

심해저 채광로봇 기술개발을 위한 Verification & Validation의 적용

Application of Verification & Validation for
deepsea mining robot technology development

성기영¹, 조수길¹, 오재원¹, 여태경², 홍섭³, 김형우^{1*}

Ki-Young Sung¹, Su-Gil Cho¹, Jae-Won Oh¹, Tae-kyeong Yeu²
Sup Hong³, Hyungwoo Kim^{1*}

〈Abstract〉

This paper deals with the verification of the functions about mining robot, which is the system for developing deep seabed resources by applying V&V(verification and validation). In order to overcome water pressure of 500 bar and to travel on soft ground, and to operate in deep sea environment with bad conditions, it is necessary to develop a robot that can satisfy various deepsea conditions. A mining robot has been developed based on simulation based design and Multidisciplinary design optimization. In order to verify the developed robot, lab test and real sea test should be performed for various marine environment conditions. There are too many requirements to consider, such as space, time, cost, personnel, and environment to do performance test. So it is costly and time consuming for developing robot. In order to solve this problems, V&V technique was applied to mining robot. The stages of mining robot design, fabrication and commission were verified.

Keywords : *Minning Robot 채광로봇, Simulation based Design 시뮬레이션 기반 설계, Multidisciplinary Design Optimization 다학제 최적설계, Verification 검증, Validation 확인*

-
- | | |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 주저자, 선박해양플랜트연구소, 해양플랜트산업지원센터1
기술원 | 1 Junior Engineer, Offshore Industries R&BD Center, Korea
Research Institute of Ship & Ocean Engineering |
| 2 선박해양플랜트연구소, 해양ICT연구본부, 책임연구원 | 2 Principal Researcher, Marine ICT Research Division, Korea
Research Institute of Ship & Ocean Engineering |
| 3 선박해양플랜트연구소, 정책협력부, 책임연구원 | 3 Principal Researcher, Policy Research and Cooperation
Department, Korea Research Institute of Ship & Ocean
Engineering |
- 1* 교신저자, 선박해양플랜트연구소, 해양플랜트산업지원센터3
터장, E-mail: hyungwoo4601@kriso.re.kr
- 1* Corresponding Author, The Director of Offshore Industries
R&BD Center, Korea Research Institute of Ship & Ocean
Engineering, E-mail: hyungwoo4601@kriso.re.kr

1. 서론

세계 인구는 1950년에 25억 명에서 현재 67년 만에 75억으로 증가했고 이 추세로 가면 2050년에 97억 명에 도달할 것으로 예상된다. 이와 더불어 과학문명은 예측할 수 없을 만큼 급속한 성장을 하고 있어 자원의 고갈은 점점 더 현실화되고 있다. 희귀금속인 희토류의 경우는 휴대전화, 모니터, 연료전지, 미사일 유도장치, 자동차 배기가스 정화용 촉매 등 다양한 유망 산업에 활용되어 있지만 전 세계 공급량의 95%를 중국이 차지하고 있어 이를 대체할 자원이 필요하다. 또한 최근 이산화탄소의 급격한 증가와 환경오염에 대한 전 세계적인 관심의 증가로 신재생에너지를 활용한 에너지 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 신재생에너지의 대표주자 중 하나는 풍력이다. 그 자체로도 아주 좋은 에너지원이라고는 하지만 전기로 바꾸기 위해서는 꼭 필요한 것이 바로 풍력 터빈이다. 풍력발전 터빈에는 니켈과 망간이 합금강철 재료로 많이 사용된다. 보통 합금강을 만드는 이유는 산화, 부식, 충격, 마모, 열기, 냉기 등에 버티는 성질을 좋게 하기 위해서다. 또한 전기자동차와 에너지저장장치(ESS)의 핵심은 내연기관차의 '엔진'에 해당하는 2차 전지다. 2차 전지 중 가장 널리 쓰이는 리튬이온 전지에는 리튬(Li)과 니켈(Ni), 망간(Mn), 코발트(Co) 등이 원료로 사용된다. 이들을 활용하기 위한 각종 광물인 망간, 니켈, 코발트, 리튬 등은 전략광물자원으로 전량 해외 수입에 의존하고 있다.

태평양 하와이 동남방향 1,500km C-C지역의 해저면에는 망간단괴가 부존되어 있다. 망간단괴에는 전략 금속인 망간, 구리, 코발트, 니켈, 희토류 등을 함유하고 있어 바다의 검은 노다지라고 불리고 있다. 대한민국은 1994년에 8월에 150,000km² 광구를 등록하였고, 2002년에 75,000km²의 독립

개발광구를 확보하였다.

이러한 망간단괴의 상업 채광을 위해 선박해양플랜트연구소는 1994년부터 꾸준한 연구를 진행하였다. 5,000m의 깊은 바다에서 운용되는 만큼 각 장비 단위부터 서브시스템, 시스템에 이르기까지 수많은 수조 테스트와 실증 테스트가 필요하다. 시간과 비용문제를 해결하고자 시뮬레이션 기반의 설계 기법 및 다물리 통합 최적설계 기법을 적용하여 실제 상황에서 발생할 수 있는 많은 문제점을 시뮬레이션 상황에서 해결하였다.

이러한 노력을 바탕으로 통해 2009년 상업 채광용량의 1/20 규모인 시험집광로봇을 개발하였다. 2009년과 2010년에 시험집광로봇의 실험역 성능시험을 성공적으로 완료하였다. 시험집광로봇을 바탕으로 상업 채광용량의 1/5 규모인 파일럿 집광로봇을 2012년에 개발하였다. 파일럿 집광로봇 개발을 위해 파일럿 집광로봇의 설계요구조건을 다음과 같이 도출하였다.

