

미국 NASA 및 DOE의 액체수소에 대한 연구

백종훈*, 장호명**

Hydrogen R&D Division, Florida Solar Energy Center, FL USA*
홍익대학교 기계/시스템디자인공학과**

1. 서론

화석연료의 사용으로 인한 지구온난화 문제와 배기가스로 인한 환경오염 문제가 전 세계적으로 심각하게 대두되고 있으며, 국가간 에너지 수급의 불균형으로 인한 정치적, 경제적 마찰과 분쟁이 지속되고 있다. 이러한 에너지 문제를 근본적으로 해결하기 위한 미래의 에너지로써 수소에너지에 대한 관심이 지대해지고 있다. 수소는 자연계에 여러 형태로 풍부하게 존재하고 있어 사실상 무한한 양이 저장되어 있으며, 완전 연소시 이산화탄소나 유독 물질을 배출하지 않는 청정에너지이다. 현재 세계 각국에서 진행되고 있는 수소에 대한 연구는 크게 생산(production), 저장(storage), 운송(transfer) 및 기타 응용분야로 분류할 수 있으며, 저온공학은 이 생산, 저장, 운송 및 응용분야에 모두 관련되어 있다. 특히 저온공학을 이용한 액체수소(liquid hydrogen) 형태의 저장기술은 수소 저장합금 다음으로 높은 체적당 에너지 저장밀도를 가지고 있으며, 저장 용기를 포함한 무게당 에너지 저장 밀도는 수소저장합금을 앞서고 있어, 단-중거리 운송과 단-중시간 저장에 적절한 방법으로 평가되고 있다.

미국에서는 1950년대부터 군사적인 목적으로 액체수소에 대한 연구와 설비가동이 시작되었으며 1960년대에 들어와 Apollo 우주 프로그램이 본격화되면서 대량의 액체수소 생산과 저장, 운송설비가 요구됨에 따라 액체수소에 대한 전반적인 연구가 활발히 이루어졌다. 미국 국립항공우주국인 NASA 내의 Marchall Space Flight Center (MSFC), Glenn Research Center (GRC), Kennedy Space Center (KSC) 등이 액체수소에 대한 직접적인 연구들을 수행하여 왔으며, 현재는 차세대 우주왕복선 개발, 인류의 달표면 재착륙 및 화성 착륙을 위하여 지속적인 연구를 진행하고 있다. 2003년에는 George Bush 대통령이

연두 국회연설(union address)에서 수소에너지 기술을 이용한 에너지 독립 및 관련 인프라의 적극적인 개발 의지를 표명하였다. 이를 추진하기 위해, 미국 에너지국(Department of Energy, DOE)은 세부 개발목표를 수립하고, Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program, FreedomCAR & Vehicle Technologies Program 등의 대형 연구 프로그램을 신설하고, 정부-산업계-학계-연구소들을 연결하는 총괄적인 상호협동 연구체계를 효율적으로 운영하고 있다.

이 글에서는 앞에 언급한 NASA 연구소들이 갖추고 있는 액체수소 관련 설비와 현재 진행중인 연구 주제, 그리고 DOE에서 추진중인 수소관련 프로그램들중 액체수소와 관련된 연구 내용들을 간략히 소개하고자 한다.

2. NASA MSFC (Marshall Space Flight Center)

미국 Alabama주의 Huntsville 에 위치한 NASA MSFC는 1960년대부터 인류의 달착륙용 추진로켓을 개발하는데 중추적 역할을 수행했던 연구소이다. 미래의 우주탐험 및 상용화 프로그램과 차세대 우주왕복선의 비행위험을 감소 및 최신 우주탐험 기술을 시범, 전시하는 STARSHIP 2040 프로젝트의 주역이다. 현재 액체수소를 직접 이용하는 연구시설로는 로켓추진 실험시설(Rocket Propulsion Test Facility)와 열진공 실험시설(Thermal Vacuum Test Facility)을 들 수 있다.

