

실험에 의한 해양방류관거의 안정성 고찰

A Experimental Study on the Safety of Underwater Sewage Outfall

김국태¹, 정동호¹, 박한일²
 Goog-Tai Kim¹, Dong-Ho Jung¹, and Han-Il Park²

1. 서 론

최근까지 주변이 해양으로 둘러싸인 연안국가에 서는 오·폐수를 인접한 연안으로 그대로 방류하 여 왔다. 그 결과, 연안의 환경오염이 상당히 심 각해졌다. 이에 따라 연안의 환경오염을 줄이기 위하여 오·폐수를 해양방류관거를 통해 해안선에서 멀리 떨어진 곳으로 방류하는 방법이 널리 채택하고 있다. Fig. 1은 호주의 연안도시 시드니에 연안의 환경오염을 줄이기 위해 설치된 해양방류 관거의 형상을 나타낸다. 해양방류관거란 육상에서 처리된 오·폐수를 해저 파이프라인이나 해저 터널을 통하여 해양으로 방류하는 장치로서 그 구성은 오·폐수를 해양으로 이송하는 해저 파이프 라인 혹은 해저 터널, 이들로부터 해저 바닥위로 내보내는 역할을 하는 라이저, 최종적으로 해수 중에서 오·폐수를 희석시키는 디퓨저로 이루어져 있다. 해양방류관거는 상당히 열악한 해양환경 속에 노출되어 있으므로 파도, 해류, 토사이동 등으로 인하여 손상될 가능성이 매우 높다.

본 연구에서는 21세기 우리 나라 물류시스템의 거점지로 예상되는 부산의 녹산 및 신호공단에서 발생될 수 있는 오·폐수 문제를 처리하기 위해 적용될 해양방류관거의 안정성을 고찰하고자 한다. 이때, 안정성을 검토하기 위해 해양파이프라인에 작용하는 응력, 라이저 부분에서 발생하는 가속도와 이로 인한 진동으로 인한 해양파이프라인과 라이저의 연결부분에서의 피로파괴해석, 그

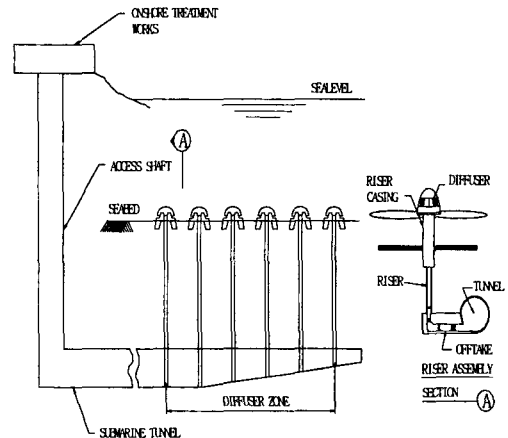


Fig. 1. Typical configuration of underwater sewage outfall
 리고 파랑과 조류에 의한 지반세굴에 관하여 조사 하였다.

2. 해양환경

2.2.1 가덕도 주변의 해양환경

가덕도 주변의 해안선은 비교적 단조로우며, 섬의 동안, 남안, 서안은 수심이 매우 깊으나 북안은 얇은 갯벌로 되어 있다. 해양방류관거가 건설된 가덕도의 동측에 대한 수심은 해양방류관거의 끝 부분인 라이저가 위치하는 부분은 수심이 약 12m이다. 해양방류관거가 매설된 대부분의 해역에서는 수심이 8~12m이다. 가덕도 주변 해역의 조

¹ 한국해양대학교 대학원 해양공학과(Department of Ocean Engineering, Graduate School of Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea)

² 한국해양대학교 해양개발공학부(Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea) Muan-Gun, Cheon Nam 534-729, Korea)

위는 녹산하수처리장 건설 기본 및 실시설계 보고서(도화종합기술공사, 1995)에 근거하면 아래의 Table 1과 같다.