- ① 용량 : 상업채광용량의 1/5 (30만톤/년)
- ② 속도 : 1 노트 이상
- ③ 중량 : 30톤(공기중) 이내
- ④ 수심 : 5,000m급

상기의 설계요구조건을 바탕으로 파일럿 집광로봇을 설계하였다. 설계 결과 파일럿 집광로봇의 중량은 25톤(공기중), 9톤(수중)이었으며, 크기는 6m(L)×5m(W)×4m(H)이었으며, 평균 접지압은 7.9kPa이었다. 파일럿 집광로봇의 부분도는 Fig. 1에 나타나 있다.

제작 완료된 파일럿 집광로봇(Fig. 2)을 사용하여 2012년에 1차 예비집광성능시험을 수행하였다. 1차 예비집광 성능시험에서는 다음과 같이 파일럿 집광로봇의 기본적인 성능 및 모조단괴 집광성능 시험을 수행하였다.

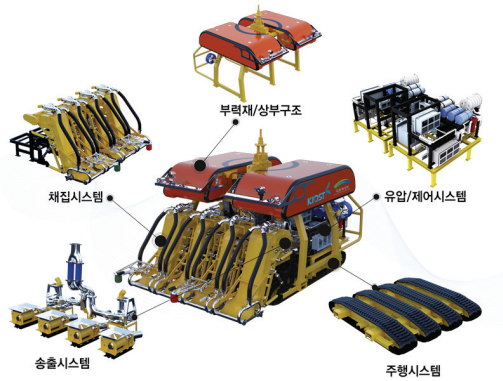


Fig. 1 Component parts of pilot mining robot

- ① 파일럿 집광로봇 핸들링 시험
- ② 수중센서 튜닝 및 시스템 성능 확인
- ③ 원격실시간 운용 S/W 성능 시험
- ④ 모조단괴 집광성능 시험



Fig. 2 Pilot mining robot, Minero™

2013년에는 동해 수심 130m 모조단괴 채집성능과 1,370m 주행 성능 등 2차 성능시험을 다음과 같이 수행하였다[1].

- ① 단괴채집장치 수정/보완 및 성능 검증
- ② 심해주행항법 알고리즘 성능 시험
- ③ 해저면 주행성능 시험

④ 해저면 주행경로추종 성능 시험

하지만, 제작단계와 시운전 단계에서 많은 문제들이 발견되었고, 이는 하부 장비부터 요구사항들을 정확히 정의하지 못해 시스템의 요구사항을 만족하지 못하는 문제라 판단되었다. 결국 시스템의 Top requirement로부터 각 서브시스템, 장비 단까지 요구사항을 할당하여 각 시스템의 설계를 수행해야 시스템 요구사항의 만족여부를 판단/검증할 수 있는데, 이러한 시스템 설계적인 연구가 부족하여 많은 시간이 소비되었다.

향후 상업용 채광로봇 개발에서 발생할 수 있는 상기의 문제점 해결을 위해, 본 연구에서는 일반적으로 소프트웨어를 개발하는데 사용하는 V&V (Verification and Validation)기법을 심해저 채광로봇 개발에 적용하고자 한다.

V&V 기법은 프로그램의 Top requirement에서부터 요구사항을 분석하고, 이 분석결과를 활용하여 시스템의 사양을 선정하고 제작 후 구성요소 하부 단에서부터 시스템을 테스트하는 설계 방법론이다. 본 논문에서는 V&V 기법을 개발된 파일럿 채광로봇에 적용하여 설계, 제작, 시운전에 이르는 단계를 검증하고 확인할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. V&V의 개념

Verification과 Validation은 검증한다는 비슷한 개념을 가지고 있다. 사용자의 요구사항과 얼마나 밀접한 관련을 가지고 있는지에 따라 차이가 있다. Verification(검증)은 개발단계의 초기에 설정된 조건을 만족하는지 여부를 결정하기 위해 구성요소나 시스템을 평가하는 과정과 각 기능이 제대로 동작하는지 여부를 확인하여 구현되는 제품이나 장비의 품질을 체크하는 것이다[2]. 이에 반해 Validation

(확인)은 명시된 요구사항들을 만족하는지 여부를 확인하기 위해 개발단계 중간이나 말에 구성요소나 시스템을 평가하는 프로세스로 정의할 수 있다.

V&V 개념도를 아래의 Fig. 3에 나타내었다.

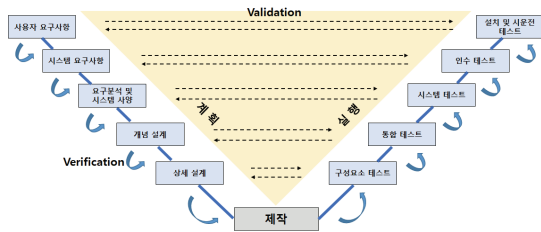


Fig. 3 V-Model

2.1 V&V의 필요성

V&V는 어떤 대상의 요구사항을 만족하는 설계를 위해 전체 시스템 레벨에서부터 최하부 시스템까지의 요구사항을 할당하고 전체 요구사항을 빠짐없이 수행할 수 있도록 검증하는 작업과 제작된 대상의 요구사항이 계획대로 만족하는지 여부를 확인하는데 그 목적이 있다. V&V를 수행해야 하는 근본적인 이유는 기술이 발달하고 다양한 성능

을 요구하는 시대에서 모든 요구사항들을 동시에 적용하기 힘들기 때문이다. 이러한 요구사항들은 계층적인 단계를 적용하여 요구사항을 할당하고 제작된 제품의 시험 및 평가를 통해 요구사항 만족여부를 검증하는 일련의 작업을 수행하여 품질 향상, 신뢰도 확보, 내구수명 및 고장률을 감소시키는데 있기 때문에 이것을 보증하기 위한 V&V가 필수적인 작업요소가 될 수 있다[3].

2.2 V&V의 절차

V&V는 신뢰도를 확보하기 위한 일련의 업무들을 정의한 절차이며, 절차 수행을 위해서는 많은 시간과 비용, 사람들의 적극적인 관심과 참여가 있어야 가능하다. V&V 절차에 대한 내용을 Table 1에 표기하였다.

