 시설은 Pipe Line을 매설키 위한 해상공사 뿐만 아니라 호안축조를 위한 연안부의 시공이 동시에 수반되므로 제체의 침하, 월파 및 Pump Station 기초부의 차수 등 다양한 기술적 문제들이 발생할 수 있어 설계단계에서부터 신중히 다뤄져야 함에도 불구하고 전체 공사비 대비 비중이 작아 상대적으로 그 중요성이 간과되어 온



〈그림 1〉 SWI 시설 개념도

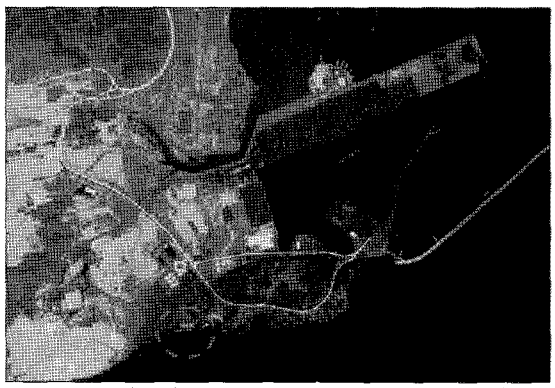


〈그림 2〉 SWI 용수공급 계통도

것이 사실이다.

특히, 송유관이나 상수도관 및 취수관로 시설을 포함하는 해저 Pipeline 시설은 항만기술자들에겐 단지 설계기준 한편을 차지하는 다소 생소한 영역이었기 때문에 그저 플랜트 공사 등의 부대토목공사로만 인식되어져 온 것이 일반적일 것이다.

당사에서 Oman 남동부의 Salalah지역(〈그림 3〉)에 공사중인 Salalah Methanol Project(이하, SMP)는 3,000MTPD(MTPD: Metric Tons Per Day)의 Methanol을 생산해 낼 수 있는 Chemical Plant 시설을 건설하는 프로젝트이다. 현재 공정이 순조로이 진행 중에 있으나, SWI시설의 시공 중 크고 작은 기술적인 어려움을 수차례 겪은 바 있어 본고를 통해 그 보강 및 개선방법을 소개하고자 한다.



〈그림 3〉 Oman SMP SWI 시설 위치 (위성사진)

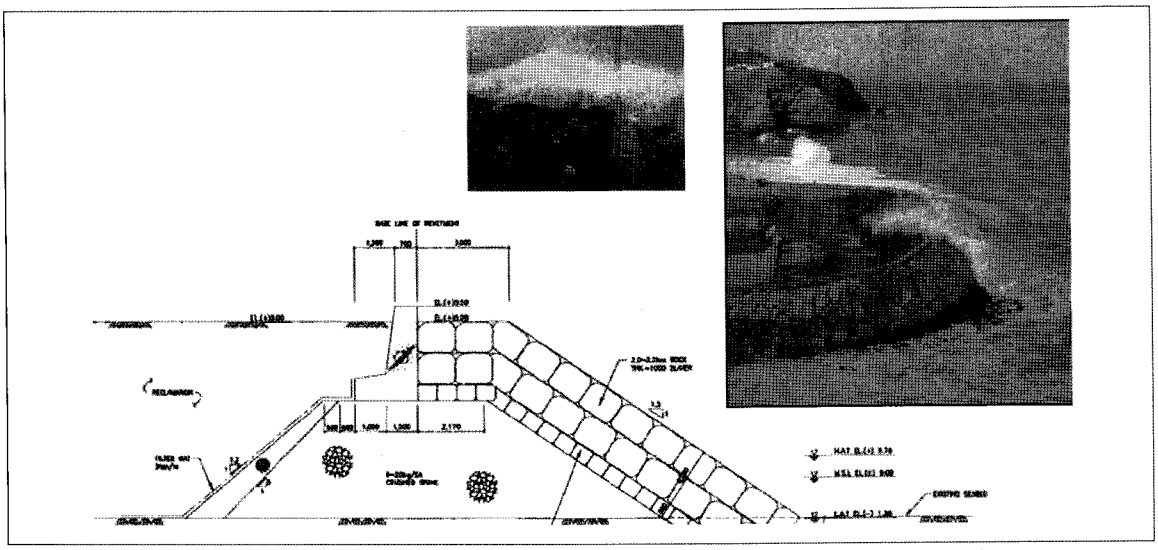
2. Shore Protection

2.1 현황 및 문제점

당해현장이 위치한 Oman 남동부의 Salalah지역은 중동에서도 독특한 몬순기후인 Khareef의 영향을 받아 4월 중순부터 5개월여 동안 습도가 높고 바람이 거세며 파고가 높은 기후특성을 갖고 있어 해상공사시 많은 제약이 수반되었다. 따라서 Khareef season 전 해상공사를 완료하기 위해 호안제체의 시공을 서둘러 마무리 짓고 배면부 Pump Station의 바닥 기초를 조성할 계획이었으나, Khareef season에 들어서자마자 Shore Protection 상부의 Parapet을 허용치 이상 월파하는 높은 파고가 지속적으로 엄습했으며(〈그림 4〉), 동시에 제체의 피복석 이탈이 관측되는 등 이상 징후가 나타나기 시작하였다.

