

해저 오염 퇴적층 복원 처리를 위한 BMP 패키지 기술 개발

배준홍* · 허문근* · 어경해** · 김승혁* · 박찬후* · 김병우* · 구근희* · 윤철원*

*삼성중공업 조선플랜트 연구소

**삼성엔지니어링 기술연구소

Development of Engineering Model for a Barge Mounted Seabed Sludge Treatment Plant

JUN-HONG BAE*, MUN-GEUN HA*, GYUNG-HAE AHO**, SEUNG-HYUK KIM*, CHAN-HU PARK*, BYUNG-WOO KIM*, KEUN-HOE KOO* AND CHEOL-WON YOON*

*Ship & Plant Research Institute, Samsung Heavy Industries, Geoje, Korea

**Research & Development Center, SECL, Seoul, Korea

KEY WORDS: BMP 부유식 해상 플랜트, Sediment 퇴적층, Engineering 엔지니어링, Restoration Treatment 복원 처리, Sludge 침전물

ABSTRACT: Soil, ground water, and sea bed are exposed to a continuous accumulation of polluted materials, causing serious environmental damage. It has been reported that such pollution causes a massive mortality of fish stock in rivers due to the resuspension of toxic chemicals, occurring during strong wind conditions. Therefore, it becomes apparent that there is an immediate demand for the restoration treatment of polluted river bed (or sea bed) sediment layers.

Pollution levels of major rivers and ports, such as Paldang, Kyungan rivers, and Masan port, are becoming of great public concern, and are posing a serious environmental threat. In particular, the pollution of the Shi-hwa river has become a nation wide issue for the last few years. In spite of such public concern, the pollution levels of such rivers or ports are worsening everyday.

In this study, an environmentally sound engineering package is introduced that helps to restore the polluted river bed or sea bed sediments. This engineering package consists of a suction facility, followed by a series of mechanical, chemical, and biological treatment units. The suction facility is designed to minimize secondary pollution that occurs from the resuspension of toxic materials during suction. The sea bed cleaning engineering package is designed to be installed on the top of a floating barge. Such a combination of environmental plant and shipbuilding technology provides a cost-effective solution, minimizing the cost involved in the transportation between suction and treatment facilities.

1. 서 론

근래 급속한 산업 발전 및 주거 환경의 팽창으로 인해 많은 항만 및 하천에는 산업 폐기물 및 생활 쓰레기 등의 오염 물질이 퇴적되고 있다. 과거 이러한 환경 오염 문제는 사업장 또는 주거 환경으로부터 발생하는 폐수, 폐가스, 폐기물 등의 직접적인 오염 발생원에 대한 관리에 치중되었으며 지하수·토양이나 하저 및 해저 퇴적층 등 이미 오염된 환경에 대해서는 상대적으로 관심을 가질 여유가 없었다.

최근, 토양, 지하수, 하저면 등에 대한 지속적인 오염 가중 현상이 문제화되면서 이미 오염된 퇴적층에 대한 복원 처리의 필요성이 논의되고 있고 특히, 팔당호, 경안천, 마산항 등의 퇴적층 오염 심각성은 이미 널리 알려져 있으며 시화호 등에서도 퇴적층이 지속적으로 수질 오염을 악화시키고 있는 것으로 조사되고 있다.

하천이나 항만 바닥에 있는 혼합물 상태의 오염 퇴적층을 회수, 처리하기 위해서는 준설시 부유물 발생을 최대한 방지하고

고액 분리 및 퇴적층 복원 처리 등의 과정을 거쳐야 한다. 일반적으로 해저나 하천 바닥에 퇴적된 오염 물질을 처리하는 방법으로는 준설선을 사용하여 오염 물질을 회수한 후 이를 배관이나 운송 바지(barge)를 이용하여 육상 처리 시설로 이송하여 처리하는 방식이 있으나, 이러한 방식은 회수된 오염 물질의 이송 문제 등으로 처리 비용이 높고, 이송 환경의 한정성 등으로 광범위한 지역에서의 이동이 불편하며 준설시 주변 환경을 다시 오염시키는 2차 오염의 문제도 발생하게 된다.

