

심해저 집광기의 제어·계측용 HIL 시뮬레이터 개발

박성재* · 여태경* · 홍섭* · 김병용** · 김상봉**

*한국해양연구원 해양시스템기술연구본부

**부경대학교 기계공학부

Development of HIL Simulator for Control and Monitoring of Deep-Sea Miner

SOUNG-JEA PARK*, TAE-KYEONG YEU*, SUP HONG*, BYUNG-YONG KIM** AND SANG-BONG KIM**

**Ocean Engineering Research Department, MOERI/KORDI, Daejeon, Korea*

***Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea*

KEY WORDS: HIL Hardware-In-the-Loop, Simulator 시뮬레이터, Control and Monitoring 제어 계측, Miner 집광기, Sensor 센서, Actuator 액츄에이터

ABSTRACT: The Deep-sea miner system is composed of body, actuators, sensors, and devices for control and monitoring. At present, we are manufacturing the miner's body included actuators and already consisted with off-the-shelf embedded controller. But sensors and those devices were just determined. To previously test performance of embedded controller which manages control and monitoring of miner system, its simulator must be developed for control and monitoring. Hardware-In-the-Loop(HIL) simulation is being increasingly used in industrial applications. This is an effective tool for the evaluation of electric system and drives. In the HIL simulator, we can test and design the control and monitoring system freely without the risk of hardware ruins and the load of expenses. Also the programming software for miner operating is verified on the HIL simulator. In this paper, we introduce the concept of HIL simulator for control and monitoring of deep-sea miner.

1. 서 론

해저 광물 자원으로는 일반적으로 비철 금속을 함유하고 있는 망간단괴(Manganese nodule), 망간각(Manganese crust), 해저열수광상(Undersea hydrothermal deposit)과 에너지 자원인 석유(Petroleum), 천연가스(Natural gas), 메탄하이드레이트(Methane hydrate) 등이 알려져 있다. 그러나 석유와 천연가스는 이미 우리가 이용하고 있는 자원이며, 망간각과 해저열수광상은 탐사단계이며, 망간단괴와 메탄하이드레이트는 이미 탐사와 채광기술을 원천적으로 개발하고도 시설 투자비와 생산비의 과다로 상업 생산 시기를 기다리고 있는 중이다. 망간단괴로부터는 하이테크 산업의 필수 원료가 되는 망간(Manganese), 니켈(Nickel), 구리(Copper), 코발트(Cobalt) 등의 금속자원을 얻을 수 있으며, 이는 육상 광물자원의 고갈과 더불어 민족자원주의가 팽배해지는 국제 정세를 감안해 볼 때, 망간 단괴를 개발하기 위한 기술의 보유는 당위적인 것이라 하겠다. 우리나라의 경우에는 선진국보다 30년 가까이 늦게 심해저 광물자원 개발에 참여했지만 그동안의 부단한 노력으로 기술격차를 극복하여, 일부 분야는 선진국에서 기술협력을 요청할 정도로 성장하였다. 정부도 2000년에 "심해저 광물자원개발사업 추진계획"을 국가과학기술위원회에서 의결함으로써 망간단괴 상업생산을 위한 탐사와 개발이 본격

적으로 수행되었고 채광시스템의 기술 개발이 가장 절실한 당면 과제로 남게 되었다. 현재, 한국해양연구원에서는 근해역 채광 성능시험을 목표로 자항식 집광 시스템과 유연관(Flexible pipeline)으로 구성되는 근해역 시험 집광 시스템의 시뮬레이션 모델 개발 연구, 시험 집광 시스템의 다분야통합설계(MDO) 모델 개발 연구, 시험 집광 시스템 시운전과 성능평가를 위한 토양수조(Deep-sea mining laboratory)의 설계 및 건설, 그리고 채광 성능 시험 준비를 위한 해저 주행 항법 알고리즘 개발 연구, 시험 집광 시스템 규모 선정을 위한 기초 엔지니어링 등의 연구가 수행되어오고 있다.

