



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년01월28일  
(11) 등록번호 10-2357504  
(24) 등록일자 2022년01월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G05B 19/418 (2006.01) G05B 19/05 (2006.01)  
G05B 23/02 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
G05B 19/41885 (2013.01)  
G05B 19/05 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2020-0022171  
(22) 출원일자 2020년02월24일  
심사청구일자 2020년02월24일  
(65) 공개번호 10-2021-0107336  
(43) 공개일자 2021년09월01일  
(56) 선행기술조사문헌  
김영주, 시추용 육상 드릴링 시스템의 방향제어  
추진체 및 수수순환기술 개발, 2017 플랜트 연구  
사업 (2017.08.09.)\*  
Tripathi 등, Acceleration pressure drop  
analysis in horizontal dilute phase pneumatic  
conveying system, Powder Technology 327, pp.  
43-56 (2017.12.12.)\*  
신승식 등, 해양자원개발을 위한 해저플랜트 및  
수중작업 기술개발 기획연구, 해양연구기획사업  
(2016.11.19)\*  
KR101384713 B1\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자  
경남대학교 산학협력단  
경상남도 창원시 마산합포구 경남대학로 7 (월영  
동, 경남대학교 내)  
(72) 발명자  
이광국  
경상남도 창원시 마산회원구 양덕북3길 5  
이대형  
경상남도 거제시 옥포중앙로 6-5, 203동 501호 ( 옥포동, 센텀빌리지)  
김용호  
경상남도 창원시 의창구 북면 외산로 365-10  
(74) 대리인  
최훈

전체 청구항 수 : 총 4 항

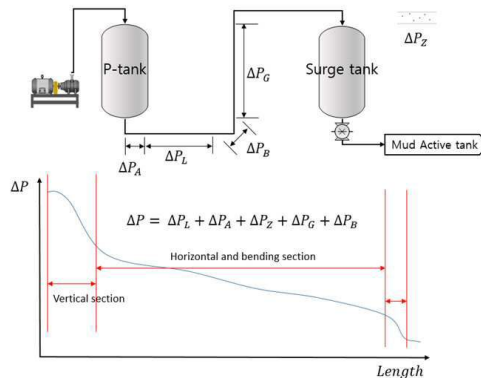
심사관 : 강성철

(54) 발명의 명칭 HILS기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법

(57) 요약

본 발명은 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 관한 것으로, 분체이송 시스템에서 문제되는 관 막힘을 예방하는 파이프라인의 압력 손실에 대한 수학적 모델링 및 시뮬레이션을 수행하고, 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 구성요소를 모델링 및 시뮬레이션을 수행하며, 이에 따라 분체이송시스 (뒷면에 계속)

대표도 - 도2



템과 이수혼합시스템의 통합 HILS 모델을 구축한 후, 상기 구축된 HILS 모델을 기반으로 테스트 시나리오에 따른 HILS 검증을 수행하는 방법을 구현함으로써, 해양 시추에 적용되는 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 HILS 개발을 통해 해양플랜트의 다양한 설비에 대한 모델링 및 시뮬레이션 적용 방안을 모색할 수 있으며, 실제로 수행하기 어렵거나 위험한 극한 시험조건에 해당하는 테스트를 사전에 수행 가능할 뿐만 아니라, 저비용 반복 테스트를 통한 시운전에 따른 비용을 크게 줄이고 장비 운영에 따른 유지보수가 용이하며 제어기의 신뢰성을 확보할 수 있는 효과가 있다.

(52) CPC특허분류

G05B 23/02 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2019EG046010113
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업 (산학공동 기술개발과제)
연구과제명	디지털 트윈 기반의 MCS의 건전성 관리 시뮬레이터 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	경남대학교 산학협력단
연구기간	2019.06.17 ~ 2019.12.20

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2017R1A2B4011329
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	중견연구자지원사업
연구과제명	거친환경에서 운영가능한 HILS기반의 운동 보상기를 갖춘 무인 반잠수정의 자율운항
기 여 율	1/2
과제수행기관명	경남대학교 산학협력단
연구기간	2019.03.01 ~ 2020.02.29

연구

공지예외적용 : 있음

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

파이프라인(Pipeline)의 압력 손실을 보충하기 위해 수직 파이프 구간에만 다수개의 에어부스터(Air Booster)가 설치되는 개수 및 간격을 최적화시키기 위해서는 MATLAB/Simulink/Global Optimization Toolbox을 통한 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)이 적용되는 분체이송시스템(Bulk Transfer System)에서 문제가 되는 관 막힘을 예방하는 상기 파이프라인의 압력 손실에 대해 수학적 모델링을 바탕으로 하여, 파이프라인의 제원과 Input 압력에 따른 압력 손실 결과를 확인한 후, HIL(Hardware In the Loop) 기반으로는 Matlab/Simulink를 통해 시뮬레이션을 수행하는 제1 단계와;

상기 분체이송시스템의 후단에 연결되며, 이송된 분체를 서지탱크(Surge tank)에 보관하고 이수펌프나 혼합호퍼(Mud mixing hopper)를 거쳐 최종적으로 이수저장탱크(Mud Storage tank)와 이수액티브탱크(Mud active tank)로 이수(Mud)가 전달되어 교반되는 이수혼합시스템(Mud Control System)의 구성요소를 모델링 및 시뮬레이션을 수행하는 제2 단계와;

상기 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션을 위하여 Bulk to Bulk 이송과 Bulk to Surge 이송 시나리오를 통해 상기 분체이송시스템과 이수혼합시스템 장비들의 성능 검증이 가능하도록 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 기반의 모델을 구축하는 제3 단계와;

상기 구축된 HILS 모델을 기반으로 하여 상기 이수혼합시스템의 테스트 시나리오에 따른 HILS 검증을 위해서는 제어기인 PLC(Programmable Logic Controller)에 탑재되어있는 HMI(Human Machine Interface)를 통하여 상기 이수혼합시스템의 제어신호를 생성하고, 상기 생성된 제어신호는 PLC(Programmable Logic Control)를 거쳐 Ethernet 통신을 이용하여 PXI를 거쳐 HIL Simulator에 있는 NI OPC Sever로 전달되며, 상기 전달받은 제어 신호를 바탕으로 HIL Simulator의 모델들의 구동 및 상기 구동 결과를 다시 Ethernet 통신으로 PXI를 거쳐 PLC로 전달되는 Loop 동작이 이루어지는 제4 단계가 포함되는 것을 특징으로 하는 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법.

**청구항 2**

삭제

**청구항 3**

삭제

**청구항 4**

삭제

**청구항 5**

제1 항에 있어서,

상기 분체이송시스템은, 저압저속(Dilute-phase) 방식을 적용하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행하되,

상기 파이프라인 내부의 수평원관 손실수두에 따른 압력 손실을 모델링하는 Air alone pressure drop( $\Delta P_L$ )와,

상기 파이프라인 내부의 분체(Bulk)에 대한 가속 준과 연관된 가속 압력 손실을 모델링하는 Acceleration pressure drop( $\Delta P_A$ )와,

상기 파이프라인 내부 벽과의 마찰로 인해 이송가스의 유동에 연관된 압력 손실을 모델링하는 Additional

pressure loss due to presence of solids( $\Delta P_Z$ )와,

상기 파이프라인 내부의 분체 입자의 크기와 속도, 파이프라인 길이에 따라 작용하는 중력에 따른 압력 손실을 모델링하는 The lift pressure loss( $\Delta P_G$ )와,

상기 파이프라인의 Bend 각에 따른 분체 집중의 현상에 의해 압력 손실을 모델링하는 Bend pressure loss( $\Delta P_B$ )가 각각 포함되는 것을 특징으로 하는 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법.

**청구항 6**

삭제

**청구항 7**

삭제

**청구항 8**

제1 항에 있어서,

상기 이수혼합시스템(Mud Control System)의 모델링은, 분체(Bulk)를 저장 및 운송하기 위한 서지탱크(Surge tank)와,

이수(Mud)를 만들기 위한 이수저장탱크(Mud storage tank)와,

이수 혼합 시 교반을 위한 교반탱크(Agitation tank)와,

각 재료의 운송을 제어하기 위한 게이트밸브(Gate Valve) 및 제트펌프(Jet Pump)에 대한 모델링이 실시되는 것을 특징으로 하는 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법.

**청구항 9**

제1 항에 있어서,

상기 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 기반의 모델을 구축하기 플랫폼(Platform)은, 소프트웨어(S/W)와 하드웨어(H/W)로 구성되되,

MATLAB/Simulink를 사용한 상기 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 모델은 HIL Simulator에 탑재되며,

제어기의 제어신호와 상기 HIL Simulator 간의 Input/Output 데이터들은 통신 인터페이스를 거쳐 상기 제어기와 통신하도록 구성되고,

또한, 통신 시뮬레이션 모델의 실시간 구현을 위해서는 LabVIEW와 VeriStand를 사용하고, 통합제어 시뮬레이션 대상 시스템인 상기 분체이송시스템과 이수혼합시스템 간의 통신을 위해서는 OPC UA(Open Platform Communications Unified Architecture) 기반으로 구현되는 것을 특징으로 하는 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법.