Table 1. Height of tide around Gaduk Island

약최고 만조위	대조평균 만조위	소조평균 만조위	평균 해면	소조평균 간조위	대조평균 간조위	약최저 간조위
177. 4	165.6	116.8	88. 7	60.6	11.8	(±) 0.0

가덕도를 중심으로 동측해역은 남동쪽으로 외해에 직접적으로 노출되어 파랑의 영향을 많이 받는 반면, 서측해역과 북측해역은 주변이 섬으로 둘러싸여 파랑의 영향이 적다. 본 연구에서는 참고문헌(한국근해해상지, 1992)에 근거하여 남해안에서 출현하는 유의파고를 이용하여 실험을 수행하였다. Table 2는 남해안에서의 유의파고의 출현율을 나타내고 있다. Table 2에서 알 수 있듯이 남해안에서는 0.4 ~ 0.9m의 유의파고가 지배적이며, 가장 큰 유의파고는 4.1m로써 악천후 시에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

Table 2. Appearance rates of significant wave heights

유의파고 (m)	평균주기 (sec)	출현율 (%)
0.4	2.43	56.5
0.9	3.65	34.9
1.4	4.55	5.5
1.9	5.30	1.6
2.4	5.96	0.6
2.9	6.5	0.7
3.4	7.09	0.1
3.9	-	-
4.1	-	0.1

2.2.2 실험에 적용된 해양환경

본 실험에서는 보다 다양한 해양환경조건에 대한 해양방류관거의 거동을 실험하기 위하여 Table 3에 나타난 것과 같이 수심과 파랑 및 조류의 상태를 다르게 하였다. 특히, No. 6 - 11까지는 수심을 40cm로 낮춤으로써 조석에 따른 수심의 영향을 고찰함과 동시에 수심에 다른 지반세굴현상의 변

화를 조사하고자 하였다.

Table 3. Waves and tides in experiment and in reality

No.	주기 (sec)		파고 (cm)		조류 (cm/s)		수심 (cm)	
	실험	실제	실험	실제	실험	실제	실험	실제
1	2	7.75	15.2	228	21	81	80	1200
2	2	7.75	11.4 4	172	21	81	80	1200
3	1.33	5.15	17.8 9	268	21	81	80	1200
4	1.33	5.15	10.0 7	151	21	81	80	1200
5	1.25	4.84	13.6 4	205	21	81	80	1200
6	2.0	10.9	13.5	405	0.0	0.0	40	1200
7	1.33	7.3	13.0	390	0.0	0.0	40	1200
8	1.25	6.8	12.0	360	0.0	0.0	40	1200
9	0.0	0.0	0.0	0.0	19	104	40	1200
10	2.0	10.9	10.5	315	19	104	40	1200
11	1.33	7.3	10.0	300	19	104	40	1200

3. 실험개요

본 실험은 남해안으로 유입되는 낙동강 하구에 인접한 가덕도의 동쪽에 건설된 Fig. 2의 해양방류관거를 Fig. 3과 같이 비례축소규칙에 따른 수리모형을 통하여 2차원 조파수조에서 이루어졌다.

본 연구에서는 실험을 통하여 크게 3가지 항목에 대해서 알아보기로 한다. 첫째, 라이저 부분은 일부분이 해양환경에 직접 노출되기 때문에 외부하중을 직접 받아 파이프와 연결된 부분으로 전달된다. 따라서 토크 게이지를 사용하여 해양환경에 의해서 해양파이프라인과 라이저의 연결부분에 얼마의 토크가 발생하는지를 관측한다. 둘째, 파랑과 조류의 작용에 따라 라이저는 유체흐름방향으로 진동하기도 하지만, 와동방출에 의해서 유체흐름의 직각방향으로 진동하기도 한다. 와동방출의 진폭은 매우 작지만, 진동수는 유체흐름방향에 비해 큰 값을 가지게 되므로 이 성분도 고려할 필요

