



해수 담수화 설비의 취수 및 배출수 해저 배관 최적화 설계

Optimal Design of Submarine Pipeline for Intake and Discharge of Seawater Desalination Facilities

최광민·한인섭*

Gwangmin Choi·Inseop Han*

서울시립대학교 일반대학원 환경공학과

Department of Environmental Engineering, The Graduate School of the University of Seoul

ABSTRACT

Desalination plants have been recently constructed in many parts of the world due to water scarcity caused by population growth, industrialization and climate change. Most seawater desalination plants are designed with a submarine pipeline for intake and discharge. Submarine pipelines are installed directly on the bottom of the water body if the bottom is sandy and flat. Intake is located on a low-energy shoreline with minimal exposure to beach erosion, heavy storms, typhoons, tsunamis, or strong underwater currents. Typically, HDPE (High Density Polyethylene) pipes are used in such a configuration. Submarine pipelines cause many problems when they are not properly designed; HDPE pipelines can be floated or exposed to strong currents and wind or tidal action. This study examines the optimal design method for the trench depth of pipeline, analysis of on-bottom stability and dilution of the concentrate based on the desalination plant conducted at the Pacific coast of Peru, Chilca. As a result of this study, the submarine pipeline should be trenched at least below 1.8 m. The same direction of pipeline with the main wind is a key factor to achieve economic stability. The concentrate should be discharged as much as high position to yield high dilution rate.

Key words: Desalination Submarine Pipeline, Coastal Erosion Study, Concentrate Dilution, Intake and Discharge Pipeline, Submarine Pipeline On-Bottom Stability

주제어: 해수담수화 해저배관, 해안침식, 농축수 희석, 취배출수 배관, 해저배관 안정성검토

1. 서 론

해수의 취수 및 배출설비는 해수 담수화 설비에서 매우 중요한 사항으로 공사비 측면에서 전체 비용의 11.0-24.5%를 차지하는 경우도 있다(Water Reuse Association, 2012; Hwang M.H et al., 2017). 위치 선정 및 설계가 잘못되었을 경우 운전비의 증가, 오염원 취수에 따른 사용자 측의 불신과 민원, 배출수로 인한

주변 해역의 생태계 영향 등으로 설비 운영에 큰 지장을 준다. 국내 해수 담수화 설비의 경우 현재 45,000 m³/d 규모가 최대이나 물 부족 스트레스를 받고 있는 충남, 인천, 충북 등을 중심으로 향후 100,000 m³/d 이상의 대형 설비 검토가 필요 시 된다. 이때 취수와 배출수 설비의 최적 설계는 성공적인 해수 담수화 설비 건설의 중요한 요소가 될 것이다. 그러나 국내의 경우 해수 담수화 설비와 관련된 취·배출수 설비에 대한 종합적인 연구가 없었다.

역삼투압 방식 해수 담수화 설비는 해저 배관을 주

Received 16 October 2017, revised 22 November 2017, accepted 4 December 2017

*Corresponding author: Inseop Han (E-mail: ishan@uos.ac.kr)

pp. 481-490

pp. 491-499

pp. 501-510

pp. 511-519

pp. 521-527

pp. 529-537

pp. 539-549

pp. 551-566

pp. 567-575

pp. 577-586

pp. 587-597

pp. 599-609

pp. 611-618

pp. 619-628

로 사용하며, 해수 취수용 배관을 해저에 설치하는 방법은 해저에 직접 설치하는 방법, 트렌치에 묻는 방법, 해저 터널 내에 설치하는 방법 등이 있다(Nikolay Voutchkov, 2013).

해저에 설치하는 배관은 설계나 시공이 잘못되었을 경우 대형 파랑, 조류의 반복흐름, 지속적인 해류, 지진, 해안 침식과 퇴적 등의 영향으로 배관이 변위되거나 노출되어 파손 또는 부상하는 등의 문제가 발생한다. 한편 지진 또는 파랑 등에 의한 반복 충격파는 배관의 기초나 피복토를 액상화시켜 배관의 침강이나 부상을 발생시킨다. 이로 인해 배관이 파손되는 문제가 생길 수도 있다. 따라서 해저 관로의 기초나 상부 피복토의 액상화 가능성을 사전에 조사하여 다른 토사로 대체하는 등의 방안을 검토할 필요가 있다.

해저 배관의 안정성은 해저 지질에 의한 저항과 환경적인 외력, 배관의 침강 무게와 관련이 있다. 해저 배관의 안정적 설계는 주어진 환경 조건에서 충분한 침강 무게로 설계되었는지를 검토하는 것이다(Det Norske Veritas, 1988).

해저 배관의 적정 매설 깊이 선정은 해안의 침식과 퇴적 분석을 통해 가능하다. 해저 배관에서 환경적 외력의 영향을 가장 크게 받는 지역은 해안에서 가까운 쇄파 지역이다. 쇄파 지역이 모래로 구성된 해안일 경우 해안 침식으로 해저 배관이 외부에 노출되는지 여부를 분석하여 충분한 깊이로 매설하여야 한다. 그러나 너무 깊게 매설할 경우 비경제적 설계가 되고 환경여건상 시공이 불가능한 경우도 있어 최적 깊이 결정을 위한 연구가 필요하다.

해수 담수화 설비는 각종 약품과 고염도 농축수를 배출한다. 처리과정에서 사용된 약품 중 일부 Antiscalant는 인과 같은 영양물질을 포함하고 있으며 이러한 약품 폐수의 배출은 주변 해역에 부영양화를 발생 시킬 수 있다(D. Hasson et al., 2011). 또한 취수과정 및 Membrane 세정 과정에서 사용된 염소는 주변 생태계에 악 영향을 주는바 확실히 환원시켜 배출해야 한다.

고농도 염수는 배출해역에서 밀도류를 형성하여 바닥에 가라앉게 되며 이때 바닥에 부착하여 살아가는 저서동물에 큰 영향을 준다(Sydney Miller et al., 2015). 배출수 배관의 배출구 설계는 해류의 방향과 고농도 농축수가 취수 설비에 유입되지 않을 충분한 거리를 고려하여 위치를 선정 한다. 배출 지점에는 주변 해수와 충분히 희석 될 수 있는 구조의 Diffuser를 설치하

여 배출 해안의 환경에 미치는 영향이 최소화 되도록 해야 한다.

본 연구는 해안 침식 및 퇴적이 발생하는 태평양 연안 페루 칠카 지역에서 수행한 해수담수화 설비를 기반으로 취수 및 배출수 배관에 대한 연구를 통해 유사 지역 및 국내 대형 해수담수화설비 설계 시 도움을 주고자 한다.

2. 연구방법

2.1 해안 침식 및 퇴적 예측

해안은 내륙, 해양, 해저, 대기로 둘러싸여 있으며 이들 사방 경계를 통하여 운동량, 에너지 및 각종 물질 교환이 활발히 이루어지는 매우 동적인 특성을 가지고 있다. 해안의 빠른 변화 속성은 파동이나 해류에 의하여 움직이는 해안의 모래나 입자들의 변화를 고려할 때 잘 나타난다. 우리나라 동해안의 백사장은 일반적으로 계절 변화에 따라 여름에는 폭이 넓고 겨울에는 좁다(Cho, K. W. et al., 2006). 연구 대상인 페루 칠카 해안에서도 동일한 결과를 볼 수 있었다. 해안 침식이란 여러 원인에 의해 바다 쪽 육지부가 침식되는 현상이다. 해저 퇴적물의 분포는 파랑 또는 해류 등의 외력 특성을 반영하게 되는데 이를 외력에 의한 해저 퇴적물의 체분류 작용이라 한다(Cho, K. W. et al., 2006).

