

Zero-Carbon Fuel: 수소와 암모니아

장대준(KAIST), 임영섭(서울대학교)

1. 서론

국제 해사 기구 (IMO)에서 온실가스 배출을 줄이기 위한 환경규제가 발표되면서 친환경 선박 추진 연료에 대한 관심이 높다. 불과 얼마 전까지 액화 천연가스(LNG)가 충분히 친환경 연료의 역할을 수행할 것으로 예측되었지만, 현재는 Zero-Emission Fuel(탄소무배출 선박 연료)이 필연적이라는 공감대가 형성되고 있다. 현재 운행 중인 선박은 LNG를 추진 연료로 사용하면서, 환경 규제에 대응할 수 있도록 연료 저감 설비(Energy-Saving Device)나 선상 이산화탄소 포집 설비(Onboard Carbon Capture)를 구축할 것으로 예상되지만, 새롭게 설계되는 선박의 경우 탄소무배출 선박 연료를 추진 연료로 사용할 가능성이 높다. 하지만, 탄소무배출 선박 추진 연료에 대한 깊이 있는 연구는 불과 최근이며, 그나마도 육상에서 했던 경험을 토대로 선박에 적용할 경우를 논하는 경우가 많다. 하지만, 자동차와 선박의 운항 시스템이 크게 다르기 때문에 선박에 요구되는 추진 연료 시스템도 육상과 크게 다를 수밖에 없다. 일례로 고분자연료전지(PEMFC)의 경우, 수소 연료전지 자동차를 위한 연료전지이며, 선박 추진 시스템에 적용하기 위해서는 해결해야 할 기술적 어려움이 많은 것이 사실이다. 본고에서는 탄소무배출 선박 연료로 생각되는 수소와 암모니아를 중심으로 선박 추진 연료로 활용되기 위한 기술적 어려움과 해결 방안, 향후 전망에 대해 논하였다.

2. 액화수소 저장 및 수송 기술 동향

향후 조선 및 해양산업에서 수소는 두 가지 구분된 역할, 즉 탄소무배출 선박 연료로서 역할과 재생에너지 운반체로서 역할로 구분하여 살펴봐야 한다. 압축, 액화, 금속수화물(Hydride) 등 여러 가지 저장 방식이 있지만, 조선해양산업에서는 액화수소 저장 및 수송 방식이 가장 중요할 것으로 예상되어, 본고의 논의를 액화수소 저장 및 수송 기술에 제한하고자 한다. 또한, 수소를 생산하는 방식도 다양하지만, 청정수소를 대규모로 생산할 수 있는 재생에너지를 이용한 수전해 및 액화를 바탕으로 설명한다. LNG 수송선이나 FSRU에서 빠져

리게 경험했듯이, 액화수소의 저장 및 수송 기술, 간단히 말하자면 액화수소 화물창 기술이 결정적으로 중요하다.

기존의 화석연료 대비, 재생에너지는 시간적 비지속성과 지리적 비균일성이라는 치명적인 단점을 가지고 있다. 시간적인 비지속성을 해결하기 위해서는 재생에너지 공급 과잉 시 에너지를 저장하고, 공급 부족 시 에너지를 배출하는 에너지 저장시스템을 필요로 한다. 우리나라의 전력 생산 용량이 100 GW를 상회하고 있고, 신재생 2030 정책에 의해 설치된 재생에너지 발전이 50 GW를 초과할 것을 고려하면, 대규모(GWhr 규모) 에너지 저장시스템이 필수적이다. 에너지 저장에 편리한 배터리는 소규모(MWhr 규모)에 적절하므로, 압축공기, 공기액화, 수력, 수소 등 대규모 에너지 저장 방식들이 설치되어야 한다. 수소는 대규모 에너지 저장 능력뿐만 아니라, 타산업(자동차, 철강, 화학산업)과의 시너지 효과를 기대할 수 있어, 선진 각국이 수소경제를 야심차게 추진하고 있다.

화석연료가 중동에 집중되어 있듯이, 재생에너지도 지리적으로 비균일하게 분포하고 있다. 중동, 아프리카 북부, 호주 북부 등이 태양광 발전에, 호주 남부와 뉴질랜드는 풍력 발전에, 노르웨이나 아이슬란드 그리고 캐나다 등은 수력에 유리한 입지를 가지고 있다. 상대적으로 우리나라는 대부분의 재생에너지 생산을 경제적으로 달성하기 어려운 지리적 위치에 있다. 결국, 우리나라에서 재생에너지 생산+저장 비용과 해외에서 재생에너지 생산+저장+수송비용을 비교하면, 재생에너지 수입의 경제성이 결정된다. 현재, 근해의 해상 풍력을 이용한 수소의 자체 생산과 더불어, 해외로부터 액화수소 수입을 위한 기술 개발이 동시에 추진되고 있다.