제체의 안정성을 위협할 수 있는 상기의 징후들이 관측되자마자 시공인력들의 안전을 위해 Pump Station 기초부의 시공을 중단하고 인력을 철수시켰으며, 제체 안정성 확보를 위해 본사의 기술부서 및 설계사 관계자가 긴급 소집되어 원인 규명 및 대책마련에 나서게 되었다.

먼저 제체 안정성을 위협할 수 있는 피복석의 이탈과 관련해서 피복석의 중량에 가장 중요한 인자인 설계파고의 적정성을 검토하였다. 당해현장은 설계당시 인근의 Salalah Port 방파제에 적용된 설계파고 - 재현빈도 100년, 수심 CD(-)18.0m 지점에



〈그림 4〉 Shore Protection 단면도 및 월파 사진

서의 심해파고 7.7m로부터 얻어진 Hs=2.26m - 를 적용하였다. 그러나 시공단계에서 배면의 차수공사를 위한 공간 확보를 위해 호안의 위치가 당초보다 해측으로 5m가량 진출해 설치되는 등 비록 근접한 위치이긴 하지만 지형적인 변수가 작용했을 것으로 판단하고, 본격적인 Khareef season에 접어들기 전에 제체의 보강을 마무리 짓기 위해 노력하였다.

2.2 보강방안

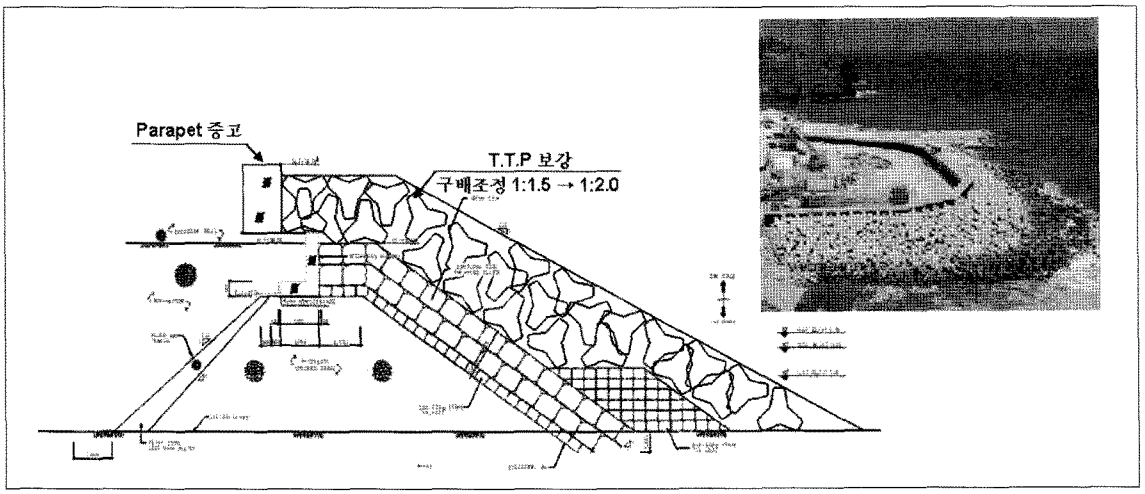
기적용된 설계파고(Hs=2.26m) 하에서는 이론적으로 월파 또는 피복석의 유동이 불가함에 따라 관측된 파고를 역산하여 설계정수를 재산정하였다. 그 결과 월파제어를 위한 Parapet을 3m가량 증고하였고, 소파 및 피복석 보강을 위한 T.T.P의 규격을 주파향에 10톤, 그 외 지역에는 5톤으로 계획하였다. 또한 파의 처오름 높이를 완화시키기 위하여 T.T.P의 사면경사를 당초 1:1.5에서 1:2.0으로 변경 적용하였다(〈그림 5〉).

이후 본격적인 Khareef season중에도 제체를 월파하는 현상은 재현되지 않았으며, 기존의 피복석 상부에 시공된 T.T.P 역시 블록간 자리잡음으로 인해 일부 소폭 침하한 것 외엔 별다른 이상 징후를 보이지 않아 충분히 안정화되었다고 판단하고 있다.

2.3 제안사항

항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2005)에 의거, 경사면의 피복석 또는 블록의 안정중량 산정시 일반화된 Hudson식에 적용하는 표준 설계파고는 파고가 큰 것부터 전체 파랑갯수의 1/3까지의 파고를 평균한 값인 유의파($H_{1/3}$)이며, 통상적으로 별도의 검토 없이 이에 준하는 설계를 해온 것이 사실이나, 당해 과업지역과 같이 특정기후 및 지형으로 인해 이상파고가 발현될 가능성이 있는 지역에 대해서는 Shore Protection Manual(U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1984; 이하 S.P.M)에서 제시하고 있는 바와 같이 $H_{1/10}$ 또는 $H_{1/20}$의 사용에 대해서도 면밀히 검토해 볼 필요가 있다.