해안 침식 및 퇴적을 예측하기 위해서 수심측량, 해류 및 지질조사 등의 현장 조사를 실시하였으며, 극한 파에 대한 파랑 자료 조사 및 분석을 실시하여 극한 파의 방향, 유의파고, 최대주기 시간을 결정한 후 수치 모델링을 통해서 해안 침식 종단면을 예측하였다.

현지 해저 면은 모래로 구성되어 있어 해안 침식 및 퇴적 분석에서 모래특성의 분석이 중요했다. 취수 및 배출수 관로의 지질 상태는 Fig. 7.과 같이 육상 6개 지점 및 해상 6개 지점을 조사하여 모래의 입경과 비중을 분석하였다.

2.2 해저 배관의 안정성 분석

수중 배관의 안정성 검토를 위한 설계 지침으로는 API RP 1111, DNV-RP-E305, DNV-RP-F109, DNV-OS-F101 등이 있다. 본 연구는 비교적 계산이 간단하여 일반적으로 널리 사용하는 DNV-RP-E305를(Det Norske Veritas 2007, M. Daghigh, et al., 2008, Y. Tian and M.J. Cassidy



2013) 이용해 해저 배관의 안정성을 검토하였다.

해저 배관 안정성은 극한 환경조건에서 해저배관이 변위되거나 부상되지 않는지를 검토하고, 안정성을 확보하기 위해 필요한 하중을 배관에 추가해 주거나 매설하는 등의 방안을 강구하는 것이다. 즉 수중 배관의 안정성을 확보하기 위해서는 침강 무게에 따른 해저 마찰 저항이 파랑이나 해류에 의해 발생하는 항력과 관성력보다 커야한다(Ogbonda Douglas Chukwu. et al., 2016). 이를 만족시키기 위해서는 배관에 설치하는 콘크리트 구조물의 무게를 크게 하여 안정성을 확보하는 방법과 Trenching 및 Back-fill 방식을 적용하여 환경 외력을 감소시키는 방법이 있다(Choi, Y. J. et al., 2012). 본 연구에서는 배관 자체 중량 증가를 위해 콘크리트 구조물의 무게를 증가시키는 방안으로 연구하였다.

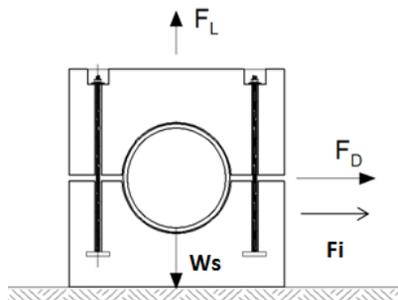
$$\left[\frac{W_s}{F_w} - F_L \right] \cdot \mu \geq F_D + F_I \quad (1)$$

- Ws : 수중 설비 무게(배관 + 콘크리트 Weight)
- Fw : 보정 계수
- μ : 모래 마찰 계수(0.7)
- F_L : 양력
- F_D : 항력
- F_I : 관성력

수중설비(Weight) 무게는 다음 식으로 계산한다.

$$W_s = \left[\frac{(F_D + F_I) + \mu \cdot F_L}{\mu} \right]_{\max} \cdot F_w \quad (2)$$

수중설비 무게(Ws)를 계산하기 위해서 보정 계수(Fw)를 사용할 때, 배관에 작용하는 유체 역학적 힘(F_L, F_D 및 F_I)은 Morison 식에 근거하여 다음 식으로부터 계산 된다.



$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_L \cdot (U_s \cdot \cos\theta + U_c)^2 \quad (3)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_D \cdot |(U_s \cdot \cos\theta + U_c)|(U_s \cdot \cos\theta + U_c) \quad (4)$$

$$F_I = \frac{(\pi \cdot D^2)}{4} \cdot \rho_w \cdot C_M \cdot A_s \cdot \sin\theta \quad (5)$$

- ρ_w: 해수 비중
- D : 배관 외경
- C_L: 양력 상수 (0.9)
- C_D: 항력 상수 (0.7)
- C_M: 관성력 상수 (3.29)
- U_s: 배관에 직각으로 해저 바닥 근처에서의 유속 속도 진폭(Significant near bottom velocity amplitude perpendicular to the pipeline)
- U_c: 배관에 직각인 해류 속도
- A_s: 배관에 직각인 유속의 가속도(AS = 2π·Us/Tu)
- θ : 파도 사이클에서의 유체 역학적 힘의 위상 각

3. 결과 및 고찰

3.1 해수 담수화 설비의 취수 및 배출수 설비 고찰

3.1.1 취수 설비

본 연구에 사용된 취수 배관의 재질은 해수의 강한 부식 특성을 고려하여 HDPE(High Density Polyethylene) 배관과 SRP(Steel Reinforced Polyethylene) 배관을 사용하였다. 육상 구간(해수담수화 설비에서 해변까지의 구간)은 HDPE(배관 직경, 350A)배관 652 m이고, 해상 구간(해변에서 취수구까지의 구간)은 SRP(350A)배관 610 m로 설계하였다. HDPE 배관의 비중은 0.95로 해수의 비중 1.025보다 작아 해수 중에서 부상하지만 SRP 배관은 HDPE 배관 내부에 Steel Wire를 설치하여 비중이 해수보다 커 부상하지 않는다. 예를 들어 350A SRP 배관의 비중은 1.33이다. 점점 Pit는 최대한 해변에 가깝게 설치하며 설비 운영 중 배관 내 생물이나 퇴적물을 주기적으로 청소할 수 있도록 계획했다. 취수구와 취수배관은 생물의 번식을 막기 위해 NaOCl을 주입하였다.

해수 취수 구조물의 최적 깊이는 일반적으로 취수구를 기준으로 12-20 m이다. 파랑이나 바람의 영향에

- pp. 481-490
- pp. 491-499
- pp. 501-510
- pp. 511-519
- pp. 521-527
- pp. 529-537
- pp. 539-549
- pp. 551-566
- pp. 567-575
- pp. 577-586
- pp. 587-597
- pp. 599-609
- pp. 611-618
- pp. 619-628

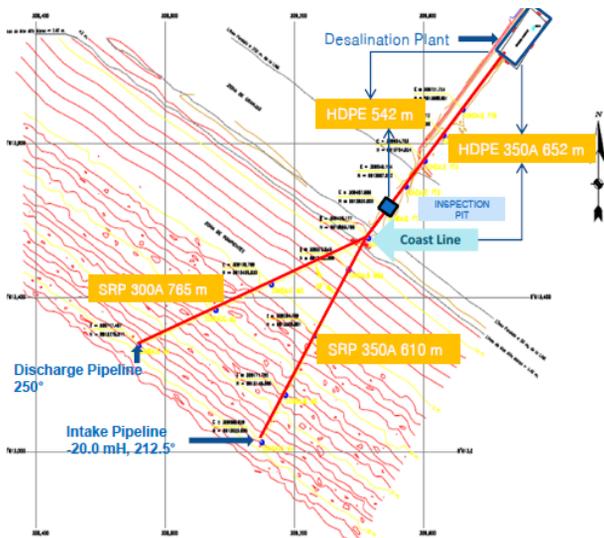


Fig. 1. Layout of intake and discharge pipeline.