로켓추진 실험시설 내에는 액체수소 저장장치를 독립적으로 갖추고 있는 여러 개의 연구설비로 구성되어 있는데, 주요 설비에 대한 현황은 다음과 같다. 연소 연구설비(Combustion Research Facility)는 소형 로켓엔진과 극저온 연료의 저장탱크 등을 실험하는 다용도 설비로써 2,200 gallons @ 1,500 psig의 액체수소를 저장 및 운용할 수 있는

규모이다. 연소 연구설비는 고압 로켓 엔진 시스템이나 터보 펌프, 밸브 및 극저온 추진 연료용 부품들의 성능을 실험하고 있으며 2,200 gallons @ 6,000 psig 의 고압 액체수소 저장 설비를 갖추고 있다. 하이브리드 엔진 부품 실험설비(Hybrid & Engine Component Test Facility)는 액체산소, 액체수소, 고체 및 하이브리드 추진용 구성부품 및 부시스템들의 유해성 여부와 그 정도를 실험하는 설비로써 5,000 gallons @ 2,000 psig 의 기체수소 또는 100,000 gallons @ 75 psig 의 액체수소 저장 능력을 갖추고 있다. 수소 냉유동설비(Hydrogen Cold Flow Facility)에서는 저압, 저유량의 수소엔진 및 부시스템 부품들의 성능을 실험하고 있으며 225,000 gallons의 제1 저장 탱크로부터 8인치 직경의 이송관을 통하여 1,800~5,000 gallons/min 의 유량으로 제 2 저장탱크로 액체수소를 이송하며 실험할 수 있는 설비를 갖추고 있다. 선진엔진 실험설비(Advanced Engine Test Facility)는 대형 로켓 엔진을 세로로 설치하여 실제와 동일한 추진 상황에서 새로운 추진기술의 검증과 시제품(prototype) 실험을 수행하고 있다. 우주왕복선의 외부탱크(external tank, ET) 의 실제 추진실험도 이곳에서 수행되었다. 액체수소 저장 설비는 75,000 gallons @ 50 psig, 450,000 gallons @ 100 psig로 실제 우주왕복선의 ET를 가득 채울 수 있다.

열진공 실험시설에서는 우주발사체가 실제 임무수행시 경험하게 되는 고진공, 극저온 및 고열 등의 극한적인 열적/물리적 환경하에서 열교환기, 연소기, 밸브 등 로켓 엔진의 각종 시스템들이 그 성능을 평가받고 있다. 이곳에서는 별도의 고정용 액체수소 저장용기 대신 12,000 gallons의 액체수소 트레일러를 이용하여 액체수소를 제공하고 있다. 또한 MSFC는 차세대 우주왕복선의 새로운 연료로서 검토되고 있는 고밀도 극저온 추진제(densified cryogenic propellants)의 사용 가능성을 타진하기 위한 기초 연구를 1994년에 수행하였으며 최근까지 NASA Glenn Research Center, Lockheed Martin Space Systems Company 와 함께 발사체용 연료 고밀도화 연구를 수행하고 있다. 또한 스프레이 폼(spray form)과 다층 단열재(MLI, multi layer insulation)을 사용한 복합 단열기술을 개발하여 액체수소 저장탱크로의 열유입을 약 50%까지 감소시킬

수 있는 단일시스템을 연구 중에 있다. 이 밖에 장기간 우주궤도를 도는 액체수소 저장탱크 내의 압력조절을 위한 수직설치형 스프레이바(spray bar) 분사시스템 연구도 수행하고 있다.

3. NASA GRC (Glenn Research Center)

미국 Ohio주의 Cleveland에 위치한 GRC (전 Lewis Research Center)에서는 지난 50여 년간 주로 로켓추진 및 추진 연료기술에 관련된 연구로 미국의 우주 프로그램 발전에 많은 기여를 하였다. Apollo program, International space station, Mars Pathfinder, Space shuttle program 등이 GRC의 주요 업적이다. 현재에도 액체수소와 직·간접적으로 관련된 연구가 활발히 진행 중이며 이 중에서 몇가지를 소개하고자 한다.

