

심해저 양광펌프시스템 연구개발 기술보고 【과제명 : 심해저 광물자원 양광시스템 개발연구】

윤치호* · 박종명

1. 서 론

심해저 양광펌프시스템은 채광시스템을 구성하는 서브시스템의 하나로써, 그림 1에서 보는 바와 같이 집광기로 모아진 망간단괴를 심해저로부터 해상의 채광선까지 수송하는 시스템으로, 집광기와 채광선을 연결하는 양광관의 도중에 설치한 고압 수증펌프를 사용하여 망간노동을 해수와 함께 동요하는 양광관내를 해저에서 채광선까지 장거리 수송하는 것이다.

이러한 양광펌프시스템은 다른 양광시스템에 비해서 상대적으로 단순한 기기구성, 적은 소요동력에 따른 고효율, 용이한 운전조작 등의 뛰어난 특징이 있다. 양광펌프시스템은 깊은 수심·동적환경하에서 고농도의 슬러리를 장거리수송하기 때문에 신뢰성과 내구성이 뛰어난 고압펌프일 것이 요구된다.

따라서, 설계시에 망간단괴 입자를 포함하는 고액이 상류의 유동특성에 관한 각종 연구, 양광성능에 관한 실험 및 이론해석 등에 의한 요소기술개발을 실시할 필요가 있다.^(1~9)

심해저 광물자원 양광시스템 개발은 비철금속자원의 지속적인 가격 상승과 자원내셔널리즘의 세계적인 정세로 인하여 자원의 안정적인 공급 확보를 위하여 국가적으로 추진해야 할 매우 중요한 핵심전략사업이 되었다.

또한, 태평양 공해상 등의 심해저 광물자원 개발을 위한 광구를 신청하여 개발권을 획득하려면 채광에 관한 기술력을 보유하는 것과 국제기관 등에 대한 기술이전을 하는 것이 전제조건이 될 것으로 예상되고 있다.

따라서, 관련 산업의 육성과 개발을 촉진시키기 위

해서는 심해저 양광시스템의 필수요소인 양광펌프시스템의 연구개발이 선행되어야 하며, 우수한 성능의 양광펌프시스템의 개발은 국내의 펌프 산업계에 차세대 첨단산업화를 위한 동기부여 및 관련 산업의 경제적인 성장에 크게 이바지할 수 있는 계기가 될 수 있을 것이다.

한편, 망간단괴 양광시스템의 연구개발은 미국과 일

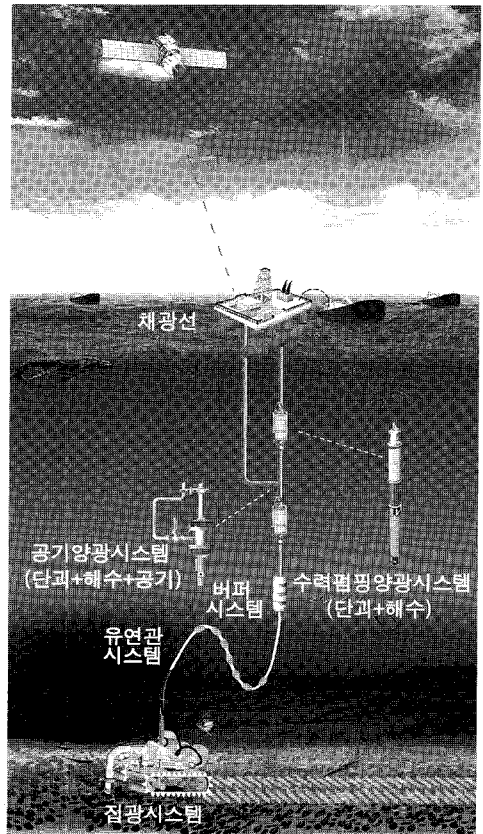


그림 1 심해저 망간단괴 채광시스템

* 한국지질자원연구원 광물자원연구본부
E-mail : ych@kigam.re.kr

본을 포함한 복수의 국제컨소시엄에 의하여 선행 실시되어 1970년대에는 해양에서의 채광실험도 시행되었다. 그리고, 프랑스에서도 국가프로젝트로 1980년대에 연구개발이 실시되었다.

