

동적 공정모사를 이용한 액화수소 펌프 시험설비의 운전절차 및 안전거동 평가

고성진¹ · 최은정² · 김정현³ · 최근철^{1*}

¹한국조선해양기자재연구원, ²동화엔텍, ³부산대학교 수소선박기술센터

Dynamic Process Simulation-Based Evaluation of Operating Procedures and Safety Response for a Liquid Hydrogen Pump Test Facility

SEONGJIN KO¹, EUNJEONG CHOI², JEONG-HYEON KIM³, GEUNCHUL CHOI^{1*}

¹Korea Marine Equipment Research Institute, 57, Mieumsandan 5-ro 41beon-gil, Gangseo-gu, Busan 46744, Korea

²Donghwa Entec. 20, Hwajeonsandan 1-ro 63beon-gil, Gangseo-gu, Busan 46740, Korea

³Hydrogen Ship Technology Center, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

[†]Corresponding author :
gcchoi@komeri.re.kr

Received 7 June, 2026
Revised 11 June, 2026
Accepted 12 June, 2026

Abstract >> Liquid hydrogen (LH₂) pumps are essential components for high-pressure hydrogen supply systems, but their performance testing requires careful control of cryogenic and high-pressure operating conditions. In this study, standard operating procedures for an LH₂ pump test facility were established and evaluated using Aspen HYSYS dynamic process simulation. The proposed procedures include nitrogen purging, hydrogen substitution, stepwise cool-down, pump load-up, normal operation, and emergency shutdown. A steady-state model was first developed to define the reference operating condition of 100 kg/h LH₂ flow rate and 85 MPa pump discharge pressure. Dynamic simulations were then conducted for pump cool-down, normal operation, and emergency shutdown. The results showed that the stepwise cool-down procedure reduced rapid thermal and pressure transients, while the PID control loop stabilized the pump discharge pressure during normal operation. The emergency shutdown simulation confirmed that residual pressure could be safely relieved through the vent system.

Key words : Liquid hydrogen(액화수소), LH₂ pump(액화수소 펌프), Dynamic process simulation(동적공정모사), Operating procedure(운전절차), Emergency shutdown(비상정지)

1. 서 론

전 세계적으로 2050 탄소중립 실현을 위한 수소

경제 이행이 ‘선언’ 단계를 넘어 ‘실질적 이행’ 단계로 진입하였다. 2025년 기준 글로벌 액화수소 시장 규모는 약 17만톤(약 450억 달러) 규모로 추산되며,

2030년까지 연평균 10% 이상의 고성장이 전망된다. 특히 아시아-태평양 지역은 중국과 한국의 대규모 수소 액화 플랜트 가동에 힘입어 가장 빠른 성장세를 보이고 있다. 국내의 경우, ‘수소경제 활성화 로드맵 2.0’ 및 2025년 본격 개설된 ‘청정수소 발전 입찰 시장(Clean hydrogen energy portfolio standards)’을 통해 산업 생태계가 급격히 확장되고 있다. SK E&S의 인천 플랜트(연 3만 톤)와 효성중공업의 울산 플랜트 등 세계 최대 규모의 액화수소 생산 시설이 상업 운전을 시작함에 따라, 안정적인 대량 공급망은 확보되었다. 그러나 이러한 인프라를 지탱할 기자재인 액화수소 밸브, 펌프, 기화기 등 핵심 기자재의 국산화율은 여전히 낮은 수준이며, 특히 고부가가치 영역인 극저온·초고압 분야는 해외 선진 기업(Linde, Chart Industries 등)의 기술 의존도가 높은 실정이다.

액화수소 펌프(LH₂ Pump)는 -253°C의 액화수소를 수소충전소나 수소 모빌리티(상용차, 선박, Urban air mobility 등)에서 요구하는 90 MPa 이상의 초고압으로 승압하여 공급하는 핵심 설비이다. 최근 시장 조사에 따르면, 고압 액화수소 펌프 시장은 수소 상용차 및 충전소 보급 확대에 따라 2025년부터 2032년까지 연평균 11.2%의 높은 성장률을 기록할 것으로 예측된다¹⁾. 기존의 기체수소 압축 방식은 에너지 비용이 높고 부피 효율이 낮은 반면, 액화수소 펌프를 활용한 액체 가압 방식(Cryogenic Pump System)은 에너지 효율을 약 30% 이상 향상시킬 수 있어 차세대 수소 충전 인프라의 표준으로 자리 잡고 있다. 하지만 국내에서는 1 ton/day 이상의 상용급 펌프에 대한 신뢰성 검증 데이터가 부족하여, 국산화 개발 제품의 시장 진입에 어려움을 겪고 있다^{2,3)}.

액화수소 설비의 대형화 및 상업화가 본격화됨에 따라, 실증 시험 단계에서의 안전 확보와 표준화된 운전 절차(Standard operating procedure, SOP) 정립은 선택이 아닌 필수 사항이 되었다. 특히 2024년부터 강화된 ‘수소안전관리 로드맵 2.0’은 액화수소 제품에 대한 엄격한 안전 기준을 요구하고 있다. 액화수소 펌프의 성능 평가는 극저온 유체의 상변화(Boil-off) 제어, 캐비테이션(Cavitation) 방지, 그리고

고압 밀봉(Sealing) 기술이 복합적으로 작용하는 고난도 공정이다⁴⁾. 체계적이지 않은 운전 절차는 펌프의 치명적인 손상(Ice plug, Seal 파손 등)이나 수소 누출 사고로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 기술로 구축된 한국가스안전공사 액화수소 검사지원센터의 실증 설비의 PFD (Process flow diagram) 및 P&ID (Piping and instrumentation diagram)를 바탕으로 시스템을 분석하고, Dynamic Simulation을 적용하여 주요 장치의 거동을 예측하여 안전하고 표준화된 성능 검사 운전 절차를 정립하고 검증하고자 한다⁵⁾.