육상 처리 설비로 회수된 오염 물질을 처리할 경우 체류 시간이 길고 넓은 처리 면적을 필요로 하며 처리된 고형 퇴적물의 활용을 위한 매립지나 기타 활용 설비도 필요하기 때문에 공간 활용 측면이나 시간 절약 측면에서 불리하다.

현재 공간 활용 및 바지 형태 해양 구조물의 우수한 이동성을 바탕으로 해상 발전 플랜트, 해상 공항, 해상 소각 플랜트 등의 여러 가지 종류의 해양 플랜트가 구상되고 있으며, 이러한 해양 플랜트는 육상의 설비 기술과 선박의 설계 기술이 잘 어우러져 설계되어야만 하는 고도의 엔지니어링 기술이 필요하다.

또한 이러한 해양 플랜트가 개발되면 혐오 시설 등의 해상 이동을 통한 한정된 육상 공간의 효율적 활용이 가능하게 되

제1저자 배준홍 연락처: 경상남도 거제시 신현읍 장평리 530
055-630-5357 jhbai@samsung.co.kr

어 산업적, 경제적 효과를 얻게 된다.

따라서, 본 연구에서는 퇴적층 회수시 2차 오염을 최소화하는 회수 설비를 설치하고 고액 분리 과정을 거쳐, 폐수 및 오염 퇴적층을 복원 처리한 후 이를 자연 환경으로 되돌리는 일련의 과정을 해상 플랜트 내에서 실시하는 해저 오염물 처리 플랜트에 대한 엔지니어링 기술을 개발하고자 한다.

2. BMP 시스템 구성

본 연구에서 제시된 각 기술별 개발 현황 및 선정된 각 설비들에 대하여 설명하면 다음과 같다.

2.1 국내외 기술 개발 현황

현재 본 연구에서 개발하고자 하는 해상 플랜트에 대한 요소 기술들은 회수 설비 기술, 입자 분리 기술, 퇴적층 복원 처리 기술 및 설계 기술로 구분되며 각 기술별 개발 현황은 다음 Table 1과 같다.

Table 1 Status for individual technology

구분	국내	국외
회수 설비 기술	- 일본 자료를 바탕으로 한 설비 일부 보유 - 전문적인 회수 설비 개발은 없음	- 일본을 주로 하여 유럽 등에서 많은 실적선 보유 (준설선 기준) - Grab계 및 Pump계 설비 다수 보유
분리 설비 기술	- 광산 및 시멘트 공장 등에서 많은 실적 보유	좌 동
복원 처리 기술	- 90년대 중반 준설에 의한 수질 개선 효과와 2차 오염에 대한 조사 시도 - 퇴적층 복원 처리 기술 미흡	- 90년대 초반부터 미국, 일본을 중심으로 연구 개발 진행 중 - 신 공정 기술 개발 활발
BMP 설계 기술	- 한국 기계 연구원 주관 국제 과제에 기본 설계 진행 - 발전 BMP, 파력 발전 장치, 부유식 담수화 플랜트 등에 대한 설계 기술 보유 - 초기 설계 기술 확보	- 일본을 중심으로 부유식 공항 및 부유식 교량 등 연구가 활발히 진행 중 - 이동식 해상 군사 기지 및 해수 온도차 발전 플랜트 등에 대한 설계 시행 중

2.2 오염 물질 회수 설비

현재 오염 물질 회수 설비는 준설선(浚渫船)이라고 불리는 작업선(作業船)에 탑재된 것이 대부분으로, 일본에서 많은 실적을 보유하고 있다 (일본 작업선 요람, 1991; 작업선 40년 1998; 작업선 No. 224, 1996; 작업선 No. 233, 1997). 본 연구에서 선정된 회수 설비는 커터 휠(cutter wheel)식 회수 설비이다. 이 방식을 선택한 이유는 ① cutter wheel식 집니기(集泥機)와 흡니(吸泥) 펌프의 조합에 의해 혼탁이 적고 축적된 상

태 그대로 준설이 가능한 공법 ② 현재 실적 data가 본 연구에서 계획하고 있는 수심, 회수량 등과 유사한 점 에서 이 방식을 선정하였으며 Fig. 1에 본 설비의 3차원 형상도를, Table 2에는 제원을 나타내었다.