재생에너지를 수입하는 방식은 크게 액화수소, 암모니아, 액상유기수소운반체가 고려되고 있다. 3가지 방법 모두 장단점이 있으며, 선박 수송 이외의 공급사슬까지 고려해야 상대적인 경제성이 분석된다. 암모니아와 액상유기수소운반체는 저장 및 수송이 상대적으로 간단하다는 장점이 있는 반면, 수입 이후에 수소를 얻기 위해 에너지가 투입되는 추가적인 분해/정제/압축 공정이 필요하다는 단점이 있다. 암모니아의 경우는 독성이 큰 단점 중에 하나이다. 반면, 액화수소는 수입 이후의 추가적인 에너지 투입은 미미하지만, 수송과 저장 기술, 즉 대형 액화수소 화물창 기술이 아직 개발되어 있지 않다는 단점이 있다.

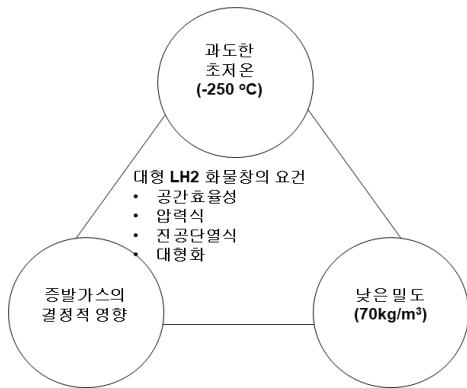


그림 1 대형액화수소 화물창의 3가지 도전과제 및 4가지 요건

액화수소 화물창을 좀 더 깊이 분석해 보면, LNG 화물창 기술과는 수준이 다른 3가지 도전 과제가 있다. 첫 번째 도전 과제는 공기 액화 온도보다 낮은 초저온성이다. LNG는 저장 온도가 -160 °C 부근이므로, 공기가 포함되는 단열층을 사용 하더라도 큰 문제가 없다. 반면, -250 °C 부근인 액화수소 저장탱크는 질소 액화 온도(약 -200 °C)보다 낮으므로, 반드시 진공이어야 한다. 소형 탱크는 진공 단열을 하는 것이 크게 어렵지 않으나, 선체 운동까지 고려해야하는 대형 화물 탱크를 진공 단열이 쉽지 않다. 두 번째 도전 과제는 낮은 밀도이다. 액화수소 밀도는 70 kg/m³로 LNG 밀도의 1/6 수준이다. 따라서, 화물탱크의 공간 효율을 높여서 되도록 많은 화물을 실을 수 있어야 한다. 또한, 화물이 너무 가벼우므로, 높이 방향으로 확장이 가능한 화물탱크이면 금상첨화이다. 세 번째 도전과제는 결정적인 증발가스의 역할이다. LNG는 가장 저렴한 연료 중의 하나인 반면, 액화수소는 가장 비싼 연료 중의 하나이다. 이러한 이유로, LNG 운반선의 증발가스를 선박연료로 사용하는 것은 경제적으로 매우 타당한 접근법인 반면, 액화수소 운반선의 증발가스를 선박연료로 사용하게 되면 선박 수송의 경제성이 크게 나빠진다. 또한, 화물 선적/하역을 위해 예비 냉각시 발생하는 증발가스가 상대적으로 많다. 액화수소의 밀도가 낮은 탓이다. 평상시나 화물 선적/하역 시 발생하는 증발가스를 버리는 경우, 액화수소 수송방식은 암모니아나 LOHC 수송 방식에 비해 현저하게 떨어지게 된다. 반대로, 증발가스를 버리지 않은 경우에는 액화수소 수송방식이 훨씬 경제적이다. 따라서, 증발가스를 탱크 내부에 저장할 수 있는 압력탱크가 화물탱크로 채용되는 것이 바람직하다.

이상 언급한 세 가지 도전과제를 종합하면 액화수소 운반선의 화물탱크는 대형화, 진공단열, 공간효율, 압력식의 4가지 요건을 모두 만족해야 한다. 이러한 4가지 요건은 액화수소 수출터미널이나 수입터미널의 저장탱크에도 그대로 적용된다.