2. 시스템 개요

2.1 시험설비 구성

본 연구의 대상이 되는 액화수소 펌프 성능평가 설비는 액화수소 공급, 초고압 펌프 시험, 열교환 및 기화, 후단 안정화 공정이 연속적으로 연계된 시험 시스템으로 구성된다. 액화수소는 저장탱크로부터 시험 목적물인 초고압 액화수소 펌프로 공급되며, 펌프를 통해 고압으로 승압된 후 열교환기와 가스히터를 거쳐 기체 상태로 전환된다. 이후 수소는 버퍼탱크에서 압력 및 유량 변동이 완화된 뒤 후단 처리 공정으로 이송된다.

본 시험설비는 액화수소 저장 및 공급부, 펌프 시험부, 열교환 및 가온부, 후단 안정화부, 안전 및 계측 시스템으로 구성된다. 액화수소 공급부는 72 m³급 LH₂ storage tank를 중심으로 구성되며, 저장탱크로부터 공급된 액화수소는 시험 대상인 초고압 액화수소 펌프로 유입된다. 펌프 시험부에서는 극저온 액화수소를 고압 조건으로 승압하여 펌프의 토출 압력, 유량, 온도 변화 및 운전 안정성을 평가할 수 있도록 구성하였다.

펌프 후단에는 액화수소의 기화 및 승온을 위한 열교환 시스템이 배치되어 있다. 고압으로 토출된 액화수소는 LH₂ heat exchanger (V-101, 100 kg/h)를 통과하면서 실리콘 열매유 공급시스템과 열교환을

수행하며, 이후 Gas heater (H-101)를 통해 목표 온도 범위까지 추가 가온된다. 이 과정에서 극저온 액체 상태의 수소는 기체 상태로 전환되며, 최종적으로 Buffer tank (T-101)에 유입되어 후단 공정으로 안정적으로 이송된다.

안전성 확보를 위해 주요 배관 및 장치 구간에는 압력안전밸브와 열팽창 안전밸브가 설치되어 있으며, 비정상 운전 또는 긴급 상황 발생 시 유로를 차단하거나 우회할 수 있도록 by-pass line, 자동밸브 및 긴급차단장치를 적용하였다. 또한 펌프 입구와 출구에는 온도 및 압력 트랜스미터를 설치하여 시험 중 주요 운전 변수를 실시간으로 계측할 수 있도록 하였으며, 액화수소 공급 배관은 외부 열유입을 최소화하기 위해 진공단열 배관으로 구성하였다⁶⁾.

2.2 PFD (Process Flow Diagram) 및 주요 공정

본 시험평가 설비의 공정흐름도는 액화수소 펌프 성능시험을 위해 필요한 주요 장치의 연결 관계와 유체 흐름, 운전 조건 및 제어 설비의 배치를 나타낸다. Fig. 1에 제시한 바와 같이 본 설비는 액화수소 저장탱크에서 시험 대상 펌프로 유체를 공급한 후, 승압, 기화, 가온 및 후단 처리 공정을 거쳐 수소를 안정적으로 배출 또는 회수할 수 있도록 구성된다.

액화수소 저장탱크로부터 공급된 극저온 유체는 Test bed에 설치된 초고압 액화수소 펌프로 유입된다. 펌프에서는 시험 조건에 따라 액화수소를 고압으로 승압하며, 이 과정에서 펌프의 토출 압력, 유량 및 온도 변화가 주요 성능평가 인자로 계측된다. 따라서 펌프 전후단의 공정 조건은 시험설비의 운전 안정성

과 성능평가 신뢰도를 결정하는 핵심 변수로 작용한다.

펌프를 통과한 고압 액화수소는 LH₂ heat exchanger (V-101)로 이송되어 실리콘 열매유 공급시스템과 열교환을 수행한다. 이 과정에서 액화수소는 외부 열원을 통해 잠열을 흡수하며 기체 상태로 전환된다. 열교환 방식은 설비 구성에 따라 pipe-fin tube 형식 또는 전기 가열 방식을 적용할 수 있으며, 기화 과정에서의 압력 변동과 열전달 특성은 후단 공정의 안정성에 직접적인 영향을 미친다.

기화된 수소는 Gas heater (H-101)를 거치면서 추가적으로 가온되며, 이후 Buffer tank (T-101)로 유입되어 압력 및 유량 변동이 완화된다. Buffer tank는 펌프 토출부와 후단 처리 공정 사이에서 완충 역할을 수행하며, 비정상적인 압력 변동이 후단 설비로 직접 전달되는 것을 방지한다.