따른 수질변화를 고려하여 최소 8 m 이상의 깊이로 설계한다. 보다 깊은 곳에서 취수할수록 깨끗한 해수를 얻을 수 있다. 그러나 20.0m 이상 깊이에서는 더 깊은 곳에서 취수한다고 해서 특별히 수질이 개선되지는 않고 오히려 수온이 저하되어 해수의 점도 증가에 따른 해수 담수화 설비 운전 전력비 증가로 결국 비경제적 설비가 된다고 알려져 있다(Nikolay Voutchkov, 2013).

본 연구 지역은 해저 지질이 모래로 구성되어 있어 미세 모래 입자의 유입 영향을 최소화하기 위해 취수 구조물을 수심 20.0 m 지점에 설치했다. 취수 구조물은 콘크리트 등을 이용하여 충분한 하중을 갖도록 했으며 취수 구조물에서 세 방향으로 콘크리트 Anchor를 설치하여 환경적 외력에 견디게 하였다. 취수 구조물의 지반 침하나 해저 퇴적물 유입 영향을 최소화하기 위해 취수구는 해저 면에서 2 m 상부에 위치하도록 설계하였다.

3.1.2 배출수 설비의 고염도 농축수 희석

배출수 배관은 육상구간 HDPE(300A) 765 m이고, 해상구간은 SRP(300A) 652 m이며, 배출구에는 농축수를 희석시키기 위해 해저 면에서 2 m 상부에 50A Diffuser를 10 m 간격으로 5개 설치하였다. 본 해수 담수화 설비의 SWRO(역삼투압설비, Seawater Reverse Osmosis)설비 회수율은 53-55% 수준으로 운전되었다. 따라서 배출되는 농축수의 염도는 주변 해수보다 약 2배 이상 높아 희석 없이 배출할 경우 주변 생태계에

큰 충격을 줄 수 있다.

국내의 경우 발전소 온배수에 대한 영향은 발전소 건설 시 수행된 환경영향평가를 통해 충분히 검토되어 왔으나 해수 담수화 설비의 농축수 배출에 의한 영향은 대형 해수담수화설비의 건설이 없었던 이유로 아직까지 연구한 사례가 전무한 실정이다.

발전소 온배수의 경우 주변해역의 물리적 특성을 변화시킬 뿐만 아니라 해수의 열 균형을 파괴시켜 주변 환경 및 생태계에 부정적인 영향을 초래하며, 발전소의 가동 중단 시 갑자기 수온을 떨어뜨려 해양생물에 막대한 피해를 유발할 수 있다(KHNPC, 2006)

그 환경 영향은 미미하다고 여겨지나 충분히 희석되지 않고 배출되면 그 영향은 작지 않다.

특히 산호초, 해초류 등 움직일 수 없는 생물은 고농도 염수에 크게 영향을 받을 수 있다(Sydney Miller, et al., 2015).

배출수 배관의 배출구는 주변 해역의 해상조사를 통해 파랑이나 해류의 방향을 파악하여 위치를 선정하고, 취수 시 농축수의 영향이 최소화 되도록 취수구와 충분한 거리를 유지해야 한다. 본 연구에서는 주해류의 방향을 고려하여 아래쪽(남쪽)에 취수배관을 배치했고 위쪽에 배출수 배관을 배치하여 해류에 의해 농축수가 취수 배관과 반대 방향으로 흐르게 하였다. 또한 취수구와 배출수 배관은 직선거리 500 m 이상 떨어진 위치에 배치하여 해류의 유속이 감소하거나 변화되더라도 농축수의 취수 수질에 대한 영향이 최소화 되도록 하였다. 배출수 배관의 유속은 0.8 m/s로 하여 배관 내 이물질 퇴적을 방지하였고, 각 Diffuser의 유속은 0.8-1.5 m/s로 설계하였다.

농축수의 희석은 EPA의 Visual Plumes Software로 분석하였다. 농축수는 비중이 커 가라앉는 특성이 있어 특히 저서 동물에 영향을 준다. 희석농축수가 해저에 도달할 때의 희석농도를 분석하여 그 영향 여부를 판단할 수 있다. Visual Plumes Software에 의해 계산된 희석 자료를 보면, Fig. 2.에서 농축수가 해저 면에 도달했을 때는 노즐로부터 수평거리 5.0 m 지점이다. 이 때 희석배수는 Fig. 3.에서와 같이 5.0 m 지점에서 248.4배로 계산되었고 Plume의 직경은 2.122 m로 계산되었다. 농축수 TDS 76,000 ppm은 주변 해수 TDS 38,000 ppm과 248.4배 희석되어 TDS 38,306 ppm으로 주변보다 0.81% 높은 수준이다. 이는 주변 해수와 1% 이하의 차이를 나타내어 해저 수중생물에 큰 영향은

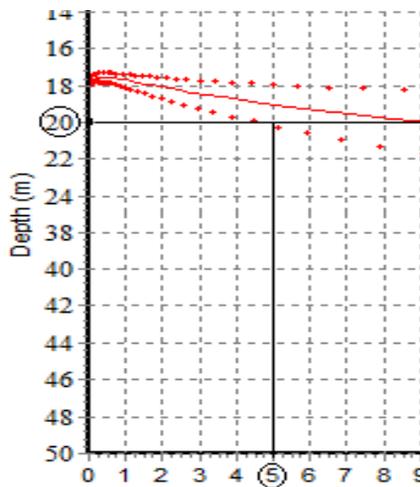


Fig. 2. Dilution distance from Nozzle versus depth.

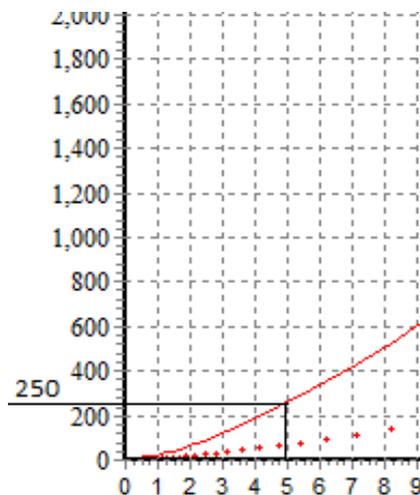


Fig. 3. Dilution distance from Nozzle versus dilution rate.

없을 것으로 판단된다. 일반적으로 자연적인 Salinity 변동 폭은 년 평균값의 $\pm 10\%$ 수준이다. 2005년에 캘리포니아 해역에서 실시한 50 MGD Carlsbad 해수담수화설비의 WET(Whole Effluent Toxicity)시험에서 주변보다 19.4%(40 ppt) 높은 염농도 수준에서도 안전하다는 보고가 있다(Nikolay Voutchkov, 2011).