**청구항 10**

삭제

**청구항 11**

삭제

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 발명은 HILS 기반의 통합제어 시뮬레이션 방법에 관한 것으로, 특히 분체이송시스템과 이수혼합시스템 통합시킨 HILS 모델을 기반으로 하여 테스트 시나리오에 따른 HILS 검증을 수행하도록 한 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0003] 일반적으로, 시추 시스템(Drilling system)은 크게 육상 시추리그(Onshore rig)와 해상 시추리그(Offshore rig)로 구분할 수 있으며, 시추 형태는 육상 시추에서 시작되어 해양 시추로 그 범위가 점차 확대되고 있다.

[0004] 시추 시스템 중에서 분체이송시스템(Bulk transfer system)과 이수혼합시스템(Mud mixing system)은 가장 중요한 역할을 수행한다. 먼저 분체이송시스템은 통상적으로 플랜트나 공장에서 원재료나 제품 등의 분체(Bulk)를 일정한 파이프 내에 생성된 공기의 압력을 이용하여 멀리까지 이송시키는 기술 및 설비이다. 또한 이수혼합시스템은 시추 시 드릴링 유체(Drilling fluid)인 이수(Mud)를 제조하여 저장 및 교반시킨 후, 이를 순환시켜 압편을 제거하는 작업을 담당할 뿐만 아니라, 땅속 깊은 곳을 Drilling을 할 때 Drill Bit의 마모 및 파손을 방지하여 Drill Bit와 Bearing 등의 Life Time을 증가시키는 역할을 하는 Mud의 배합 및 공급에서부터 회수까지의 시스템 전반을 의미한다.

[0005] 특히, 해양 시추 시스템(Offshore drilling systems)에서 기자재 국산화율이 저조하여 소수 외국 대기업의 NOV와 AKMH의 독과점 현상이 심화되고 있다. 이에 적극적인 국산 기술 개발 및 시장 진입 전략이 필요하다. 최근 시추 시스템에 대한 선주의 요구가 다양해지고 통합 시스템의 복잡도 역시 증가하고 있다. 하지만 시추 시스템의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합을 제어하는 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 개발은 전혀 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 시추 시 빈번히 발생하는 분체이송시스템의 파이프라인의 관막힘 예방과 이수혼합시스템의 운영 시 불확실성과 유지 및 보수비용을 줄이기 위한 건전성 관리 시스템의 필요성이 대두되고 있다.

[0006] 한편, 이 분야의 국내 기업은 MEICS, Atlas Copco, Nabors Industries Ltd, 한진 D&B 등 육상시추플랜트 전문업체가 있으며, 해외는 ARAMCO(Arabian-American Oil Co.), KNPC(Kuwait National Petroleum Company), Bechtel사 등이 있다. 상기 기업들은 이수혼합시스템(Mud control system)의 전반적인 제조 및 서비스는 제공하고 있지만, 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합 제어를 위한 HILS(Hardware In-the-Loop Simulation) 기반의 모델링 및 시뮬레이션을 연구한 사례가 전혀 없다.

[0007] 한편, 대한민국 등록특허공보 제10-1023565호(2011.03.11)에는 지층에 터널을 뚫는 굴진작업을 위해 전면에서 분사되는 이수가 굴진기의 뒤쪽으로 흐르는 것을 임의로 차단할 수 있도록 이수흐름의 제어가 가능한 굴진기가 제안되어 있다[1].

[0008] 또한, 대한민국 공개특허공보 제10-2015-0069723호(2015.06.24)에는 시추 과정에서 사용되는 머드액에 함유된 이수손실 방지제를 별도로 회수할 수 있도록 하여 이수손실 방지제의 유실을 방지하여 시추 비용을 절감할 수 있는 이수손실 방지제 회수 모듈 및 머드액 순환 시스템이 제안되어 있다[2].

[0009] 또한, 대한민국 등록특허공보 제10-1783150호(2017.09.22)에는 MCC(Micro Controller Unit) 기반의 임베디드 시뮬레이터(Embedded Simulator)를 이용하여 매트랩 시뮬링크(Matlab Simulink) 코드로 구현된 선박 장비와 PMS(Power Management System)의 신호를 하드웨어 영역에서 게이트웨이가 가능토록 해석함으로써, PMS 시뮬레이터의 속도 향상은 물론 부하로드의 소비전력을 효율적으로 테스트 가능토록 한 HILS 기반 선박용 전력관리시스템 시뮬레이터가 제안되어 있다[3].

[0010] 그리고 대한민국 등록특허공보 제10-1922532호(2018.11.21)에는 위성항법 보정시스템(DGPS)으로부터 수신되는 정보와 선박의 계획항로상의 항해정보를 이용하여 선박의 조종성능을 예측함으로써, 선박의 에너지 효율성을 높이고 효율적인 운항방법을 제공할 수 있도록 하는 HILS 기반의 선박조종 성능 예측관리 시스템이 제안된 바 있다[4].

[0011] 그러나 위 특허기술 [1] 내지 [4] 모두는 HILS를 적용한 일부 문헌적인 기술 사항만 유사할 뿐, 시추 시스템 내 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 모델링 및 시뮬레이션을 통한 HILS 기반으로 테스트 시나리오에 따른 HILS

검증을 수행할 수 없는 문제점이 여전히 남아 있다.

[0012] 따라서 본 발명은 전술한 문제점을 해소함과 동시에 새로운 HILS 기반의 통합제어 시뮬레이션 방법을 제안한다.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0014] 본 발명의 목적은, 시추 작업에 사용되는 분체이송시스템(Bulk Transfer System)과 이수혼합시스템(Mud mixing system)을 통합 제어 가능한 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 기반의 테스트 시나리오를 통해 실제 운영 장비들에 대하여 사전에 성능을 검증하는 시뮬레이션 방법을 구현함으로써, 시운전에 따른 비용을 크게 줄이고 장비 운영에 따른 유지보수가 용이하며 제어기의 신뢰성을 확보할 수 있도록 한 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법을 제공한다.

**과제의 해결 수단**

[0016] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 특징에 의하면, 파이프라인(Pipeline)의 압력 손실을 보충하기 위해 수직 파이프 구간에만 다수개의 에어부스터(Air Booster)가 설치되는 개수 및 간격을 최적화시키기 위해서는 MATLAB/Simulink/Global Optimization Toolbox을 통한 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)이 적용되는 분체이송시스템(Bulk Transfer System)에서 문제가 되는 관 막힘을 예방하는 상기 파이프라인의 압력 손실에 대해 수학적 모델링을 바탕으로 하여, 파이프라인의 제원과 Input 압력에 따른 압력 손실 결과를 확인한 후, HIL(Hardware In the Loop) 기반으로는 Matlab/Simulink를 통해 시뮬레이션을 수행하는 제1 단계와; 상기 분체이송시스템의 후단에 연결되며, 이송된 분체를 서지탱크(Surge tank)에 보관하고 이수펌프나 혼합호퍼(Mud mixing hopper)를 거쳐 최종적으로 이수저장탱크(Mud Storage tank)와 이수액티브탱크(Mud active tank)로 이수(Mud)가 전달되어 교반되는 이수혼합시스템(Mud Control System)의 구성요소를 모델링 및 시뮬레이션을 수행하는 제2 단계와; 상기 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션을 위하여 Bulk to Bulk 이송과 Bulk to Surge 이송 시나리오를 통해 상기 분체이송시스템과 이수혼합시스템 장비들의 성능 검증이 가능하도록 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 기반의 모델을 구축하는 제3 단계와; 상기 구축된 HILS 모델을 기반으로 하여 상기 이수혼합시스템의 테스트 시나리오에 따른 HILS 검증을 위해서는 제어기인 PLC(Programmable Logic Controller)에 탑재되어있는 HMI(Human Machine Interface)를 통하여 상기 이수혼합시스템의 제어신호를 생성하고, 상기 생성된 제어신호는 PLC(Programmable Logic Control)를 거쳐 Ethernet 통신을 이용하여 PXI를 거쳐 HIL Simulator에 있는 NI OPC Sever로 전달되며, 상기 전달받은 제어 신호를 바탕으로 HIL Simulator의 모델들의 구동 및 상기 구동 결과를 다시 Ethernet 통신으로 PXI를 거쳐 PLC로 전달되는 Loop 동작이 이루어지는 제4 단계가 포함되는 것을 특징으로 하는 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법을 제공한다.

[0020] 본 발명의 또 다른 실시 예에 따르면, 상기 분체이송시스템은, 저압저속(Dilute-phase) 방식을 적용하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행하되, 상기 파이프라인 내부의 수평원관 손실수두에 따른 압력 손실을 모델링하는 Air alone pressure drop( $\Delta P_L$ )와, 상기 파이프라인 내부의 분체(Bulk)에 대한 가속 존과 연관된 가속 압력 손실을 모델링하는 Acceleration pressure drop( $\Delta P_A$ )와, 상기 파이프라인 내부 벽과의 마찰로 인해 이송가스의 유동에 연관된 압력 손실을 모델링하는 Additional pressure loss due to presence of solids( $\Delta P_S$ )와, 상기 파이프라인 내부의 분체 입자의 크기와 속도, 파이프라인 길이에 따라 작용하는 중력에 따른 압력 손실을 모델링하는 The lift pressure loss( $\Delta P_G$ )와, 상기 파이프라인의 Bend 각에 따른 분체 집중의 현상에 의해 압력 손실을 모델링하는 Bend pressure loss( $\Delta P_B$ )가 각각 포함되는 것을 특징으로 한다.