표 1 화물창 방식별 대형 액화수소화물창 요건 충족 여부

항목	실린더 방식	멤브레인 방식	이상적인
	화물창	화물창	화물창
공간효율성	X	O	O
압력식	O	X	O
진공단열	O	X	O
대형화	X	O	O

액화수소 운반선 화물탱크를 개발하는 접근법은 크게 실린더 화물탱크 방식, 멤브레인 화물탱크 방식, 새로운 화물탱크 방식으로 나뉜다. 실린더를 이용할 경우, 진공 단열과 압력식이라는 요건은 만족시키지만, 대형화와 공간효율은 만족시키기 어렵다. CNG(압축천연가스)를 실린더로 이용하여 운송하고자 하는 CNG 운반선 개발이 2000년 초에 전세계적으로 시도되었으나, 단 한 건도 실제 프로젝트로 이어지는 못했다. 탱크 자체도 문제이지만, 다수 탱크를 연결하는 배관과 전계장이 유발하는 안전과 운전 복잡성, 그리고 과도하게 커지는 선체 및 이에 따른 과도한 연료 소모량, 그리고 운반선에 대응하는 육상설비 등이 상용화를 가로 막는 중요한 이유였다. 초저온 액화수소 탱크의 경우에는 이러한 문제들이 더 심각하게 되므로, 이를 극복하는 기술 개발이 이루어져야 한다.

멤브레인 화물탱크 방식은 대형화와 공간효율 조건은 만족시키지만, 진공단열과 압력식의 요건은 만족시키지 못한다. LNG 멤브레인 탱크는 근본적으로 선체가 화물의 부하를 견디도록 되어 있으며, 선체와 탱크 멤브레인 사이에 단열층이 화물의 부하를 선체에 전달하게 된다. IMO 규정에 따라 멤브레인 탱크는 기본적으로 누출이 발생할 수 있으며, 누출을 감지하기 위하여 단열층에 질소를 통과시키게 된다. 멤브레인 화물탱크를 액화수소에 적용하기 위해서는 이 단열층을 진공 방식으로 바꾸어야 한다. 또한, 수송 경제성을 확보하기 위해서는 증발가스를 재액화해야 한다.

기존 화물탱크 기술의 한계가 분명하여 새로운 액화수소 화물탱크 기술을 개발하려는 시도도 이루어지고 있다. 국내 기업인 (주)래티스테크놀로지는 자유형상의 압력탱크인 격자형 압력탱크를 이미 선박용 LNG 탱크로 상용한 바가 있는데, 이 탱크는 대형화, 공간효율, 압력식의 3가지 요건을 만족한다. 더불어, 당사는 대형탱크를 위한 새로운 진공단열 기술도 개발하여, 4가지 요건을 모두 만족시켰다. 이러한 이상적인 화물창에 대하여 당사는 2020년에 로이드스등급으로부터 원칙승인을 확보하고, 현재는 상세설계 기술개발 및 성능 시험을 준비 중이다.

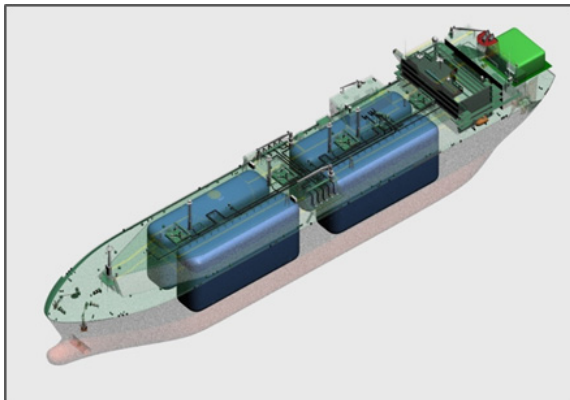


그림 2 이상적인 대형 액화수소 화물창을 장착한 액화수소운반선 개념도

4가지 요건을 모두 만족하는 이상적인 대형 액화수소 화물창이 개발 완료되면, 조선해양 산업에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 첫 번째 영향은 저렴한 수소 가격에 기반한 글로벌 수소 경제의 구현이다. 각국이 현재 수소경제를 적극적으로 추진하고 있음에도 불구하고, 다른 나라의 수소경제와는 고립되어 있다. 가장 중요한 수소를 효과적으로 교역할 방법이 없기 때문이다. 하지만, 이상적인 액화수소 저장탱크가 상용화된다면, 재생에너지가 싼 지역에서 비싼 지역으로 재생에너지를 운반하는 수단으로 액화수소가 가장 경쟁력 있는 운송 수단으로 대두될 것이며, 전세계 수소경제가 하나의 시장으로 통합될 것이다.