배출수의 희석은 Diffuser Port의 농축수 배출 높이, 유속, 배출각도, 해류속도 등에 영향을 받는다. 이러한 인자 중 가장 큰 영향을 받는 것은 설치 높이와 해류 속도이다. 해류 속도는 인위적으로 조절할 수 없는 사항이나 설치 높이는 조정 가능한 사항으로 가능한 고염 농축수가 높은 곳에서 배출 되도록 설계하는 것이 최대 희석 효과를 갖게 하는 것이다.

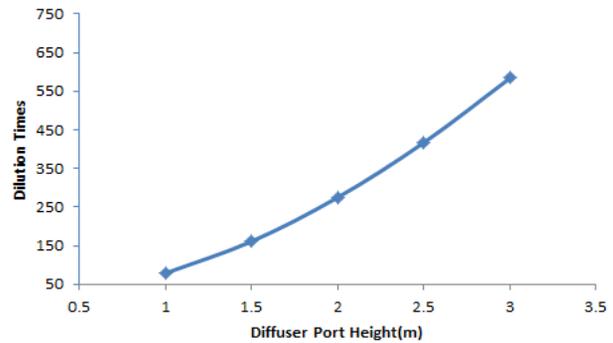


Fig. 4. Diffuser port height vs. dilution times.

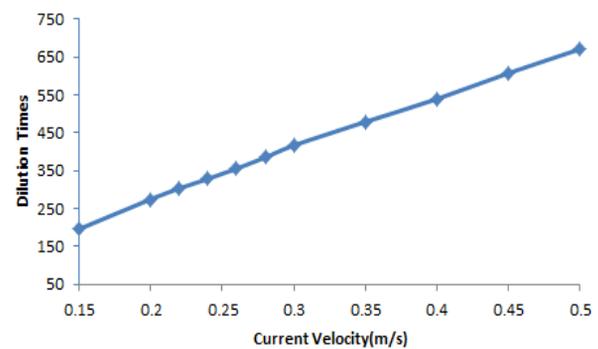


Fig. 5. Current velocity vs. dilution times.

3.2 해안침식 및 퇴적 분석 결과를 통한 해저배관 최적 매설깊이 결정

해저 배관이 설치될 해안의 수심측량 결과 취수배관 위치 종단면은 2.8-5.3%, 배출수 배관 위치 종단면은 2.3-3.7%의 기울기로 조사되었다.

Fig. 7은 배관 설치 위치에 대한 모래의 Sampling 위치를 나타낸다.

Fig. 9는 취수 배관 설치 위치의 해저 종단면과 수심별 모래 입자 크기를 나타낸다. 해저 배관 설치 위치의 지반은 모래로 구성되어 있으며, 각 조사 지점에서 전체 모래 중량의 50%에 해당하는 입경은 Table 1과 같이 0.16-0.20 mm이고 밀도는 2.70-2.72 Ton/m³이었다.

일반적으로 해변은 평탄할수록 구성 물질의 입자가 작다(Tom Garrison, Orange Coast College, 2008). 해안의 모래 입경에 따른 해변 경사도 관계를 나타내는 문헌자료를 보면 직경 0.125-0.25 mm에서 해변경사도 3°를 보이고 0.25-0.5 mm에서 5° 경사를 보인다(Shepard, 1973). 이는 본 연구의 모래입자 크기와 경사도의 분석 결과와도 일치한다.

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

Table 1. Summary of surface sand sample properties

Sample	Density(Ton/m ³)	Diameter, D50(mm)
SM1	2.71	0.16
SM2	2.70	0.17
SM3	2.72	0.20
SM4	2.72	0.17
SM5	2.71	0.18
SM6	2.71	0.18
ST1	2.73	0.19
ST2	2.72	0.16
ST3	2.74	0.17
ST4	2.71	0.11
ST5	2.70	0.16
ST6	2.71	0.2

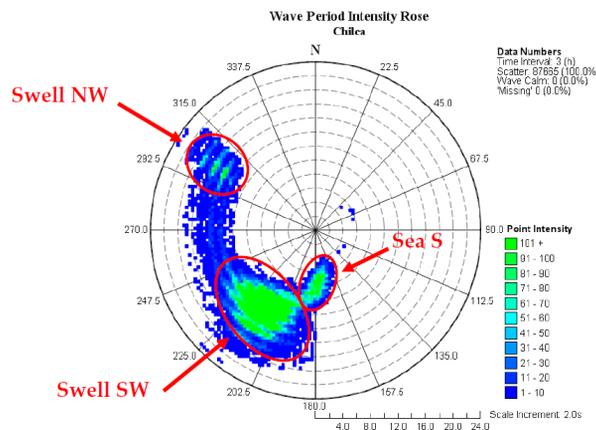


Fig. 6. Peak period deep water intensity rose-Peru Chilca.

수심 20.48 m에서 측정한 해수 온도는 평균 13.83°C, 최고 16.97°C, 최저 13.27°C를 나타냈다. 파랑분석 결과는 평균유의파고 1.9 m, 최대 유의파고 4.8 m, 최소 유의파고 1.07 m, 평균 주기시간 10.6 sec, 최대 주기시간 15.09 sec, 최소 주기시간 4.56 sec, 평균 파랑 방향 213.2°이었다. 주요 수질 분석 결과는 용존산소 6.79-7.21 mg/L, pH 7.0-7.5, Salinity 35.4-35.9 ppt 이었다. 해류 유속은 수심 1.0 m에서 평균 0.2 m/s, 최대 평균 0.32 m/s, 최대 0.45 m/s이며 수심 10.0 m에서 0.23 m/s, 0.38 m/s, 0.48 m/s이고 수심 18.0 m에서 0.26 m/s, 0.45 m/s, 0.58 m/s로 분석되었다.

연구 지역에 대한 극한파를 결정하기 위해 사용한 데이터베이스에 대한 장기 심해파 환경을 검증한 후 연구 대상지역의 주요 파랑 방향에 대한 상위 30개를 선택하여 통계학적으로 2년, 5년, 10년, 20년, 50년, 100년 빈도의

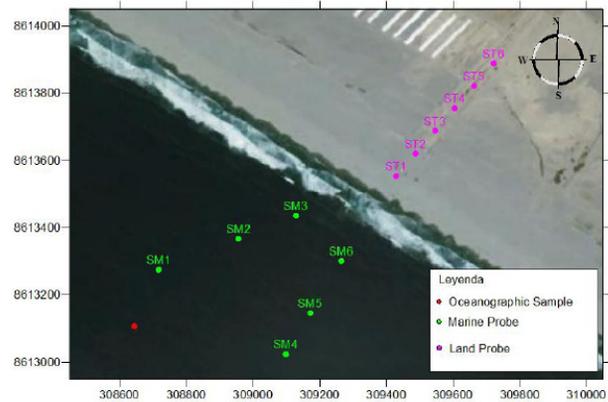


Fig. 7. Sampling points at the intake and discharge pipe route.