S.P.M의 원문을 인용하면 다음과 같으며, 실제 금

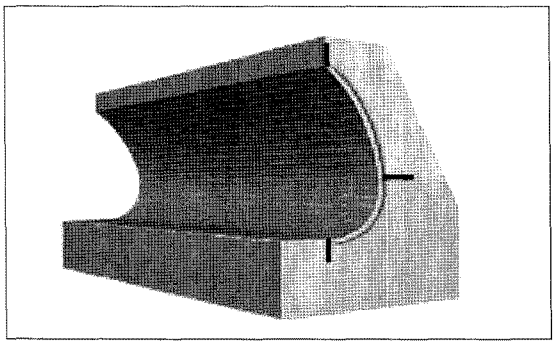


〈그림 5〉 Parapet 증고 및 T.T.P 보강된 Shore Protection 단면도 및 사진

회 과업에 $H_{1/10}$을 설계당시에 적용하였다면 피복석의 중량이 2배 이상 커졌으므로 피해상황은 현저히 달랐을 것으로 판단된다.

"..For flexible structures, such as rubble-mound or riprap structures, the design wave height usually ranges from H_5 to the significant wave height H_s. H_{10} is currently favored for most coastal breakwaters or jetties."

또한 본 과업에서처럼 월파를 제어하기 위해 Parapet을 충분히 증고할 수 없는 여건이라면, 〈그림 6〉과 같이 마루높이를 낮게하여도 월파제어 효과가 우수한 '월파 제어형 곡면 호안' 의 적용 또한 고려해 볼 수 있다. 단, 곡면부에 작용하는 양압력이 상당히 클 수 있고 천단형태가 충격에 취약한 단점이 있으므로 충분한 검토가 선행되어야 한다.



〈그림 6〉 이중곡면 반파호안

3.1 현황 및 문제점

취수가 시작되는 Intake Head와 이를 육측의 Pump Station까지 연결하는 Pipeline (GRP Pipe D1,800 2 Line)을 시공 완료한 후 차년도 Khareef Season 전 Diver를 동원하여 과업구간을 조사한 결과 Pipeline 전반에 걸친 Joint부의 파손으로 인해 다량의 되메움재가 관내로 침투되고 있었다. 되메움 상부 피복석 또한 일부가 크게 유실되어 있는 등 많은 문제점이 발견되었다.

Pipe의 파손형태는 크게 (a) Joint간 과도한 Gap 발생, (b) Delamination, (c) Torn 등으로 분류될 수

있었으며, 확인된 파손형태별 수량은 〈표 1〉과 같다.

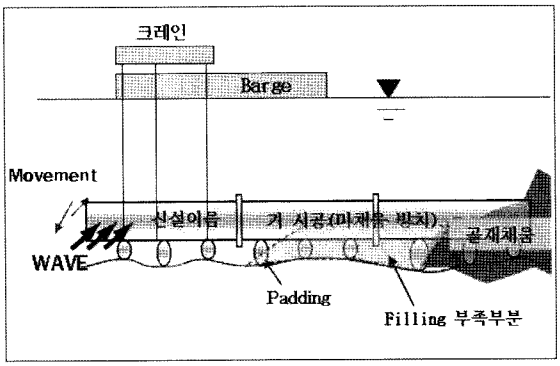
이에 본사의 기술부서 및 설계사와 현장에서 즉각적인 원인규명에 나선 결과, 앞선 설계파고의 문제와 연계하여 피복석의 중량을 재산정해 보강해야 한다는 것엔 이견이 없었으나, Pipe joint부의 파손에 대하여는 높은 파고만으로는 설명이 되지 않는 측면이 있어 보강방안 마련에 많은 어려움이 있었다.

항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2005)에 의하면 해저면에 매설된 관거는 시공 후 파랑이나 조류력의 영향을 받지 않는다. 그러나 SWI 시설 중 유일하게 수직으로 시공되어 있는 Intake Head가 높은 파력 및 수류력에 노출됨으로 인해 Pipeline 전반에 파손을 주었다고 가정하기도 무리가 있었다. 결국 시공 중 받은 파랑의 영향을 주요 원인으로 분류하고(〈그림 7〉), 피복석 유동시 관거의 해중 노출 또한 관거에 변위를 발생시킨 하나의 원인으로 고려하였다.

발주처는 전면 재시공을 요구하였으나, 해상장비가 이미 모두 철수한 상황에서 더욱이 수개월여 앞으로 다가온 Khareef season 전까지 매설된 파손관거를 모두 제거하고 신관을 거치하기란 시간적/경제적으로 불가능하였다. 이에 일단 되메움 상부의 피복석 시공을 위한 해상장비를 수배하는 한편, 신뢰할 수 있는 보강공법을 제시할 경우 승인하겠다는 발주처의 약속을 받아낸 뒤 관거를 보강키 위한 대안마련에 총력을 기울였다.