[0023] 본 발명의 또 다른 실시 예에 따르면, 상기 이수혼합시스템(Mud Control System)의 모델링은, 분체(Bulk)를 저장 및 운송하기 위한 서지탱크(Surge tank)와, 이수(Mud)를 만들기 위한 이수저장탱크(Mud storage tank)와, 이수 혼합 시 교반을 위한 교반탱크(Agitation tank)와, 각 재료의 운송을 제어하기 위한 게이트밸브(Gate Valve) 및 제트펌프(Jet Pump)에 대한 모델링이 실시되는 것을 특징으로 한다.

[0024] 본 발명의 또 다른 실시 예에 따르면, 상기 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 기반의 모델을 구축하기 플랫폼(Platform)은, 소프트웨어(S/W)와 하드웨어(H/W)로 구성되며, MATLAB/Simulink를 사용한 상기 분체이송시

시스템과 이수혼합시스템의 모델은 HIL Simulator에 탑재되며, 제어기의 제어신호와 상기 HIL Simulator 간의 Input/Output 데이터들은 통신 인터페이스를 거쳐 상기 제어기와 통신하도록 구성되고, 또한, 통신 시뮬레이션 모델의 실시간 구현을 위해서는 LabVIEW와 VeriStand를 사용하고, 통합제어 시뮬레이션 대상 시스템인 상기 분체이송시스템과 이수혼합시스템 간의 통신을 위해서는 OPC UA(Open Platform Communications Unified Architecture) 기반으로 구현되는 것을 특징으로 한다.

**발명의 효과**

- [0028] 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법은 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.
- [0029] 시추 작업에 사용되는 분체이송시스템과 이수혼합시스템에 대한 HILS 기반의 테스트 시나리오를 통해 실제 운영 장비들에 대한 성능 검증이 가능함으로써,
- [0030] (1) 본 발명은, 통합된 HILS 모델과 실증 시운전 데이터로 지속적인 시뮬레이션 모델 검증이 가능하기 때문에 실장비 운영 전에 기능테스트가 가능하여 시운전에 따른 비용을 크게 줄이고 장비운영에 따른 유지보수가 용이하며 신뢰성을 확보할 수 있다.
- [0031] (2) 본 발명은, 실제로 수행하기 어렵거나, 위험한 극한 시험조건에 해당하는 시운전 환경과 유사한 랩 테스트가 가능하기 때문에 저비용 반복 테스트를 통한 제어기의 성능 및 신뢰도를 향상시킬 수 있다.
- [0032] (3) 본 발명은, 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 HILS 개발을 통해 해양플랜트의 다양한 설비에 대한 모델링 및 시뮬레이션 적용 방안을 모색하고, 건조/시운전/설치/유지보수 등의 고부가가치 시장진출 및 기자재 국산화를 향상에 기여할 수 있는 독특한 효과가 있다.

**도면의 간단한 설명**

- [0034] 도 1은, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 플로워 차트
- 도 2는, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 분체이송시스템의 압력 손실 구성에 대한 개념도
- 도 3은, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 분체이송시스템의 압력 손실에 대한 수학적 모델을 나타낸 도면
- 도 4는 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 파이프라인에 대한 압력 손실 결과를 나타낸 그래프
- 도 5는, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 유전자 알고리즘을 이용한 압력 손실 최적화를 나타낸 개략도
- 도 6은, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 이수혼합시스템을 나타낸 도면
- 도 7은, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 HIL 테스트 아키텍처를 구현한 실물사진
- 도 8은, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 HILS Platform 실물사진
- 도 9는, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 이수혼합시스템 HIL 시뮬레이터 UI를 나타낸 실물사진
- 도 10은, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법에 대한 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합 HILS 모델을 Veristand 2015ver.로 구현한 실물사진

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0035] 이하, 본 발명의 바람직한 실시 예를 첨부된 도면들을 참조하여 상세히 설명한다. 우선 각 도면의 구성요소들에 참조부호를 부가함에 있어서, 동일한 구성요소들에 대해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일

한 부호를 가지도록 하고 있음에 유의해야 한다. 또한, 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지 구성 또는 기능에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명은 생략한다.

[0036] 도 1 내지 도 10을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법은 다음과 같다.

[0037] 먼저, 도 1 및 2를 참조하여, 본 발명의 실시 예에서는 분체이송시스템(Bulk transfer system)에서 문제가 되는 관 막힘을 예방하는 파이프라인(Pipeline)의 압력 손실 성능에 대한 수학적 모델링 및 시뮬레이션을 수행하는 제1 단계를 갖는다.

[0038] 여기서 상기 분체이송시스템(Bulk transfer system)은, 플랜트나 공장에서 원재료나 제품 등의 분입체를 일정한 파이프 내에 생성된 공기 압력을 이용하여 멀리 이송시키는 기술 및 설비를 말한다. 분체이송시스템은 이송방식의 특성에 따라 저압고속(Dilute-phase)과 고압저속(Dense-phase) 방식으로 구분되며, 이송하고자 하는 원료 및 제품의 물리적, 화학적 특성에 의해 결정되게 된다. 저압고속 방식의 경우 재료 이송속도가 높아 이송원료가 깨지거나 마찰에 의한 마모로 어느 정도의 에너지 손실을 갖지만 시스템의 운용 측면에서 예측의 정확성과 높은 신뢰성을 갖는다. 고압저속은 이동속도는 낮으나 부하를 높일 수 있어 효율적인 이송이 가능하고 마찰에 의한 마모손실이 적어 고마모성 재료의 원거리 이동에 적합하다.

[0039] 따라서 본 발명의 실시 예에서는 저압저속(Dilute-phase) 방식을 적용하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행한다.

[0040] 먼저 도 2를 참조하여, 저압고속(Dilute-phase) 이송방식의 압력 손실 성능은 몇 개의 주요 특성성분으로 구성되며, 이러한 각 압력 손실 성분의 총합이 설계 요구 가스압력이 된다. 각 압력 손실 성분을 보다 상세히 분류하면 (1) Air alone pressure drop( $\Delta P_L$ ), (2) Acceleration pressure drop( $\Delta P_A$ ), (3) Additional pressure loss due to presence of solids( $\Delta P_Z$ ), (4) The lift pressure loss( $\Delta P_G$ ), (5) Bend pressure loss( $\Delta P_B$ )로 분류할 수 있으며, 이외에 시스템 마모에 의한 압력 손실 및 파이프 연결부위의 step에 의한 손실 등이 있다.

[0041] (1) Air alone pressure drop( $\Delta P_L$ )

[0042] 식 (1)은 수평원관 손실수두를 나타내며 파이프라인 내부의 압력 손실은 Dracy 식에 의해 일반화한다.

[0043] 
$$\Delta P = \lambda_L \frac{\rho}{2} V^2 \frac{L}{d} \quad (1)$$

[0044] 여기서 상기  $\lambda_L$ 는 마찰계수,  $\rho$ 는 이송기체의 밀도,  $V$ 는 이송기체의 평균속도,  $L$ 은 파이프의 길이,  $d$ 는 파이프 직경이다.

[0045] 이때 대표적인 이송가스인 공기와 질소의 밀도와 점성계수는 공기의 온도에 따라 변하므로 이를 다음과 같이 고려한다.

[0046] 기점성계수 : 
$$\frac{\eta_1}{\eta_0} = \left( \frac{T_0}{T_1} \right)^{0.77}, \eta = 1.783 \times 10^{-5} \left( \frac{T+273.15}{288.16} \right)^{0.77} \quad (2)$$

[0047] 질소점성계수 : 
$$\eta = 1.665 \times 10^{-6} \times 9.81 \frac{375.7}{T+375.85} \left( \frac{T+273.15}{273} \right)^{1.5} \quad (\text{sutherland's equation}) \quad (3)$$

[0048] 
$$\rho = \frac{101.325 + P}{0.287 + (T + 273.15)} \quad (\text{공기인 경우})$$

[0049] 
$$\rho = \frac{101.325 + P}{0.2968 + (T + 273.15)} \quad (\text{질소인 경우})$$

[0050]  $Re = \frac{\rho V D}{\mu}$  에서,  $\lambda_L = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$  는 난류영역에서 관마찰계수이다.

[0051] 여기서 상기  $Re$  는 레이놀즈 수,  $\rho$  는 이송기체의 밀도,  $T$  는 온도,  $\mu$  는 점성계수,  $\lambda_L$  는 마찰계수,  $V$  는 이송기체의 속도,  $D$  는 파이프 직경이다.

[0052] (2) Acceleration pressure drop( $\Delta P_A$ )

[0053] 고체는 몇몇 공급 장치 형태 위의 Bunker에 쌓이게 된다. 공급 장치의 유동은 다양한 유동비율과 압력에 의해 제공된 주요 이송자이다. 대기압에 Bunker에 쌓인 고체는 기본적으로 움직이지 않으며 유동가스에 의해 도입된다. 모멘텀(Momentum)의 급격한 변화는 고압력 손실을 유발한다. 수평 파이프라인의 길이는 입자가 정지상태에서 몇몇 평균 이송 속도까지 가속할 수 있도록 충분히 제공된다. 여기서 가속 준과 연관된 가속 압력 손실이 있다.

[0054]  $c = v(1 - 0.65d^{0.92} \rho_p^{0.5} \rho^{-0.2} D^{-0.54})$  (4)

[0055]  $\Delta P_A = \mu v \rho_p c$  (5)

[0056] 여기서 상기  $c$ 는 Particle velocity,  $d$ 는 순간적 전체 drag 계수,  $\rho_p$ 는 분체 밀도,  $\rho$ 는 이송기체 밀도,  $D$ 는 파이프직경이다.