두 번째는 해상 기반 액화수소 공급사슬이다. FLNG-LNG 운반선-FSRU의 LNG 공급사슬과 유사하게, 부유식 액화수소 수출터미널-액화수소 운반선 - 부유식 액화수소 수입터미널의 액화수소 공급사슬이 신속하게 경제적인 액화수소 공급사슬이 될 수 있으며, 국내 조선해양산업의 새로운 성장 동력이 될 수 있다.

세 번째 영향은 대형 수소추진 선박의 경제성 확보이다. 대형 수소추진 선박이 암모니아를 비롯한 다른 탄소무배출선박에 비해 경제성이 떨어지는 주요 걸림돌은 대형 액화수소 연료저장 탱크와 액화수소의 높은 가격이다. 이상적인 액화수소 화물창은 이러한 걸림돌을 제거할 것이며, 액화수소가 주요한 탄소무배출 선박연료로 자리 잡게 할 것이다.

3. 암모니아 생산 및 수송 기술 동향

최근 대체연료로서 암모니아 또한 많이 언급이 되고 있다. 이 역시 크게 2가지 역할로 구별되는데, 첫째, 수소를 수송하

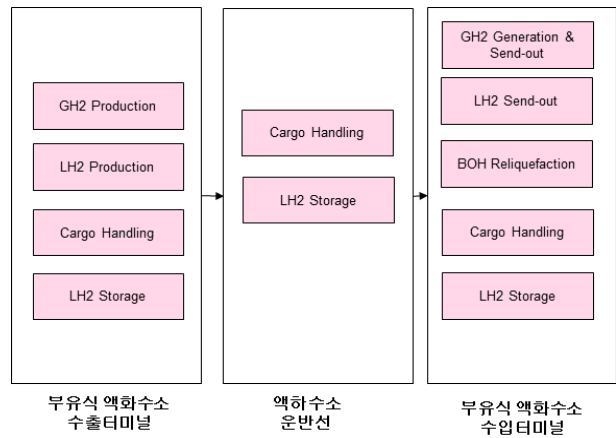


그림 3 해상 방식의 액화수소 공급 사슬

는 수소 운반체(hydrogen carrier)의 역할로서 언급되는 경우가 있으며, 둘째, 암모니아를 탄소를 배출하지 않는 연료인, 에너지 운반체(energy carrier)로서 사용하는 관점에서 언급되는 경우가 있다. 전자의 경우는 생성된 암모니아를 수송 이후 수소로 분해하는 과정을 거쳐 수소를 생산하고, 이 수소를 연료로 이용하게 된다. 후자의 경우에는 생산된 암모니아 그 자체를 연료로 사용하게 된다.

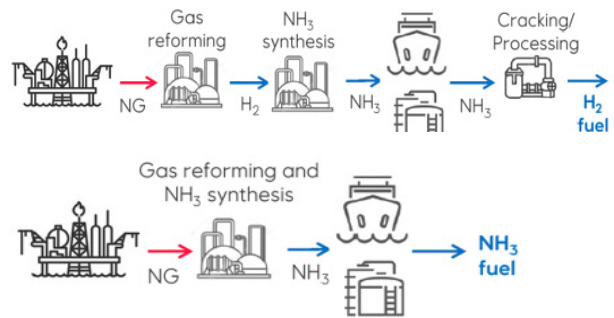


그림 4 암모니아를 이용한 수소 수송 및 선박 추진 연료 개념도

수소 운반체의 역할이 강조되는 것은, 액화수소의 기술적 장벽이 높기 때문이다. 수소 가스는 밀도가 낮아서 가스 자체를 수송하는 것은 경제적이지 않다. 부피가 큰 가스를 수송하는 방법은 일반적으로 2가지가 있는데, 압력을 높여서 밀도를 낮추거나, 액화해서 밀도를 낮춰서 수송하는 방법이다. 통상 고압가스 보다는 액체의 밀도가 높으므로 LNG의 예처럼 온도를 낮춰서 액화하는 쪽이 장거리 수송에서는 보통 상대 우위를 가진다. LNG의 경우 수송하기가 썩 좋은 물질이 아닌 이유 중 하나가 부피를 줄이려고 액화하려다 보니 상압에서 끓