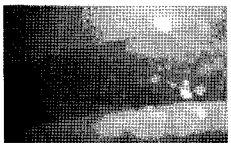
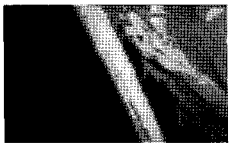
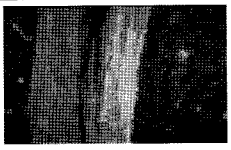
3.2 보강방안

파손된 관거를 굴착 후 신관으로 교체할 경우 해상작업이 불가능한 Khareef season을 감안하여 약 1년여의 공사기간 및 1,000만불이 넘는 공사비가 소요될 것으로 예상되었다. Pipe를 외부에서 보강할 경우는 전자보다 시공이 까다로워 적용이 불가하였다. 따라서 관 내부에서 파손부위를 보수/보강할 수 있는 방안의 모색이 절실하던 중 필자가 개발에 참여했던 당사 보유 환경신기술인 '하수관거 비굴착 부분보수공법' 을 당해현장에 적용해보고자 제안하였다. 이후 수차례의 Mock-up test를 통해 사용성 및 품질을 검증한 후 실제 적용하기에 이르렀다.

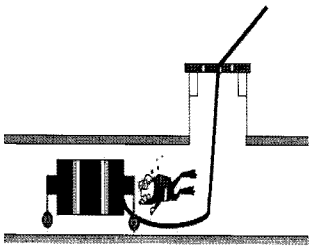
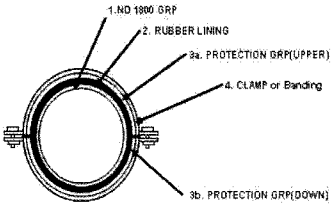
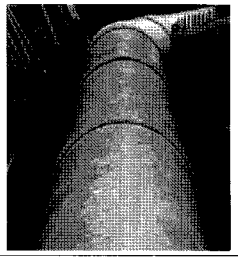


〈그림 7〉 Joint 연결 후 되메움 전 자유단 노출 모식도

〈표 1〉 파손형태별 수량

	Gap (Overlapping)	Delamination	Torn	Total
Picture				
Line A	7ea	4ea	1ea	12ea
Line B	3ea	3ea	1ea	7ea
Total	10ea	7ea	2ea	19ea

〈표 2〉 관 보수/보강방안

	1안 내부 보강	2안 외부 보강	3안 관거 교체
개념도			
시공방법	지수재인 고무Sheet와 보강재인 수지가 함침된 Polyester Felt를 Packer에 감아 보수하는 방법	굴착 후 파손 관거 외부를 고무라이닝 및 GRP Pipe로 감싸는 방법	굴착 후 신관으로 교체
장 점	〉 굴착 없이 지수/보강 가능 〉 Shore Protection부 적용 가능 〉 당사 보유 환경신기술	〉 파손부위의 상부 사석상태 확인 可 〉 지수/보강 동시 가능	〉 Pipe업체 guarantee 〉 발주처 승인 용이
단 점	〉 수중시공 경험 없음 〉 Pipe업체 guarantee 불가 〉 Mock-up 통한 적용성 검증 要	〉 Shore Protection부 적용 불가 〉 자재 수급 시간 필요 〉 굴착에 따른 추가 Damage 가능성	〉 Shore Protection부 적용 불가 〉 장비/자재 수급 불가

비굴착 부분보수공법은 보수기(Packer)에 경화수지(Resin+Hardener)가 함침된 보수재(Felt)를 감아 관내에 투입 후 공기압을 주입하여 보수기를 부풀림으로써 관내 파손부위에 보수재를 압착/경화시키는 공법으로 이미 육지에서는 널리 쓰이는 기술이다. 그러나 이 공법을 해저면에 매립된 관거에 적용한 사례가 없어 이를 국내뿐만 아니라 세계 최초로 시도한다는 사명감을 갖고 2개월여에 걸친 수차례의 Mock-up Test를 통해 공법을 개선하여 당해현장에 적용할 수 있었다.

(1) 보수기(Packer)의 개선

육지에서만 적용하던 공법이므로 이를 해중에 적용하는 금회 과업에서는 Diver가 제어할 수 있는 각종 Gauge 등을 보수기에 추가로 장착하였다. 관내 염소주입관 거치용 Cradle의 간섭을 감안하여 보수기의 직경을 D1,500으로 제한함과 동시에 이에 따른 팽창범위의 증가 및 수심 15m의 수압에 견딜 수 있도록 보수기 표면의 고무를 고강도 재질로 변경하였다(〈그림 8〉).