[0057] (3) Additional pressure loss due to presence of solids( $\Delta P_Z$ )

[0058] 분체이송 시 분체 자체의 추가적인 압력 손실이 있다. 특히, 파이프라인 내부의 벽과의 마찰로 인해 이송가스의 유동에 연관된 압력 손실이 있다.

[0059]  $\Delta P_Z = \mu \lambda_z \frac{\rho}{2} v^2 \frac{\Delta L}{D}$ ,  $\rho$ : 공기밀도,  $\lambda_z: 5 \times 10^{-3}$  (6)

[0060] 여기서 상기  $\mu$ 는 점성계수,  $\rho$ 는 이송기체의 밀도,  $v$ 는 점성,  $L$ 는 파이프 길이,  $D$ 는 파이프 직경이다.

[0061] (4) The lift pressure loss( $\Delta P_G$ )

[0062] 수직 파이프라인의 유동하는 분체의 입자는 수평 파이프라인에서 요구하는 Saltation velocity와는 달리 추가적 입자의 크기 및 속도, 파이프라인의 길이에 따라 작용하는 중력에 따른 압력 손실이 고려된다.

[0063]  $\Delta P_G = \rho^* g \Delta Z$ ,  $\rho^* = \frac{\mu \rho}{c/v}$  (7)

[0064] 여기서 상기  $\rho$ 는 이송기체의 밀도,  $v$ 는 점성,  $g$ 는 중력가속도,  $\Delta Z$ 는 수직파이프 높이 변화이다.

[0065] (5) Bend pressure loss( $\Delta P_B$ )

[0066] 굴곡부의 너무 크게 휘어진 각에 의해 Suspension velocity는 상당히 감소될 것이다. 따라서 파이프라인의 Bend 각에 따라 이러한 분체 집중의 현상에 의해 압력 손실이 고려된다.

[0067]  $\frac{\Delta P_B}{\Delta P_Z} = 210 \left( \frac{2R_B}{D} \right)^{-1.15}$  (8)

[0068]  $\Delta L_{eq} = 2\pi R_B / 4$  (for  $90^\circ$  bend) (9)

[0069]  $\Delta P_{Zbend} = \Delta P_z(\text{totallength}) \times \Delta L_{eq}$  (10)

[0070]  $\Delta P_B(\text{Solid}) = \Delta P_{Zbend} 2^{10} \left(\frac{2R_B}{D}\right)^{-1.15} \times n$  (11)

[0071]  $\Delta P_B(\text{gas}) = \Delta P_1(\text{totallength} \times 40 \times D)$  (12)

[0072]  $\therefore \text{total} \Delta P_B = \Delta P_B(\text{Solid}) + \Delta P_B(\text{gas})$  (13)

[0073] 여기서 상기  $R_B$ 는 굴곡부 반지름,  $\Delta L_{eq}$ 는 굴곡부 길이,  $D$ 는 파이프라인 직경이다.

[0074] (6) 분체이송시스템의 압력 손실 시뮬레이션

[0075] 본 발명의 실시 예에 따른 분체이송시스템의 시뮬레이션은, 앞서 정의한 압력 손실에 대한 수학적 모델링을 바탕으로 하여, 파이프라인의 제원과 Input 압력에 따른 압력 손실 결과를 확인한 후, HIL(Hardware In the Loop) 기반으로는 MATLAB/Simulink를 통해 시뮬레이션을 실시하였다.

[0076] 또한, 도 3은 본 발명의 실시 예에 따른 분체이송시스템의 압력 손실 모델로서, 파이프라인의 제원과 Inlet 압력에 따라 압력 손실을 Case 별로 수학적 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 실시하였으며, 자세한 input 사양은 Table 1과 같다.

표 1

Table 1 Basic Specification of bulk transfer system

Contents	Value
Supply pressure	3.8bar
Temperture	20°C
Air Density	1.17kg/m3
Material Density (Apparent Specific Gravity)	2400kg/m3 (Barite)
Diameter of pipe	0.13m
Total horizontal length of pipe	127.9m
Total vertical length of pipe	26.2m
Radian of bending pipe	90°, 45°
Radius of bending pipe	0.75m
Total length of pipe	161.6m

[0077]

[0079] 도 4는 본 발명의 실시 예에 따른 시뮬레이션 모델을 활용한 분체이송시스템의 전체 파이프라인(Pipe line)에 대한 압력 손실 결과를 나타낸다.

[0080] 도 4에서 보는 바와 같이, Air booster의 역할은 배제하고 시뮬레이션을 수행하였으며, 압축기(Compressor)에서 공급하는 Input pressure가 3.8bar로 시작하여 수직 파이프 구간에서 급격히 감소되고, 그 이후 수평 및 곡간부 부분에서 비교적 조금씩 감소되어 1.14bar 손실이 발생하여 결과적으로 2.66bar의 Outlet pressure가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

[0081] 이와 같이, 본 발명의 실시 예에 따른 분체이송시스템(Bulk transfer system)에서 문제가 되는 관 막힘을 예방하는 파이프라인(Pipeline)의 압력 손실 성능에 대한 수학적 모델링 및 시뮬레이션은 앞서 구한 시뮬레이션 결과 값과 시험데이터와의 비교 검증을 수행할 수 있는 특징이 있다.

[0082] 또한, 도 5를 참조하면, 본 발명의 다른 실시 예에서는 상기 분체이송시스템(Bulk transfer system)에는 압력 손실 영향으로 인한 관 막힘이나 장비의 손상 등을 예방하기 위한 압력 손실 보충용으로 에어부스터(Air Booster)가 수직배열로 다수개가 설치되며, 상기 에어부스터에 대해서는 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)을 적용하여 압력 손실을 최적화하는 단계가 더 포함한다.

[0083] 다시 말해서, 상기 분체이송시스템(Bulk transfer system)의 압력 손실을 보충하기 위해서는 다수개의 에어부스

터(Air Booster)가 수직배열로 설치되며, 상기 에어부스터를 통해 압력 손실이 심한 수직 파이프 구간에 대한 압력 손실을 최소화하며, 에어부스터의 설치 개수와 간격 등을 최적화하기 위해서는 MATLAB/Simulink 2019b / Global Optimization Toolbox을 통한 유전자 알고리즘을 적용하여 압력 손실을 최적화시킨다.

[0084] 다음은, 도 1 및 도 6을 참조하여, 본 발명의 실시 예에서는 상기 분체이송시스템(Bulk transfer system)과 연결되는 이수혼합시스템(Mud control system)의 모델링 및 시뮬레이션을 수행하는 제2 단계를 갖는다.

[0085] 도 6을 참조하면, 본 발명의 실시 예에 따른 이수혼합시스템(Mud Control System)은, 상기 분체이송시스템(Bulk transfer system)의 후단에 연결되어 설치되며, 분체이송시스템에서 이송된 분체를 서지탱크(Surge tank)에 보관하고 이수펌프나 혼합호퍼(Mud mixing hopper) 등을 거쳐 최종적으로 이수저장탱크(Mud Storage tank)와 이수액티브탱크(Mud active tank)로 머드(Mud)가 전달되며, 상기 전달된 머드는 교반기(Agitator)에서 교반되는 기술적 구성을 갖는다.

[0086] 여기서 상기 이수혼합시스템(Mud Control System)의 이수(Mud)는, 해양 시추에 사용되는 액체상의 현탁액인 드릴링 유체(Drilling fluid)이며, 굴진과정에서 생긴 암편을 제거하고 시추공의 압력을 제어하는 등의 많은 역할을 수행한다.

[0087] 또한, 본 발명의 실시 예에 따른 이수혼합시스템(Mud control system)의 모델링은 다음과 같다.

[0088] 이수 혼합을 위해서는 앞서 이수혼합시스템의 구성에서 보는 바와 같이, 우선 분체(Bulk)를 저장 및 운송하기 위한 (1)서지탱크(Surge tank)와 이수(Mud)를 만들기 위한 (2)이수저장탱크(Mud storage tank), 이수 혼합 시 교반을 위한 (3)교반탱크(Agitation tank)에 대한 모델링을 수행하였다. 그리고 각 재료의 운송을 제어하기 위한 (4)게이트밸브(Gate Valve)와 (5)제트펌프(Jet Pump)에 대한 모델링 역시 필요하다.

[0089] (1) 서지탱크(Surge tank) 모델링

[0090] 상기 서지탱크는 분체를 저장하는 분체저장탱크(Bulk storage tank)이며, 분체(Bulk)의 경우 고체이므로 고체 흐름의 가장 간단한 아날로그는 시스템을 동등한 액체상황과 비교하는 것이며, 공압식 운송에서는 질량(Mass)의 일정한 유량을 제공하는 데 초점을 두어야 하므로,  $m_s$ 가 저장 탱크 또는 피더 장치의 분체의 양이면 식(14)와 같이 표현 할 수 있다.

[0091] 
$$\frac{dm_s}{dt} = \dot{m}_{su} - \dot{m}_{s0} \quad (14)$$

[0092] 여기서,  $\alpha$ 와  $\omega$ 는 각각 탱크 입구와 출구의 상태를 나타낸다.

[0093] 출력을 일정하게 유지하는 방법은 피더에 기준 레벨을 설정하고 탱크 압력을 일정하게 유지하는 것이다. 탱크의 분체 수준 또는 양을 지속적으로 측정가능하다.