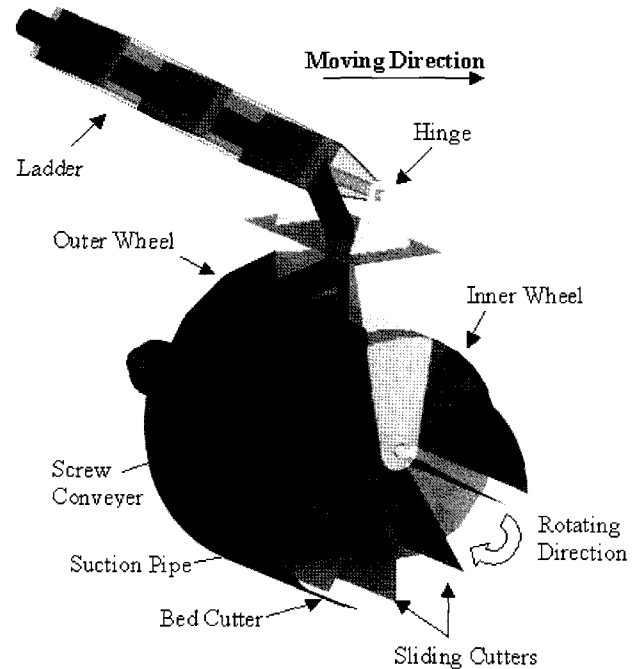


Fig. 1 Isometric view of cutter wheel

Table 2 Dimension of cutter wheel

형식	커터 휠(cutter wheel)식
집니기(集泥機) 내경 × 외경	Φ 1610 × Φ 2210 mm
집니기(集泥機) 폭	1500 mm
회수 대상 오니(汚泥) 두께	300 mm
slide식 채니(採泥) 칼 수	12개
집니(集泥) 능력	160 m ³ / h
Screw conveyer	1대
공칭(公稱) 회수 능력	60 m ³ / h
흡니(吸泥)관 지름	150 mm
대상 토층	점성토 (일부 모래 혼합)
준설 깊이	3 ~ 15 m

본 연구에서는 ASM (Algebraic Slip Mixture Model) (Fluent, 1998)을 이용하여 커터 휠(cutter wheel)과 파이프 유입구 부근에서의 물과 mud의 2상 유동장을 전산 유체 프로그램인 FLUENT, ver 5.0을 이용하여 계산하였다. 모델 결과를 이용하여 pipe suction velocity와 바지의 진행 속도에 따라 파이프 내부로 유입되는 유체의 함수 비율의 변화를 계산하였고, 함수 비율이 50 %이상 되도록 바지의 진행 속도와 pipe suction velocity를 결정하였으며 해석 결과는 Fig. 2, Fig. 3과 같다.