〈표 3〉 Mock-up test 요약

No	Test일시	장소	개요	비고
1	'08.12.3~4	통영	D600 GRP관거 수심 11.0m시공	해저 적용성 확인
2	'09.1.5~6	거제	D1,800 GRP관거 수심 10.0m시공	보수기 nozzle 파손
3	'09.1.14~15	거제	〃	보수기 고무 탈락
4	'09.1.22	화성	D1,800 육상시공 (4.0bar)	성공

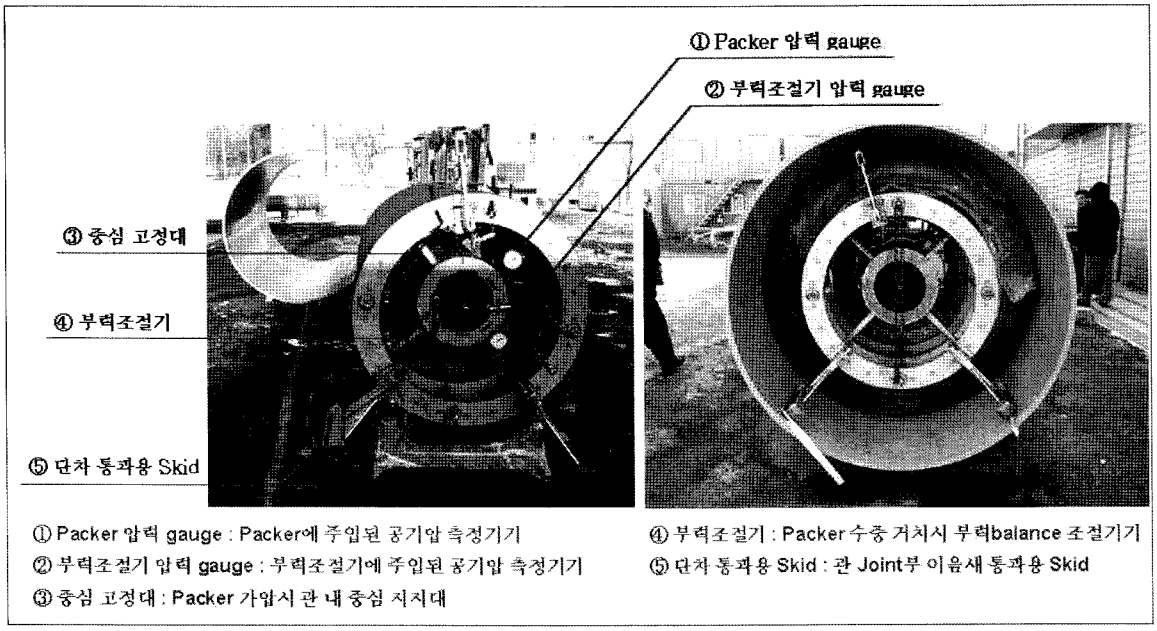
(2) 경화수지(Resin)의 개선

수차례 실패를 거듭하였던 보수기와는 달리 경화수지의 경우 1차 Mock-up test 결과 염수에서도 순조로이 경화가 진행되었으며 이후 충분한 강도가 발휘됨을 확인하였다. 추가적으로 현지의 여건 및 공사방법이 국내의 육상작업과 상이함을 감안하였

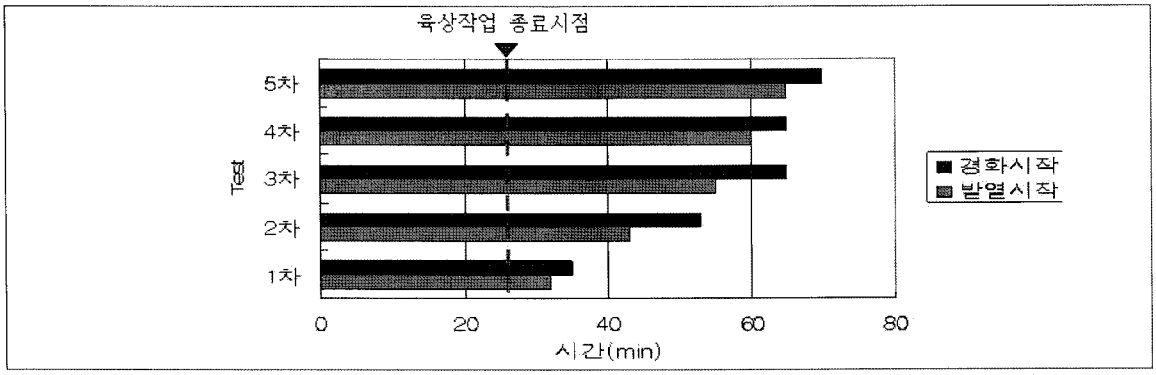
다. 또한 현지의 기온이 경화를 빠르게 촉진시킬 수 있는 고온이고, Diver가 보수지점까지 유영하여 보수기를 거치시켜야 하므로 충분한 경화 지연시간을 확보하기 위하여 경화강도에 영향을 주지 않는 추가적인 지연제를 자체 개발하였으며 Test 결과는 〈그림 9〉와 같다.

그러나 현지에서의 사전 모의시공 결과 지연제의 성능이 국내에서의 Test 결과에 못미쳐 부득이하게 작업시간을 주간에서 기온이 다소 떨어지는 야간으로 변경하는 등 크고 작은 장비 및 시공방법을 수차례 개선하였다.