3. 파일럿 채광로봇의 V&V

서론에서 기술한 망간단괴 상업적 생산을 위해서는 심해 광구의 연약지반을 효율적으로 주행하

Table 1. Procedure of V&V

절 차	내 용
검증 및 확인 계획	사용자의 요구조건 및 개발자의 의도에 맞게 개발되었는지에 대하여 전체 개발 프로세스의 검증 및 확인을 위한 계획 수립
요구사항 검증	제품 및 장비에 대한 요구 문서검토, 상위 요구문서부터 하위 요구문서까지 누락된 항목 없이 추적이 가능한지 살펴보고, 문장에 오류나 오해의 소지가 있는지 등 요구사항 자체의 완전성과 정확성을 검증하는 논리 검증
개념 모델 확인	제품 및 장비의 목적에 따라 모의하고자 하는 실세계의 범위와 상세도에 맞게 개념 모델이 수립되었는지 확인하는 과정
설계 검증	요구사항에 제시된 내용들이 설계에 반영되었는지 확인
데이터 검증	개념모델 수립, 설계, 구현 단계에서 식별된 여러 유형의 데이터들을 비교, 분석, 검토의 방법으로 검증
결과 확인	요구사항에 정의된 기능들이 모두 작동하는지 확인, 사용 의도에 적합한 결과를 생산할 수 있는지 평가함

고, 친환경적으로 광물을 채집할 수 있는 자항식 채광로봇과 실시간 원격제어기술이 선행적으로 확보가 되어야 한다. 따라서 채광로봇의 내구성과 신뢰성을 담보할 수 있는 설계 검증 시스템이 필요하며, 본 논문에서는 소프트웨어 부분에서 적용 중인 V&V를 채광로봇 기술개발에 적용시켜 그 효용성을 검증하고자 한다.

3.1 파일럿 채광로봇의 구성

Fig. 4와 같이 채광로봇은 크게 기계·구조부, 유압부, 전기·전자부로 구성되며, 그 하위에 채집시스템, 송출시스템, 진·회수 시스템, 주행시스템, 유압시스템, 전기·전자 시스템, 운용 및 전력 공급 시스템 등으로 세분화 되어 있다[4].

3.2 파일럿 채광로봇의 Validation절차

파일럿 채광로봇의 Validation의 절차는 Table 2처럼 요구사항, 기능 아키텍처, 물리적 아키텍처로 구성된다. Fig. 5는 파일럿 채광로봇의 Validation 절차에 대한 개념도를 나타낸 것이다.

Table 2. Procedure of Validation

항목	세부항목	내용
1. 요구사항 (Requirements)	일반적 요구사항	파일럿 채광로봇의 구성에 따른 가장 기본적이고 필수적인 요구사항에 대한 정의
	기술적 요구사항	일반적인 요구사항을 만족시키기 위하여 기술적으로 요구되는 세부적인 사항을 작성
2. 기능 아키텍처 (Function Architecture)	기능	파일럿 채광로봇의 구성에 따른 일반적인 기능에 대한 정의
	세부 기능도출	일반적인 기능에 따른 여러 가지 세부 기능을 도출하여 작성
	요구사항 정의	세부 기능을 수행하기 위하여 필요한 장치별 요구사항에 대한 정의
	성능 요구사항	요구사항을 만족하기 위한 장치의 사양 및 성능 요구조건에 대한 세부적인 내용을 작성
3. 물리적 아키텍처 (Physical Architecture)	-	파일럿 채광로봇 단위모듈 시스템을 구성하고 있는 하위 시스템, 장비 및 부품 등의 세부 요소들에 대한 리스트 분류

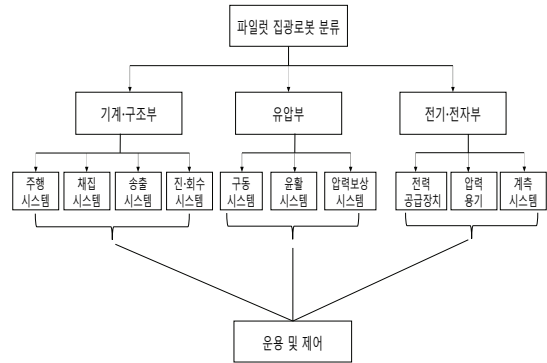


Fig. 4 Concept of a Pilot Mining Robot

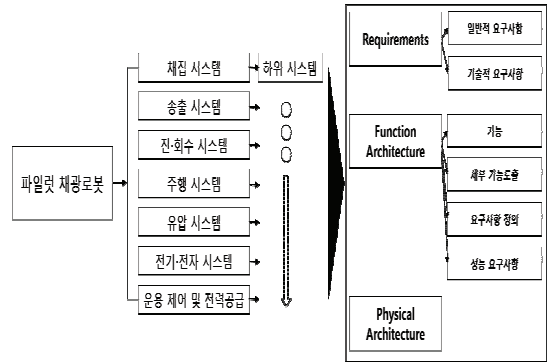


Fig. 5 Validation procedure of Pilot Mining Robot

4. 파일럿 채광로봇의 Validation의 적용

3.2절에서 정리한 내용을 기준으로 채광로봇에 Validation을 Fig. 4의 모든 시스템에 대해 적용시켰다. 다만 본 연구의 보완을 위해 Fig. 4의 파일럿 채광로봇의 구성요소 중 일부분인 주행 및 채집시스템에 대해 Validation을 적용시킨 결과를 Table. 3~4에 나타내었다.

Table 3은 주행시스템의 Validation 결과를 나타내고 있다. 주행시스템은 동력구동장치, 장력제어장치, 궤도 및 하중지지 장치로 구성되어 있다. 각각의 세부장치 중 중요한 요소를 도출하여 각각의 요소에 대한 일반적 요구사항 및 기술적 요구사항을 도출하였고, 이러한 요구사항에 대한 기능 아키텍처인 기능, 세부기능, 기능에 대한 요구사항 및 성능요구사항을 도출하였고, 이를 바탕으로 물리적 아키텍처를 도출하였다.