최종적으로 승온 및 안정화된 수소는 운전 조건에 따라 냉동기를 통해 재액화되거나 Vent mast를 통해 안전하게 방출된다. 이와 같은 공정 구성은 액화수소 펌프의 성능시험뿐만 아니라, 쿨다운, 정상 운전 및 비상정지와 같은 주요 운전 시나리오를 모사하고 평가하기 위한 기반이 된다.

3. 운전 절차 정립

액화수소 펌프 시험설비는 -253°C 수준의 극저온 유체와 초고압 수소를 동시에 취급하므로, 운전 초기부터 정지 단계까지 체계적인 절차 관리가 요구된다. 특히 배관, 밸브 및 펌프 내부에 잔존할 수 있는 수분, 산소 및 질소는 액화수소 공급 조건에서 응축 또는 고화될 수 있으며, 이는 아이스 플러그(ice plug), 밸브 작동 불량, 임펠러 손상 및 국부적인 압력 상승과 같은 운전 위험으로 이어질 수 있다. 또한 상온 상태의 설비에 액화수소가 급격히 유입될 경우 열충격과 급격한 기화에 따른 압력 변동이 발생할 수 있으므로, 시험 전 치환, 단계적 냉각 및 정상 운전 전환 절차가 적절히 수립되어야 한다.

본 연구에서는 액화수소 펌프 성능시험의 안전성과 재현성을 확보하기 위해 가동 전 점검, 질소 퍼지,

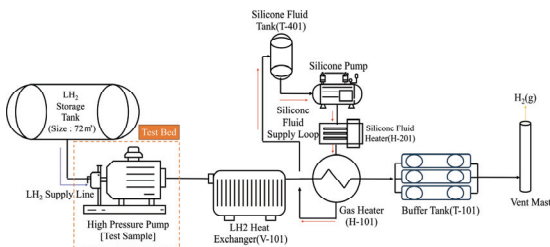


Fig. 1. Process Flow Diagram (PFD) about test system

수소 치환, 단계적 쿨다운, 펌프 부하 증가, 정상 운전 및 비상정지 절차로 구성된 운전절차를 설정하였다. 특히 동적 공정모사의 대상이 되는 주요 운전 시나리오는 초기 쿨다운 과정에서의 온도 및 압력 변동, 정상 운전 조건에서의 펌프 토출압력 제어, 그리고 비상정지 시 압력 해소 거동으로 구분하였다. 이를 통해 실제 시험설비 운전 중 발생할 수 있는 주요 과도상태를 사전에 검토하고, 운전 절차의 열역학적 안정성을 평가하고자 하였다.

3.1 가동 전 점검 및 질소 퍼지

액화수소를 공급하기 전에는 시험설비 내부의 불순물과 산화성 가스를 제거하기 위한 사전 점검 및 퍼지 절차가 수행된다⁷⁾. 본 설비에서는 고순도 질소를 이용하여 시스템을 일정 압력까지 가압한 후 대기압 수준으로 감압하는 가압 퍼지 방식을 적용하였다. 이 과정은 배관 및 장치 내부에 잔류하는 산소와 수분을 제거하고, 액화수소 공급 시 발생할 수 있는 고화, 착화 위험 및 유로 폐색 가능성을 저감하기 위한 것이다.

가압 퍼지와 동시에 주요 배관 연결부, 밸브, 계측 포트 및 장치 접속부에 대한 누출 여부를 확인한다. 퍼지 완료 기준은 배관 내 산소 농도가 1% 이하로 유지되는 조건으로 설정하였으며, 질소 퍼지 횟수와 불활성가스 사용량은 KOSHA CODE P-80-2022의 불활성가스 치환 기술지침을 바탕으로 산정하였다⁷⁾. 본 연구에서 적용한 가압 퍼지 조건에 따라 산소 농도 저감 거동을 계산한 결과, 시험설비의 초기 안전 조건을 만족하기 위해 최소 7회 이상의 반복 퍼지가 필요한 것으로 나타났다. 관련 계산식은 다음과 같다.

$$y_j = y_0 \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^j = y_0 \left(\frac{P_L}{P_H} \right)^j \quad (1)$$

$$\Delta n_{\text{inerting gas}} = j(P_H - P_L) \frac{V}{R_a T} \quad (2)$$

여기서 j 는 불활성가스 치환 반복 횟수, y_0 는 용기

내 초기 산소 농도, y_j 는 j 회 치환 후 용기 내 최종 산소 농도, P_L 은 진공 치환 시 도달하는 최저 절대 압력, P_H 는 불활성가스를 주입하여 도달하는 가압 후 절대압력을 나타낸다.

3.2 기체수소 치환 및 단계적 쿨다운

질소 가압 퍼지가 완료된 이후에도 시스템 내부에는 미량의 질소가 잔류할 수 있으므로, 액화수소를 즉시 공급할 경우 잔류 질소의 응축 또는 고화가 발생할 수 있다. 또한 상온 상태의 배관 및 펌프에 -253°C의 액화수소가 직접 유입되면 급격한 열수축과 열응력 증가로 인해 설비 손상 및 국부적인 압력 변동이 유발될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 액화수소 공급 전 수소 치환과 단계적 쿨다운을 연계한 운전 시나리오를 적용하였다.