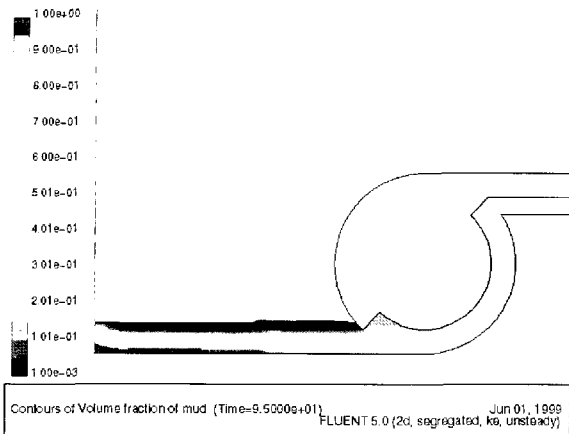


Fig. 2 Volume ratio of mud at steady state

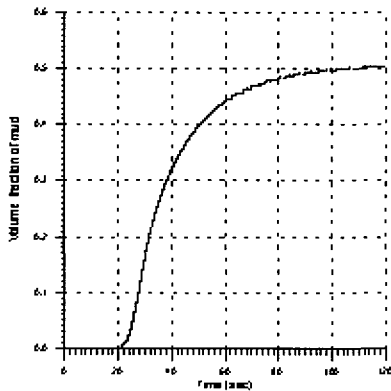


Fig. 3 Time variation of volume ratio in pipe

2.3 오염 물질 분리 설비

회수된 슬러지를 Fig. 4와 같은 입자 선별기를 사용하여 입자 크기 2 mm 이하는 폐수 처리 및 퇴적층 복원 설비에서 처리하고 2 mm 이상은 세척수를 사용하여 오염 물질을 제거한 후 처리하는 것으로 하였으며 Table 3에 제원을 나타내었다.

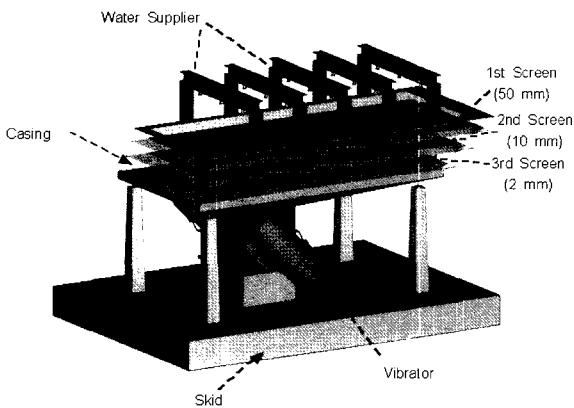


Fig. 4 Isometric view for vibrating screen

Table 3 Dimension of vibrating screen

면적 (m ²)	2.96
폭 X 길이 (mm)	1200 x 3000
진동기 output (Kw x unit)	3.7 x 2
진동수 (vpm)	900
중량 (kg)	1730

2.4 폐수 처리 및 퇴적층 복원 설비

입자 분리된 오염 퇴적층의 처리 공정은 퇴적물 중 고형물과 액상 폐기물의 분리, 액상 폐기물의 농축/탈수, 탈수 과정에서 발생하는 활용 가능한 골재, 고�형 폐기물, 액상 폐기물, 폐수에 함유된 오염 물질을 신속히 처리·처분할 수 있도록 설계하였다.

최적 처리 공정 설계를 위해 모래만 고상 잔류물로 처리하는 경우, 모래 전부와 점토 일부를 고상 잔류물로 처리하는 경우 등 6가지 경우에 대한 여러 설비들의 조합을 실시하였으며 본 연구에서는 폐수 처리 및 퇴적층 복원 설비들의 조합 중에서 바지 강도 측면 및 기본 배치 측면에서 가장 무겁고 큰 설치 장소를 요구하는 설비들의 조합 Fig. 5을 사용하여 기본 배치 및 바지 강도 해석을 수행하였고 향후 처리 대상 퇴적층 특성 변화에 따라 폐수 처리 및 퇴적층 복원 설비들의 조합이 바뀌어도 현재 계획된 설치 장소 및 바지 구조로 충분히 변경된 설비 조합에 대응할 수 있도록 설계하였다.