이와 같은 심해저 광물자원 양광시스템과 관련된 선행연구에 의해 관련 기술선진국에서는 심해저 유망광구의 확보를 통한 21세기 해양 선진국으로서의 위상을 정립하고 외교적 주도권을 확보해가고 있다.

그러나, 우리나라의 경우 심해저 양광펌프시스템에 대한 관련분야의 기술수준이 아직 기술선진국에 비하여 초보적인 단계에 놓여있는 것이 현실이며, 기술선진국으로부터의 기술이전 또는 국가 간의 기술교류는 각국의 국익을 위한 기술유출 금지조치들로 인하여 현실적으로 실행되기 어렵다. 따라서, 국내에서의 기술개발은 산업계의 관련기술을 적용한 독자적인 기술개발이 불가피하며, 원천기술의 확보를 위해서는 국가주도의 전폭적인 지원이 필요하다.

이상의 심해저 양광펌프시스템과 관련된 기술적, 경제·산업적 그리고 사회·문화적 측면에서의 연구개발 필요성에 대하여, 본 기술보고에서는 현재 국내에서 독자적으로 연구 개발되고 있는 관련 기술에 대해서 살펴보기로 하며, 향후 추진되어야 할 연구개발과제에 대해서도 검토해보기로 한다.

2. 연구개발 개요

2.1 연구개발 추진현황

현재까지 추진된 본 연구개발사업을 통하여 설계, 제작 및 시험 적용된 1세대형 양광펌프 설계기술을 근간으로 하여 실제 해역에서의 양광성능 모사를 위한 차세대형 프로토타입의 다단형 양광펌프를 설계 및 제작하여 시운용 하였다.

이를 위해서 기존의 원심형 송출기능을 더한 축류와 원심형 송출성능을 갖는 임펠러의 설계를 위한 수치해석과 더불어, 다상(multi-phase)류의 고압송출 특성을 갖기 위한 2단형 임펠러 형상설계 및 이를 바탕으로 수심 30m를 전후한 근해역에서의 실험역 성능시험이 가능한 양광펌프를 개발 및 제작하였으며, 실험역 실증시험을 성공적으로 마쳤다.

그림 2는 한국지질자원연구원에 설치되어 운용중인 심해저 광물자원 양광실험동을 보이며, 그림 3은 실험역에서 실증시험에 참여중인 연구원들이다.

또한, 100m 수심의 근해역에 적용 가능한 양정 70m의 2단 사류형 양광펌프에 대해서 제작업체에 대한 설계 및 제작 기술 지원을 통한 양광펌프 제작을 완료하여 공장시험을 통한 성능시험을 성공적으로 마치고, 실험역 실증시험을 준비 중에 있다.

이상에서 설명한 본 연구개발사업의 추진현황을 간략하게 정리하면 표 1과 같다.



그림 2 심해저 광물자원 양광실험동 전경



그림 3 실험역 실증시험에 참여중인 연구원들 (사진중앙 저자)

표 1 심해저 양광펌프시스템 연구개발 추진현황

구분	과제명	연도	성과
1차 년도	근해역 양광용 펌프개발	2003	-고액 슬러리 펌프 설계 기술 확보
2차 년도	근해역 채광용 양광펌프 성능보완 연구	2004	-이상유동 3차원 수치해석 기법 확보 -심해양광용 유연관 설계 기술 확보
3차 년도	심해저 양광펌프 시제품 설계	2005	-이단 축류/원심 혼합형 양광펌프 기본설계 기술 확보
4차 년도	심해 실험역용 양광펌프 기본설계	2006	-심해저용 양광펌프 소재/ 부식/장식 기술 축적 -심해저용 양광펌프의 기 본설계 기술 확보
5차 년도	심해저용 다단양광펌프 형상설계	2007	-심해저용 4단 사류형 양 광펌프의 세부 설계안 제 시 및 성능 검증 -천해양광펌프 성능 시험 지원
6차 년도	심해저용 다단양광 펌프 보완설계	2008	-근해역용 양광펌프 제작 설치지원 -수치해석법 이관과 기술 지원 -심해역용 펌프 기본기술 검토

2.2 근해역 양광펌프 설계 및 실험역 성능시험 적용

표 1의 5차년도 과제에서 실험역에 적용하기 위한 4단 사류형 양광펌프의 수력설계와 수치해석을 통한 성능 검증을 완료하였다.