먼저 질소로 치환된 시스템에는 약 0.6 MPa의 상온 기체수소를 공급하여 배관 및 장치 내부의 잔류 질소를 수소로 치환한다. 이 과정은 액화수소 공급 전 시스템 내부를 수소 분위기로 전환하기 위한 단계로, 수소 농도가 99% 이상으로 유지되고 산소 및 수분 농도가 10 ppm 이하가 될 때까지 반복 수행한다. 본 절차에서는 안정적인 치환 조건 확보를 위해 7회 이상의 반복 치환을 기준으로 설정하였다.

기체수소 치환이 완료된 후에는 액화수소 직접 공급에 앞서 저온 기체수소를 이용한 예냉 과정을 수행한다. 저온 기체수소를 펌프와 배관 계통에 단계적으로 공급하여 장치 내부 온도를 -150°C 이하까지 낮추며, 이때 밸브 개도 조절을 통해 냉각률이 약 3°C/min 이하가 되도록 제한한다. 이는 금속 재질의 급격한 열수축과 열응력 집중을 완화하고, 이후 액화수소 유입 시 발생할 수 있는 열충격을 최소화하기 위한 것이다.

시스템 내부 온도가 -150°C 이하에 도달하면 액화수소를 공급하여 2차 쿨다운을 수행한다. 액화수소 유입 초기에는 배관 및 펌프 내부의 잔류 열부하에 의해 순간적인 기화와 압력 스파이크가 발생할 수 있으므로, 압력 및 온도 트랜스미터를 통해 주요 운

전 변수를 지속적으로 감시한다. 이후 시스템 온도가 -230°C 이하로 안정화되면 액화수소를 일정 시간 순환시켜 펌프 내부의 열적 평형을 유도한다. 이 과정은 펌프 흡입부의 충분한 과냉도와 유효흡입수두를 확보하여 캐비테이션 발생 가능성을 낮추고, 정상 운전 단계로 전환하기 위한 안정 조건을 형성하는 데 목적이 있다⁸⁻¹⁰⁾.

3.3 정상 운전(Normal Operation)

단계적 쿨다운이 완료되고 펌프 내부에 안정적인 액상 유동이 확보되면 액화수소 펌프의 성능시험을 개시한다. 정상 운전 단계에서는 펌프의 급격한 부하 변화를 방지하고, 토출 압력과 유량의 안정적인 추종 특성을 확인하기 위해 회전수를 단계적으로 증가시키는 Load-up 절차를 적용하였다.

펌프 기동 초기에는 수동 제어 모드에서 운전을 시작하며, 회전수는 500 RPM 단위로 순차적으로 상승시킨다. 각 회전수 조건에서는 일정 시간의 유지 구간을 설정하여 토출 압력, 유량, 온도 및 밸브 개도율의 변화를 확인한다. 본 절차에서는 각 부하 조건에서 약 5분간의 Holding time을 적용하고, 주요 공정 변수가 안정적으로 유지되는 것을 확인한 후 다음 부하 단계로 전환하도록 설정하였다. 이러한 단계적 부하 증가는 펌프 및 후단 설비에 가해지는 급격한 압력 변동을 완화하고, 제어계의 응답 특성을 안정적으로 평가하기 위한 것이다.

펌프 회전수가 목표 운전 조건에 근접하면 수동 제어에서 자동 제어 모드로 전환한다. 자동 제어 전환 초기에는 제어 밸브의 조작량 변화와 펌프 토출 압력의 응답 지연으로 인해 일시적인 오버슈트가 발생할 수 있다. 따라서 전환 구간에서는 설정값(Set point, SP), 현재값(Process value, PV), 조작값(Output, OP)의 변화를 함께 관찰하여 제어 루프가 목표 압력 조건으로 안정적으로 수렴하는지를 확인한다.

토출 압력이 목표 압력인 85 MPa에 도달하고, 유량 및 밸브 개도율의 변동이 허용 범위 내에서 안정화되면 정상 운전 상태로 판단한다. 이후 해당 조건

에서 펌프의 성능평가 데이터를 취득하며, 이때 확보된 압력, 유량 및 온도 데이터는 펌프의 운전 안정성 및 성능 특성을 평가하기 위한 기준 자료로 활용된다.

3.4 비상 정지(Emergency Shut-down, ESD)

액화수소 펌프 시험설비는 극저온 및 초고압 수소를 동시에 취급하므로, 미세 누출, 과압, 과열 또는 보조 계통 이상이 발생할 경우 중대 사고로 이어질 가능성이 있다. 따라서 정상 운전 중 비정상 상태가 감지될 경우, 운전자의 수동 조작에 의존하지 않고 독립적인 인터록 기반의 비상정지 절차가 즉시 작동하도록 설정하였다.

본 연구에서 고려한 비상정지 조건은 배관 압력이 설계압력을 초과하는 경우, 가스히터 후단 온도가 설계온도를 초과하는 경우, 또는 실리콘 열매유 탱크의 액위가 설계 운전범위 이하로 저하되는 경우로 설정하였다. 이러한 조건이 감지되면 ESD 신호가 발생하며, 펌프 구동부와 실리콘 열매유 히터의 전원이 차단되고 액화수소 공급밸브가 자동으로 폐쇄된다.

동시에 시스템 내부에 잔류하는 고압 수소를 안전하게 해소하기 위해 펌프 입구 및 주요 배관 구간의 벤트 밸브가 개방된다. 이를 통해 고립된 배관 내부의 압력을 Vent header 방향으로 유도하고, 시스템 압력이 대기압 수준으로 안정적으로 감압되도록 한다. 이 과정에서 밸브의 급폐쇄 및 펌프 정지에 따른 일시적인 압력 변동이 발생할 수 있으므로, 비상정지 시나리오에서는 감압 속도와 최대 압력 상승 여부를 함께 검토할 필요가 있다.