GRC가 지난 수 년 동안 가장 많은 노력을 기울인 수소관련 연구로는 로켓, 우주왕복선 등에 적용가능한 고밀도 극저온 추진제(densified cryogenic propellants)의 개발이라고 할 수 있다. 추진연료인 액체수소와 산화제인 액체산소의 온도를 비등점 이하로 낮춰 과냉각(subcooling)하여 연료의 밀도를 최대 8~10% 증가시킴으로써, 발사체의 gross lift off weight(GLOW)를 최대 20% 정도 감소하고 payload의 증가를 기대할 수 있다. 현재 1 파운드의 payload를 우주로 쏘아올리는데 드는 비용이 약 \$10,000임을 감안할때, 고밀도 극저온 추진연료 기술은 상당한 경제적 절감효과를 기대할 수 있다. 최근 GRC는 X-33(single-stage-to-orbit reusable launch vehicle)의 연료탱크로 제작된 액체산소와 액체수소의 고밀도화 설비를 완비하였고, 이 중에서 열역학 배기시스템(Thermodynamic Venting System)을 이용하여 액체산소의 고밀도화 실험을 성공적으로 수행하였으며 액체수소를 이용한 실험을 준비 중에 있다.

화성 착륙과 같은 장기적인 미션에 사용될 극저온 액체연료 저장탱크에서의 증발 손실(boil-off loss)을 최소화하기 위하여 다층 단열시스템(Multilayer Insulation System)과 극저온 냉동기(cryocooler)를 이용한 Zero boil-off (ZBO) 저장기술을 개발하고 있다. 그림 1은 최근 지상에서 극저온냉동기를 이용한

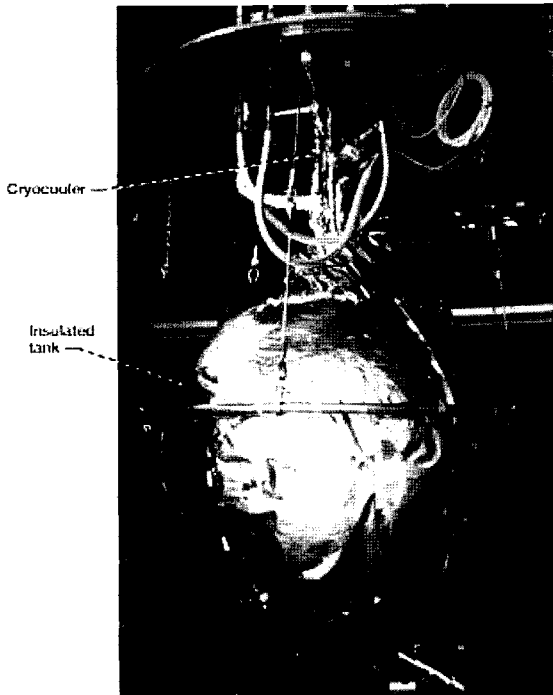


그림 1. Cryocooler intergrated 1.42 m³ LH₂ tank for ZBO demonstration at GRC

ZBO 성능실험을 성공적으로 마친 액체수소 저장 탱크의 시제품의 사진을 보여 주고 있다.

고밀도 액체수소에서 더 나아가 고체수소와 과냉액체수소의 혼합된 형태인 슬러쉬 수소(Slush hydrogen) 혹은 젤수소(Gelled hydrogen)에 대한 연구도 수행되었다. 젤수소는 확산속도가 액체 및 기체수소에 비하여 현저히 낮아 안전성이 높고, 연료의 고밀도화로 인한 GLOW 감소, 연료탱크내 액체 출렁임 감소, 비추력(specific impulse) 증가 등의 효과를 기대할 수 있다. 현재까지 200,000 gallons 이상의 슬러쉬 수소가 연구 목적으로 생산된 것으로 보고되고 있다. 무중력 상태에서 극저온 추진연료의 탱크내 저장량을 정확히 계측하기 위한 질량측정 시스템(mass gauge system)의 개발과, 탱크내 연료의 혼합과 압력조절등을 연구하기 위한 수치 열전달 및 유체의 거동 수치해석도 병행되고 있다. 이 밖에 우주 궤도상에 대용량의 연료탱크 및 추진연료를 상주시키려는 노력인 Propellant depot technology

(COLDSAT: Cryogenic Liquid Orbiting Depot - Storage Acquisition and Transfer, CONE: Cryogenic On-orbit Nitrogen Experiment)의 일환으로 무배기 연료 충전기술(No-Vent Fill technology)도 지상에서 시연되었다.