심해저 집광기의 계측과 제어는 그 운용과 설계 그리고 성능 시험의 과정에서 어려움이 많다. 아직까지 시험 집광기가 제작이 완료되지 않았으며 실제 집광기는 심해저에서 원격으로 제어되어야 함으로 시험 집광기의 제어와 계측도 극한의 환경과 까다로운 조건과 과정들을 거쳐 구현되어 질 것이다. 집광기는 실시간(Real-time), 원격(remote)으로 작동됨으로 그 성능과 안정성을 향상시키기 위한 임베디드 컨트롤러(Embedded Controller)와 다수의 센서(Sensor), 액츄에이터(Actuator)로 제어·계측부가 구성된다.

본 논문에서는 심해저 망간단괴 집광 시스템의 집광기 제어·계측 장치(Control and monitoring devices)의 설계와 구현을 위한 HIL 시뮬레이터(Hardware-In-the-Loop Simulator; HILS) 개발에 대해서 소개한다. 일반적으로 HILS는 산업응용분야에 널리 이용되는 유용한 도구로써 전자 장비나 시스템을 평가하기

박성재: 대전광역시 유성구 장동 171번지
042-868-7590 parksj@moeri.re.kr

위해 사용되어 진다. HILS를 이용하여 집광기의 제어와 모니터링 시스템을 하드웨어(H/W; Hardware)의 손실 위험이나 비용의 큰 부담이 없이 자유롭게 설계하고 시험해 볼 수 있다. 또한 집광기의 운용 소프트웨어(S/W; Software)를 검증하기 위해서도 활용하고자 한다.

2. Hardware-In-the-Loop Simulator

고가의 시스템들이나 부서지기 쉬운 시스템, 그리고 유례없는 유일한 시스템의 테스트는 파손의 위험이나 유실의 문제 때문에 어려운 점이 많고 부담감이 크다. 일반적으로 처음 제작되는 임베디드 하드웨어나 소프트웨어의 경우에는 결합이 있다고 알고 있다 하지만 이를 발견하거나 수정을 거쳐야 하는데 어떤 방법을 이용할 것인지는 알려진 것이 없다. HILS는 이러한 점을 해결하기 위한 방법으로 유일한 방법은 아니지만 임베디드 시스템이나 소프트웨어를 개발하기 위한 가장 유연하고 손쉬운 방법 중의 하나이다. 집광기의 경우뿐만이 아니라 국방 및 우주, 항공 분야, 전력 및 에너지 분야 등에서 실험을 위한 위험부담이나 시험 가동에 많은 비용이 드는 경우에는 실험 자체가 불가능한 경우도 생길 것이다. 하지만 요즘은 많은 엔지니어들이 이러한 난항을 타개하기 위한 방법으로 출시되어 있는 기성품(Off-the-shelf tool)을 이용하여 프론트 엔드(Front-end) 소프트웨어와 하드웨어를 개발하고 구성하여, 이것을 HILS를 통하여 검증하고 개발하고 있다. 집광기의 제어·계측용 하드웨어는 크게 2대의 임베디드 컨트롤러를 사용하여 구성이 되는데 (Fig. 5), HILS를 이용한 임베디드 시스템을 테스트는 Fig. 1와 같이 구성 되어 진다.

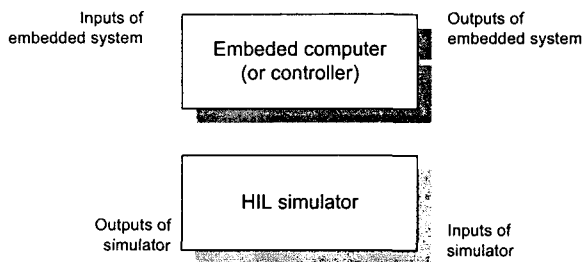


Fig. 1 A simple block diagram of an embedded system being tested using a HILS

HILS는 임베디드 시스템의 입출력(I/O; Input and output)과 사용자에게 의해 코드(Code)된 환경을 모사하고 있다. 일반적인 시뮬레이터와 HILS의 차이점은 크게 다음의 세 가지로 말할 수 있다.