Table 4는 채집시스템에 대한 Validation결과를 나타내고 있다. 채집시스템은 크게 단괴 부양장치, 자세제어장치, DVL 및 센서 거치장치로 구성되어 있다. 각각의 구성장치는 하부구성요소로 이루어져 있다. 예를 들어 단괴 부양장치는 물제트 펌프, 물제트 노즐, 물제트 호스, 유체이송 펌프, 유동안내판 등으로 구성되어 있다. 각 구성요소에 대한 일반적, 기술적 요구사항을 도출하였고, 이러한 요구사항을 만족하는 기능 및 세부기능을 도출하였다. 또한 이러한 기능을 만족하기 위한 성능요구사항을 도출하였다.

5. 파일럿 채광로봇의 Verification의 적용

파일럿 채광로봇의 주행 및 채집시스템의 Verification은 앞 절에서 정리된 Validation의 역순으로 진행되었고, 부품에서부터 각 부분 시스템

까지를 세부적으로 정리하였다.

Table 5.1~3은 Table 3의 주행시스템의 Verification결과를 나타낸다. Table 5.1은 주행시스템 전체에 대한 verification 방법을 나타내고 있다. 이때 사용된 검증방법은 선회특성시험, 수중항법시험, 심해주행 및 경로추종제어 시험의 결과를 사용하였고, 주행시스템에 대한 만족 여부를 판단하였다. Table 5.2는 주행시스템의 서브시스템인 동력구동장치, 장력제어장치, 궤도 및 하중지지 장치에 대한 검증을 수행하였다. 이때 각 궤도별 제어 실험, 연약지반 주행 시험, 구조해석, 주행 테스트 및 변형 체크 등을 사용하여 검증을 수행하였다.

Table 5.3은 각각의 서브시스템의 세부구성요소에 대한 검증을 수행하였다. 이때 사용된 검증방법은 크게 제품검수, 각 궤도별 수중회전테스트 및 주행테스트, 구조해석, 주행 테스트 및 변형 체크 등을 사용하였다.

Table 6.1~3은 Table 4의 채집시스템의 Verification결과를 나타내고 있다. Table 6.1은 채집시스템 전체에 대한 verification 방법을 나타내고 있다. 이때 사용된 검증방법은 실험실 성능시험-미주행, 실험실 성능시험-주행, 1차 예비 집광성능시험, 2차 예비 집광성능시험의 결과를 사용하였고, 채집시스템에 대한 만족 여부를 판단하였다. Table 6.2는 채집시스템의 서브시스템인 단괴부양장치, 자세제어장치, DVL 및 센서 거치 장치에 대한 검증을 수행하였다. 이때 실험실 성능시험, 수치해석 시뮬레이션, 기중 및 수중 동작 테스트, 수치해석 시뮬레이션, 기중 및 수중 동작 테스트 등을 사용하여 검증을 수행하였다. Table 6.3은 각각의 서브시스템의 세부구성요소에 대한 검증을 수행하였다. 이때 사용된 검증방법은 성능검수, 노즐에 의한 유동 확인, 물 제트 유량 확인, 곡률에 따른 유동 확인, 단괴 이송 확인, 성능검수, 수치해석 시뮬레이션, 기중 및 수중 동작 테스트, 좌우 높이 조절 테스트 등을 사용하였다.

Table 3. Apply validation to tracked vehicle system

세부 구성	요구사항				기능 이기택처			물리적 아키텍처
	일반적 요구사항	기술적 요구사항	기능	세부기능 도출	요구사항 정의	성능 요구사항		
A. 동력구동장치	<ul style="list-style-type: none"> 구동 능력이 좋아야함 독립 구동이 가능해야함 궤도가 이탈하지 않아야함 	<ul style="list-style-type: none"> 장속제어 가능 방수 및 내압설계 하중대비 접지면적 최적화 설계 	<ul style="list-style-type: none"> 동력 발생 궤도 회전 	<ul style="list-style-type: none"> 동력 구동 및 전달 기능 	<ul style="list-style-type: none"> 10° 이하의 경사면 주행이 가능한 동력 각 궤도별로 독립 구동이 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 하나의 트래체인 무개(189kg), 트래슈 및 전체 하중을 구동할 수 있는 성능 	<ul style="list-style-type: none"> 트랙모터 스프라켓 트래체인 	
	a	<ul style="list-style-type: none"> 심해에서 구동능력이 좋아야함 	<ul style="list-style-type: none"> 하중 대비 구동 가능한 원활한 성능 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 구동을 위한 동력 제공 	<ul style="list-style-type: none"> 동력 및 지속 주행 가능 트랙모터는 1단, 2단 기능이 있을 것 유량에 따른 속도비가 일정해야함 	<ul style="list-style-type: none"> 최대속도= 1,417rpm 모터토크= 82.9Nm 최대유량= 42lpm 기준압력= 250bar 	<ul style="list-style-type: none"> 유압모터 	
	b	<ul style="list-style-type: none"> 궤도가 이탈하지 않아야함 동력전달을 잘 해야함 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 이탈방지, 효율적인 동력전달을 위한 형상 최적화 주행 중 외력에 의한 변형 최소화 설계 	<ul style="list-style-type: none"> 트랙 모터를 궤도로 전달 및 궤도 이탈방지 	<ul style="list-style-type: none"> 동력 전달 가능 궤도 이탈방지 기능 	<ul style="list-style-type: none"> 21개의 볼너 외경= 449mm 내경= 230mm 두께= 42.5mm 	<ul style="list-style-type: none"> 스프라켓 	
c	<ul style="list-style-type: none"> 동력을 전달받아 궤도를 움직이게 함 	<ul style="list-style-type: none"> 스프라켓으로부터 동력을 전달받아 원활한 구동을 위해 길이 및 두께 설계 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도의 변형량이 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> 동력 전달 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 트래체인피치 = 125mm 표준피치 	<ul style="list-style-type: none"> 체인블러 		
B. 장력제어장치	<ul style="list-style-type: none"> 궤도가 이탈하지 않아야함 수중에서 궤도의 장력을 유지해야함 	<ul style="list-style-type: none"> 장력조절이 용이하도록 설계 수중방수 및 내압가능 	<ul style="list-style-type: none"> 체인의 장력 조절 및 처짐방지 	<ul style="list-style-type: none"> 장력조절 및 유지 기능 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 최소 회전반경 보다 커야함 	<ul style="list-style-type: none"> 아이들러 운활장치 		
	a	<ul style="list-style-type: none"> 궤도가 이탈하지 않아야함 수중에서 궤도의 장력을 유지해야함 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 가이드 역할 및 충격/진동 흡수 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 가이드 역할 궤도 이탈방지 기능 트래체인 가이드 역할 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 이탈방지 기능 궤도 이탈방지 가이드 역할 	<ul style="list-style-type: none"> 체인링크와 접촉하는 부분은 경도와 강도가 높아야함 	<ul style="list-style-type: none"> 아이들러 	
b	<ul style="list-style-type: none"> 수중에서 방수 및 고압에 견뎌야함 	<ul style="list-style-type: none"> 수중에서 윤활유 손실 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> 직접적인 장력 조절 요소 	<ul style="list-style-type: none"> 장력조절 및 유지 기능 	<ul style="list-style-type: none"> 수행 시 장력을 유지해야함 	<ul style="list-style-type: none"> 수중 주행 시 궤도체인 변형량 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> 장력조절 스프링 	
C. 궤도 및 하중 지지 장치	<ul style="list-style-type: none"> 고하중의 무게에 견뎌야함 모듈이 분리되어야함 	<ul style="list-style-type: none"> 독립주행이 가능하도록 설계 고 하중을 지탱할 수 있는 프레임 설계 모듈 분리구조로 설계 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도의 형상을 유지하고 하중을 지지 	<ul style="list-style-type: none"> 하중지지 기능 궤도형상 유지기능 	<ul style="list-style-type: none"> 분리 및 결합 기능구조 	<ul style="list-style-type: none"> 구조적 안전성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도프레임 트래슈 상부롤러 하부롤러 	