GRC에 위치한Cryogenic Propellant Tank Facility (K-Site)에는 우주환경을 모사하기 위한 직경 25 feet의 구형 챔버가 설치되어 있다. 그림 2에서 볼 수 있는 K-site는deep space를 모사하기 위한 액체수소온도의 이동 가능한 벽, 이중단열 액체수소 이송관, 800 gallons의slush hydrogen을 생산할 수 있는 설비, 액체수소의 출렁임을 모사할 수 있는 hydraulic shaker, 사고로 인한 챔버 내에액체수소 유출에 대비한 비상용 연소장치, 우주의 진공환경을 모사하기 위한 고진공 펌프 등을 갖추고 있어, 차세대 단열시스템 개발

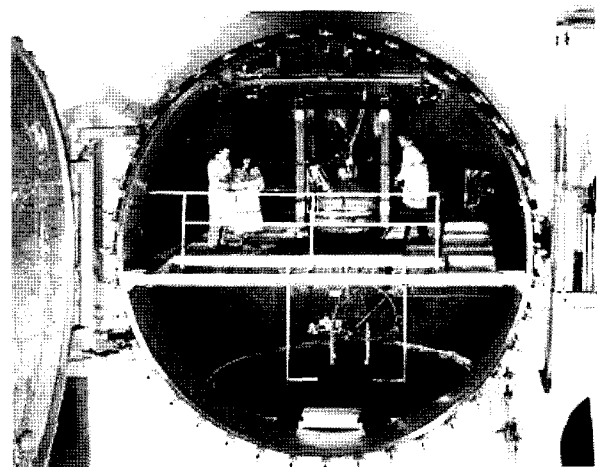
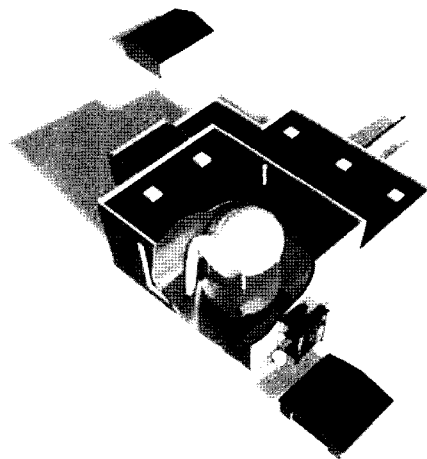


그림 2. K-site slush rig at Plum Brook Station

과 궤도상에서의 유체이동 및 극저온 연료탱크 등의 연구에 없어서는 안될 중요한 연구 설비이다. 이 설비를 통하여 우주와 유사한 환경에서 액체수소를 이용한 대형 규모의 실험이 가능하며, 모든 장치의 조정 및 실험 자료의 데이터 획득은 원거리에 위치한 별도의 건물에서 수행될 수 있도록 하였으며, 모든 전기장비들은 폭발에 견딜 수 있도록 제작되었다.

GRC는 최근 NASA Hydrogen Research in Florida Universities Program 을 개시하고 그 총괄적인 연구진행을 Florida Solar Energy Center내의 Hydrogen R&D 부서에 일임하여, 여러 플로리다 대학들로 하여금 NASA가 추진하고 있는 여러 수소관련 연구들에의 자발적이고 창의적인 연구참여를 독려하고 있다. 이 프로그램중 특히 액체수소에 관하여는 발사체 추진연료의 고밀도화 냉각방법 연구와 광학적 방법을 통한 연료탱크 내의 질량 측정기술, 그리고 고밀도 액체수소의 물성연구 등이 각각 Florida Solar Energy Center 와 Florida State University에서 수행되고 있다.