이러한 각고의 노력을 통해 보수공법의 개선을 마무리 지을 수 있었으며, 보수작업 개시 후 단 2주 만에 파손부위 19개소의 보수 및 보강을 모두 완료하



〈그림 8〉 개선된 보수기 사진

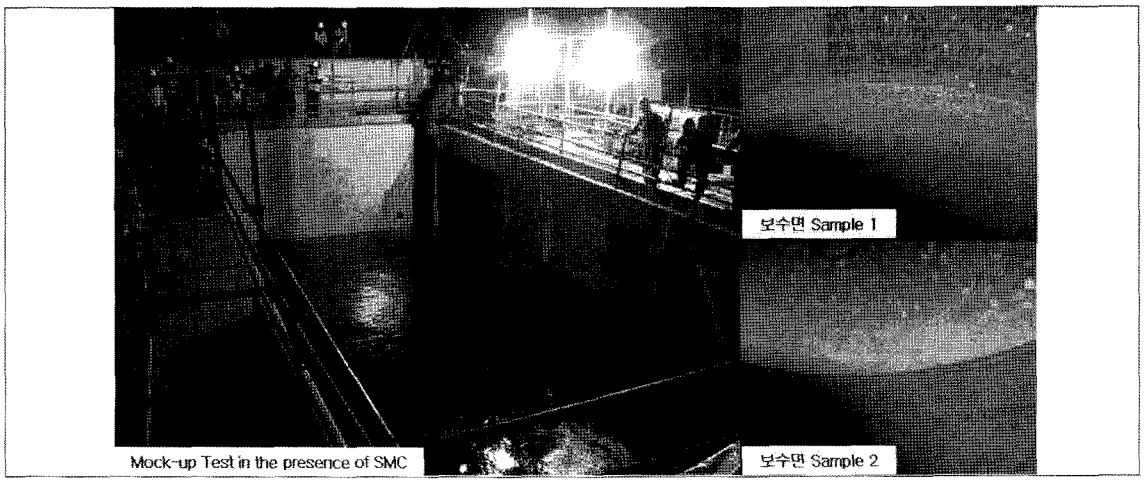


〈그림 9〉 지연제 Test 결과

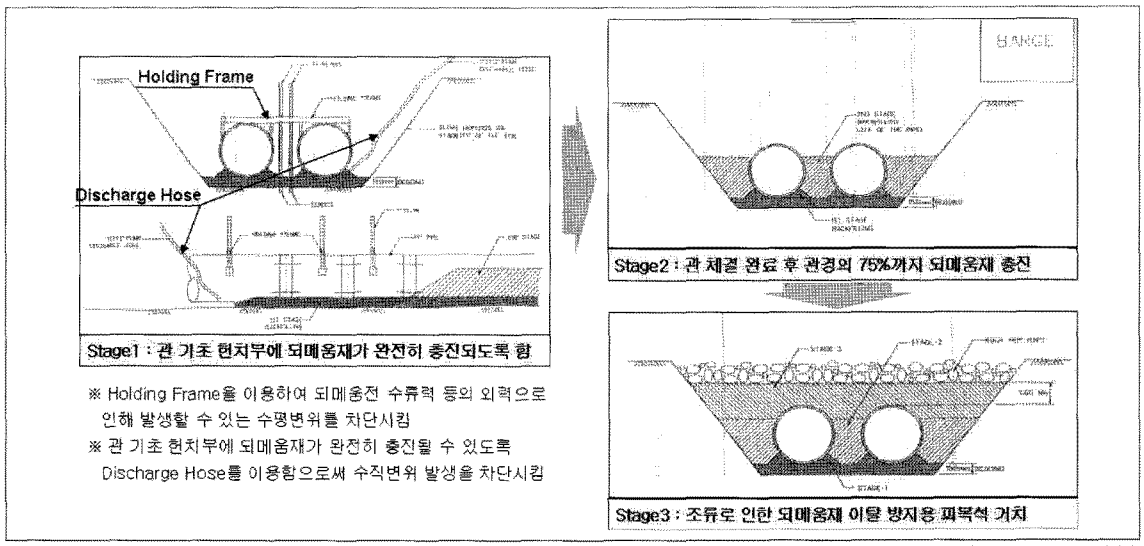
였을 뿐만 아니라, 보수면의 품질 또한 육지에서 시공하는 이상의 만족한 성과를 얻을 수 있었다(〈그림 10〉).

3.3 제안사항

시공시 〈그림 11〉의 Spec을 준수하여 수직 및 수평변위의 발생을 차단하고, 적합한 중량의 피복석으로 되메움재의 이탈을 방지하도록 한다. 특히, 되메움 전에 관 내 · 외의 시공상태를 Diver를 통해 사진 또는 비디오 촬영하여 조사토록 함으로써 하자발견시 보수공사가 용이토록 한다.