비상 상황이 종료되고 유지보수 또는 재가동 준비 단계로 전환할 경우, 시스템 내부의 잔류 수소를 제거하기 위한 사후 치환 절차를 수행한다. 이때 상온 질소를 이용하여 전체 배관을 0.2~0.3 MPa 수준으로 가압한 후 배출하는 과정을 반복하며, 본 절차에서는 최소 5회 이상의 질소 치환을 수행하도록 설정하였다. 이를 통해 시스템 내부를 안전한 질소 분위기로 전환하고, 후속 점검 및 유지보수 작업의 안전

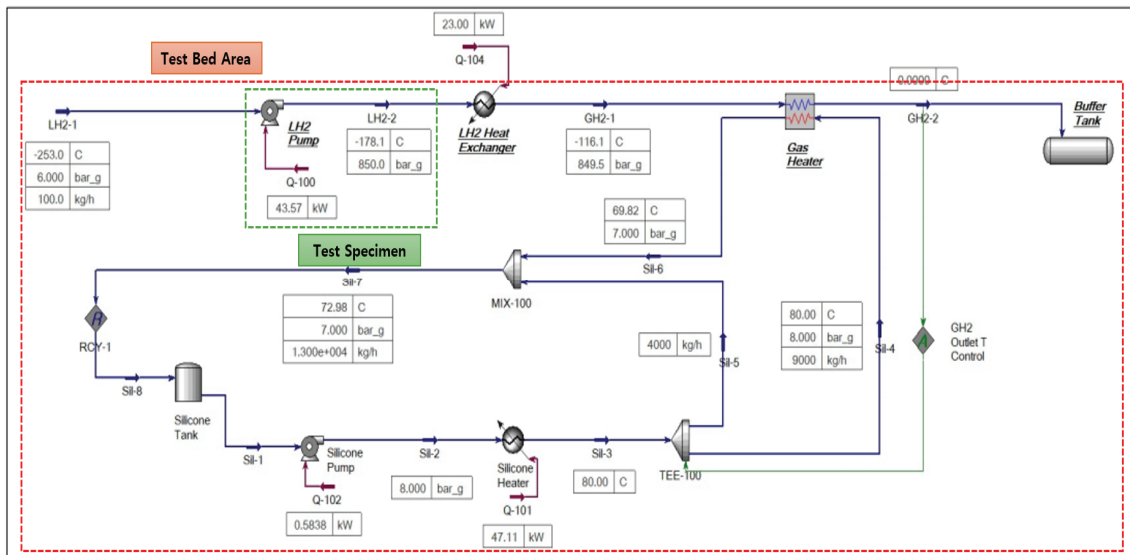


Fig. 2. System modeling for steady-state simulation

성을 확보한다.

4. 다이나믹 시뮬레이션

동적 공정모사는 시스템의 정상상태 설계 조건을 기반으로 시간 변화에 따른 압력, 온도, 유량 등 공정 변수의 일시적인 과도 복합 거동을 정량적으로 추적하고 평가하는 수치해석 기법이다. 특히 -253°C 이하의 극저온 유체와 85 MPa급 초고압 조건을 동시에 제어해야 하는 액화수소 펌프 평가 설비의 경우, 가동 초기 예냉(Cool-down) 단계에서의 급격한 열충격, 정상 운전 중 제어 루프의 오버슈트(Overshoot), 그리고 비상정지(ESD) 상황 시 고립 구간 내 잔류 압력 소산 특성 등 시간 가변적(Time-dependent) 안전성 검증이 설계 단계에서 필수적으로 요구된다.

본 장에서는 앞서 수립된 액화수소 펌프 시험설비의 운전절차를 바탕으로 임의의 시험 목적물을 연계한 계통 환경을 구축하고, Aspen HYSYS dynamic simulation을 적용하여 시스템 가동부터 비상 제어까지의 주요 핵심 시나리오에 대한 거동 평가 및 열역학적 신뢰성을 검증하고자 한다.

4.1 정적모사(Steady-state Simulation) 및 기초 열역학 모델링

동적 공정모사에 필요한 초기 조건과 기준 운전 데이터를 확보하기 위해 설계 조건을 기반으로 Fig. 2와 같이 정적모사를 선행하였다. 정적모사에서는 전체 공정에 대한 열 및 물질 수지를 확립하고, 액화수소가 펌프, 열교환기, 가스히터 및 버퍼탱크를 거치며 변화하는 압력, 온도 및 상변화 특성을 분석하였다.

펌프 입구 조건은 온도 -253°C , 압력 0.6 MPa, 유량 100 kg/h의 액화수소 포화상태로 설정하였다. 펌프를 통과한 액화수소는 목표 토출압력인 85 MPa까지 승압되며, 이 과정에서 발생하는 기계적 압축 일량에 의해 엔탈피가 증가한다. 정적모사 결과, 펌프 토출부의 온도는 -178.1°C 까지 상승하는 것으로 나타났다. 이는 초고압 승압 과정에서 극저온 유체의 열역학적 상태 변화가 크게 발생함을 보여준다.