또한, 6차년도 과제에서는 근해역 100m 수심에서 예비적으로 양광성능을 테스트하는 시운전을 채광과 양광시스템이 통합적으로 2009년도에 실시할 예정이며, 표 2에서 근해역 양광펌프의 기초사양을 나타내고 있으며, 그림 4는 기본도면이다.

근해역 시운전용 펌프는 2단의 임펠러부와 가이드 베인부로 구성된 사류형 펌프로 제작되었으며, 펌프유로의 특성상 펌프 출구영역에서 발생 가능성이 높은 전압손실과 망간단과의 적체현상을 개선하기 위하여 유로가 완만하게 변화하도록 설계하였다.

그리고, 다단의 펌프를 이용할 경우 축봉장치와 연결되는 각 단의 임펠러는 적당한 거리를 유지해야 되며 이를 위해 흔히 볼베어링이 활용되지만, 일반적인 볼베어링을 사용하게 될 경우 윤활유를 이용하여 윤활

표 2 근해역 양광펌프의 기초사양

펌프 성능	사 양	비 고
유량	2.5m ³ /min	
양정	70m	
흡입 및 출구 구경	100mm	
Free passage	40mm	망간단과 직경 20mm로 가정
회전속도	1,750rpm	
모터동력	110kW	
모터전압	380V (3상)	
작동수심	130m	100m에서 작동하지만, 축봉장치 선정시 안전율 감안
재질	GC200, SUS304	Suction casing, impeller, discharge casing은 GC200을 적용. 그 이외는 SUS304를 채택

을 해야 되며 윤활유의 보충과 유지보수는 해수 속에서 수행하기에 번거로운 작업이 될 수 있다. 또한, 스테인리스 베어링이라 하더라도 장시간의 해수에 노출 될 경우 산화와 부식 작용이 필연적이다. 따라서 본 연구개발사업에서는 그림 5에서 보이는 바와 같은 특수 오일레스 베어링을 활용함으로써 이러한 문제점을 보완하도록 하였다.

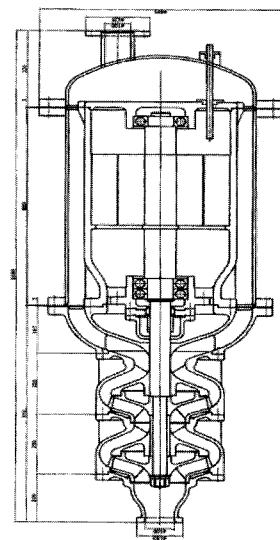


그림 4 근해역 양광펌프 기본도면

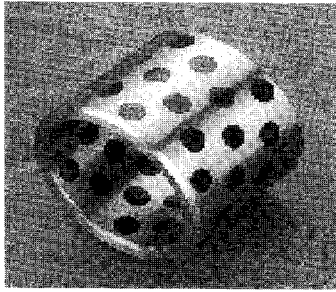


그림 5 오일레스 베어링(KDB 500)

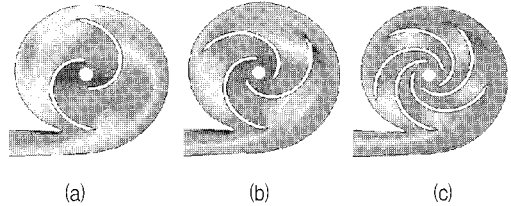


그림 6 블레이드 개수에 따른 전압분포(1차년도) :
(a) 블레이드 2 개, (b) 3개, (c) 5개

2.3 다상유동 펌프의 수치해석 기술 개발

본 과제를 수행함에 있어서 심해저 양광용 펌프시스템의 경우 일반적인 산업용 펌프와 같은 설계 프로세스를 적용하는 데 많은 제약이 있을 수 있다. 즉, 수중모터펌프는 아직 국산화율이 낮은 편에 속하기 때문에 설계에 참고할 수 있는 많은 데이터가 필요하다. 또한, 사용될 펌프의 자동유체가 다상이기 때문에 성능예측의 어려움이 존재한다. 그리고, 펌프의 설계안과 작동상의 문제점을 미리 파악하여 그에 따른 올바른 작동지침이 준비될 필요가 있다.