는점인 -160°C 이하로 온도를 낮춰야 했기 때문인데, 수소는 이보다 더 불리한 조건을 가지고 있다. 상압에서 끓는점이 -253°C 이므로, LNG 온도보다 100도를 더 낮춰야 액체 수소를 만들 수 있다. 액화하는데 제거해야 하는 열량의 입장에서 보면 1kg의 액화 수소를 만들기 위해서는 동질량의 LNG를 만드는 것에 비해서 약 5배 이상의 열량을 제거해야 하며, 액화 공정의 소모 에너지 입장에서는 LNG 액화에 비해서 거의 10배 이상의 에너지가 소모된다. 그렇게 액체 수소를 만든다고 할지라도, LNG에 비교하여 단위 부피당 발열량이 약 절반에 불과하다.

액화 이후의 수송과정도 문제가 있다. 액화수소는, LNG보다 낮은 증발열과 밀도로 인하여 단위부피당 증발량이 LNG의 약 6배 이상이다. 이러한 수소를 LNG수송선처럼 상압 극저온 조건에서 저장하여 수송하려고 하면, 지금 LNG수송선에 적용되는 단열성능보다 월등히 뛰어난 진공 단열기술 등이 적용되거나, 에너지 소모량이 적은 수소 재액화 공정이 필요하다. 현재는 이 둘 다 해결이 쉽지 않다.

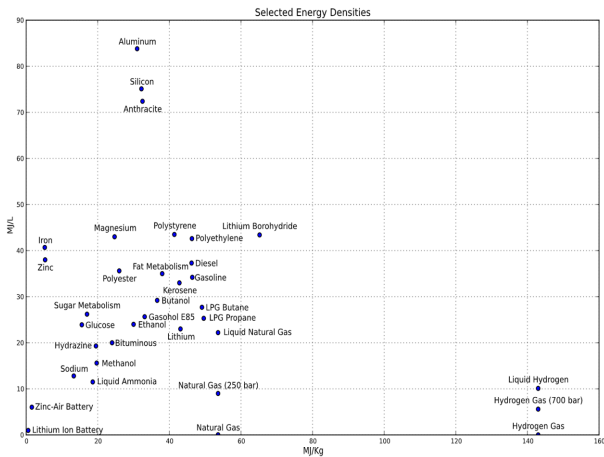


그림 5 수소 및 암모니아를 포함한 추진 연료의 에너지 밀도 (Energy density)

수소운반체로서 암모니아가 언급되는 가장 큰 이유는, 암모니아가 단위 분자당 수소를 많이 포함하는 물질(NH_3)인 동시에 암모니아를 수송하기에 적합한 조건의 운송설비를 이미 장기간 사용해왔기 때문이다. 암모니아는 상압에서는 -34°C 이하, 상온에서는 9기압 이상이면 액화가 가능하다. 이는 LPG(liquefied petroleum gas)와 매우 유사한 운반조건이다. 조성에 따라 차이가 나지만 프로판 및 부탄이 주요 성분인 LPG는 상압에서는 -40°C 이하, 상온에서는 5~9기압 이상이면 액화가 가능하다. 즉, 기존 LPG운반선의 운전조건과 거의

동일한 조건에서 수송이 가능하며, 저장탱크 또한 유사한 조건의 기존 탱크들을 사용하는 것이 가능할 것으로 기대가 되고 있다.

에너지 운반체로서의 암모니아는, 암모니아를 엔진 등의 연료로 직접 사용하는 경우를 의미한다. 암모니아를 연료로 직접 사용하는 경우도 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 다른 연료를 사용할 때 암모니아를 섞어서 연소하는 혼소 엔진과 암모니아만을 연소시키는 전소 엔진이 있다. 암모니아를 이용한 연료전지 기술도 존재하나, 엄밀하게 말하면 이는 암모니아를 질소와 수소로 분해한 뒤 수소를 이용하는 수소 연료전지로 수소 운반체로서 암모니아를 사용하는 경우에 가깝다. 한 예로 유럽의 다국적 ShipFC 프로젝트는 독일 프라운호퍼사에서 개발한 암모니아 연료전지를 노르웨이 아이데스빅 조선사의 바이킹 에너지 호에 탑재, 암모니아 연료전지 기반 선박 추진을 2023년까지 실증하기로 발표한 바 있다.