[0094] 
$$\varepsilon' = m_{sref} - m_s \quad (15)$$

[0095] 여기서  $m_{sref}$ 는 탱크의 분체 기준량(Reference amount of solids)이다. 오차는 유입구 유량에 비례하여 설정할 수 있으므로 식(16)으로 표현 된다.

[0096] 
$$\dot{m}_{su} - K\varepsilon' \quad (16)$$

[0097] 이것은 사용할 수 있는 제어 유형 중 하나이다. 이 시점에서 다양한 제어 체계가 분석에 통합 될 수 있습니다. 기본 미분 방정식 (17)은 생산량으로 표현가능하고

[0098] 
$$\frac{dm_s}{dt} + Km_s = Km_{sref} - \dot{m}_{so} \quad (17)$$

[0099] 라플라스 변환으로 표현하면, 아래 식으로 표현가능하다.

[0100] 
$$m_s(s) = \frac{1}{s+K} [Km_{sref}(s) - \dot{m}_{so}(s) - m_s(0)] \quad (18)$$

[0101] 공압식 운송에서 일반적으로 사용되는 또 다른 설정은 액체 시스템에서 블로우 탱크 배열과 같은 아날로그를 거의 사용하지 않는다. 분체와 같은 고체를 갖는 블로우 탱크(Blow tank) 또는 전달 탱크(Transfer tank)는 파이프라인 내로 그리고 파이프라인을 통해 고체를 이송하기 위해 가압될 수 있다.

[0102] 따라서 분체(Bulk)와 같은 고체의 물질수지(Balance of solids)는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dm_s}{dt} = -\dot{m}_{so} \quad (19)$$

[0104] 또한, 유량 측정계를 통해 출력 유량을 지속적으로 측정하면 오류 신호를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\varepsilon = \dot{m}_{soref} - \dot{m}_{so} \quad (20)$$

[0106] 또한, 탱크에서의 출력 유량은 장치의 질량 양과 적용된 압력에 따라 다르기 때문에 이 현상에 선형 조합을 사용하면 아래와 같이 표기된다.

$$\dot{m}_{so} = \alpha m_s + \beta P_{Tank} \quad (21)$$

[0108] 또한, 탱크의 압력은 아래와 같은 비례 제어에 의해 오류 신호와 관련될 수 있다.

$$P_{Tank} = K(\dot{m}_{pref} - \dot{m}_{po}) \quad (22)$$

[0110] 따라서 위 표현을 결합하면, 아래와 같이 정리된다.

$$\frac{dm_s}{dt} = -[\alpha m_s + \beta K(\dot{m}_{pref} - \dot{m}_{po})] \quad (23)$$

[0112] 그리고 라플라스 변형을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$m_s(s) = \frac{1}{s + \alpha} [m_s(0) - \beta K(\dot{m}_{soref}(s) - \dot{m}_{so}(s))] \quad (24)$$

[0114] 여기서 s는 라플라스 변환 표기임을 나타낸다.

[0115] (2) 이수저장탱크(Mud storage tank) 모델링

[0116] 상기 이수저장탱크(Mud storage tank)는, 이수(mud) 자체가 액체이므로 액체저장탱크(Liquid storage tank)이며, 액체 공정 모델은 일련의 미분방정식과 대수방정식들로 이루어지므로 물질수지식은 질량 보존의 법칙에 따라 유출량  $q_{oP}$ 은 펌프에 의해 일정하게 유지된다고 가정한다.

[0117] 또한, 시간에 따른 유입량은  $q_{iP}$ , 시간에 따른 유출량은  $q_{oP}$ , 시간에 따른 액체 양의 변화는  $\frac{d}{dt}(\rho V)$ 가 되므로 식(25)과 같이 표현이 가능하다.

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = q_{iP} - q_{oP} \quad (25)$$

[0119] 그런데,  $V = Ah$ 이고 단면적  $A$ 는 일정하므로 식(26)으로 표현이 가능하다.

$$A \frac{d}{dt}(\rho h) = q_{iP} - q_{oP} \quad (26)$$

[0121] 만약, 밀도  $\rho$ 가 일정하다면

$$A \frac{dh_s}{dt} = q_{iP} - q_{oP} \quad (27)$$

[0123] 이고,  $q_o$ 는 일정하므로 정상상태에서는 식(28)으로 표현이 가능하다.

$$A \frac{dh_s}{dt} = 0 = q_{is} - q_o \quad (28)$$

[0125] 따라서 정리하면 식(29)으로 표현할 수 있다.

$$A \frac{d(h-h_s)}{dt} = q_i - q_{is} \quad (29)$$

[0127] (3) 교반탱크(Agitation tank) 모델링

[0128] 교반 시스템에서 유입액의 유량은  $w_i(kg/s)$ , 유출액의 유량은  $w(kg/s)$ , 교반 탱크 내의 유체의 부피는  $V(m^3)$ 이다. 밀도는  $\rho(kg/m^3)$ 이며, 가열기에 의하여 공급되는 열량은  $Q(cal/g^\circ C)$ 이다. 그리고 유체의 비열은  $C_p(cal/g^\circ C)$ 이다.

[0129] 또한, 시간에 따른 유입 물질량은  $w_i$ , 시간에 따른 유출 물질량은  $w$ , 시간에 따른 물질량의 변화는

$$\frac{d}{dt}(\rho V) \quad \text{이므로, 물질수지식은,}$$

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = w_i - w \quad (30)$$

[0131] 으로 주어진다.

[0132] 또한, 기준온도를  $T_o$ 라 하면 시간에 따른 유입 에너지량은  $C_p w_i(T_i - T_o)$ , 시간에 따른 유출 에너지량은  $C_p w(T - T_o)$ , 외부로부터 가해지는 에너지량은  $Q$ , 시간에 따른 에너지량의 변화는  $\frac{d}{dt} \{C_p \rho V(T - T_o)\}$ 으로 표현이 가능하다. 따라서 에너지 수지식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dt} \{C_p \rho V(T - T_o)\} = C_p w_i(T_i - T_o) - C_p w(T - T_o) + Q \quad (31)$$

[0134] 여기서, 상기  $C_p$ 는 시간  $t$ 와 무관하므로 위 식의 좌변을 다시 쓰면

$$\frac{d}{dt} \{C_p \rho V(T - T_o)\} = C_p(T - T_o) \frac{d}{dt}(\rho V) + C_p \rho V \frac{d}{dt}(T - T_o) \quad (32)$$

[0136] 으로 표현이 가능하다. 여기서, 식(32)을 이용하면

$$\frac{d}{dt} \{C_p \rho V(T - T_o)\} = C_p(T - T_o)(w_i - w) + C_p \rho V \frac{dT}{dt} \quad (33)$$

[0138] 으로 다시 표현할 수 있다. 위의 관계와 식 (33)로부터

$$\begin{aligned} C_p \rho V \frac{dT}{dt} &= C_p w_i(T_i - T_o) - C_p w(T - T_o) + Q - C_p(T - T_o)(w_i - w) \\ &= C_p w_i(T_i - T) + Q \end{aligned} \quad (34)$$

[0140] 으로 표현 된다. 식(34)는 서로 다른 변수들인  $w_i$ 와  $T_i$  및  $T$ 들의 곱들을 포함하고 있으므로 비선형 모델이며 선형화에 의해 편차변수를 이용한 선형 모델 식을 얻을 수 있다. 식(34)을 선형화시키면

$$C_{p\rho V} \frac{dT}{dt} \approx C_p(T_{is}-T_s)(w_i-w_{is}) + C_p w_{is}(T_i-T_{is}) - C_p w_{is}(T-T_s) + (Q-Q_s) \quad (35)$$

[0141]

[0142] 으로 표현이 가능하고, 위에서 아래첨자 s는 정상상태를 의미한다. 편차변수를 이용하면

$$C_{p\rho V} \frac{dT'}{dt} \approx C_p(T_{is}-T_s)w_i' + C_p w_{is}T_i' - C_p w_{is}T' + Q' \quad (36)$$

[0143]

[0144] 으로 표현이 가능하다.

[0145]

교반 특성에서 중요한 한 가지는, 혼합 시간(Mixing time)이고 물질이 액체와 원하는 혼합 상태로 혼합되는데 걸리는 시간을 혼합 시간이라고 한다. 또한 원하는 농도를 결정하는 것뿐만 아니라 농도의 변동을 인식하고 허용 된 변동의 적절한 최대값을 선택하는 것이 중요하다.

[0146]

혼합 시간과 혼합도(Mixedness)를 측정하는 일반적인 방법은 농도 변동의 척도인 변동 계수( $CoV$ )를 사용하는 것이다.

$$CoV = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}}{\bar{C}} \quad (37)$$

[0147]

[0148] 여기서,  $C$ 는 농도(Concentration),  $\bar{C}$ 는 평균농도(Mean Concentration)이다.

[0149]

혼합도는  $(1-CoV) \cdot 100$ 으로 표현된다. 그러므로  $CoV$  값은 예를 들어 0.1은 90% 혼합도를 나타내고, 0.01은 99%의 혼합도를 나타낸다.

[0150]

또한, 도 2를 참조하여, 본 발명의 실시 예에서는 상기 분체이송시스템(Bulk Transfer System)과 이수혼합시스템(Mud Control System)의 통합제어 시뮬레이션을 위한 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 기반의 모델을 구축하는 제3 단계를 갖는다.