- 시뮬레이터의 출력은 단지 그래프로 출력되는 곡선 등의 신호이지 H/W의 신호(Signals)가 아니다.
- HILS는 실시간으로 동작된다
- HILS의 임베디드 S/W는 실제로 사용될 수 있는 H/W에서 동작한다.

Fig. 2는 이러한 특징을 가지는 일반적인 HILS의 구성을 나타낸다. 그 구조는 입력과 출력을 위한 H/W와 S/W, 그리고 실제 모델 혹은 물리적 모델은 S/W를 통해 구현되어진다.

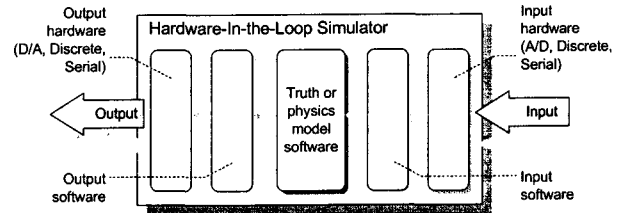


Fig. 2 The components of a simple HILS

HILS를 개발하고 구성하는데 있어서 고려해야할 점들 다음과 같다.

- Digitizing and iteration rate
- Choice of hardware platform
- Expansion usability to real model
- I/O Architecture for S/W and H/W
- Data logging or communication
- Reusability and Flexibility

HILS의 단점은 그 한계가 뚜렷한데, 실제 H/W와 모델을 다룬다는 점에서 많은 장점을 가지고 있지만 HILS 자체로 실제 시스템의 내장 회로(In-circuit)나 인터페이스(Interface), 로직(Logic)의 변환기(Emulator)이나 분석기(Analyzer)의 역할이 불가할 뿐 아니라 S/W의 수정(Debugger)을 대신할 수 없다. 다시 말하자면 임베디드 시스템의 S/W와 H/W의 내부의 작동은 HILS가 표현하지는 못한다. 따라서 그 구성과 설계에 있어서 엔지니어의 H/W 선정과 S/W 운용기술이 지배적이다. 또 다른 단점은 HILS는 루프(Loop)를 구성하게 되어 테스트 도중 중단이 어려워 일반적인 S/W 디버깅 기술인 중단점(Brake-point) 등을 만드는 것과는 다르게 테스트에 있어서도 이 점에 신중을 기해야 한다.

3. 심해저 집광기 시스템

심해저 집광기는 크게 제어부(Control part), 동력부(Power part), 기계부(Mechanical part)로 나눌 수 있지만, 제어·계측의 관점에서는 센서를 포함한 신호처리부, 제어장치 등을 포함한 제어부 및 전기부 그리고 유압부(Hydraulic part)로 나눌 수 있다. 기계적 구동부는 단과 채집을 위한 물제트(Water jet), 채집장치 자세, 단과 이송장치, 파쇄기 그리고 주행장치로 구분된다. 이러한 구동부들은 모두 유압 파워팩(Hydraulic power pack)을 통해 동력이 되는 유압을 제어 시스템에 의해 지령을 받은 비례-제어 밸브(Proportional control valve)로 제어하여 각각의 모터와 실린더에 전달받아 구동된다. 그럼으로 집광기 제어를 위해서는 각 구동부에 적절한 제어신호를 보내주어야 하며, 집광기의 성능을 감시하고 제어를 위한 데이터를 수집하기 위한 집광기의 상태 정보를 계측하여야 한다. Fig. 3은 심해저 채광 시스템

템의 개요와 집광기의 역할에 대한 그림이고 Fig. 4는 심해저 집광기의 각 구동부와 기계적 구성에 관한 그림이다.