이후 고압 상태의 극저온 수소는 액화수소 기화기(V-101)와 가스히터(H-101)를 통과하면서 외부 열원으로부터 현열 및 잠열을 흡수한다. 이를 통해 액체 상태의 수소는 기체 상태로 전환되며, 최종적으로 버

퍼탱크(T-101)에 안정적으로 유입될 수 있는 조건을 형성한다. 이러한 정적모사 결과는 후속 동적모사에서 초기 조건, 제어 기준 및 주요 운전 변수의 기준값으로 활용하였다.

4.2 Pump Cool down 동적 모사

설비 가동 초기에는 상온 상태의 배관 및 펌프 내부로 극저온 수소가 유입되면서 급격한 비정상 열전달과 압력 변동이 발생할 수 있다. 특히 -253°C 의 액화수소가 충분한 예냉 없이 직접 공급될 경우, 배관 및 펌프 구성품의 급격한 열수축, 국부적인 기화, 압력 스파이크 및 열충격이 유발될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 앞서 제시한 수소 치환 및 단계적 쿨다운 절차를 반영하여 펌프 쿨다운 과정의 동적모사를 수행하였다.

모사 조건에서는 상온 기체수소 치환, 저온 기체수소를 이용한 예냉, 액화수소 직접 공급 및 안정화 단계가 순차적으로 적용되도록 구성하였다. 이를 통해 배관 및 펌프 내부의 온도 저하 거동, 질량유량 변화, 압력 응답 및 상변화 특성을 시간에 따라 추적하였다.

Fig. 3은 펌프 쿨다운 과정에서 나타나는 주요 동적 응답을 보여준다. 저온 유체가 초기 유입되는 구간에서는 배관 및 펌프 내부의 잔류 열부하로 인해

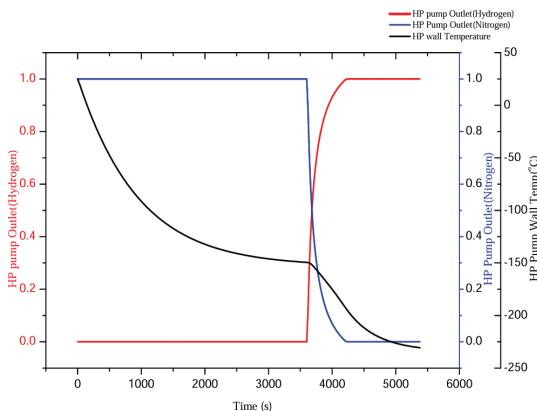


Fig. 3. Dynamic simulation results for pump cool-down

부분적인 기화가 발생하며, 이로 인해 국부적인 압력 스파이크와 질량유량 변동이 나타났다. 그러나 극저온 유체가 지속적으로 공급되면서 시스템 내부 온도는 점진적으로 감소하였고, 기체와 액체가 혼재된 과도상태를 거쳐 최종적으로 액화수소 단상 유동에 가까운 안정 상태로 전환되는 경향을 확인하였다.

이러한 결과는 액화수소 펌프 시험 전 단계적 쿨다운 절차가 열충격을 완화하고, 펌프 흡입부에서의 불안정한 상변화 및 캐비테이션 발생 가능성을 줄이는 데 유효함을 보여준다. 또한 쿨다운 과정에서 밸브 개도 조절과 냉각 속도 제어가 실제 시험설비 운전 안정성 확보에 중요한 인자임을 확인하였다.

4.3 정상 운전 조건 동적 모사

성능시험 설비가 목표 운전 조건에 도달한 이후, 압력, 온도 및 유량과 같은 주요 공정 변수가 안정적으로 제어되는지를 평가하기 위해 PID (Proportional-Integral-Derivative) 제어를 적용한 정상 운전 동적모사를 수행하였다. 본 모사에서는 앞서 정립한 운전 절차를 반영하여 펌프 회전수를 단계적으로 증가시키는 load-up 과정과, 목표 운전 조건에 근접한 시점에서 수동 제어에서 자동 제어로 전환되는 시나리오를 구현하였다.

펌프 가동 과정에서는 soft starter를 적용하여 회전수를 500 RPM 단위로 증가시켰으며, 최종적으로 3,600 RPM까지 상승하도록 설정하였다. 이 과정에서 펌프 토출압력과 유량의 변화를 시간에 따라 추적하고, 자동 제어 전환 시 제어계의 응답 특성을 함께 분석하였다.

Fig. 4는 제어 및 작동조건을 나타내는 그래프이다. X축은 시간, Y축은 HP Pump의 Rotate Speed와 밸브가 어느정도 열렸는지를 나타내는 Input 조건을 나타내었으며, 펌프 회전수(RPM)가 계단식으로 올라감에 따라 밸브 개도율이 어떻게 제어되는지 그 상관관계를 볼 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4의 Input에 따라 펌프 작동이 유체의 상태 변화를 나타내는 Output을 나타낸다. 이 때 Y축은 토출압력과 토출온도, 수소의 Mass