그러나, 국내 전문펌프업체가 가지고 있는 데이터는 거의 전무하며 이미 이러한 기술을 확보하고 있는 선진국가의 업체의 경우 기술 유출을 꺼리고 있으므로 자주적인 확보 외에는 기대할 곳이 없을 것이다.

따라서, 본 과제에서는 수치해석법을 개발하고 이를 적극 적용하여 활용할 필요가 있었기 때문에 실제로 지난 6년간의 이전 연구에서는 상용코드를 적용한 수치해석법을 이용하여 여러 좋은 결과를 도출해 낼 수 있었고, 그 결과를 적극적으로 설계에 반영해 왔으며, 각 연도별 수치해석 사례들은 다음과 같다.

1차년도에 적용한 수치해석법은 간단화된 원심형 펌프의 블레이드 개수에 따른 유동 형태를 규명하고 적절한 블레이드 개수를 제안하는 것에 목적을 두었다. 그러나, 수치해석 결과는 주로 정성적인 블레이드 수에 따른 펌프 내부의 유동연구였으며 정량적인 결과로는 활용될 수 없었다. 그림 6은 블레이드 수에 따른 2차원 펌프 내부유동장의 전압분포이며, 표 3에 블레이드 매수에 따른 유동해석 결과를 보이고 있으며, 표 4에 단상 및 다상 유동해석에 따른 해석결과 비교를 나타내고 있다.

표 3 원심형 펌프의 2차원 유동해석 결과 요약(1차년도)

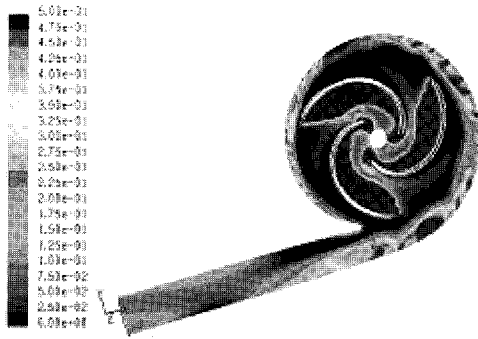
임펠러 블레이드 수 (개)	출구 유량 (kg/s)	전압차 (Pa)	입구 평균 속도 (m/s)	출구 평균 속도 (m/s)
2	2,478.47	347,633.8	15.3	24.0
3	2,857.16	403,024.2	17.6	28.7
5	3,039.71	472,435.2	18.7	30.5

표 4 원심형 펌프의 단상 및 이상 유동 해석결과 비교 (1차년도, 블레이드 3매)

유동특성	출구 유량 (kg/s)	전압차 (Pa)	입구 평균 속도 (m/s)	출구 평균 속도 (m/s)
단상유동 (물)	2,857	403,024	17.6	28.7
이상유동 (물+망간 단괴)	2,000 ~ 2,500	228,670 ~ 285,042	8.6 ~ 10.8	13.9 ~ 17.4

2차년도 과제에서는 1차년도 연구에 대해 3차원화하여 확장 해석하는 것에 주안점을 두었다. 제작된 원심식 1세대형 프로토타입 펌프를 활용하여 그 성능을 평가해보고자 했으나, 실제 펌프의 형상보다는 계산적 편이에 치중하여 유동장의 단순화로 인하여 정밀한 정략적 해석 결과를 얻는 것에는 한계가 있었다. 형상 비교 조건으로서 펌프 입구부가 급속 확장되도록 설계된 모델1과 완만하게 확장되도록 설계한 모델2에 대한 정성적 평가를 수행하였다.

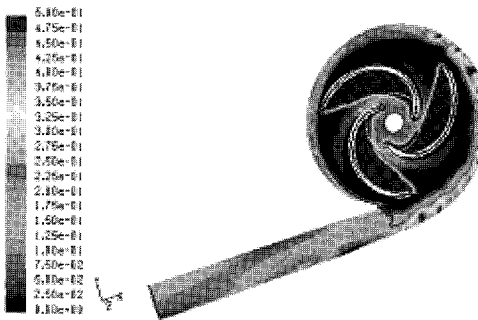
2차년도 연구과제의 성과는 1차년도에서 확정된 임펠러부의 블레이드 3개를 적용한 펌프를 토대로 펌프의 구동부 외에 다른 부속부인 유입부의 형상에 따른 펌프 성능 영향을 평가하였으며 중요한 연관 관계를



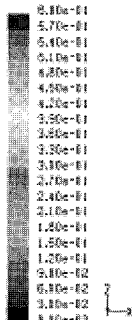
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 7 펌프내부 임펠러부의 망간 체적분포(2차년도) :
(a) 모델 1, (b) 모델 2

그림 8 펌프 유입부 형상에 따른 망간 체적분포(2차년도) :
(a) 모델 1, (b) 모델 2

확인할 수 있었다.