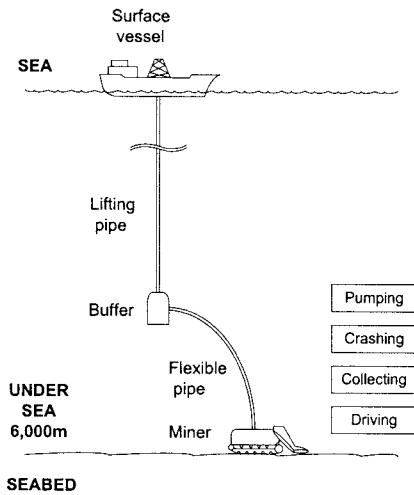


Fig. 3 Concept diagram of deep-sea mining system

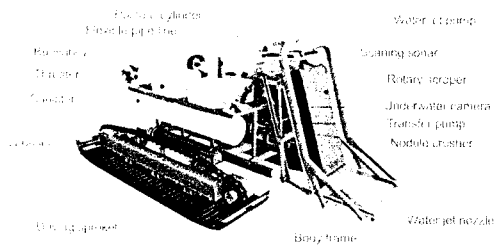


Fig. 4 Composition of deep-sea miner

Table 1 Measurement item and range

계측 항목	계측 범위	분해능
채집장치와 지면간 거리	0 - 30cm	1cm
실린더 Stroke	0 - 50L/min	0.5L/min
노즐 유량	0 - 100L/min	0.5L/min
파쇄 속도	0 - 50L/min	0.1L/min
이송 속도	0 - 50L/min	0.1L/min
트랙 속도	0 - 100L/min	0.5L/min
위치	0 - 6000m	1%
속도	0 - 5 m/s	0.01 m/s
가속도	-3 - 3 g	0.1 g
방위각	0 - 360 deg	1 deg
자세	-45 - 135 deg	1 deg
침하량	0 - 30 cm	0.5 cm
유연관 인장력	0 - 100kN	1 kN
연결 방향	-90 - 90 deg	1 deg
장애물 탐지	0 - 100 m	1 m
유압력	0 - 200 kgf/cm ²	5kgf/cm ²
유온도	-10 - 50℃	1℃
전압	0 - 300V	1V
전류	0 - 50A	0.1A
수중 카메라	0 - 2000m	10Mpixel

다음으로 집광기의 계측을 위한 센서들은 집광효율과 안정성을 높이기 위해 각 성능별(채집, 주행, 안전)로 설계되었으며 Table 1과 같은 계측 범위와 분해능을 요구하고 있다.

더불어 제어와 계측을 관장하게 되는 집광기의 임베디드 시스템은 선상의 로컬(Local)와 심해저 집광기의 원격(Remote)의 2대의 컨트롤러가 탑재되었고 각 컨트롤러들은 임베디드 케

블(Umbilical cable)의 광통신(Fiber-optic communication)을 통해 연결된다. 임베디드 컨트롤러는 내셔널인스트루먼트사(National Instrument Inc.)의 PXI 플랫폼(Platform)이 채택되었다. PXI는 고속, 산업 표준 PCI 버스를 모듈형 새시(Chassis)와 함께 사용하여 기존의 시스템에 비해 탁월한 성능 향상을 가져다준다. PXI 컨트롤러를 이용한 집광기의 제어·계측 시스템의 개념은 Fig. 5와 같다.