4. NASA KSC (Kennedy Space Center)

미국 Florida주의 Cape Canaveral에 위치한 NASA KSC는 미국의 유일한 우주로 향하는 통로로서, 지난 40여년간 다양한 로켓 및 우주왕복선을 발사하는 중요한 임무를 수행해왔다. KSC는 이러한 발사장 임무를 원활히 수행하기 위하여 극저온 추진연료의 구입, 이송, 저장 및 실제 발사준비 과정에 필수적인 여러 극저온 액체 (예: 액체질소, 액체헬륨)들의 사용 및 관리업무도 병행하고 있다. KSC는 로켓 및 우주왕복선의 발사스케줄에 맞추어 대량의 액체수소를 정기적으로 사용하는 실사용처이므로 이곳의 액체수소 사용현황을 간단히 정리하면 다음과 같다.

(1) 액체수소 생산 및 조달

1950년대부터 60년대 중반까지는 West Palm Beach, Florida 에 위치한 U.S. Air Force Plant #74 (Papa Bear)에서 액체수소를 생산하여 당시 Centaur Program을 위해 7,000 gallons의 트레일러를 통하여 운반되었

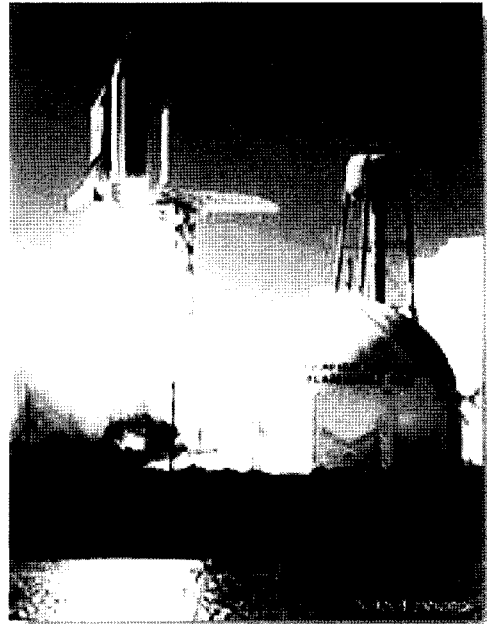


그림 3. Space shuttle launch at the KSC

다. 현재 KSC에서 사용되고 있는 모든 액체수소는 KSC에서 약 640 마일정도 떨어져 있는 New Orleans 에 위치한 Air Products and Chemicals, Inc Plant (APCI, 수소액화능력 66 ton/day) 에서 여러 대의 13,000 gallons tanker들에 의해 발사스케줄에 맞추어 KSC내 Launch Complex 39 (LC39) Propellants Operations Area 에 위치한 주 저장탱크에 조달되고 있다.

(2) 액체수소 저장 및 이송

우주왕복선이 발사되는 Launch Pad 39 에는 A, B 두개의 발사장이 마련되어 있으며, 각각의 발사장은 850,000 gallons 크기의 주 저장탱크가 준비되어 있다. 이 저장탱크는 직경 61 feet 9인치 스테인레스강으로 만든 내부탱크와 직경 70 feet 탄소강으로 만들어진 외부탱크, 그 사이를 펄라이트(perlite)와 진공으로 이루어진 단열시스템으로 구성되어 있다. 증발 손실율은 발사장 A의 경우 400 gallons/day, 발사장 B의 경우 600 gallons/day 정도이다. 오랜 세월동안 여러 번의 열사이클(thermal cycling)을 경험하고 perlite compaction으로 인한 단열성능의 저하로 인하여 최근 발사장 B의 증발손실율이

급격히 증가하는 추세를 보이고 있어, Florida Solar Energy Center 와 KSC 연구원들이 공동으로 이 문제를 해결하기 위해 노력하고 있다. 주 저장탱크는 직경 10인치, 길이 1,000 feet의 진공 단열관을 통하여 우주왕복선의 ET와 연결되어 있으며 최대 10,000 gallons/min의 유량으로 ET에 액체수소를 공급할 수 있다.