그림 7과 8은 펌프내부의 망간단괴 체적분포를 이상유동해석을 통하여 검토한 결과이다.

3차년도 과제에서는 1차년도 및 2차년도에서 검토되었던 원심형 펌프와 달리 사류형 2단펌프로 전환하여 개발되었으며 실제 전해역과 근해역 시운전 평가를 염두에 둔 개발이 이루어졌다.

그리고, 수치해석법에서도 큰 변화가 있었는데, 이전까지는 실제 펌프와는 별개로 정성적 평가에 대한 해석기법을 구축해 왔다고 볼 수 있는데 반해, 3차년도부터는 실제 펌프 제작 전후에 성능을 평가하는 정량적 검토에 대한 시도가 이루어졌다.

이와 같은 해석 접근은 실제 펌프 모델에 대한 직접적인 모사가 이루어져야 했기 때문에, 펌프 제작사의 3차원 CAD 도면이 수치해석용 형상모델링과정에서 활용되어졌다.

그림 9는 사류형 2단펌프 내부 유선을 나타내고 있으며, 그림 10은 펌프 내부의 유속과 망간단괴 체적분포를 보이고 있다.

5차년도 과제에서는 심해저에 설치되어 운용될 수 있는 실제 양광펌프를 가정하여 높은 양정을 달성할 수 있도록 단수를 4단으로 확장하여 수치해석을 수행하였으며, 그림 11은 형상모델링 결과를 보이고 있고, 그림 12는 펌프내부 각 단에서의 양정상승을 정량적으로 나타내고 있다. 또한, 표 5는 각 단의 임펠러에 작용하는 토크를 수치해석 결과를 이용하여 정량적으로 확인한 결과이다.

수치해석 분야에서 향후 수행되어야 할 과제로서는 망간단괴의 수치해석상 정의가 필요하고, 수치해석에 사용되고 있는 경계조건들의 실질성과 타당성의 검증을 해야 하며, 펌프 출구단을 포함하는 펌프 전체에 대한 수치해석이 요구되고 있다.

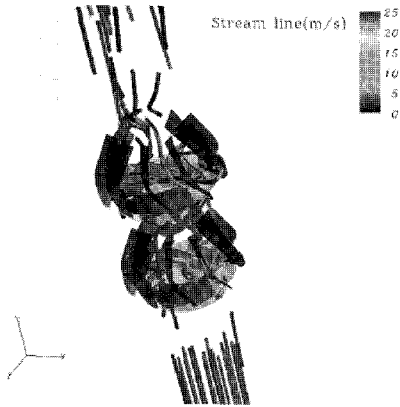


그림 9 사류형 2단펌프의 내부 유선(3차년도)

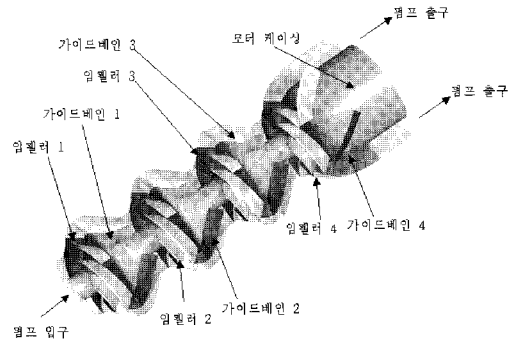
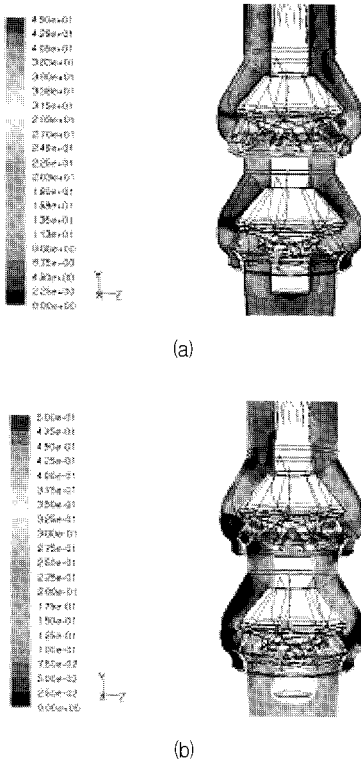