가 있다. 따라서 가속도계를 사용하여 해양환경에 의한 라이저의 진동정도를 살펴본다. 셋째, 라이저 주변에서는 파랑과 조류의 작용에 의해서 저질사가 소실되는 세굴현상이 발생하게 된다. 세굴이 발생하면 라이저의 노출면적은 증가하게 되어 보다 큰 하중을 받게 되고 토크도 크게 작용하게 된다. 따라서 지반세굴에 대한 관찰을 실시한다. 넷째, 해양구조해석 전용프로그램인 SACS를 이용하여 가장 큰 응력집중이 일어나는 부분에 대하여 파랑에 의한 피로파괴해석을 수행한다. 그 결과에 의해 해양방류관거의 설계수명과 피로파괴에 의한 구조물의 수명을 비교하여 그 안정성을 검토한다.

4. 실험결과

4.1 토크에 대한 실험결과

Table 4에서는 토크게이지를 이용하여 수리모형에서 측정된 토크값과 이 값을 실제 해양방류관거에 적용하였을 때의 토크값, 그리고 구조해석용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 토크에 의한 응력값이 나타나 있다. Table 4에서 알 수 있듯이 주기가 10.9sec이고 파고가 405cm인 No. 6에서 Fig. 4와 같이 9720kg·m의 최대토크값과 1.588MPa의 최대응력값을 얻었다. 이 최대응력값에 Kwang의 공식에 따라 계산된 약 20의 최대응력집중계수를 곱한다 하더라도 강철의 허용응력값인 300MPa보다 작으므로 실제의 해양방류관거는 가덕도의 해양환경에 대하여 충분한 안정성을 갖는다고 볼 수 있다.