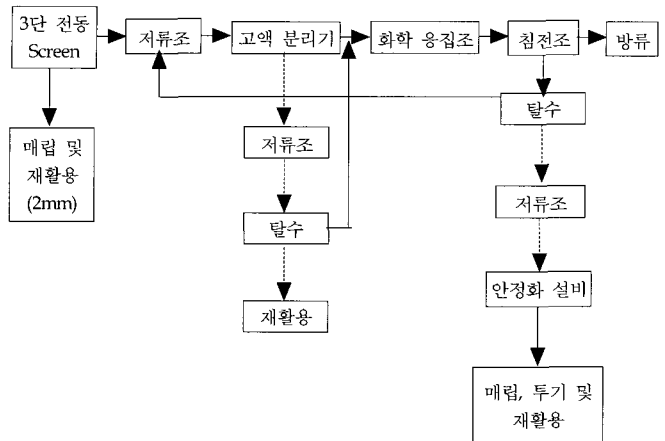


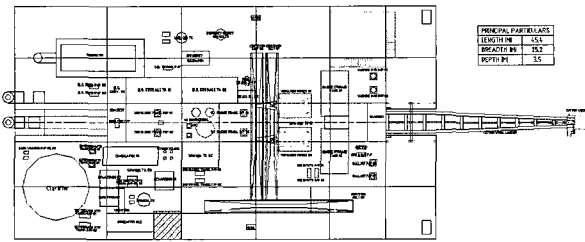
Fig. 5 Plan for restoration of sludge (Silt & Clay solid)

2.5 발전 설비 선정

본 연구에서는 부유식 해상 구조물 상에 발전 설비를 설치하여 각 설비에 대한 전원을 자체적으로 공급하도록 전체 시스템 부하 용량을 계산하고 부하 안전율을 고려하여 1,200 kW의 주 발전기를 계획하였다. 또한 500 kW의 비상 발전기를 갖추어 주 발전기의 고장시 긴급 전원 공급이 가능하도록 설계하였다.

2.6 오염 퇴적층 복원 처리 BMP 기본 배치

앞 절들에서 나타난 바와 같이 해저 오염 퇴적물 회수 및 복원 처리를 위한 최적 설비들을 선정하였으며 이들 설비들을 바지 상에 탑재하여 원활한 운전을 하기 위한 배치를 수행하였다. Fig. 6에 기본 평면 배치도를 나타내었고 Fig. 7에 3차원 형상도, Table 4에 BMP(Barge Mounted Plant)의 기본 제원을 나타내었다.



TOP VIEW

Fig. 6 Example of G.A. (Top view)

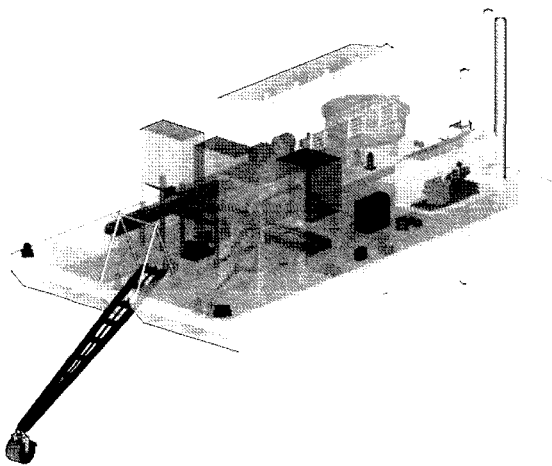


Fig. 7 Isometric view for BMP

Table 4 Main particular of BMP

길이 (M)	45.4
폭 (M)	25.2
깊이 (M)	3.5
설계 흘수 (M)	2.3
경하 중량 (Ton)	750

3. 이론적 검증

해상 플랜트 기본 배치에서 계획된 기본 배치를 근거로 하여 유체 정역학적 해석과 유체 동역학적 해석을 수행하였으며 플랜트의 구조적 안전성을 검토하였다.

3.1 유체 해석

부유식 해상 구조물은 주어진 작업 해상 환경에서 정해진 위치를 유지하며 요구되는 작업을 장기간 수행하여야 하므로 파랑, 조류, 바람 등에 의해 야기되는 환경 하중과 이로 인하여 발생하는 구조물의 거동을 정확히 예측하고 해석하는 것이 설계 관점에서 매우 중요하다. 이들 환경 하중과 이에 의한 구조물의 안정성과 운동 응답 해석은 구조물의 강도 결정, 작업 기준의 확립을 위해 오랫동안 연구되어 왔다.