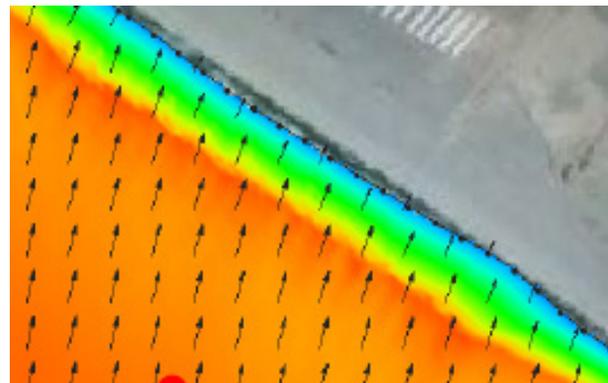


Fig. 8. Wave directions.

Table 2. Synthetic storm events

Return Period (Years)	Duration (hr)	Significant Wave Height (m)	Peak Period (sec)	Peak Direction (°)
100	131	5.13	14.5	216
50	131	4.33	14.5	216
25	131	4.09	14.5	216
10	131	4.02	14.5	216
5	131	3.80	14.5	216

극한파를 결정하였다. 본 연구에 사용된 Olas del Pacifico 데이터베이스 검증을 위해 NOAA 32302 Buoy의 검측 자료와 비교하였다. 본 연구 지역에 대해 분석된 주요 파랑 방향은 Fig. 6과 같이 주로 세 방향이며 주로 남쪽에서 북쪽으로 향하고 있다. 세 방향 에너지를 조합하여 Table 2와 같은 합성 극한값을 얻었다. 100년 빈도 기준으로 유의파고(Significant Wave Height)는 5.13 m이고, Peak Period는 14.5 sec, Peak Direction은 216°이다.

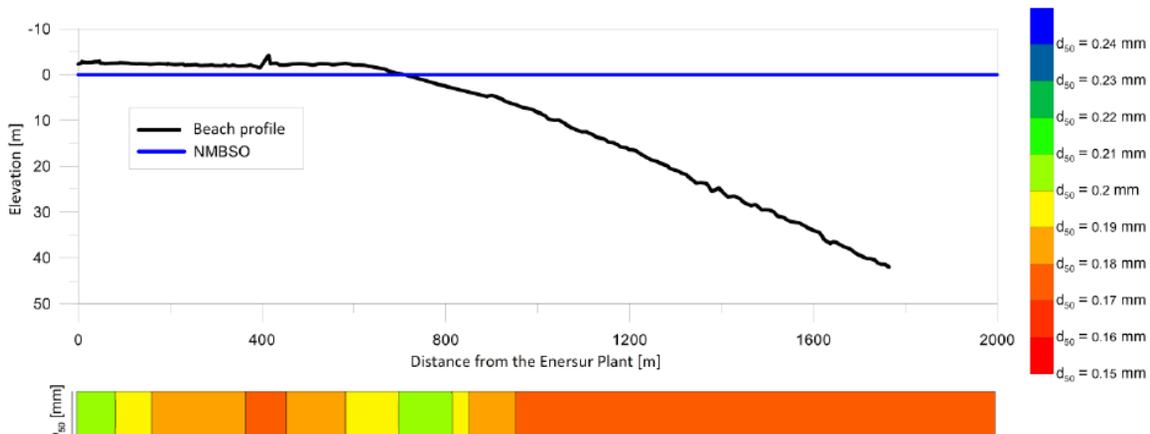


Fig. 9. Beach profile and diameter of sand.

모래 입자 크기는 해수면 제로 근처에서 가장 큰 크기 (0.2 mm)를 보였고 수심이 깊어짐에 따라 작아지며 수심 20 m 지점에서 0.16 mm로 조사 되었다. 해수면 제로 근처의 미세 입자는 파도나 조류에 의해 가정 먼저 바다 쪽으로 이동하며 수심이 깊을수록 모래 입자 크기가 작게 됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 해안 침식 모델들의 감도 분석을 위해 4 개의 수치 모델링 프로그램(XBEACH, FUSBEACH, COSMOS, PETRA)을 이용하여 해안 침식과 퇴적을 예측한 결과이다. 모든 모델에서 유사한 해안침식과 퇴적의 결과를 보이고 있다. PETRA의 경우 퇴적 지점에서 실제 측량자료와 다른 거동을 보였고, FUSBEACH 모델의 경우 전체적인 모양은 실제와 유사하나 침식정도가 실제보다 약하게 분석되었다. COSMOS 모델의 경우 현지 상황과 가장 유사하면서도 보수적인 침식단면 결과를 보이고 있어 COSMOS 프로그램을 통해 본 연구의 100년 빈도 해안 침식 종단면을 Fig. 11.과 같이 작성하였다. Fig 11.을 보면 해수면 제로 근처에서 수심 5.0 m까지 약 200 m 구간에서 심한 해안침식이 발생하고 있으며 수심 7.0-8.0 m 구간에서는 퇴적이 발생함을 알 수 있다. 수심 5.0 이하 구간에 위치한 해저 배관의 경우 해안침식선 이하로 매설되지 않으면 해안침식 발생 시 배관이 노출되고 파랑과 해류 등에 의해 부상 및 파손될 가능성이 있다. 실제로 본 연구 시설에서도 강한 파랑의 영향으로 해안침식이 발생하여 매설된 취.배출수배관이 노출되었고 배출수 배관은 파손되어 재시공하였다. 이러한 문제의 해결방안은 해안침식 예상 단면을 사전에

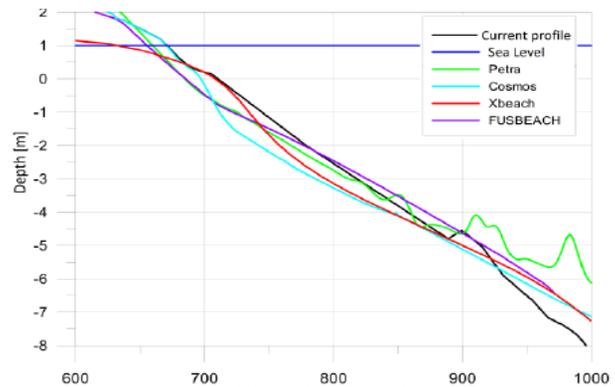


Fig. 10. Comparison of beach profiles simulated using the COSMOS, PETRA, XBEACH and FUSBEACH models.

분석하여 해안침식선 이하로 배관을 매설하도록 해야 한다. 또한 극한파에 대한 배관 안정성 검토를 실시하여 배관의 침강 하중을 증가시킬 Anchor를 충분히 설치하여 안정성을 확보해야 한다.

Table 3은 해당 지역에 대한 5년에서 100년 빈도의 해안 침식과 퇴적에 대한 분석 결과이다. 100년 빈도에서는 해수 담수화 설비로부터 670 m 지점에서 해수면 기준 1.8 m의 침식이 발생할 수 있으며 1,050 m 떨어진 지점에서는 2.3 m의 퇴적이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 페루 칠카 지역에서는 100년 빈도의 극한파에도 배관이 노출되지 않으려면 해수 담수화 설비로부터 670 m 지점은 해수면 기준 최소 1.8 m 이하로 배관을 매설하여야 한다는 결론을 얻게 되었다. 실제로는 해저배관이 100년 빈도 침식 종단면에서 최소 0.5 m 이하의 매설 깊이를 갖도록 설계·시공하였다.