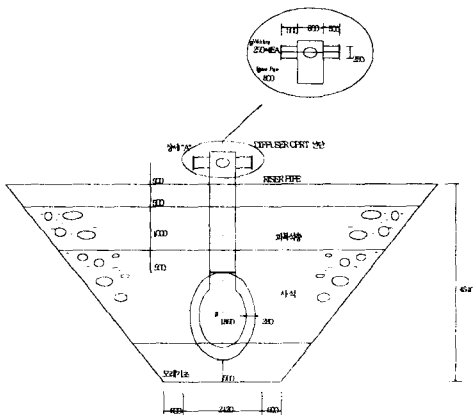


Fig. 2. Cross section of riser portion of underwater sewage outfall

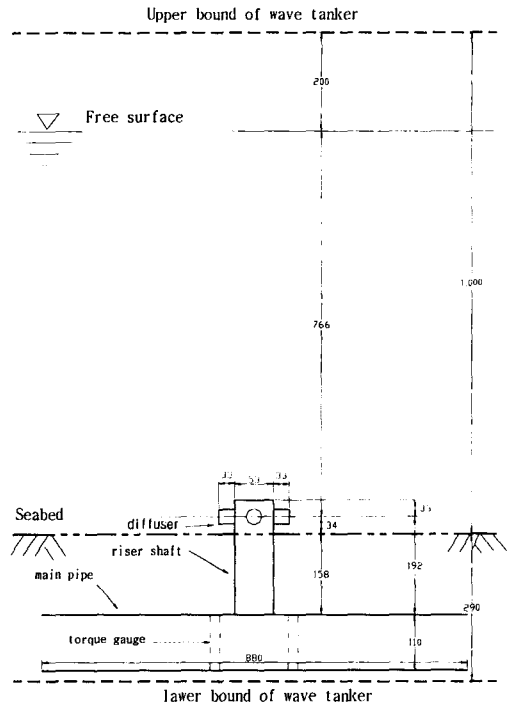


Fig. 3. Cross section of the hydraulic model of underwater sewage outfall

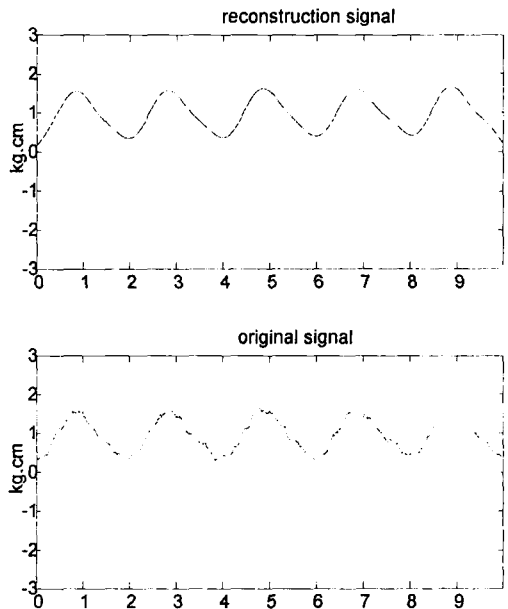


Fig. 4. Torque variation in the case of No. 6

Table 4. Torques and stresses in experiment and in reality

No	토크(kg·m)		응력(MPa)
	모델	실험	
1	0.032	1620.0	0.487
2	0.014	708.75	0.363
3	0.013	658.13	0.356
4	0.007	354.38	0.315
5	0.007	354.38	0.315
6	0.012	9720.0	1.588
7	0.007	5670.0	1.037
8	0.005	4050.0	0.187

4.2 가속도에 대한 실험결과

가속도에 대한 실험결과는 크게 2가지로 나눌 수 있다. 하나는 유체흐름방향 성분이고 또 다른 하나는 유체흐름의 직각방향 성분이다. 먼저 유체흐름방향 성분은 No. 1 - 5의 경우들인데, 이들 대부분 실험의 경우에 대하여 가속도는 0.1g 이하의 진폭을 나타내었다. 이것은 해양방류관거의 라이저 부분이 파랑에 의한 운동이 크지 않음을 의미한다. 다음으로 유체흐름의 직각방향 성분을 살펴보면 No. 6 - 11의 경우들인데, 이들 대부분의 경우도 유체흐름방향과 마찬가지로 가속도는 매우 작은 값을 나타내었다. 이것은 와동방출에 의한 응답을 나타내는 것인데, 와동방출의 발생으로 인한 구조물의 진동이 거의 나타나지 않는 것을 의미한다. 이는 구조물의 고유진동수는 729Hz인데 반하여 와동방출의 진동수는 이보다 훨씬 작고 라이저에 붙어 있는 디퓨저의 영향으로 와류가 발생하기 어렵기 때문이다. 그러나 조류만 발생시킨 No. 9의 경우에는 Fig. 5와 같이 다른 경우보다 약간 큰 가속도가 발생하였다.

4.3 지반세굴에 대한 실험결과

파랑과 조류에 의한 라이저 주변의 지반변동을 관찰하여 파랑과 조류 중에서 지반세굴에 보다 영향을 많이 미치는 인자를 찾기 위한 것이다. 먼저 파랑과 조류를 각각 분리하여 작용시켜 실험한 다음 파랑과 조류를 동시에 작용시켜 각각을 분리했을 때와의 차이점을 살펴보았다.