[0151]

본 발명의 실시 예에 따른 상기 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 기반의 모델을 구축하기 위해서는, 제어기의 제어신호와 I/O와 HIL Simulator I/O 간의 신호전달을 위한 인터페이스 모델과 장비, HIL Simulator, 제어기를 이용하여 HILS 플랫폼이 요구된다.

[0152]

따라서 도 7을 참조하면, 본 발명의 실시 예에서는 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합 HILS 모델과 시뮬레이션 결과를 기반으로 National Instrument PXI, PLC 그리고 PC Simulator를 연동하여 아날로그 및 디지털 신호를 통한 기본적인 데이터 송수신 테스트를 위한 시스템 아키텍처를 구성하였다.

[0153]

본 발명의 실시 예에 따른 상기 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합제어 시뮬레이션을 위한 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 기반의 모델 구축을 하는 이유는, SILO Tank, Surge Tank, Pressure Sensor, "On" / "Off" Valve, Purge Valve 동작 및 성능 검증에 중점을 두고 테스트를 실시함으로써, "Bulk to Bulk" 이송, Bulk to Surge 이송 시나리오를 통해 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 장비들의 HILS 성능 검증의 수행이 가능하다.

[0154]

또한, 도 8을 참조하면, 본 발명의 실시 예에 따른 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 HILS Platform은, 소프트웨어(S/W)와 하드웨어(H/W) 요소로 나누어 구성된다.

[0155]

즉, MATLAB/Simulink를 사용한 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 모델을 HIL simulator에 탑재하고 Input/Output 데이터들은 통신 인터페이스를 거쳐 제어기와 통신하도록 구성된다. 또한 통신 시뮬레이션 모델의 실시간 구현을 위해서는 National Instrument의 LabVIEW와 VeriStand를 사용하고, 제어 대상 시스템인 분체이송시스템과 이수혼합시스템 간의 통신을 위해서는 OPC UA(Open Platform Communications Unified Architecture) 기반으로 구현하였다.

[0156]

또한, 하드웨어 요소는 지멘스 PLC 검증을 위해 NI PXIe-8135으로 구현하고, 이더넷(Ethernet) 통신을 포함한 아날로그 신호 및 디지털 신호의 양방향 통신이 가능하도록 I/O 인터페이스를 구성하였다.

- [0157] 그리고 도 9를 참조하면, 본 발명의 실시 예에서는 Veristand 2015를 이용하여 구성된 HIL Simulator UI(User Interface)를 나타내며, UI는 분체 이송 시스템의 Tank level과 Pressure을 확인할 수 있도록 구성하였으며, 최종적으로 이수혼합시스템의 이수의 농도(Density)를 확인할 수 있도록 구성하였다.
- [0158] 마지막으로, 도 1과 도 9 및 도 10을 참조하여, 본 발명의 실시 예에서는 상기 제3 단계의 구축된 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 모델을 기반으로 상기 이수혼합시스템(Mud Control System)의 테스트 시나리오에 따른 HILS 검증을 수행하는 제4 단계를 갖는다.
- [0159] 상기 구축된 HILS 모델을 기반으로 상기 이수혼합시스템의 테스트 시나리오에 따른 HILS 검증 방법은 다음과 같다.
- [0160] 먼저, 제어기인 PLC(Programmable Logic Controller)에 탑재되어있는 HMI(Human Machine Interface)를 통하여 이수혼합시스템의 제어신호를 생성한다.
- [0161] 다음은, 상기 생성된 제어신호는 PLC를 거쳐 Ethernet 통신을 이용하여 PXI를 거쳐 HIL Simulator에 있는 NI OPC Sever로 전달된다.
- [0162] 또한, 상기 전달받은 제어 신호를 바탕으로 HIL Simulator의 각 모델이 구동된다.
- [0163] 그리고 상기 수행된 모델들의 구동 결과를 다시 Ethernet 통신으로 PXI를 거쳐 PLC로 전달된다.
- [0164] 이러한 루프(Loop) 동작은 제어기가 실제 하드웨어 장비들을 실제장비 없이도 제어기의 성능을 시험, 검증, 평가할 수 있으며, 실제로 수행하기 어려운 시험 조건을 저비용 반복 수행이 가능하다. 분체이송시스템과 이수혼합시스템 구성품의 스펙은 Table 2에 나타내었다.

**표 2**

Table 2 Bulk transfer system & mud mixing system component spec

Component	Spec
Bulk Tank-1 (P Tank)	Capacity : 40m <sup>3</sup> Quantity : 1set
Bulk Tank-2 (Transfer Tank)	Capacity : 7m <sup>3</sup> Quantity : 2set
Surge Tank	Capacity : 7m <sup>3</sup> Quantity : 1set
Jet pump	Dry material capacity : 211.68m <sup>3</sup> /h Liquid flow capacity : 493.92m <sup>3</sup> /h
Mud active tank	Capacity : 58.8m <sup>3</sup> Quantity : 2set
On/Off Valve	DC 24V gate valve
Pressure Sensor	4 ~ 20mA Analog Pressure Sensor
Density Sensor	4 ~ 20mA Analog Density Sensor
Motor	380V 5.5kw Motor

- [0165]
- [0167] 또한, 본 발명의 실시 예에 따른 제어기와 HIL Simulator에서 이용된 신호 I/O는 23개로 Table 3에 나타내었다.

표 3

Table 3 Signal components of mud control system and HIL simulator

No.	Component	Type	Unit
1	Inlet pressure	Numerical Value	bar
2	Outlet Pressure	Numerical Value	bar
3	P-tank Inlet valve	True/False	on/off
4	P-tank outlet valve	True/False	on/off
5	Surge-tank Inlet valve	True/False	on/off
6	Surge-tank outlet valve	True/False	on/off
7	Water tank inlet valve	True/False	on/off
8	Water tank outlet valve	True/False	on/off
9	Sub tank inlet valve	True/False	on/off
10	Sub tank outlet valve	True/False	on/off
11	Jet Pump inflow 1	Numerical Value	kg/s
12	Jet Pump inflow 2	Numerical Value	kg/s
13	Jet Pump outflow	Numerical Value	kg/s
14	P-tank volume	Numerical Value	m <sup>3</sup>
15	Surge tank volume	Numerical Value	m <sup>3</sup>
16	Water tank volume	Numerical Value	m <sup>3</sup>
17	Active tank volume	Numerical Value	m <sup>3</sup>
18	Sub tank volume	Numerical Value	m <sup>3</sup>
19	Moter speed	Numerical Value	rpm
20	Power Coefficient	Numerical Value	-
21	Flow Coefficient	Numerical Value	-
22	Mud Density	Numerical Value	kg/m <sup>3</sup>
23	Emergency stop	True/False	on/off

[0168]

[0170]

또한, 본 발명의 실시 예에서는 이수혼합시스템(Mud Control System)의 HIL 테스트를 위해 11가지의 시나리오를 설정하여 테스트를 수행하였다. 테스트 시나리오는 Table 4 에 나타내었다.

표 4

Table 4 HIL test scenario of bulk transfer system & mud mixing system

No	HIL Test scenario
1	Pressure loss check during conveying bulk
2	Mud density, mixing time check by motor RPM
3	Auto off signal check after conveying bulk to P-tank
4	Auto off signal check after conveying bulk to surge tank
5	Auto off signal check after conveying bulk to active tank
6	Auto off signal check after conveying water to active tank
7	Entering valve off signal during conveying bulk to P-tank
8	Entering valve off signal during conveying bulk to surge tank
9	Entering valve off signal during conveying bulk to active tank
10	Entering valve off signal during conveying water to active tank
11	Check sub tank module operation at emergency stop

[0171]

[0173]

위 Case 3, 4, 5를 제외한 나머지의 경우는 Normal condition에서의 이수 혼합 시스템의 일반적인 구성 요소 확인사항이다. 순서대로 설명하자면, Case 1은 분체 이송 시 압력 손실을 나타내고, Case 2의 경우 이수 혼합 탱크인 액티브 탱크의 교반기 모터 RPM에 따른 이수 혼합 시간과 밀도를 나타낸다. Case 3, 4, 5, 6의 경우 각 탱크의 용량에 맞는 물질들이 채워진 후에 각 탱크의 유입구 밸브 신호들이 자동으로 Off 신호 바뀌는지 여부이다. Case 6, 7, 8, 9의 경우 분체와 물이 각 탱크로의 이송 중 강제로 밸브에 Off 신호를 줄때의 제어기의 반응을 확인한다. Case 11의 경우 비상 정지 시 HMI에서 경고창이 뜨고 시스템 중단 여부를 확인한다. HIL 테스트 시나리오에 따른 결과를 Table 5 에 나타내었다.

표 5

Table 5 Result of test cases for bulk transfer system & mud mixing system

No	Test case
1	Normal operation
2	Mixing time increase at 30RPM, Mixing time increase at 90ORPM, Normal operation
3	Normal operation
4	Normal operation
5	Normal operation
6	Normal operation
7	Normal operation
8	Normal operation
9	Normal operation
11	Sub tank module not working at emergency stop

[0174]

[0176]

위 HIL 테스트 시나리오 1~11번의 경우 모두가 정상작동을 하는 것을 확인할 수 있다. Case 2번의 경우 HIL simulator의 RPM 조절에 따라 제어기의 교반기 모터의 RPM이 조절되었고 그에 따라 소요 동력과 이수 혼합 시간이 조절되었다. Case 3, 4, 5, 6의 경우 분체와 물이 각각의 탱크로 이송 후 유입구 밸브 신호들이 자동적으로 Off 신호로 전환되고 그에 따라 제어기도 반응 하는 것을 확인하였다. Case 7, 8, 9, 11의 경우 분체와 물이 이송 각각의 탱크로 이송 중에 강제로 밸브 신호를 Off로 뒀을 경우 HMI에 나타난 밸브들의 신호가 Off로 바뀌고 이에 따라 제어기도 반응하는 것을 확인할 수 있다.