본 절에서는 해저 오염물 복원 처리를 위해 개발되어진 BMP의 하중 조건에 대하여 각 선급에서 제시한 Rule & Regulation을 적용하여 안정성을 검토하고, BMP의 운동 응답 특성을 평가하였으며 풍속 100노트에 대한 해저 오염물 복원 처리 BMP의 동적 안정성을 IMO MODU code에 따라 각 재화 상태별로 검토한 결과를 Table 4에 정리하였으며, 모든 재화 상태 (회수 설비를 지지하는 support 부분 포함)에서 동적 안정성이 충분함을 확인하였다.

Table 5 Stability check according to load condition

ITEM	단위	경하 상태	만재 상태
① area under righting moment curve	m-rad	4.86	0.77
② area under wind heeling moment	m-rad	0.34	0.034
③ area between righting & heeling (②-①)	m-rad	4.52	0.736
(③ ÷ ②) ≥ 40%	%	1329	2165

Fig. 8와 Fig. 9는 각각 경하 상태와 만재 상태에서의 roll 운동에 대한 RAO를 나타낸다. RAO는 파고 1 m인 파가 입사하는 경우의 바지의 운동 응답으로서, 해저 오염물 복원 처리 BMP와 같이 비교적 작은 구조물은 peak period에서 비교적 큰 운동 응답을 하게 된다.

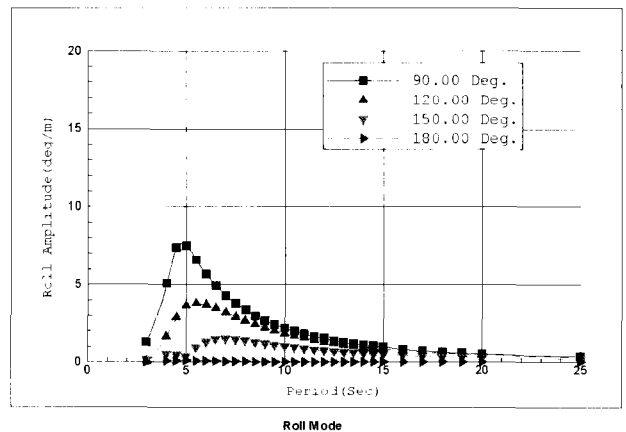


Fig. 8 RAO for roll motion (light ship condition)

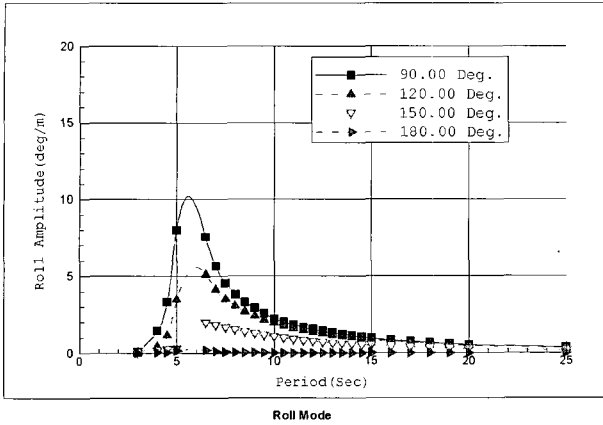


Fig. 9 RAO for roll motion (full load condition)

3.2 구조 해석

부유식 해상 구조물(BMP)는 주어진 작업 환경 하에서 장기간 작업을 수행해야 함으로 파랑, 조류, 바람 등에 의해 발생하는 환경 하중과 바지의 운동으로 발생하게 되는 관성력 그리고 자중 등에 의한 구조 거동을 정확히 예측하고 해석하는 것이 설계 관점에서 매우 중요하다.