〈그림 10〉 발주처 입회 현지 Mock-up test 및 보수면 사진



〈그림 11〉 GRP Pipe 수중거치 Spec

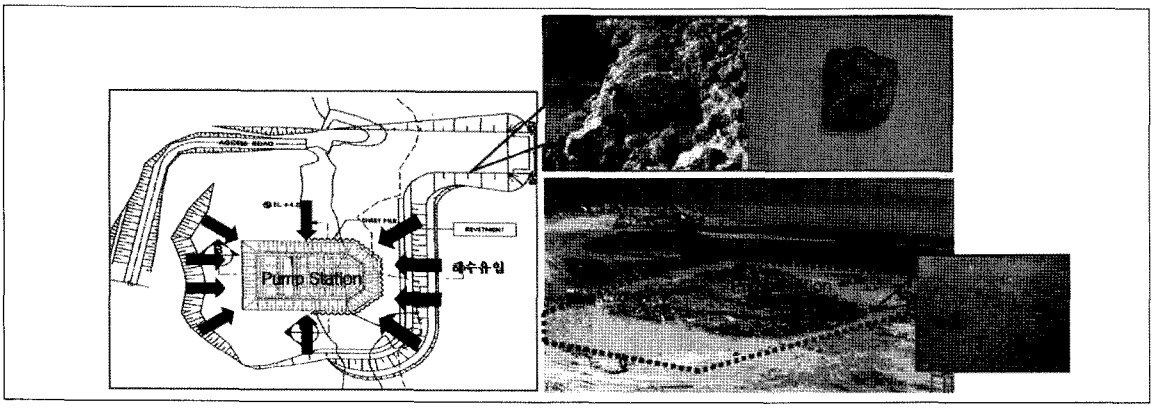
4. Pump Station

4.1 현황 및 문제점

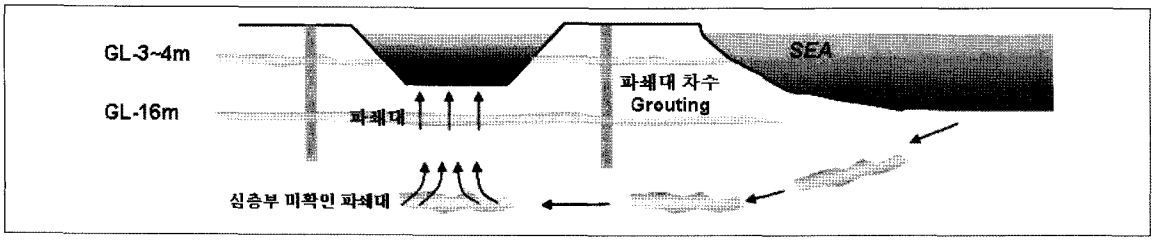
Shore Protection 내측의 Pump Station 부지는 〈그림 12〉에서 보는 바와 같이 전반적으로 중동지역에서 흔히 관측되는 석회암지대로, 수용현상에 의한 다공질 암석이 일부 분포하고 있어 발파로 인한 굴착 작업중 배수능력을 초과하는 과다한 해수의 유입이 발생하였다.

이에 부지 주변 측면에 대해 Vertical grouting을 실시하였으나, 굴착면 바닥 및 남측구간에서 지속적인 지하수(해수)의 유입이 관측되었다. 이는 부지 심층부의 불규칙한 유로를 통한 유입으로 판단되었다(〈그림 13, 그림 14〉).