세부 구성	요구사항			기능 이키텍처			물리적 아키텍처
	일반적 요구사항	기술적 요구사항	기능	세부기능 도출	요구사항 정의	성능 요구사항	
a	<ul style="list-style-type: none"> 수중에서 변형이 없는 구조 수중에서 변형이 없는 구조 연약지반에서 주행이 가능해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> 응력 집중이 되지 않는 구조로 설계 분리가 가능한 구조의 프레임 설계 고 하중에 견딜 수 있는 재질 및 구조 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도형상을 유지하고 하중을 지지 	<ul style="list-style-type: none"> 하중지지 기능 궤도 형상 유지 기능 	<ul style="list-style-type: none"> 분리 및 결합 가능 구조 	<ul style="list-style-type: none"> 구조적 안정성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 빔
b	<ul style="list-style-type: none"> 수중에서도 변형이 없는 구조여야 함 연약지반에서 주행이 가능해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> 수중무게를 최적화할 수 있는 재질 채광로봇 접지압의 최적화를 위한 트래슈 갯수 	<ul style="list-style-type: none"> 지반에서 침하 방지 및 반력을 통한 채광로봇 구동 	<ul style="list-style-type: none"> 하중지지 기능 지반반력을 이용한 추진력 기능 	<ul style="list-style-type: none"> 트래슈는 중성 부력이 있는 재질 사용 	<ul style="list-style-type: none"> 주행장치 모듈당 폭 =0.7m 주행장치 접지길이 =4.5m 	<ul style="list-style-type: none"> 트래슈
c	<ul style="list-style-type: none"> 궤도가 이탈하지 않도록 가이드 역할을 해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 하중을 지지할 수 있는 최적 위치 및 배치 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 형상 유지 및 지지 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 형상 유지기능 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 형상을 유지하면서 궤도의 원활한 움직임을 위한 가이드 	<ul style="list-style-type: none"> 궤 방향 지지 가능 	<ul style="list-style-type: none"> Shell 베어링 Pin
d	<ul style="list-style-type: none"> 궤도가 이탈하지 않도록 가이드 역할을 해야 함 채광로봇의 하중을 지탱해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> 고 하중을 지지할 수 있는 갯수와 배치 	<ul style="list-style-type: none"> 궤도 이탈 방지 및 전체 하중 지지 	<ul style="list-style-type: none"> 하중지지 기능 	<ul style="list-style-type: none"> 채광로봇 하중을 견디어함 	<ul style="list-style-type: none"> 공기중 채광로봇 무게 =30ton 	<ul style="list-style-type: none"> 부싱 샤프트 O-ring

Table 4. Apply validation to pick-up system

세부 구성	요구사항			기능 이키텍처			물리적 아키텍처
	일반적 요구사항	기술적 요구사항	기능	세부기능 도출	요구사항 정의	성능 요구사항	
A. 단과부양장치	<ul style="list-style-type: none"> 연약지반에 있는 망간단과를 채집하여 파쇄기까지 이동 	<ul style="list-style-type: none"> 망간단과를 부유식으로 채집 파쇄기까지 손실 없이 이동 	<ul style="list-style-type: none"> 유체식 	<ul style="list-style-type: none"> 망간단과 부유 기능 코안다 원리를 이용한 망간단과 흡입 망간단과 유체식 이송 	<ul style="list-style-type: none"> 망간단과가 부유되도록 물체트 공급 부유된 망간단과 손실 최소화(채집을 극대화) 채집량 대비 이송이 원할해야함 	<ul style="list-style-type: none"> 2열의 15.5mm 노즐을 통하여 10m/s로 분사 	<ul style="list-style-type: none"> 물체트 펌프 물체터 노즐 물체트 호스 유체이송펌프 유동안내관
a	<ul style="list-style-type: none"> 망간단과를 피우기 위한 물체트 사용 	<ul style="list-style-type: none"> 해수를 이용한 펌프 	<ul style="list-style-type: none"> 유압 동력을 이용한 해수 공급 	<ul style="list-style-type: none"> 해수를 공급하여 망간단과가 부양할 수 있도록 충분한 유량을 물체트 노즐로 전달 	<ul style="list-style-type: none"> 망간단과가 부양할 수 있는 충분한 유량 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 유량= 5.4m³/min 양정= 11m 회전수= 3,000rpm 길이= 650mm 최대직경= ∅208 	<ul style="list-style-type: none"> 펌프