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

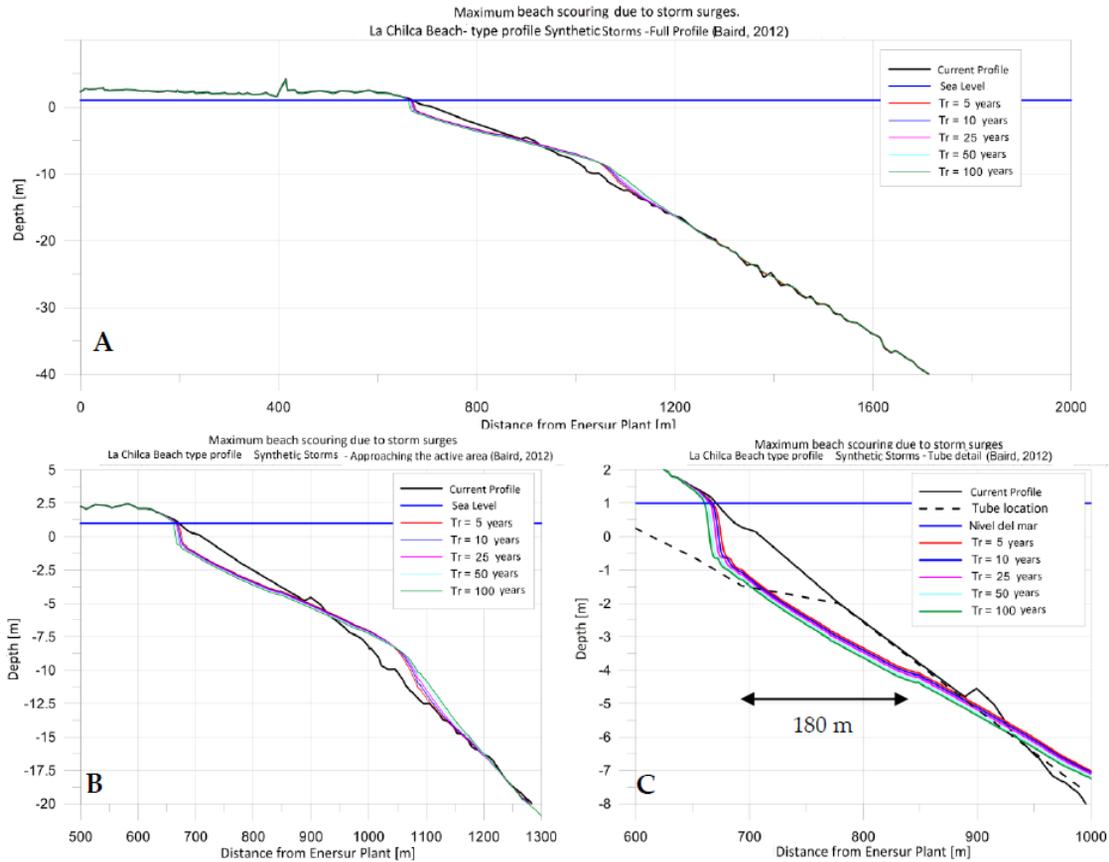


Fig. 11. Morphodynamic change expected in the beach profile due to the action of synthetic wave storms.

Table 3. Maximum erosion and deposit values along the beach profile for simulated synthetic storms.

Return Period	Maximum Erosion (m)	Maximum Deposit (m)
5 Years	-1.5	2.1
10 Years	-1.6	2.1
25 Years	-1.6	2.1
50 Years	-1.7	2.2
100 Years	-1.8	2.3

3.3 해저배관의 안정성 검토

3.3.1 취수배관의 안정성 검토

해저 취수 배관의 안정성 검토를 DNV-RP-E305로 수행한 결과 수심 20.0 m를 기준으로 계산한 해저 배관의 F_L , F_D , F_I 값은 각각 다음과 같다.

$$F_L(\text{양력, Lift force}) = 80.5 \text{ N/m}$$

$$F_D(\text{항력, Drag force}) = 62.6 \text{ N/m}$$

$$F_I(\text{관성력, Inertia}) = 41.7 \text{ N/m}$$

$$W_s = [(62.6 + 41.7) + 0.7 \times 80.5] / 0.7 \times 1.3 = 298.5 \text{ N/m}$$

수심 20.0 m 지역에서 환경적 외력에 대한 안정성을 확보하기 위해 필요한 최소 무게는 30.5 kg/m(298.5 N/m)였다. 배관의 단위 무게는 37.42 kg/m이고 사용한 콘크리트 Anchor의 단위 무게는 371.45 kg/EA(0.154 m³/EA)이다. 본 연구에서 수심 20 m 지점은 6 m 간격으로 콘크리트 Anchor 1개를 설치하였다. 이 때 단위 침강 무게는 99.33 kg/m이 된다. 이 정도의 침강 하중은 배관 상에 공기가 최대 25% 있을 때(총 양력 98.63 kg/m)까지도 안정하다. 수심 20 m 지점에서 배관에 공기가 없는 조건에서 최대 Anchor 설치 간격은 9.6 m로 계산되었다.

같은 방법으로 각 수심에 따라 필요한 수중 Weight를 계산한 값은 Fig. 12와 같다. Fig. 12의 계산 값을 통해 수심 5.0 m에서 안정성을 확보하기 위한 Anchor 설치 간격은 2.0 m이고 수심 4.0 m에서는 1.6 m, 3.0 m에서

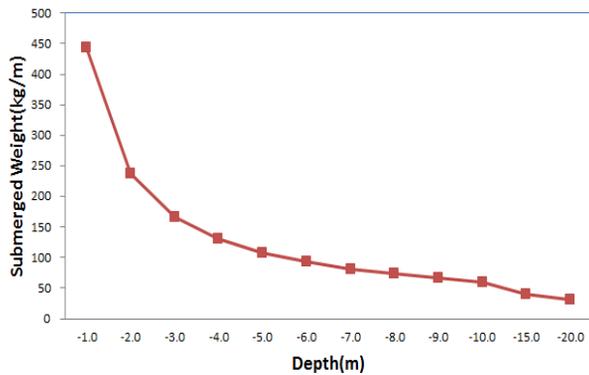


Fig. 12. Required weight at each depth for intake pipe.

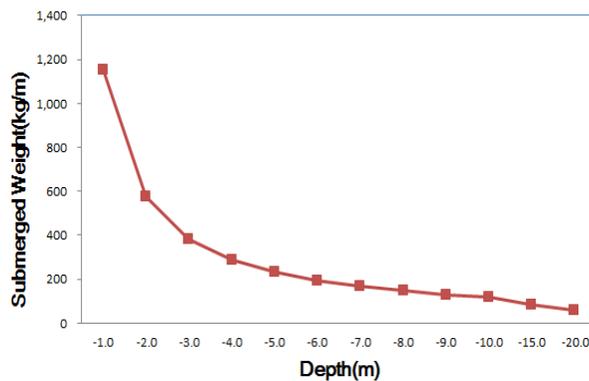


Fig. 13. Required weight at each depth for discharge pipe.