그림 11 사류형 4단펌프의 형상모델링 결과(5차년도)



(a)

(b)

그림 10 사류형 2단펌프의 내부유동(3차년도) : (a) 유속, (b) 망간단피 체적분포

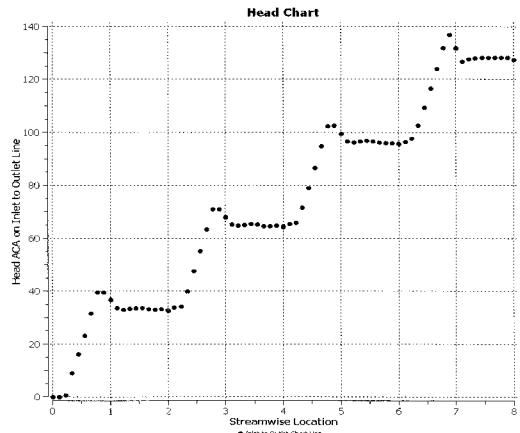


그림 12 사류형 4단펌프 각단의 양정상승 (5차년도)

표 5 사류형 4단펌프 각 단의 임펠러에 작용하는 토크 (5차년도)

로터부	블레이드 한 개당 토크 (N·m)	임펠러의 토크 (N·m)
임펠러 1	159.2	796.0
임펠러 2	152.1	760.5
임펠러 3	151.2	756.0
임펠러 4	154.0	770.0
전 체	-	3,082.5

2.4 심해저 양광펌프 및 유연관의 유동시험

한국지질자원연구원에에 그림 13에서 보이는 양광 타워가 있으며 펌프의 성능 실험 및 고액 이상류에 대

한 실험, 유연관 형상에 대한 심험 등을 할 수 있다. 양광타워는 30m의 수직고를 가지며 5층으로 구성되어 있다.

근해역 채광시험을 위해 제작된 양광펌프의 성능을 검증하고 곡관을 포함하는 유연관내 고-액 혼합물의

유동특성을 파악하기 위한 고-액 2상류 유동실험을 수행하였으며, 총 양정 55m의 양광펌프는 원심펌프로서 펌프의 상하단에는 유연관이 연결된다.

그림 14는 양광펌프 하부의 유연관 형상 개략도를 보이고 있으며, 실험에 사용된 유연관은 해양채광에 적합하도록 직경 100mm, 단위길이 10m로 제작되었다. 실험을 수행한 결과, 그림 15에서와 같이 20%의 고체 체적점유율까지 양광실험에 무리가 없는 것으로 확인하였으며, 기존에 개발된 전산모델의 예측이 실험결과와 유사함을 확인하였다.

2.5 심해저용 양광펌프 기술검토와 보완

펌프 최종 출구단의 형상이 펌프 전압에 미치는 영향이 매우 크게 나타남을 본 과제의 수행을 통하여 확인하였으며, 최적형상 결정에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다. 또한, 높은 양정을 달성하기 위해서 채용될 예정인 다단펌프의 경우 축추력에 대한 정밀한 검토가 선행되어야 하며, 축추력 발생에 따른 차압보상장치의 적용이 필요하다.