세부 구성	요구사항			기능 아키텍처			물리적 아키텍처
	일반적 요구사항	기술적 요구사항	기능	세부기능 도출	요구사항 정의	성능 요구사항	
b	물체판과 노즐 • 망간단과를 띄우기 위해 물이 일정간격으로도 발생되어야함	망간단과를 띄우기 위해 유량 부족을 방지하기 위한 노즐 설계	• 망간단과를 부양시키기 위한 해수 분출	• 일정한 각도로 분출 • 채집모듈 전체에 발생되도록 해야 함	• 최적의 노즐각도 • 최적의 노즐 갯수	• 최적의 노즐갯수 • 2열의 15.5mm의 노즐	• 유체판 및 노즐
c	물체판과 호스 • 망간단과를 띄우기 위한 물이 펌프에서 노즐로 이동하여야함	물체판과 호스에 따른 유량 부족을 방지하기 위한 설계	• 펌프에서 노즐로 해수 이동	• 물체판 펌프에서 물체판 노즐로 해수를 원활하게 전달	• 체결이 잘되어 도중에 분리되지 않도록 함 • 다른 장비에 간섭이 없어야함	• 최적의 호스길이 • 최적의 호스지름 • 최적의 호스형상	• 유연관 호스
d	유체이송 펌프 • 채집된 망간단과가 파쇄장치로 이동하기 위한 유체력을 발생시켜야 함	망간단과 유동 안 내판에 따른 유량 부족을 방지하기 위한 설계	• 해수 유동으로 망간단과를 파쇄기로 이동	• 해수 유동발생 • 망간단과 이송	• 망간단과 이송이 가능한 도록 충분한 유동발생	• 유량= 60lpm	• 펌프
e	유동안내판 • 채집된 망간단과가 파쇄장치로 이동하는 가이드 역할을 함	코안다 원리를 이용한 유동안내판 설계 필요	• 물체판 노즐의 유동으로 인해 부양된 망간단과를 이송장치까지 전달하는 역할	• 망간단과 이송 가이드 기능	• 유동안내판의 형상은 물체판 노즐의 유량, 각도, 간격, 유동반침관 등과 함께 유동성능을 결정짓는 중요한 요소임	• 코안다 효과가 발생할 수 있는 유동안내판의 형상	• 유동판
B. 자세제어장치							
a	자세제어 실린더 • 지반과의 거리를 유지하도록 채집 장치의 높낮이를 조절함	최적의 채집효율을 갖는 높이 유지를 위한 설계 • 상·하 동작 시 원활한 채집기능	• 지면과의 최적높이 유지	• 채집 장치의 상·하 움직임	• 채집 장치 하중을 견디는 움직임 • 4축 링크구조	• 실린더 내경= 63mm • 로드직경= 45mm • 재질: SUS316L • 최대 사용 압력 = 140bar • 최대부하= 20kN	• 자세제어 실린더 • 자세제어 링크 • 유압밸브
b	자세제어 링크 • 채집 장치 모듈의 높낮이를 조절하도록 동력을 제공함	높이 유지를 위한 움직임의 최적반응 속도로 설계	• 자세제어를 위한 동력 제공	• 채집 장치 상·하 움직임 • 채집 장치 지지	• 채집 장치 상·하 변위 200mm에 해당하는 스트로크	• 최대속도= 0.06m/s • 모터힘= 8,000N • 최대유량= 52lpm • 기준압력= 50bar	• 유압실린더
c	유압밸브 • 자세제어 실린더가 동작하도록 제어됨	높이 유지 범위에 맞춰 움직임이 가능한 구조로 설계	• 높이조절 및 장치 지지	• 상·하 움직임 수평유지	• 상·하 링크 길이가 동일해야함 • 채집 장치 하중을 견뎌야함	• 상·하부 길이 오차 5mm이내 • 기준압력= 50bar	• 링크 및 회전 조인트 • 유압밸브