본 연구에서는 해저 오염물 처리용 BMP 및 주요 상부 구조물에 대한 구조 설계를 수행하였으며, 바지 및 상부 구조물의 기본 설계안에 대한 구조 안전성을 평가하였다.

바지는 한국 선급의 준설선 규칙에 의해 부재 치수를 결정하였으며, 이 부재 치수를 근거로 설계 단면에 대한 횡단면 계수를 계산한 결과 선급 규칙의 요구치를 만족함을 알 수 있었다. 또한 정수 중의 파랑에 의한 압력 하중, 바지 및 상부 구조물의 자중에 의해 바지에 발생하는 응력이 허용 응력을 초과하지 않으므로 구조적으로 안전함을 유한 요소 해석을 통하여 확인할 수 있었다. (Fig. 10, Fig. 11)

또한 회수 설비를 지지하고 있는 ladder부의 구조 해석 수행시 가장 하중이 크게 작용하는 조건 즉, ladder 부분 내부 배관에 sludge가 가득 찬 상태로 수면 상에 노출되어 있는 경우를 고려하여 구조 해석을 수행하여 충분한 안전성을 가지도록 ladder 구조물과 바지 연결부를 설계하였다. (Fig. 12)

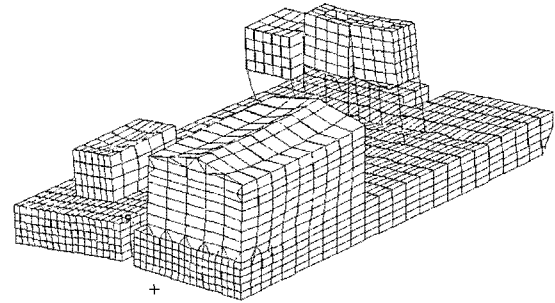
바지 이외의 상부 구조물은 풍 하중 등의 환경하중 및 국부적인 하중을 고려하여 설계를 하였고, 유한 요소 해석을 통하여 구조적으로 안전함을 확인할 수 있었다.

이러한 해석 결과로부터 본 연구에서 채택된 부유식 해상 구조물이 강, 호수등의 평수 구역 및 항만 등 연안 구역에서의 해저 정화 작업 시 구조적으로 충분히 안전한 것으로 판단된다.

4. 결 론

이상과 같이 해저 오염 퇴적층을 회수하여 입자 크기에 따른 분리를 실시한 다음 폐수 처리 및 퇴적층 복원 설비를 거쳐 오염 물질을 제거하는 부유식 해상 플랜트에 대한 엔지니어링 기술을 개발하였으며 기본 설계를 완성하였다.

MSC/PATRAN Version 9.0.25-Jul-01 16:07:47
Deform: Default, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



Deformed Shape of Sludge Treatment BMP

default_Deformation :
Max 19. @Nd 1

Fig. 10 Deformed shape for BMP

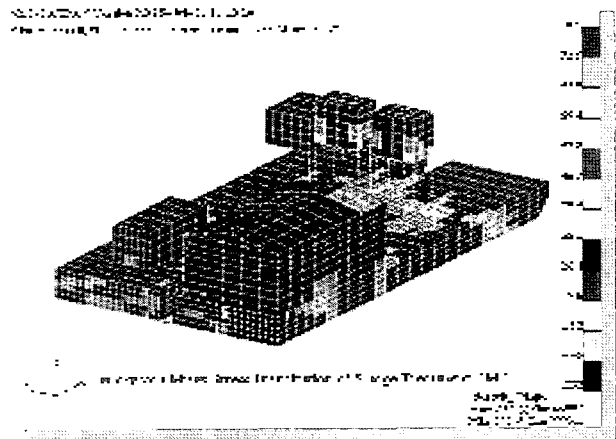


Fig. 11 Von-Mises stress for BMP

MSC/PATRAN Version 9.0.12-Apr-01 09:45:42
Fringe: lad2, Static Subcase_2, Stress Tensor, - von Mises