심해저 양광용 펌프에 전원공급을 위한 동력케이블과 모터 케이싱의 접합력을 유지시키기 위한 컴펜세이

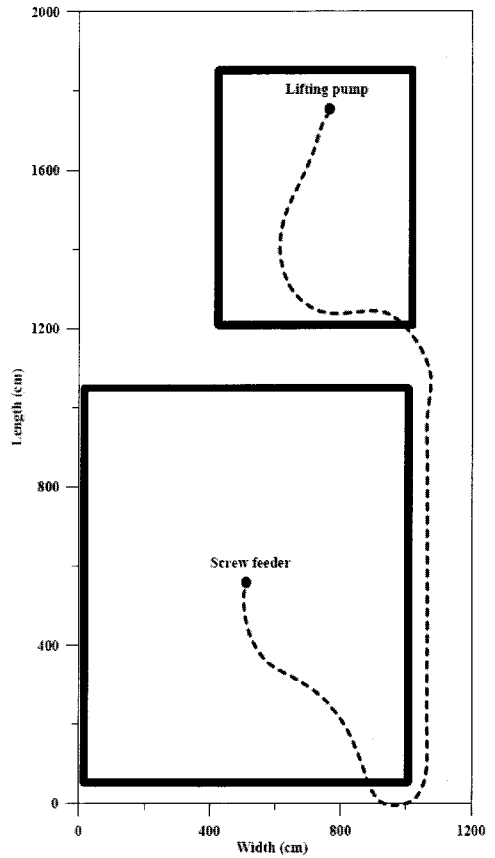


그림 14 양광펌프 하부의 유연관 형상 개략도

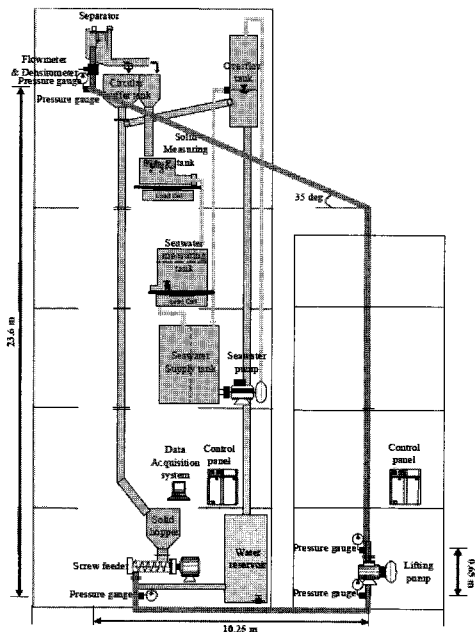


그림 13 양광펌프 실험장치 개략도

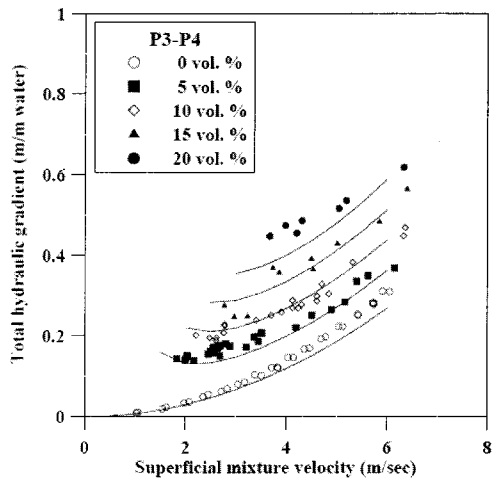


그림 15 고체 체적점유율에 대한 실험 및 이론해석 결과 비교

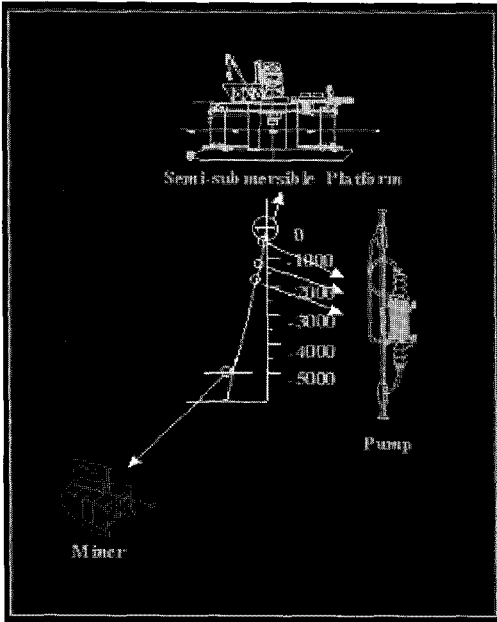


그림 16 수력펌핑방식의 양광시스템 개념도
(한국지질자원연구원)

터의 역할 및 성능에 대한 상세한 검토가 필요하다.

마지막으로, 심해저 양광시스템의 설치에 대한 각 구성요소의 상세한 검토가 요구되며, 현재까지 제안된 실험역 심해저 양광시스템의 개념도를 그림 16과 17에 나타내고 있다.