세부 구성	요구사항		기능 아키텍처			물리적 아키텍처	
	일반적 요구사항	기술적 요구사항	기능	세부기능 도출	요구사항 정의		성능 요구사항
C. DVL 및 센서 거치장치	<ul style="list-style-type: none"> 주행 중에 속도센서를 위치로 옮기는 위치로 옮기임 	<ul style="list-style-type: none"> 속도센서를 원하는 위치로 옮기도록 설계 	<ul style="list-style-type: none"> DVL 위치조절 	<ul style="list-style-type: none"> DVL 위치조절: 진·회수 시 채집 장치 안쪽, 주행 시에 물체트 노를 앞쪽으로 이동함 	<ul style="list-style-type: none"> DVL의 정확한 위치 DVL 위치 이동시 진동 최소화 주행 시 진동 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> DVL 및 지지대 하중지치:DVL(12.4kg), 거치대(23kg) 진·회수 시 정확한 위치를 위한 질량터 스트로크 	<ul style="list-style-type: none"> DVL 거치대 DVL 실린더 DVL 거치링크
a	<ul style="list-style-type: none"> 속도센서를 고정함 	<ul style="list-style-type: none"> 속도센서를 거치대에 고정하도록 설계 	<ul style="list-style-type: none"> DVL고정 	<ul style="list-style-type: none"> DVL고정 높이 측정센서 고정 	<ul style="list-style-type: none"> 고정대 변형 최소화 고정대 무게 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> 고정대 최소 무게 	<ul style="list-style-type: none"> DVL 거치지그
b	<ul style="list-style-type: none"> 주행 중에 속도센서를 위치로 옮기도록 옮기임 	<ul style="list-style-type: none"> 속도센서를 원하는 위치로 옮기도록 속도제어 및 실린더 제원 선정 	<ul style="list-style-type: none"> DVL 위치조절을 위한 동력 계공 	<ul style="list-style-type: none"> DVL의 정확한 위치 이동 DVL의 안전한 이동 속도 	<ul style="list-style-type: none"> DVL의 원활한 움직임 DVL의 속도조절 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 실린더 초기길이=1,138mm 실린더 최대 스트로크= 520mm 실린더 입력속도= 50mm/sec 	<ul style="list-style-type: none"> 유압실린더
c	<ul style="list-style-type: none"> DVL을 진·회수과 주행 중에 원하는 위치로 놓이도록 기구적인 매커니즘을 구현함 	<ul style="list-style-type: none"> 속도센서를 원하는 위치로 옮기도록 기구설계 	<ul style="list-style-type: none"> DVL 위치이동 	<ul style="list-style-type: none"> DVL 센서 하중지지 DVL 센서의 정확한 안전한 이동 	<ul style="list-style-type: none"> DVL의 정확한 위치 DVL의 진동 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> 링크의 최적두께 링크 구조적 안정성 27.2mm스테인레스강관 	<ul style="list-style-type: none"> 링크 및 조인트

Table 5.1 Apply verification to tracked vehicle system

순서	system	Verification(Test)			특이사항
		검증방법	성능	만족 여부	
1	주행시스템 심해주행 및 경로추종제어 시험 연약 지반에서 주행 불가능 상황 발생	신뢰특성시험	속도, 신뢰비에 따른 신뢰 가능 여부	만족	
2		수중항법 시험	수중 항법 센서에 의한 위치, 속도, 가속도 측정	만족	
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

Table 5.3 Apply verification to tracked vehicle system

순서	component	Verification(Test)			특이사항
		검증방법	성능	만족 여부	
1	트랙모터	제품 검수	최대속도: 1,417rpm 모터토크: 82.9Nm 최대유량: 42LPM 기준압력: 250bar	만족	
2	스프라켓	제품 검수	21개의 톱니 외경: 449mm 내경: 230mm 두께: 42.5mm	만족	기성품 사용
3	트랙체인	제품 검수	트랙체인 피치: 125mm 표준피치	만족	체인링크와 접촉부 고주파 열처리
4	아이들러	제품 검수	지름: 384mm	만족	
5	운활장치	각 궤도별 수중화전테스트 및 주행테스트	궤도 변형 최소화 및 방수 확인	만족	그리스 활용 테스트
6	궤도프레임	구조해석	분산 하중 및 최소 변형량	만족	
		주행 테스트 및 변형 체크	주행 중 궤도프레임 변형 체크	만족	
7	트랙슈	제품 검수	길이= 4.6m 궤도간격= 1m	만족	
		제품 검수	주행장치 모듈당 폭(B)= 0.7m 주행장치 접지길이(Lc)= 4.5m	만족	
8	상부롤러	제품 검수	치수 확인	만족	체인링크와 접촉부 고주파 열처리
9	하부롤러	제품 검수	치수 확인	만족	체인링크와 접촉부 고주파 열처리

Table 5.2 Apply verification to tracked vehicle system

순서	subsystem	Verification(Test)			특이사항	
		검증방법	성능	만족여부		
1	동력구동장치	각 궤도별 제어 실험	유량에 따른 궤도 회전속도 측정	만족		
2			입력 신호 대비 유량값 확인	만족	속도에 따른 PWM 제어 신호 확인	
3			장력 유지	1개의 궤도 장력 변화	만족	압력보상장치의 고장이 원인
4	장력제어장치	연약지반 주행 시험	장력 하중에 대한 스트레스 분석	만족		
5			진체 하중에 대한 스트레스 분석	만족		
6	궤도 및 허중지지장치	구조해석	주행 시 문제점 확인	만족	상부롤러 지지대 변형 및 장력 조절	
7			주행 테스트 및 변형 체크	만족	체인에 의한 궤도프레임 손상	
8						
9						

Table 6.1 Apply verification to pick-up system

순서	system	Verification(Test)				특이사항
		검증방법	성능	만족 여부	수정사항	
1	체집 시스템	실험실 성능시험 - 미주행	단괴 회수 시 부양현상 확인	만족		채집간격: 100~140mm, 20mm×80mm 타원형 노즐, 성능우수
2		실험실 성능시험 - 주행	단괴 회수량 (120kg) 기준	만족		84.5 kg (70.4%) 회수
3		1차 예비 집광 시험	85% 모조단괴 회수	보통	기계식 채집장치 → 유체식 채집장치로 변경	시스템 무게 감소
4		2차 예비 집광 시험	채집량	1차보다 개선	코안다 효과를 이용한 유체식 채집장치	채집률 계산 불가