[0177]

또한, HIL 테스트 시나리오 중 Case 11에서 이상동작을 확인할 수 있는데, Case 11의 경우 HIL simulator에서 비상 정지 버튼을 눌렀을 때 제어기의 HMI에서 알람경고는 떴으나 분체와 물의 이송은 계속되었다.

[0178]

이처럼 HIL 테스트를 이용하면 실제 환경에서 테스트하기 불가능(극한시험, 돌출변수 등)한 환경을 손쉽게 구축이 가능하며 컴퓨터 기반의 시뮬레이션을 통하여 반복 실험을 추가비용 없이 수행할 수 있는 특징이 있다.

[0179]

또한 본 발명의 실시 예에서는 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합된 HILS 모델을 기반으로 HIL 테스트 플랫폼을 구축 하였으며, 특히 P-Tank, Surge Tank, Active tank, Water tank, Gate valve, Agitator motor 등의 동작 및 성능 검증에 중점을 두고 테스트를 실시한 바, 다양한 시나리오를 통해 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 HILS 성능 검증을 추가 비용 없이 반복 수행이 가능함을 확인할 수 있었다.

[0180]

도 11은 본 발명의 실시 예에서 구축한 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합된 HILS 모델을 Veristand 2015ver.으로 구현한 것을 나타낸다.

[0181]

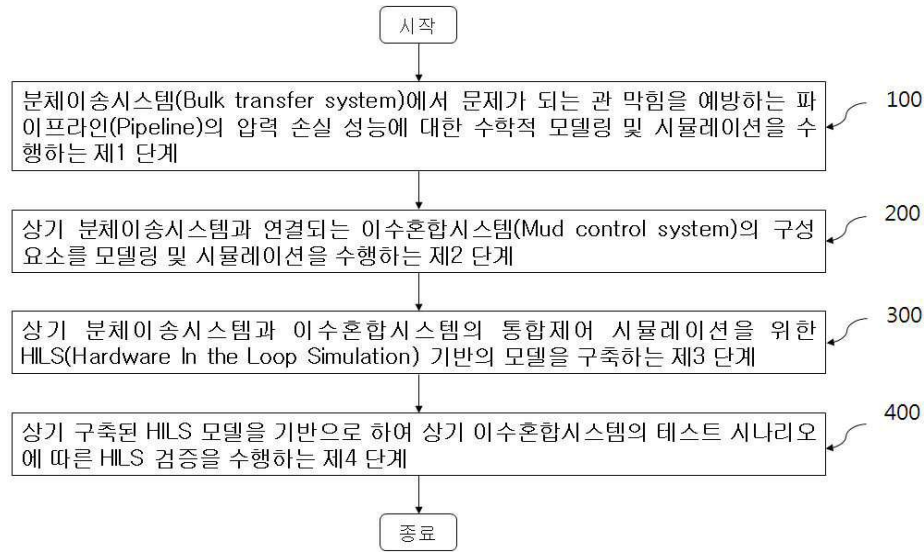
이와 같이, 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 HILS 기반의 분체이송 시스템과 이수혼합 시스템의 통합제어 시뮬레이션 방법은 분체이송시스템에서 문제되는 관 막힘을 예방하는 파이프라인의 압력 손실에 대한 수학적 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였고, 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 구성요소를 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였으며, 이에 따라 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 통합 HILS 모델을 구축하였다. 그리고 구축된 HILS 모델을 기반으로 테스트 시나리오에 따른 HILS 검증을 수행하는 방법을 구현함으로써, 해양 시추에 적용되는 분체이송시스템과 이수혼합시스템의 HILS 개발을 통해 해양플랜트의 다양한 설비에 대한 모델링 및 시뮬레이션 적용 방안을 모색할 수 있으며, 실제로 수행하기 어렵거나 위험한 극한 시험조건에 해당하는 테스트를 사전에 수행 가능할 뿐만 아니라, 저비용 반복 테스트를 통한 시운전에 따른 비용을 크게 줄이고 장비 운영에 따른 유지보수가 용이하며 제어기의 신뢰성을 확보할 수 있는 독특한 특징이 있다.

[0182]

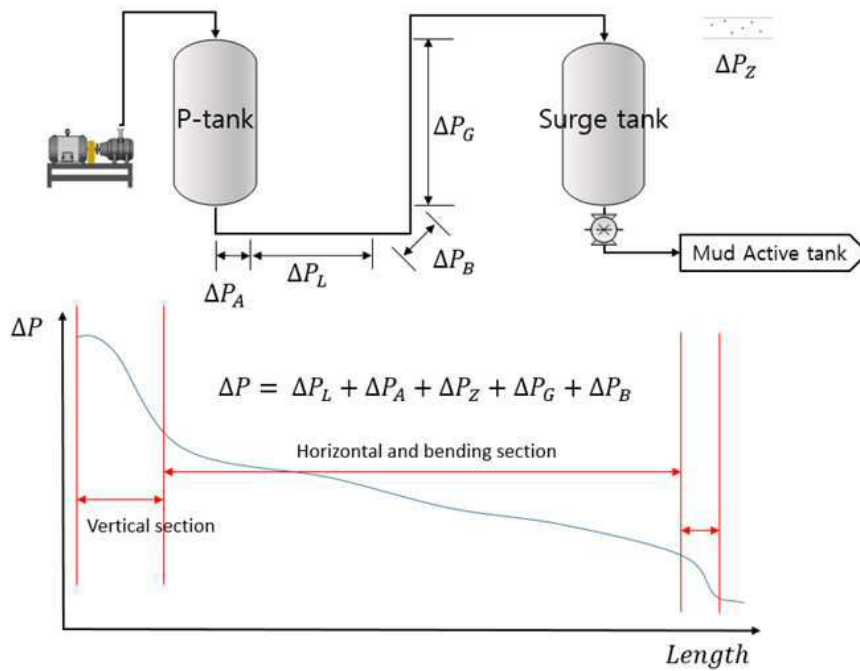
이상의 설명은 본 발명의 기술 사상을 예시적으로 설명한 것에 불과한 것으로서, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 다양한 수정 및 변형이 가능할 것이다. 따라서 본 발명에 개시된 실시 예들은 본 발명의 기술 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시 예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아니다. 본 발명의 보호 범위는 아래 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