(3) 액체수소의 사용량 현황

우주왕복선 1회 발사의 경우 주 엔진에 액체수소를 공급할 ET와 왕복선 내의 연료전지에 사용될 액체수소의 양을 모두 포함하여 약 385,700 gallons정도가 소모된다. 또한 ET및 이송관의 초기 예냉, 발사전까지 증발손실량을 보충하는 과정 등에서 약 168,740 gallons의 액체수소가 추가로 사용된다. 이상은 왕복선의 발사에만 해당되는 양이며, 액체수소 저장탱크에서 이송, 저장 및 관리시 증발되는 손실량이 연간 445,650 gallons 정도이다. 우주왕복선 프로그램의 초기 75회의 발사시 사용되었던 액체수소의 총 양을 평균하면 대략 500,000 gallons/launch가 사용되었으며, 지난 21년간 우주왕복선 109회 발사까지 사용되었던 총 액체수소량은 약 90,000,000 gallons이라고 한다. 매 발사시마다 발생하는 특수한 상황, 예를 들면 발사연기로 인한 ET로부터 주 저장탱크로의 액체수소 회수 및 재주입 등으로 인하여, 발사에 실제로 사용된 액체수소의 양은 매번 상당히 달랐다고 보고되고 있다. 1960년대 당시 미국 정부(NASA, U.S. Air Force등)가 필요로 하던 액체수소의 양은 미국내 전체 생산량의 95%를 차지하였으나, 현재는 전체 액체수소 생산량의 5% 미만으로 감소되었으며, 생산량의 대부분은 정부가 아닌 산업계에서 소비되고 있는 것으로 보고되고 있으므로 실로 액체수소의 사용량이 얼마나 급증되었는지를 짐작할 수 있다.

(4) 액체수소의 가격

역사적으로 지난 40여년간 액체수소의 요구량이 시대적 변화에 따라 심하게 변동하였으므로 이에 따른 액체수소의 가격도 상당히 변동이 심하였다. 통계적으로 보아 KSC에 배달되는 비용까지 포함된 최종 액체수소의 지급액은 2002년 현재 대략 \$2/lb 혹은

\$4.5/kg에 수렴되고 있다. 이중 상당한 금액이 New Orleans에서 KSC까지 상용 고속도로를 통하여 tanker로 운반되는 운송비로 소비되고 있어, 현재 KSC 내 혹은 인근에 적절한 규모의 수소액화 설비 준공 및 운영을 신중하게 검토하고 있다. 이러한 액체수소의 가격은 액화방식과 액화설비의 규모 및 이송거리 등에 따라 큰 변수를 갖게 된다.

5. 미국 DOE (Department of Energy)

2003년 George Bush대통령의 연두 국회연설에서 수소에너지 개발 중흥을 주창한 이후, DOE 내의 여러 부서에서는 수소에너지원의 개발 및 응용을 목표로 하는 여러 연구 프로그램들이 좀 더 활기를 띄기 시작하였다. 특히 DOE산하의 에너지 효율 및 재생에너지 (Energy Efficiency and Renewable Energy) 사무소에서 진행하는 Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies 프로그램은 수소의 생산, 이송, 저장, 연료전지, 안전, 규약 및 표준화, 교육 등, 전반적인 수소에너지의 개발과 상용화 및 범용화를 향한 포괄적인 연구개발을 포함하고 있다. 이러한 여러 수소에너지 관련 연구 중에서 액체수소 분야는 주로 '저장(storage)' 분야로 분류되고 있다. 수소에너지의 저장 기술은 크게 고압 압축가스, 극저온 액체, metal / chemical hydrides, Carbon-based 나노구조 내 저장 등이 거론되고 있다. 극저온 액체수소 형태의 저장방법은 체적당 에너지 밀도를 높일 수 있는 장점이 있는 반면, 증발 손실율이 높고 고가의 수소액화기술 등이 요구되므로 보다 개선된 단열 시스템의 개발이 필수적이다. DOE가 지원하고 있는 액체수소 관련 연구로는 고압용 액체수소 탱크의 개발이 대표적이라고 할 수 있다. Quantum, John Hopkins 대학, Lincoln Composite등은 보다 진보된 복합소재를 사용하여 무게가 가볍고, 탱크의 외형제작이 보다 유연하며, 최대10,000psi의 고압을 견디는 고압가스용 저장탱크를 연구하고 있는 반면, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)에서는 액체수소의 증발 손실율을 최소화 할 수 있는 단열고압 수소탱크 (insulated pressure vessel) 개발을 위해 노력하고 있다. LLNL은