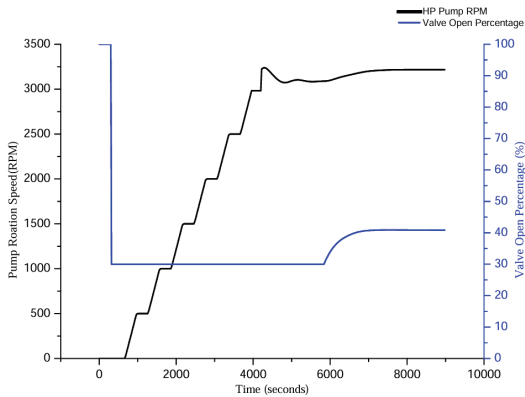


Fig. 4. Dynamic simulation results for normal operation (Input)

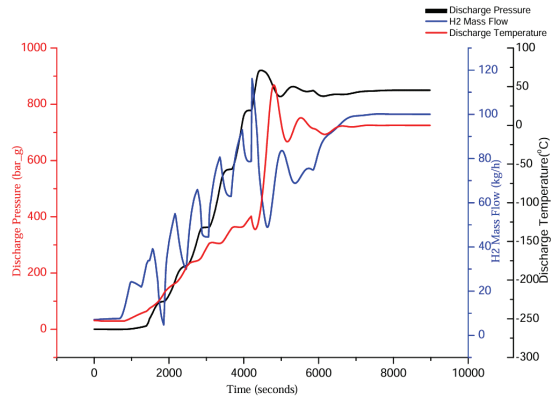


Fig. 5. Dynamic simulation results for normal operation (Output)

Flow를 나타낸다. Fig. 4에 Input 조건에 따라 압력이 상승하면서 유량이 확보되고, 동시에 토출온도가 변화하는 일련의 극저온 유체 거동을 하나의 흐름으로 묶어보았다. Fig. 4와 Fig. 5를 조합해서 보면 수동 제어에서 자동 제어로 전환되는 시점에서 토출압력과 유량에 일시적인 오버슈트가 발생하는 경향이 확인되었다. 이는 펌프 회전수 증가와 제어밸브 조작량 변화 사이의 응답 지연에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 PID 제어 루프가 설정값과 현재값 사이의 편차를 보상하면서 제어밸브의 조작량이 조정되었고, 이에 따라 압력 및 유량의 변동은 점차 감쇠되었다.

최종적으로 펌프 토출압력은 목표 압력인 85 MPa에 수렴하였으며, 주요 공정 변수는 정상 운전 범위 내에서 안정화되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 단계적 부하 증가와 자동 제어 전환 절차가 액화수소 펌프 성능시험 중 발생할 수 있는 과도응답을 완화하고, 목표 운전 조건에서의 제어 안정성을 확보하는 데 유효함을 보여준다.

4.4 비상정지 동적 모사

성능시험 중 배관 과압, 극저온 유체 누출, 후단 온도 상승 등과 같은 비정상 상황이 발생할 경우, 설비는 즉시 안전 상태로 전환되어야 한다. 이를 검토하기 위해 본 연구에서는 인터록 신호에 의해 비상정지 절차가 작동하는 상황을 가정하고, ESD 조건에

서의 동적 거동을 모사하였다.

비상정지 시나리오에서는 이상 조건이 감지되는 즉시 고압 액화수소 펌프의 인버터 출력이 차단되어 펌프 회전수가 감소하도록 설정하였다. 동시에 액화수소 공급계통의 긴급차단밸브가 폐쇄되고, 시스템 내부의 잔류 압력을 해소하기 위해 압력 조절용 벤트 밸브가 개방되도록 구성하였다. 이를 통해 펌프 정지, 공급 차단 및 압력 소산이 연동되는 비상 보호 시퀀스를 구현하였다.

Fig. 6의 경우 비상 상황 발생 시 펌프 자체의 기계적, 역학적 거동과 이에 따른 일차적인 토출 압력 변화를 보여주는 그래프로 시간에 따라 HP Pump의 Rotate Speed와 토출 압력을 나타내었다.

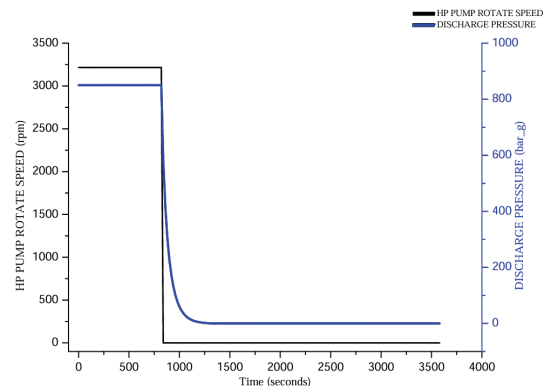


Fig. 6. Dynamic simulation results for emergency shutdown (Pump dynamic responses)

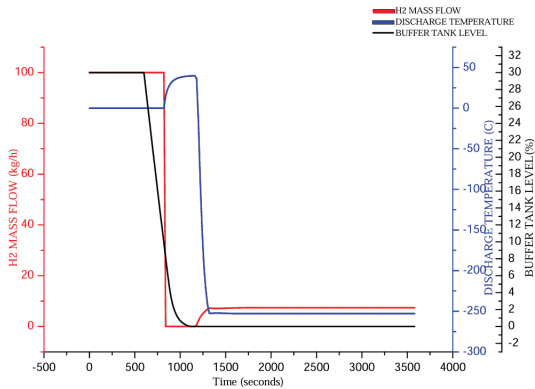


Fig. 7. Dynamic simulation results for emergency shut down (Buffer tank & fluid status)

Fig. 7의 경우 펌프 급정지 이후, 후단 공정인 버퍼탱크(T-101)의 액위 변화와 토출 온도 거동을 보여주는 그래프이다.