1.27 m, 2.0 m에서 0.86 m, 1 m에서는 0.4 m 간격으로 설치해야 된다. 콘크리트 Anchor를 1.0 m 이하 간격으로 설치하는 것은 실질적으로 어려운바 수심 3.0 m 이하에서는 해안침식선 이하로 배관을 매설하는 것이 바람직하다. 본 계산은 매우 보수적인 값으로 배관의 자연 매설에 의한 안정성 영향을 고려하지는 않았다. 실제로는 설치 후 환경적 요인에 의해 배관이 어느 정도 자연 매설되며 이로 인해 계산된 값보다는 다소 안정적이다.

3.3.2 배출수 배관의 안정성 검토

해저 배출수 배관의 안정성 검토를 DNV-RP-E305로 수행한 결과 수심 20.0 m를 기준으로 계산한 해저 배관의 F_L , F_D , F_i 값은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 F_L(\text{양력, Lift force}) &= 162.96 \text{ N/m} \\
 F_D(\text{항력, Drag force}) &= 126.75 \text{ N/m} \\
 F_i(\text{관성력, Inertia}) &= 31.0 \text{ N/m} \\
 W_s &= [(162.96 + 126.75) + 0.7 \times 31.0] / 0.7 \times 1.5 = 582.5 \text{ N/m}
 \end{aligned}$$

수심 20.0 m 지역에서 배출수 배관이 환경적 외력에 대한 안정성을 확보하기 위해 필요한 최소 무게는 59.44 kg/m(582.5 N/m)였다. 배관의 무게가 25.36 kg/m 이고 사용한 콘크리트 Anchor의 단위 무게 284.82 kg/EA(0.118 m³/EA)에서 배관에 3.0 m 간격으로 콘크리트 Weight 1개를 설치 시 총 단위 무게는 59.99 kg/m였다. 즉 3.0 m 이하로 Anchor를 설치 시 안정한 상태가 된다.

같은 방법으로 각 수심에 따라 필요한 Weight를 계산한 값은 Fig. 13.과 같다.

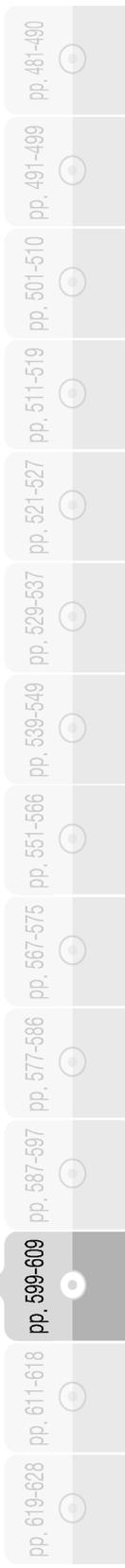
배출수 배관의 관경은 취수 배관보다 작음에도 취수 배관 20 m 지점의 필요 Weight 값 30.5 kg/m와 비교하면 약 2배의 높은 값을 보인다. 배출수 배관의 설치 각도는 250°이고 취수 배관은 212.5°이다. 주 파랑 방향은 216°로 배출수 배관의 경우 파랑 방향과 34°의 큰 각을 이루고 있다. 이로 인해 필요 Weight 값 계산 시 관련 Factor R 값(R, Directional and Spreading Factor)이 커져 높은 필요 Weight 값을 나타낸다. 만약 배관 설치방향을 파랑 방향과 동일하게 설치한다면 수심 20 m 지점에서 필요 Weight는 26.86 kg/m이다. 이는 배출수용 콘크리트 Anchor를 7.9 m 간격으로 설치해도 안정한 것으로 계산된다. Anchor 설치 간격이 멀어지면 설치 수량을 줄일 수 있어 보다 경제적인 설계가 된다.

Fig. 13.의 계산 값을 통해 수심 7.0 m에서 안정성을 확보하기 위한 Anchor 설치 간격은 1.0 m이고, 수심 6.0 m에서 0.87 m, 5.0 m에서 0.72 m, 4.0 m에서 0.57 m, 3.0 m에서 0.43 m, 2.0 m에서 0.28 m, 1.0 m에서 0.142 m 간격으로 설치해야 된다.

배출수 배관의 콘크리트 Anchor 폭은 0.375 m이며 이론적으로는 0.375 m 간격까지 설치 가능하나 실제로는 1.0 m 이하 간격은 시공이 매우 어렵다. 따라서 배출수 배관의 경우 수심 7.0 m 이하에서 매설하는 방안으로 설계하는 것이 바람직하다.

해저배관을 매설하는 것은 많은 비용과 시간이 필요하고 300A의 소형 배관을 매설하는 것은 매우 비경제적이라 할 수 있다. 만약 배출수 배관을 216° 방향으로 설치한다면 수심 5.0 m에서 안정성을 확보하기 위한 Anchor 설치 간격은 2.1 m이고 수심 4.0 m에서는 1.77 m, 3.0 m에서 1.35 m, 2.0 m에서 0.91 m, 1 m에서 0.46 m 간격으로 설치해도 된다.

이처럼 해저 배관 설계 시 파랑 방향과 배관 설치



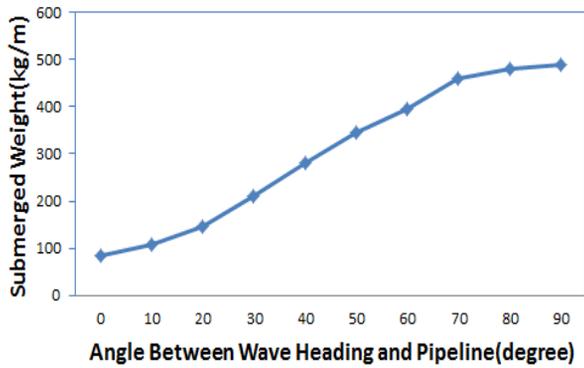


Fig. 14. Required weight versus different angle between wave and pipeline.

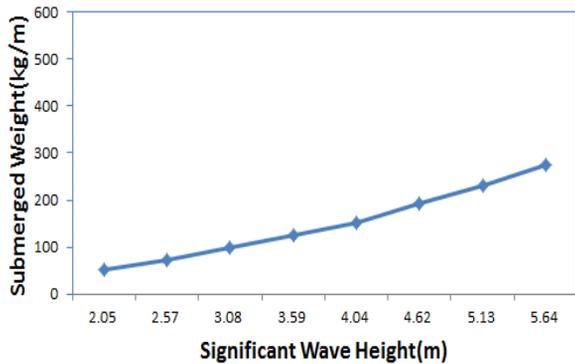


Fig. 15. Required weight versus different significant wave height.

방향의 설치 각도는 해저 배관 안정성에 매우 중요한 요소가 된다. 경제성과 안정성을 고려할 때 파랑 방향과 일치되는 방향으로 배관 방향을 설계해야 한다. 불가피하게 배관의 방향이 파랑 방향과 일치될 수 없는 경우는 배관을 매설하거나 환경적 외력 영향이 적은 수심에서 방향 전환을 하는 것이 바람직하다.