2004년 9월 현재, 액체 및 기체수소를 5,000psi의 고압으로 저장할 수 있는 하이브리드형 단열고압 수소탱크의 시제품을 개발하여 소형 트럭에 장착하고 Riverside, California 지역에 향후 6개월간 시운전 시험을 수행할 계획이다.

6. 맺음말

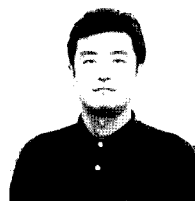
현재 미국 NASA의 여러 연구센터들과 미 에너지국에서 진행하고 있는 수소에너지 관련 프로그램 중에서 액체수소를 직접 다루고 연구하고 있는 곳을 중심으로 하여 연구설비의 현황 및 주요 연구주제들을 나열하였다. 본문의 여러 곳에서 언급된 바와 같이, 극저온 공학을 통하여 얻어지는 액체수소의 역할과 그 응용분야는 방대하며 그 중요성 또한 간과될 수 없다. 극저온 공학 자체가 내제하고 있는 가장 큰 장애물 중의 하나인 단열시스템에 관한 연구가 모든 액체수소의 응용분야에 걸쳐 큰 연구주제가 되고 있음을 주목할 필요가 있다. 본문에는 자세히 언급되지 않았으나 기체 및 액체수소를 다루고 있는 모든 설비에는 반드시 다중의 안전 장치들이 구비되어 있으며, 정책개발자, 연구 개발자 및 실사용자에 이르기까지 투철한 안전의식이 요구되고 있다.

참고문헌

- [1] M. M. Fazah, "STS Propellant Densification Feasibility Study," NASA TM 108467, NASA Marshall Space Flight Center (1994).
- [2] J.J. Martin and L. Hastings, "Large-Scale Liquid Hydrogen Testing of Variable Density Multilayer Insulation With a Foam Substrate," NASA TM-211089, NASA Marshall Space Flight Center (2001).
- [3] L. Hastings, A. Hedayat, and T.M. Brown, "Analytical Modeling and Test Correlation of Variable Density Multilayer Insulation for Cryogenic Storage," NASA/TM-2004-213175, NASA Marshall Space Flight Center (2004).
- [4] L.J. Hastings et al., "Spray Bar Zero-Gravity Vent System for On-Orbit Liquid Hydrogen Storage," NASA/TM-2003-212926, NASA Marshall Space Flight Center (2003).
- [5] T. M. Tomsik, "Recent Advances and Applications in Cryogenic Propellant Densification Technology," NASA TM 2000-209941, NASA Glenn Research Center (2000).
- [6] L.J. Hastings et al., "An overview of NASA efforts on zero boiloff storage of cryogenic propellants," Cryogenics 41 833-839 (2002).
- [7] A. Bain, "NASA Kennedy Space Center Base Case Hydrogen Operations - Past and Present," NASA Glenn Research Center Technical Report, FSEC-CR-1359-02, Florida Solar Energy Center (2002).
- [8] U.S. Department of Energy, "DOE This Month," Office of Public Affairs, D.O.E., September (2002).
- [9] U.S. Department of Energy, "DOE Hydrogen Program Annual Report 2003," (2004).

저자이력

백종훈 (白種勳)



1968년 12월 9일 생. 1994년 홍익대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1996년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 2003년 미국 University of Wisconsin 기계공학과 졸업(공학박사). 2003년-현재 미국 Florida Solar Energy Center 선임연구원.

장호명 (張鎬明)



1960년 9월 21일 생. 1983년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1988년 미국 MIT 기계공학과 졸업(공학박사). 1997-98년, 2002-04년 미국 FSU NHMFL 객원교수. 1990년-현재 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 교수.