도면

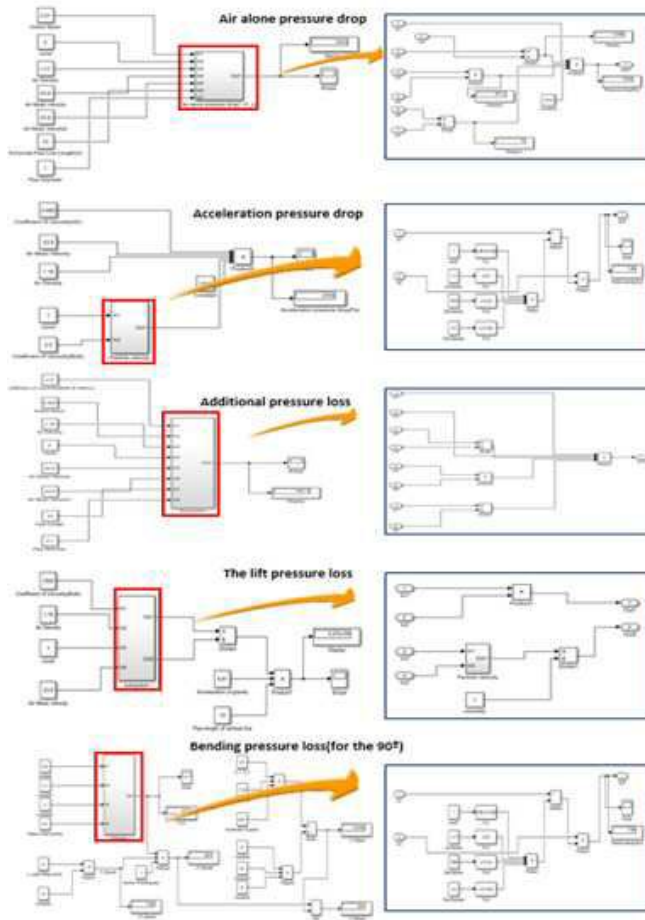
도면1



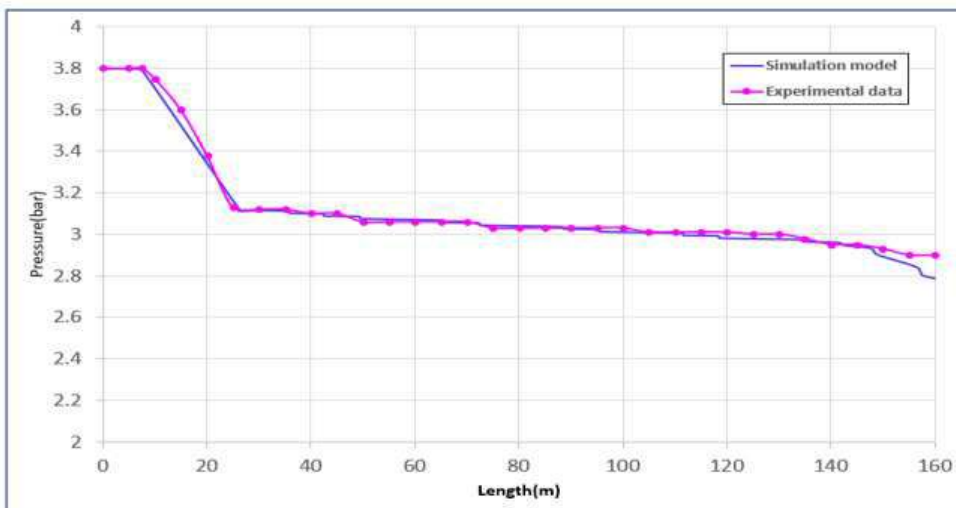
도면2



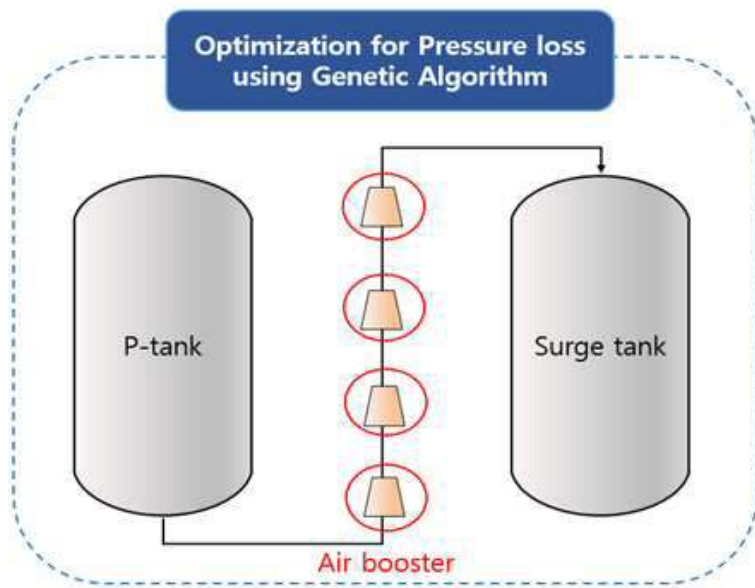
도면3



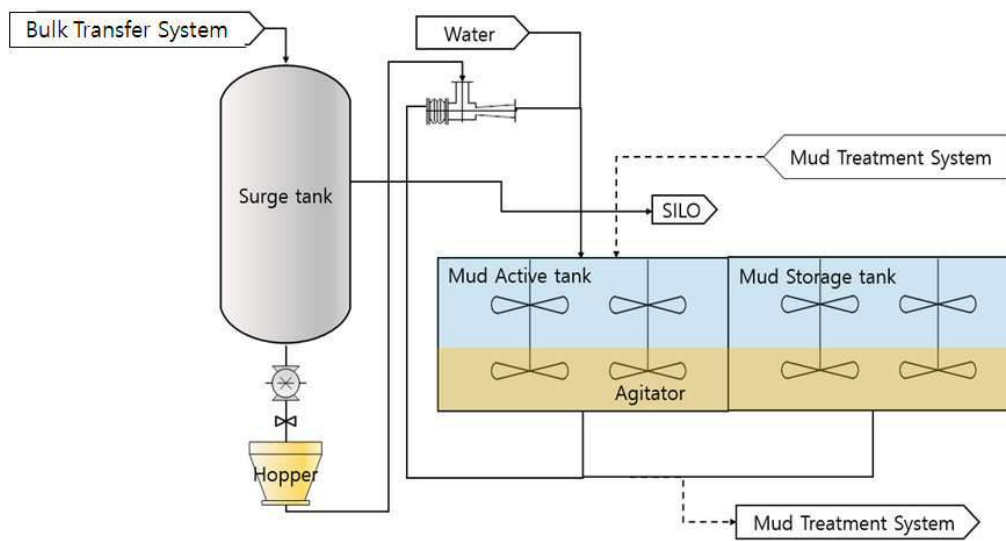
도면4



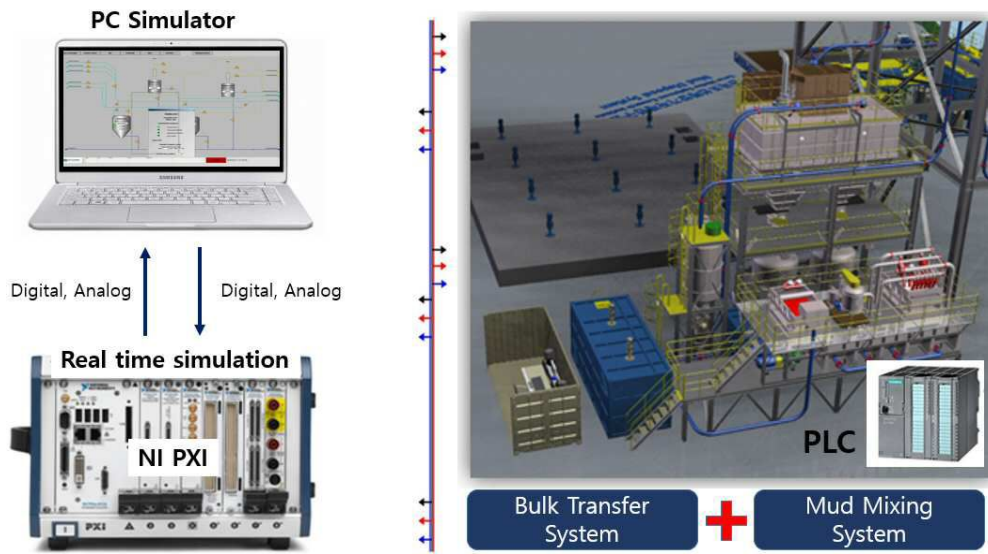
도면5



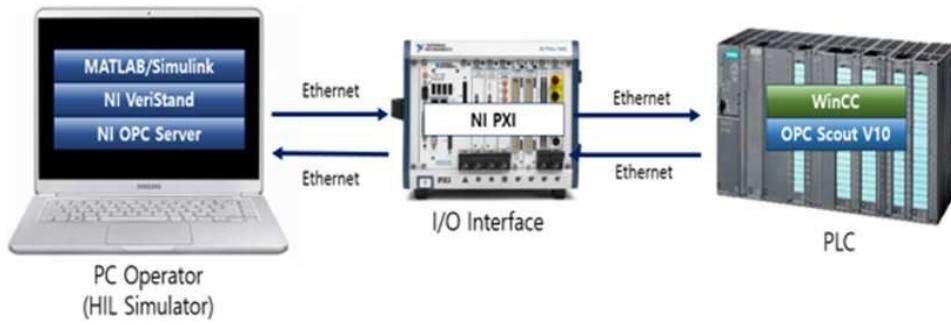
도면6



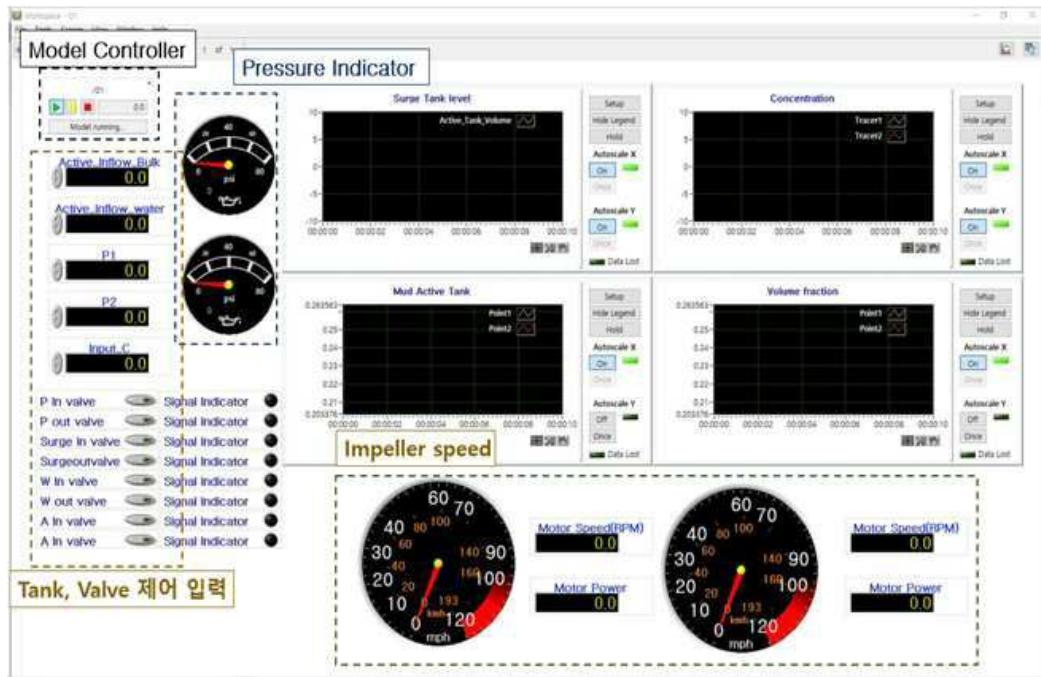
도면7



도면8



도면9



도면10