해저배관의 안정성 검토와 관련하여 여러 조건에서 필요 Weight 무게에 가장 영향을 주는 것이 무엇인지를 파악하기 위해 수심 5.0 m에서 배관설치 각도와 유의파고를 변경하여 그 영향을 살펴보았다. Fig. 14.는 파랑 방향에 대한 배관 설치 각도별 필요 Weight 변화를 나타낸다. 파랑 방향과 같은 방향일 때 필요 Weight는 85.0 kg/m이나 30° 차이로 설치할 경우는 211.2 kg/m로 약 2.5배의 침강무게가 필요했다. Fig. 15.는 수심 5.0 m에서 유의파고를 변경했을 때 필요 Weight 변화를 나타낸다. 유의파고는 Table 2.에서 100년 빈도 기준 5.13 m, 5년 빈도 3.8 m을 기준으로 사

용했다. 이때 필요 Weight의 무게는 각각 231.11 kg/m, 137.9 kg/m이다. 이는 약 1.7배의 차이를 보인다. 이상과 같이 필요 Weight는 유의파고 보다는 파랑 방향과 배관설치 방향의 각도에 더 큰 영향을 받는다.

배출수 배관의 경우 운영 중에 공기가 유입될 가능성이 있어 공기유입을 차단하거나 유입공기를 배출할 수 있는 설비 설계가 필요하다. 특히 운전을 정지하면 배관 내 수위가 해수면까지 내려간다. 이후 재가동 시 배관 내 미 배출된 공기는 곡관부위에서 배관 단면을 감소시킨다. 이는 농축수 배출을 어렵게 하고 배관을 부상시키는 등의 문제를 발생시킨다. 취수배관 보다는 배출수 배관에서 공기 유입 가능성이 높아 안정성에 더욱 취약하다. 따라서 배출수 배관은 운전 및 정지 시에도 공기가 유입되지 않도록 설계하는 것이 중요하다.

4. 결 론

해수 담수화 시 깨끗한 물을 안정적으로 취수하고 주변 해역에 적절하게 배출하는데 해저배관의 설계는 매우 중요한 사항이다. 해변이 모래로 구성되어 있어 해안침식 및 퇴적이 빈번한 태평양 연안 페루 칠카 지역 해저배관 설계 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 태평양 연안에 위치한 페루 칠카 지역의 해안은 계절적으로 해안침식과 퇴적이 반복되는 특성을 갖고 있으며, 침식과 퇴적을 유발하는 해변의 모래 입자 평균 입경은 0.16-0.2 mm이고 밀도는 2.70-2.72 Ton/m³이었다. 연구 지역에서 주요 파랑은 세 방향에서 발생하고 그 에너지를 조합하였을 때 극한파 결과는 100년 빈도 기준으로 유의파고(Significant wave height) 5.13 m, Peak Period 14.5 sec, Peak Direction 216°였다.

2) 100년 빈도에서 해안 침식 및 퇴적 분석결과 최대 침식은 해수면기준 1.8 m, 최대 퇴적은 2.3 m이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 평균 해수면 제로 근처에서 수심 5.0 m 이하 약 200 m 구간에서 심한 해안침식이 발생하고 수심 7.0-8.0 m 구간에서는 퇴적이 발생하는 것으로 분석되었다. 수심 5.0 m 이하 구간에 설치된 배관은 해안침식으로 배관이 노출되고 파랑과 해류 등에 의해 부상 및 파손 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

3) 해저 배관의 안정성 설계 시 파랑 방향과 배관



설치 방향의 각도는 안정성 설계에서 가장 크게 영향을 주는 요소이다. 배관의 설치 방향은 주 파랑 방향과 가능한 일치하게 설계하는 것이 보다 안정성을 확보한 설계라 볼 수 있다.

4) 해수담수화 과정에서 발생된 고염도 농축수는 배출지점에서 충분한 희석이 이루어지도록 위치 선정 및 구조물 설계가 되어야 한다. 희석관련 주 영향인자는 배출 지점에서의 해류 속도와 디퓨저의 배출구 높이로 분석되었다. 농축수는 비중이 해수보다 커 가라앉는 특성이 있는바 가능한 높은 위치에서 배출될 때 희석배율이 높았다.

References

- Cho, K. W., Meang, J. H., Joo, Y. J., Shin, H. H., Kim, G. H. (2006). "A study on mitigation plan of coastal erosion effect on coastal development project", Korea Environment Institute, 5.
- Choi, Y. J. Park, N. S. Choi, B.Y. (2012). "Study for on-bottom stability of submarine pipeline due to Wave and Current" KSCE 2016 convention, 431-434.
- Det Norske Veritas(DNV), (1988). RP E305, On-bottom stability design of submarine pipelines.
- Det Norske Veritas(DNV), (2007). RP F109, On-bottom stability design of submarine pipelines.
- D. Hasson, H. Fath, Z.Abbas, A.Khaled, (2011). "Techno-economic assessment and environmental impact of desalination technologies", Desalination, 266, 263-273.
- Hwang M.H., Han D. S. and Kim I.S. (2017). "Estimation of Water Production Cost from Seawater Reverse Osmosis (SWRO) Plant in Korea," Journal of Korean Society of Environmental Engineers , Vol. 39, No. 4, pp. 169-179.
- Korea Hydro & Nuclear Power Co. (KHNPC), (2006). "Analysis to Evaluate of Marine Ecosystem by The Deep Discharge At Power Plants".
- M. Daghigh, S. Alagheband, H. Tahmasbi Ashtiani, (2008). "Applying the reliability analysis concept in on-bottom stability design of submarine pipeline", ICOPMAS, Volume 8.
- Nikolay Voutchkov, (2013). "Desalination engineering planning and design", The McGraw-Hill Companies. U.S.A 205.
- Nikolay Voutchkov, (2011). "Overview of seawater concentrate disposal alternatives", Desalination, 273, 205-219.
- Ogbonda Douglas Chukwu, Chinwuba Victor Ossia, C.O. Akhigbemidu, (2016). "Estimating on-bottom stability of offshore pipelines in shallow waters of the gulf of guinea" International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 4(3), 115-122.
- Shepard, F. P. (1973). "Submarine Geology 3rd ed." New York: Harper & Row. The Earth Beneath the Sea in greater depth, with a more scholarly emphasis.
- Sydney Miller, Hilla Shemer, Raphael Semiat, (2015). "Energy and environmental issues in desalination" Desalination, 366, 2-8.
- Tom Garrison, (2008). "Oceanography : An Invitation to Marine Science", 3rd Edition, Orange Coast College, University of Southern California, 287.
- Water Reuse Association, (2012). "Seawater desalination costs" White Paper. January.
- Y. Tian and M.J. Cassidy (2013). "Equivalent absolute lateral static stability of on-bottom offshore pipelines" Australian Geomechanics Vol 48 No. 4 December.

pp. 481-490

pp. 491-499

pp. 501-510

pp. 511-519

pp. 521-527

pp. 529-537

pp. 539-549

pp. 551-566

pp. 567-575

pp. 577-586

pp. 587-597

pp. 599-609

pp. 611-618

pp. 619-628