Table 6.3 Apply verification to pick-up system

순서	component	Verification(Test)				특이사항
		검증방법	성능	만족 여부	수정 사항	
1	물체트 펌프	성능검수	유량: 5.4m ³ /min 양정: 11m 회전수: 3,000rpm 길이: 650mm 최대직경: ∅208	만족		
2	물체트 노즐	노즐에 의한 유동 확인	노즐 형상	만족		
3	물체트 호스	물체트 유량 확인	충분한 유량	만족		
4	유동 안내판	곡물에 따른 유동 확인	원활한 유동	만족		
5	유체제어 펌프 실린더	단괴 이송 확인	채집부에서 파쇄장치로 단괴이송	만족	NG10밸브 추가	유체식 이송장치 추가 구동
6	자세제어 실린더	성능검수	최대속도: 0.06m/s 모터힘: 8,000N 최대 유량: 52LPM 기준압력: 50bar	만족	Stroke 감소	200→155mm
7	자세제어 링크	수치해석 시뮬레이션	상하 최대 이동 거리 확인	만족		
8	동기실린더	기중 및 수중 동작 테스트	상하로 100mm씩 총 200mm의 간격조정	만족		
9	유압 밸브	기중 및 수중 동작 테스트	좌우 높이 조절	만족		
10	DVL 커치대	기중 및 수중 동작 테스트	주행 시 노이즈 없이 신호 측정	만족		
11	DVL 실린더	수치해석 시뮬레이션	수치해석 결과 DVL 최적 위치 및 속도 최소화	만족		
12	DVL 커치장치 링크	기중 및 수중 동작 테스트	원활한 위치 및 움직임을 위한 제어 성능	만족		

Table 6.2 Apply verification to pick-up system

순서	subsystem	Verification(Test)				특이사항
		검증방법	성능	만족 여부	수정사항	
1	단괴 부양장치	실험실 성능시험	단괴 회수 시 부양현상 확인	만족		채집간격: 100~140mm, 20mm×80mm 타원형 노즐, 성능우수
2		수치해석 시뮬레이션	해석을 통한 충분한 동력 및 위치 확인	만족		
3		기중 및 수중 동작 테스트	간격 별 제어 성능 및 좌우 모듈 동기화 테스트	만족		
4		수치해석 시뮬레이션	수치해석 결과 DVL 최적 위치 및 속도 최소화	만족		
5	DVL 및 센서 커치 장치	기중 및 수중 동작 테스트	원활한 위치 및 움직임을 위한 제어 성능	만족		

6. 결론

시스템이 기술의 발전에 따라 복잡해지면서, 다양한 요구조건이 존재하는 새로운 제품을 설계해야 하는 경우 많은 시행착오가 존재할 수 밖에 없다. 최악의 경우에는 시스템의 중요한 요구조건들을 만족하지 못하는 결과가 도출 될 수 있다. 또한, 설계 중 단일부품의 잘못된 설계가 확인되지 못하여 제작된 장비의 잦은 고장, 수명단축 등을 유발할 수 있기에 초기 설계부터 요구조건을 관리할 수 있는 설계 방법론이 필요하다.

본 연구에서는 망간단괴 채집을 위한 채광로봇의 설계에 대해 다루었다. 파일럿 규모로 개발된 채광로봇 역시 제작 및 시운전에서 다양한 문제점을 확인하였고, 각 장비 설계 후 통합하는 Bottom up 방식의 한계를 확인하였다. 이를 해결하기 위해 소프트웨어 제작 시 사용되는 설계 방법론인 V&V기법을 개발된 채광로봇 시스템에 적용하였다.

V&V 기법의 핵심은 Top down과 Bottom up 방식이 기어가 맞물리듯 매칭된다는 점이다. 즉 Top requirement에서 세부 요구조건들이 각 서브시스템에 할당되면 이를 검증할 계획들이 세워진다. 설계 및 제작 이후 계획된 검증 내용이 확인되면 상위 시스템의 검증으로 올라간다. 즉, 검증하는 방법만을 보면 똑같은 Bottom up 방식이지만 검증 계획은 상층부에서 내려왔기 때문에 상위 요구사항을 만족하기 쉽다.

따라서 본 연구에서는 채광로봇의 hierarchy를 3단계로 구성하여 각 하위 시스템까지 요구사항을 할당하였으며 검증과정을 기존의 검증 방안과 매칭시키며 확인하였다. 그 결과 기존 채광로봇의 설계에서 생각하지 못하였던 설계 절차와 검증 방안이 수립되었으며, 앞으로 이러한 시스템 설계 방법론을 적용하여 상용 채광로봇 설계를 수행한다면 시간과 비용을 줄일 수 있다고 판단된다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 정부출연금 사업인 “해양플랜트 머티리얼 핸들링 핵심기술인 및 운영·유지보수 위험도 평가/관리 기술 개발”에 의해 수행되었습니다(PES3081).

참고문헌

- [1] Hong, S.: The Development of Pilot Mining Robot “MineRo” and Sea Performance Tests. Proceedings of the KSOE Conference, Seoul, Korea, pp.60-63, (2013)
- [2] Kim, S.W.: Study of Acquiring the Credibility for Weapon System M&S with V&V Process. Journal of the Korea Society for Simulation, pp.1-8, (2015)
- [3] Yoon, S.C.: S.W.: Characteristics Analysis of Sustainable Manufacturing System and V&V Strategy. Journal of the Korea Society of System Engineering, pp.51-58, (2014)
- [4] SUNG, K.Y.: Performance Test for the Manganese Nodule Crushing Equipment of the Deep Seabed Mining Robot ‘MineRo’. Ocean and polar research, pp.455-463, (2014)
- [5] Kim, Jung Hoon.: Verification, Validation, and Accreditation (VV&A) Considering Military and Defense Characteristics. Industrial engineering & management systems : an international journal, pp.88-93, (2015)
- [6] Choi, Yoo Jin.: The Study of process for VV&A on acquiring the credibility of M&S, Journal of the Korea Society of System Engineering, pp.11-16, (2009)
- [7] Kim, Hyeong Hyeon.: A Study on Application and Promotion of DM&S VV&A(Focused on M&S for Test and Evaluation), Journal of the Korea Society for Simulation, pp.157-164, (2009)

[8] Lee, Jong Bok.: Verification and Validation to develop safety-critical software, 한국품질경영학회 2004년도 품질경영모델을 통한 가치 창출, pp.114-119, (2004)

[9] Cheon, Se Woo.: The Software Verification and Validation Tasks for a safety critical system in nuclear power plants, International Journal of Safety, pp.38-46, (2004)

(접수: 2019.10.25. 수정: 2019.11.27. 게재확정: 2019.12.03.)