먼저 No. 6 - 8의 경우들은 파랑만 작용한 경우로써 파랑의 영향이 해저면까지 충분히 전달되도

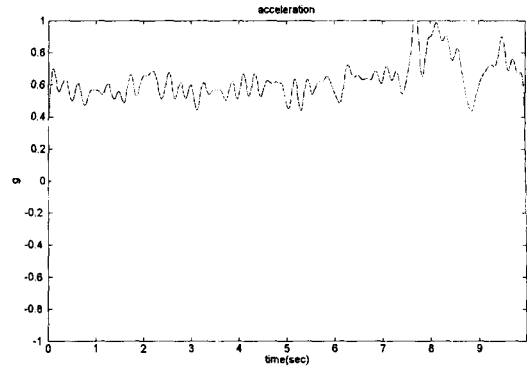


Fig. 5. Acceleration variation in the case of No. 9

록 하기 위하여 수리모형의 수심을 40cm까지 낮추어서 실험을 하였다. 천해역의 경우, 파입자 운동은 수심에 따라서 타원반경이 작아지는 타원운동을 하며, 해저면에서는 수평왕복운동을 한다. 따라서 파입자의 궤적거리가 라이저의 직경보다 상당히 긴 경우에는 파랑이 주변 저질사의 이동에 영향을 미치게 된다. No. 6 - 8의 경우들에서는 파입자의 운동이 해저면까지 상당한 영향을 미쳐서 해저면 저질사를 운동시키는 것을 육안으로도 충분히 확인할 수 있었다. 그러나 이것은 단순히 수평왕복운동에 불과하고 해저면에서는 유속이 감소하기 때문에 라이저 주변의 세굴현상은 발견되지 않았다.

다음은 No. 9의 경우로서, 이 경우는 조류만 작용한 경우인데, 조류속도가 수리모형실험에서 19cm/s인데 실제 해양방류관에서의 값으로 환산하면 104cm/s가 된다. 이 값은 해양방류관거 설치지점의 최대유속인 1.1m/s보다 약간 작은 값이다. 이 경우에는 라이저 전면과 양측면에서 세굴이 발생하였다. 전면에서는 세굴깊이가 약 1.5cm로서 실제 해양방류관거의 경우는 22.5cm에 해당되는 값이고 양측면에서는 약 2.0cm로서 실제 해양방류관거의 경우는 30cm에 해당되는 값이다. 또한 양측면에서 세굴된 저질사는 라이저의 후면으로 이동하여 퇴적되는 현상이 나타났다. 이것은 와동방출로 인하여 후면에서 세굴이 발생할 것이라는 예상과는 전혀 다른 현상으로 실제 해양방류관거에서도 이러한 현상이 발생할 것으로 예상된다.

마지막으로 No. 10 - 11의 경우들은 파랑과 조류를 동시에 작용시킨 경우로서 파랑과 조류의 진행방향이 일치하는 경우이다. 이 경우들에서는 파랑이 작용하지만 조류의 영향이 강하게 작용하기 때문에 파랑에 의한 부가적인 세굴현상은 심하게 발

생하지 않았다. 단지 조류만 작용하는 경우보다 약 0.2cm 정도 세굴깊이가 증가하는 현상을 나타내었다.

4.4 피로해석결과

일반적으로 피로파괴해석 방법은 결정론적 방법과 확률적 방법으로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는 외부하중으로 파랑만을 고려하여 결정론적 방법으로 피로파괴해석을 수행하였다. 해양방류관거의 피로파괴수명을 결정하기 위해서는 먼저 실제 적용되는 해양환경에서의 유의파고와 파주기의 1년 동안 발생빈도를 이용하여 응력범위를 결정한다. 그리고 S-N 곡선으로부터 피로파괴를 일으키는 횟수를 구하여 식(1)에 나타난 Palmgren-Miner의 손상공식으로부터 1년동안의 누적손상값을 얻은 후 1/D를 취하여 피로파괴수명을 결정한다.

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (1)$$

여기서 D는 누적손상율, n_i 는 i 번째 응력범위 안에서 구조물에 작용하는 횟수, N_i 는 i 번째 응력범위에 의해 파괴되는 횟수이다.

실제 가덕도 주변의 해양환경하에서 해양방류관거를 Fig. 6에서와 같은 유한요소모델로 하여 조인트 1번과 연결된 유한요소 ①과 ⑧중에서 유한요소 ①번에서의 응력값이 더 크므로 이 값을 가지고 피로파괴해석 결과를 Table 5에 나타내었다. 이와 같이 하여 구한 결과, 조인트 1번 발생하는 누적피로파괴는 안전계수를 1.5로 하였을 때 0.0137로써 48.7년의 피로파괴수명을 가진다. 이는 설계수명 50년에 근접한 결과를 보여준다. 보다 높은 피로파괴수명을 갖도록 하기 위해서는 피로파괴해석에 사용된 해저파이프라인과 라이저가 만나는 부분의 용접방법을 변경하는 것으로도 가능하다.