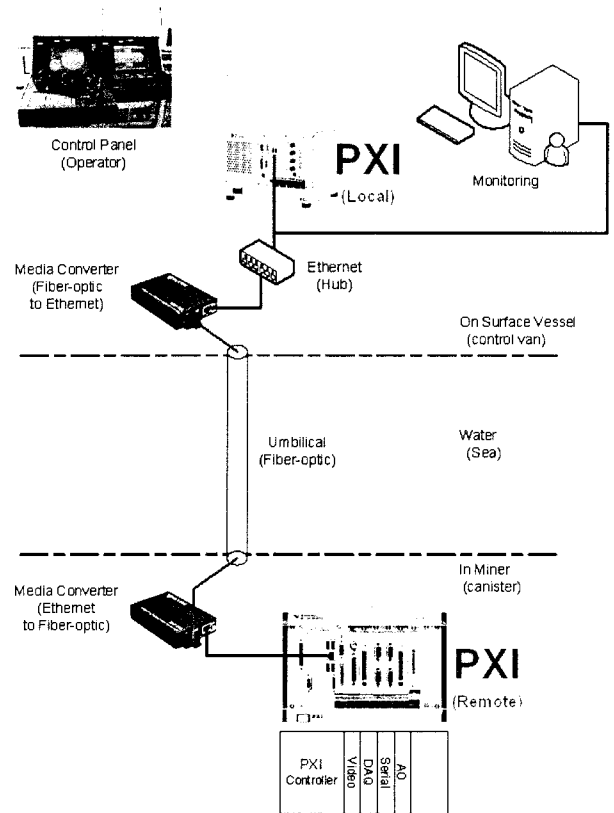


Fig. 5 Diagram of control and monitoring embedded system for deep-sea miner

4. 심해저 집광기 HILS

HILS의 개발에 필요한 크게 H/W와 S/W로 구성되며, 전체 HILS의 구조(Architecture)는 임베디드 시스템과 HILS (Fig. 1), 시뮬레이터용 센서 및 액추에이터로 (Fig. 6) 구성된다. Table 2는 시뮬레이터용 센서와 액추에이터로 Table 1과 상사될 수 있다. HILS와 심해저의 제어·계측용 센서와 액추에이터 시뮬레이터의 구성은 Fig. 6과 같다. 그리고 HILS는 모든 액추에이터가 선정되었다면 모든 센서에 대한 S/W 처리부를 가지게 된다. Fig. 6에서는 단순화된 도식을 위해 단순의 액추에이터와 센서에 대한 그림으로 표현되었다. S/W에서 센서를 모델하고 액추에이터 H/W를 구성하기 위해서는 각각 대한 타협(Trade-off)가 필요하다. 완벽한 S/W 모델이 없으며 아무리 단순한 장치를 제어하는데도 방정식은 매우 복잡할 수 있다. 다시 말하자면 H/W를 포함한 시뮬레이터가 모든 문제의 해결책은 결코 아니라는 것이다. 장치가 실험실에서처럼 실제 환경에서도 똑같이 동작하리라고는 장담하기 힘들다. 그래서 이러

한 설계가 간과될 수 없으며 반드시 실험을 통한 최적의 S/W와 H/W의 구조를 구성할 필요가 있다.

참고 문헌

Table 2 Sensor and actuator for miner simulator

센서 및 액츄에이터	계측 및 구동 범위	성능
적외선 근거리 센서	4 - 30cm	146.25mV/cm
적외선 거리 센서	10 - 80cm	70mV/cm
압력센서	15 - 115kPa	45.9mV/kPa
각도센서	0 - 360deg	0.1deg
램프	주광색 할로겐	20W
램프	주광색 할로겐	50W
Linear slide 구동 모터	1nm/1pitch, 1500mm	500rpm
Truster 구동 모터	12V	3000rpm
Sprocket 구동 모터	12V	111rpm
온도계	2 - 99℃	10 mV/℃
전압계	1 ~ 300V	1 V
전류계	1 ~ 50A	1 A
CCD 카메라	3 CCD	1M pixel
카메라 Pan-tilt	상하/회전	-
LVDT	5-100mm	20mV/mm
Remote Relay	4CH	AC/DC 5A
Limit Switch	-	5 ~ 12V