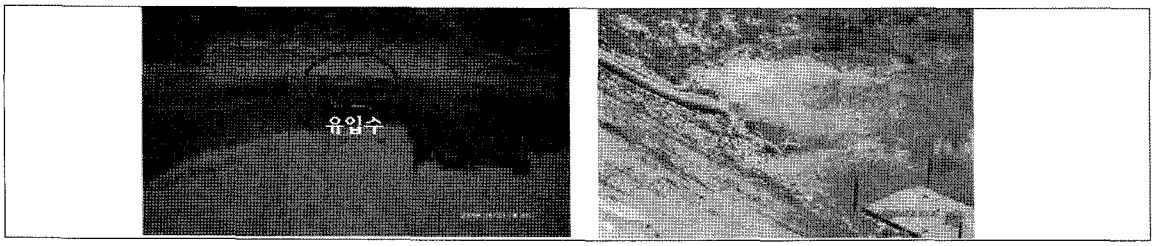
4.2 보강방안



〈그림 12〉 Pump Station 시공부지 평면도 및 사진

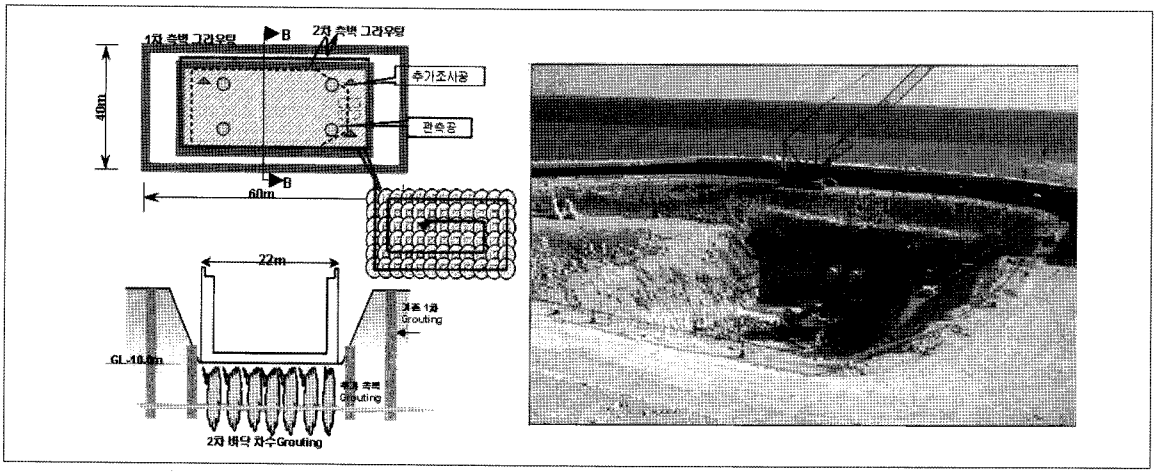


〈그림 13〉 해수유입 개요도



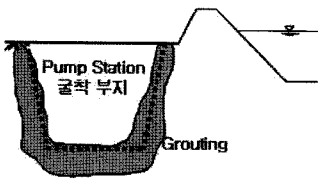
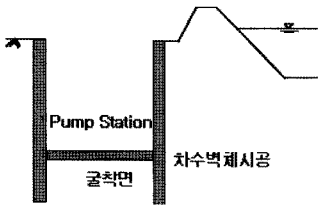
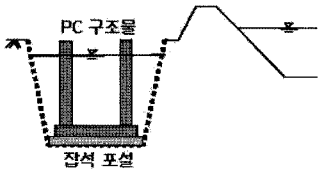
〈그림 14〉 해수유입 현황 사진

현지의 지반조건상 암반층이 조기 출현하여 Sheet Pile의 시공이 불가하고, 해수의 유입양상을 감안할 때 바닥을 포함한 전면차수가 필요하다고 판단되었다. 이에 〈그림 15〉와 같이 기존에 1차로 측벽에 시공된 차수공법과 동일한 Grouting공법을 선정하고, 추가 측벽 Grouting에 Bottom grouting을 병행한 결과, 유입수량을 배수가 가능한 유량 이내로 저감시킬 수 있었다.



〈그림 15〉 추가 Grouting 개요도 및 사진

〈표 4〉 차수방안 비교

	1안 Pre-Grouting	2안 차수벽체 시공	3안 수중굴착+PC구조물 시공
개념도			
시공 방법	굴착심도 이하 Pre-Grouting 수행으로 해수유입을 차단	차수벽체 시공 후 본 구조물 시공	수중굴착 후 기초지반 잡석 포설 후 기제작된 PC구조물을 시공하는 방안
장단점	〉 시공이 비교적 단순 〉 Grouting 차수효과가 양호할 경우 Dry Work 가능 〉 Grouting 주입량의 예측이 어려움	〉 시공실적 다수 〉 기반암이 조기 출현시 차수벽체 공사비 과다 〉 심도가 깊을 경우 바닥 차수 Grouting 선시공 후 단계별 굴착이 필요	〉 구조물 크기가 소형일 경우 적용성 양호 〉 수중 기초 시공면의 면밀한 시공관리가 요구됨 〉 구조물 인양에 따른 지역적 제한이 따름
적용성	구조물 규모 및 지반조건에 따라 공사비의 변동성이 크므로 상세조사 후 적용성 평가 필요		

4.3 제안사항

금회 과업과 같이 다공질의 석회암이 다소 분포하고 있는 지반에서 다량의 유입수가 예상되는 경우에는 〈표 4〉와 같은 방법을 검토하는 것도 바람직하다고 판단된다.

5. 결 언

SWI 시설에 대해 알고 있는 바가 거의 없었던 필자로서는 1년여라는 짧은 기간 동안 많은 기술적인 문제점을 접하였고, 또 이의 극복을 위해 고민하고 기술지원을 해나가는 모든 과정들이 매우 유익하였으며, 또한 도전적인 경험이었다.

부족하나마 필자의 경험을 지면을 통해 공유할 수 있게 허락해주신 한국해안 · 해양공학회 관계자 여러분께 감사드리며, SWI 시설 공사를 처음 접하는 기술자 선 · 후배님들께 조금이나마 도움이 될 수 있으면 하는 바램이다.

끝으로 본 과업을 성공적으로 수행할 수 있도록 많은 도움을 주신 SMP 현장소장님 이하 모든 직원 여러분들과 비굴착보수업체인 덕산건설 및 보수기 제작업체인 대원인더스트리얼, 그리고 Resin 제작업체인 DSC 직원분들께도 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

해양수산부 (2005). 港灣 및 漁港 設計基準.

U.S. Army Coastal Engineering Research Center (1984). Shore Protection Manual.

저자 약력

● 1990-1995, 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)

● 1997-현재, GS건설(주) 기술본부