5. 결 론

해양환경오염에 대한 공공의 관심과 인식이 점차 증가함에 따라 해양방류관거의 개발에 대한 필요성이 증대되고 있다. 그러나 해양방류관거는 매우 열악한 해양환경에 노출됨으로써 그 안정성에 대하여 사전에 실험이나 수치해석을 통하여 충분한 검토가 필요하다.

이러한 안정성을 검토하기 위하여 외부하중의 작용으로 인한 해양파이프라인에 전달되는 응력과

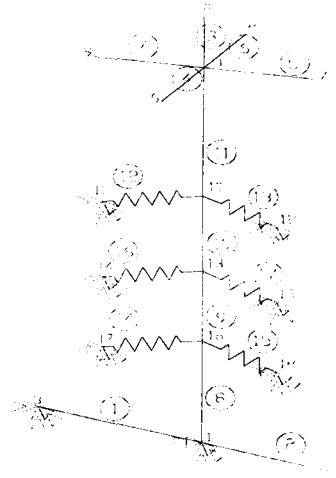


Fig. 6. Finite element model of underwater sewage outfall

Table 6. Result of fatigue analysis at joint 1

유 의 파 고 (m)	평균 주기 (sec)	1년출현 빈도	Hot spot stress 범위 (MPa)	허용빈도	파괴
0.4	2.43	7.34×10^6	0	∞	0
0.9	3.65	3.02×10^6	0.28	∞	0
1.4	4.55	3.81×10^5	1.77	∞	0
1.9	5.30	9.53×10^4	4.37	∞	0
2.4	5.96	3.18×10^4	9.31	8.26×10^7	0.0004
2.9	6.50	3.40×10^4	11.35	3.09×10^7	0.0011
3.4	7.09	4.45×10^3	11.86	2.18×10^7	0.0002
3.9	-	-	-	-	-
4.4	-	-	-	-	-
4.9	8.51	3.71×10^3	2.46	3.09×10^5	0.0120
1년에 발생하는 누적 피로파괴					0.0137

해저바닥 위에 노출된 라이저 부분의 가속도를 측정하였다. 또한 파랑에 의해 해저파이프라인과 라이저의 연결부분에서 발생하는 피로파괴해석을 수행하였으며 지반이 세굴되는 현상을 관찰하였다.

그 결과, 가덕도에 건설된 해양방류관거에 있어서 앞에서 고려한 사항들의 경우에 대해서는 충분한 안정성이 확보된다고 판단된다.

참고문헌

- Arnold, M. S., 1989, The Offshore Installation of Ocean Outfalls Diffuser Assemblies From a Semi-submersible, OTC 6017.
- Brooks, R. P., 1990, Design and Construction Planning of Deepwater Ocean Outfall Riser Shafts and Diffuser Structures, OTC 6386.
- ENGINEERING DYNAMICS, Inc., 1995, SACS User's Manual, Release 4.
- Herbich, J. B., 1981, Offshore Pipeline design Elements, Marcel Dekker Inc.
- McClelland B. and Reifel M. C., 1986, Planning and Design of Fixed Platform, Chp. 18, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York.
- Patel, Mino H., 1989, Dynamics of Offshore Structures, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd.
- Pater, M. H., 1989, Dynamics of Offshore Structure, Butterworths & Co. Ltd.
- SAP IP Inc., 1996, ANSYS User's Manual, Release 5.3.
- Sarpkaya, T. and Isaacson, M., 1981, Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, VanNostrand Reinhold Co.
- 李錫祐, 1992, 韓國近海海象誌, 集文堂,
- (주)도화종합기술공사, 1997, 녹산하수처리장 방류관거 기본 및 실시 설계에 따른 수리모형실험.