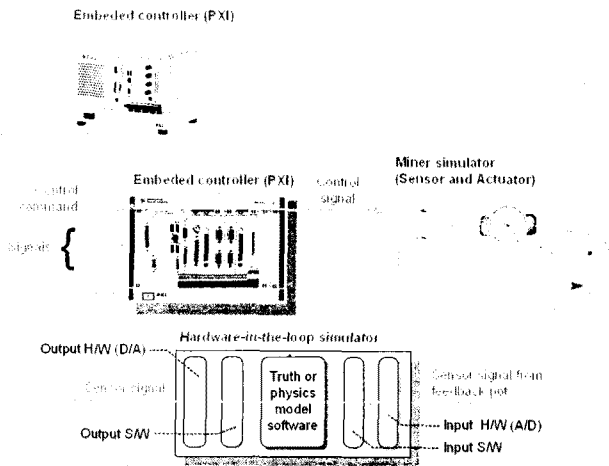


Fig. 6 Diagram of a mix of real and simulated components

5. 결 론

본 논문에서는 심해저 집광기의 제어·계측에 필요한 센서와 액츄에이터 그리고 임베디드 시스템의 설계에 이용할 HILS의 구성에 대하여 논하였다. 대상 H/W에 대한 테스트에 위험요소 혹은 비용의 부담이 클 경우 HILS를 이용하여 이를 줄일 수 있으며, 특히 S/W와 임베디드 시스템의 테스트에 유용한 수단으로 사료된다. 아울러 본 연구로 앞으로 제작될 시험 집광기를 위해 HILS를 위한 시뮬레이터를 제작하고 시험 집광기용 제어·계측 시스템을 구성하고자 한다.

후 기

본 연구는 해양수산특정연구과제인 “심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발” 과제의 일부분으로 수행되었습니다.

- 박성재, 여태경, 홍 섭, 김상봉 (2005). “심해저 채광 시스템용 모니터링 장치 설계”, ICASE 한국자동제어학술회의 논문집, pp.398-403.
- 박성재, 여태경, 홍 섭, 김형우, 최중수 (2006). “심해저 집광기의 제어·계측 임베디드 시스템의 설계”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집, pp 624.
- 여태경, 최중수, 홍 섭, 김형우, 박성재 (2006). “심해저 집광기의 제어·계측 시스템 설계”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집, pp 667.
- 홍 섭 외 (2006). “심해저 광물자원 개발기술연구”, 한국해양연구원 보고서, 해양수산부, CRPM32100-1782-5.
- David M. Lane, G.J. Falconer, G. Randall, Ian Edwards, Jonathon Evans, Jeremy Smith, Julia Hunter, John Standeven, Martin Colley (2001). "Interoperability and Synchronisation of Distributed Hardware-in-the-Loop Simulation for Underwater Robot Development: Issues and Experiments", Proc. of ICRA 2001, Vol. 1, pp 909-914.
- D. Virzonis, T. Jukna, D. Ramunas (2004). "Design of the Embedded Software Using Flexible Hardware-In-the-Loop Simulation Scheme", MELECON 2004, Vol. 1, pp 351-354.
- Feijun Song, Andres Folleco, Edgar An (2001). "High Fidelity Hardware-In-the-Loop Simulation Development for an Autonomous Underwater Vehicle", OCEANS 2001, Vol. 1, pp 444-449.
- Feijun Song, P. Edgar An, Andres Folleco (2003). "Modeling and Simulation of Autonomous Underwater Vehicles: Design and Implementation", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 28, Issue 2, pp 283-296.
- Mark Karpenko, Nariman Sepeshri (2006). "Hardware-in-the-Loop Simulator for Research on Fault Tolerant Control of Electrohydraulic Flight Control Systems", Proc. of 2006 American Control Conference, 7 pp.
- Paul Baracos, Guillaume Murere, C.A. Rabbath, Wensi Jin (2001). "Enabling PC-Based HIL Simulation for Automotive Applications", IEMDC 2001, pp 721-729.
- Peter Terwiesch, Thomas Keller, Erich Scheiben (1999), "Rail Vehicle Control System Integration Testing Using Digital Hardware-in-the-Loop Simulation", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 7, Issue 3, pp 352-362.
- P. Ridao, E. Batlle, D. Ribas, M. Carreras (2004). "NEPTUNE: A HIL Simulator for Multiple UUVs", OCEANS 2004, Vol. 1, pp 524-531.
- S. Raman, N. Sivashankar, W. Milam, W. Stuart, S. Nabi (1999). "Design and Implementation of HIL Simulators for Powertrain Control System Software Development", Proc. of American Control Conference, Vol. 1, pp 709-713.
- Syed Muslim Shah, Muhammad Irfan (2005). "Embedded Hardware/Software Verification and Validation using Hardware-In-the-Loop Simulation", Proc. of the IEEE Symposium on Emerging Technologies, pp 494-498.
- Thomas J. Erkkinen (1999). "Embedded Control System Implementation and Modeling Issues", Proc. of American Control Conference, Vol. 1, pp 734-738.