Fig. 6과 Fig. 7을 통해 비상정지 조건에서의 동적 모사 결과를 확인해보면, 펌프의 급정지와 밸브의 급폐쇄 과정에서 순간적인 압력 변동이 발생하였으며, 이는 유동 관성 및 차단밸브 작동에 따른 과도응답으로 해석할 수 있다. 그러나 압력 해소용 벤트 밸브가 개방된 이후 시스템 내 잔류 압력은 Vent header 방향으로 점진적으로 소산되었고, 배관 설계 한계를 초과하지 않는 범위에서 감압되는 경향을 보였다.

이러한 결과는 비상정지 절차가 펌프 정지와 액화수소 공급 차단뿐만 아니라, 고압 구간 내 잔류 수소의 압력 해소까지 연계하여 작동해야 함을 보여준다. 또한 ESD 조건에서의 최대 압력 상승, 감압 속도 및 밸브 응답 특성은 실제 시험설비의 안전성 평가와 인터록 설정값 결정에 중요한 설계 인자로 활용될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 최대 85 MPa급의 액화수소 펌프 시험평가 설비를 대상으로 PFD를 분석하고 ASPEN HYSYS로 동적 공정모사(Dynamic Simulation) 기법을 활용하여 설비의 체계적인 운전 시나리오를 정립하였다.

1) 질소 퍼징, 기체수소 및 액화수소를 활용한 단계적인 쿨다운, 펌프 부하 증가(Load-up), 정상 운전, 비상 정지로 이어지는 운전절차를 구체화하였다.

2) ASPEN HYSYS를 활용한 동적모사를 통해, 실제 수동 제어에서 자동 제어로 전환 시 발생하는 오버슈트 현상을 예측하고 제어 안정화에 도달하는 과정을 검증하였다.

본 연구에서 도출된 동적 모사 결과와 운전 절차는 향후 상용급 고압 액화수소 펌프의 국산화 개발 시 실증 평가의 기준 자료로 활용될 수 있으며, 극저온 고압설비의 운전 안전성을 제고하는데 크게 기여할 수 있을 것이다.

후 기

- 1) 본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20227310100090).
- 2) 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00437088).

References

1. DNV, "Energy transition outlook 2026: hydrogen to 2060", DNV, Norway, 2026, Retrieved from https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/2025/?utm_source=google&utm_medium=search&utm_campaign=eto_2025_download/&gad_source=1&gad_campaignid=23088436319&gbraid=0AAAAo9W8r2vfr3Hf6SgnK0AtGvVePH4g&gclid=CjwKCAjwI97RBhBWEiwAa9rbXSTlUrX6lMzZZiejTsLWSGtt1iKM7G9ZvPBsKHV957PgYHHdmlGnjhoCllkQAvD_BwE.
2. M. Conte, A. Iacobazzi, M. Ronchetti, and R. Vellone, "Hydrogen economy for a sustainable development: state of the art and technological perspectives", Journal of Power Sources, Vol. 100, No. 1, 2001, pp. 171-187, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00893-X.
3. S. H. Kang, S. J. Choi, and J. W. Kim, "Analysis of the world energy status and hydrogen energy technology R&D of foreign countries", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 18, No. 2, 2007, pp. 216-223.

4. J. Shin, Y. Cheon, H. Lim, S. Park, and J. Lee, "Thermodynamic analysis of LH₂ boil-off gas re-condensation process", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 2, 2025, pp. 109-118, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.2.109>.
5. H. S. Jeong and P. W. Heo, "Pumping Cycle Simulator of a Ultra-Low Temperature Liquid Hydrogen Pump", *Proceedings of the 2023 KSFC Autumn Conference*, 2023, pp. 82, Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11994578>.
6. Y. M. Seo, H. W. Noh, T. H. Koo, W. J. Seo, D. W. Ha, and R. K. Ko, "A study on measuring the actual level of liquid hydrogen using cryogenic temperature sensor", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 615-624, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.615>.
7. Korea Occupational Safety and Health Agency, "Technical Guidelines for Purging with Inert Gas (KOSHA CODE P-80-2022)", Korea Occupational Safety and Health Agency, Korea, 2022, Retrieved from <https://portal.kosha.or.kr/archive/resources/tech-support/search/chemistry/history?techGdlnNo=P-80-2022>.
8. G. Shi, Y. Wei, and S. Liu, "Cavitation flow characteristics of water and liquid oxygen in the inducer considering thermodynamic effect", *Energies*, Vol. 15, No. 14, 2022, pp. 4943, doi: <https://doi.org/10.3390/en15144943>.
9. Y. Fu, B. Gao, D. Ni, W. Zhang, and Y. Fu, "Study on the influence of thermodynamic effects on the characteristics of liquid nitrogen cavitating flow around hydrofoils", *Symmetry*, Vol. 15, No. 10, 2023, pp. 1946, doi: <https://doi.org/10.3390/sym15101946>.
10. X. Long, Q. Liu, B. Ji, and Y. Lu, "Numerical investigation of two typical cavitation shedding dynamics flow in liquid hydrogen with thermodynamic effects", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, 2017, pp. 879-893 doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.063>.