3. 결론

근해역 시운전용 펌프제작은 기초사양 선정과 이에 따른 펌프의 기본도면과 세부 상세 부품도 작성이 완료되었다. 아울러, 초기에 수력설계검토서를 활용한 단순한 펌프 세부설계에서 벗어나 전산해석기법을 활용한 각 펌프 주요 구성품의 최적설계가 진행 단계에 있다. 임펠러부는 4개의 블레이드로 구성된 단품에 대한 검토와 검증이 마무리 된 상태이며, 추후로 가이드베인과 전체 펌프의 성능검증이 예정되어 있다.

심해저용 다단양광펌프의 설계는 우리가 예측하기 힘든 많은 기술적 보완점이 산재되어 있을 것이라 예상된다. 펌프 설계에서 펌프 출구단의 형상을 최적화시키고, 모터부의 케이싱과 동력 케이블 전달 부분을 고려하여 한층 고도화된 설계가 진행되어야 한다.

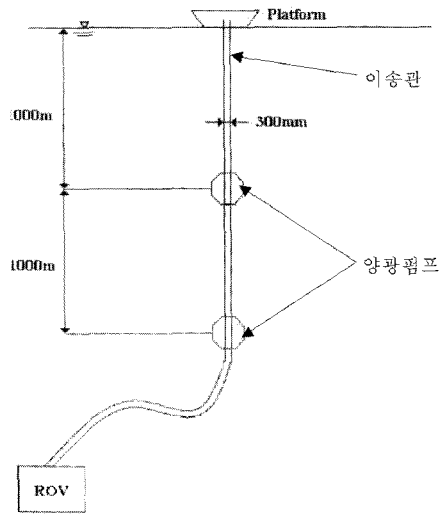


그림 17 양광시스템 개념도

또한, 축추력 차압보상장치에 대해서 보완하였으며, 펌프 모터부에 동력전달부의 기계적 쉘 처리를 위해 컴페세이터 활용을 제안하였다.

그리고, 양광펌프 시스템의 설치방법에 대한 정보를 수집하여 검토하였으며, 추후로도 태평양 광구의 실험역에 적용될 심해저용 펌프의 새로운 부속장치의 발굴과 심해저 양광작업 시에 나타날 수 있는 문제점을 관심 있게 검토해 볼 예정이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 해양수산연구개발사업의 연구과제인 “심해저 광물자원 양광시스템 개발연구”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 윤치호, 권광수, 양승진, 1993, “심해저 망간단괴 채광시스템,” 광물과 산업, 제6권, 제2호, pp. 2~8.
- (2) 권광수, 윤치호, 1993, “심해저 광물자원 현황 및 개발전망,” 한국자원공학회지, 제30권, 제4호, pp. 361~365.
- (3) 윤치호, 권광수, 양승진, 1995, “프랙탈모델을 이용한 심해저 망간단괴의 매장량평가,” 자원환경지질, 제28권, 제2호, pp. 155~164.
- (4) 윤치호, 권광수, 김인기, 성원모, 1996, “심해저 망

- 간단피 공기양광시스템의 정상유동분석에 의한 동력특성 연구,” 한국자원공학회지, 제33권, 제6호, pp. 421~427.
- (5) 윤치호, 김인기, 권광수, 권오광, 1998, “심해저 망간단피 수력펌핑 양광시스템의 양광관내 입자의 유동형태분석,” 한국자원공학회지, 제35권, 제2호, pp.157~164.
- (6) 윤치호, 김인기, 권광수, 권오광, 1999, “심해저 망간단피 수력펌핑 양광시스템에서의 비정상 유동모델에 의한 해석,” 한국자원공학회지, 제36권, 제1호, pp. 33~41.
- (7) 이동길, 성원모, 2006, “심해저 망간단피 양광펌프의 최적설계를 위한 3차원 고-액 전산유동해석 연구,” 제43권, 제3호, pp. 206~212.
- (8) 윤치호, 김영주, 이동길, 박용찬, 권석기, 2006, “광물자원 개발을 위한 사류형펌프 설계,” 유체기계저널, 제9권, 제5호, pp. 80~87.
- (9) 윤치호, 박용찬, 김영주, 박종명, 권석기, 2007, “근해역 채광용 양광펌프 및 유연관의 유동시험 연구,” 한국지구시스템공학회지, 제44권, 제4호, pp. 1~6.