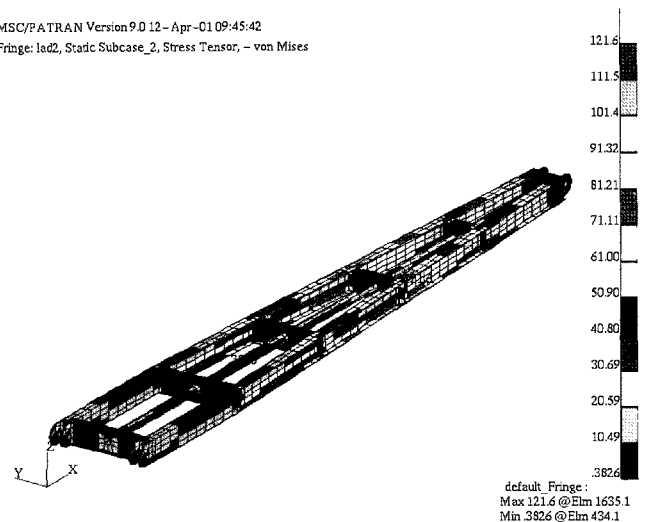


Fig. 12 Von-Mises stress for ladder structure

default Fringe :
Max 121.6 @Elm 1635.1
Min 3826 @Elm 434.1

본 논문에서와 같이 해저 및 하저의 오염 퇴적층을 부유식 해상 플랜트에서 회수, 분리 및 복원 처리하는 기술을 개발함으로써 기존 육상에서만 사용하던 입자 분리 설비 등을 해상 플랜트에서도 사용할 수 있다는 가능성을 밝힘으로서 관련 설비들의 시장성을 확대시킬 수 있다고 판단된다.

현재 육상에서 시행되고 있는 폐수 처리 및 퇴적층 복원 처리 기술을 해상 작업 환경이라는 상황에 맞추어 체류 시간 및 처리 시간을 최소화하여 부유식 해상 플랜트에 적용함으로써 기존 설비들의 개발 기술 상승 효과 및 설비 시장성을 확대시킬 수 있다고 판단되며 2차 오염 등의 문제를 해결할 수 있고 부유식 해상 플랜트의 이동성을 활용할 수 있으므로 호수 및 연안 항만 등의 오염 퇴적층 회수 및 처리에 용이하게 사용할 수 있다고 판단된다.

또한, 소각용, 담수 처리용 부유식 해상 플랜트 설계 기술 등 현재 국내에서 개발되고 있는 BMP 설계 기술에 당 연구에서 획득한 해저 오염물 복원 처리용 부유식 해상 플랜트의 설계 기술을 국내에서도 확보할 수 있으므로 향후 사람들의 거주 생활을 위한 해상 도시 등의 거대 부유식 해상 구조물 설계시 요소 기술로 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같이 본 논문을 통해 개발된 해저 오염물 복원 처리용 BMP가 시제품으로 제작되면 관련 국내 설비 기술 향상 및

부유식 해상 구조물 설계 기술 향상에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술정책평가원 후원으로 실시한 국책연구개발사업 중 “엔지니어링 핵심 공통 기반 기술 개발 사업”으로 수행된 연구 결과의 일부임을 부기한다.

참 고 문 헌

- 동양건설주식회사 (1997). “80m³/h 가반식 고농도 저니준설선”, 작업선 No 233, pp 4-9.
- 일본작업선협회 (1991). “일본 작업선 요람”, pp 135-166.
- 일본작업선협회 (1998). “작업선 40년의 흐름”, pp 14-142.
- 오양건설주식회사 (1996). “60m³/h 가반식 고농도 저니준설선”, 작업선 No 224, , pp 10-15.
- Fluent (1999). “User’s Guide”, Vol 3.

2002년 9월 18일 원고 접수

2003년 3월 26일 최종 수정본 채택