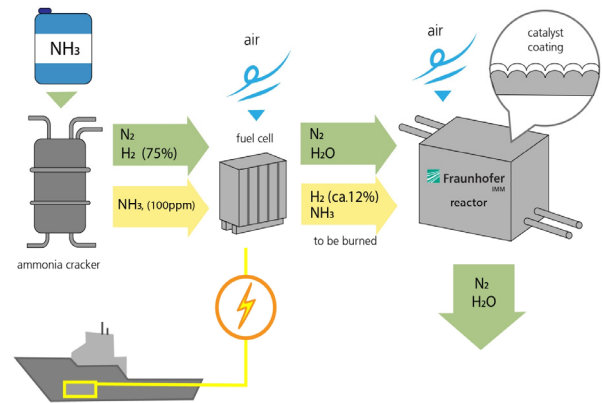


그림 6 암모니아 연료전지 선박의 개념도

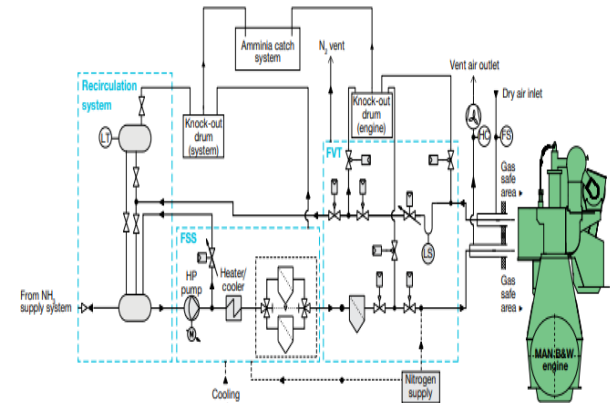


그림 7 MAN B&W 사의 암모니아 이중연료 엔진 개념도

암모니아는 완전 연소시 수소와 마찬가지로 이산화탄소의 발생이 없이 에너지를 얻는 것이 가능하다.



따라서 전소 시에는 이산화탄소가 발생하지 않으며, 기존 화석연료에 이를 섞어서 사용하는 혼소 시에는 이산화탄소 발생량이 감소하는 효과가 있다. 일례로 한국에너지기술연구원에서는 2014년 암모니아와 가솔린을 7:3비율로 혼합한 연료를 사용하는 암모니아 혼소 엔진을 탑재한 차량 “암비”를 선보인 바 있다. MAN B&W 사는 LPG와 암모니아를 연료로 사용할 수 있는 이중 연료 엔진을 2024년까지 개발 완료, 조선소에 공급할 계획을 발표한 바 있다.

암모니아의 이용 시 가장 큰 문제가 되는 부분은, 수소와 마찬가지로 그 생산 과정에서 이산화탄소가 발생한다는 것이다. 현재 가장 경제적인 암모니아의 생산 방법은 친환경적이지 않다. 암모니아를 생산하는 가장 보편적인 방법은 1913년 개발된 하버-보쉬 프로세스로 수소에 질소를 첨가하여 암모니아를 생산하는 방법이다. 통상 이는 수소를 생산하기에 가장 경제적인 수증기 메탄 개질(SMR, Steam Methane Reforming) 공정과 결합되어서 이용되는데, 이 생산 방법의 가장 큰 문제점은 높은 수율을 얻기 위해서 고온고압(~300bar, ~500°C)의 반응조건을 필요로 한다는 것이다. 때문에 생산과정에서 많은 에너지를 소모해야 하며(30-40GJ/NH3 ton), 이는 다시 에너지 공급을 위해서 다량의 연료가 소모되어 이산화탄소의 배출을 야기한다.

즉, 이러한 화석연료를 기반으로 만들어지는 브라운 암모니아(brown ammonia)는 이산화탄소 배출을 줄이려는 소기의 목적을 달성하기에 거리가 멀다. 때문에 CCS(Carbon Capture and Storage)와 결합한 블루 암모니아(blue ammonia)나 신재생에너지로부터 만든 그린 수소로부터 그린 암모니아를 만드는 개념이 제시되고 있으나, 아직까지는 생산 비용의 증대로 인하여 상업적인 경제적 타당성을 확보하기 위해서는 좀더 에너지 소모를 줄인 기술개발 적용이 필요하다. 일례로 SIMENS, Air Product 등은 신재생에너지와 하버-보쉬 공정을 결합한 그린 암모니아 생산공정 계획을 발표한 바 있으며, JGC나 한국에너지기술연구원은 저온 저압 암모니아 합성 촉매 개발 등을 연구해오고 있다.

암모니아 사용에 따라오는 또 다른 치명적인 위험은 그 독성이다. 암모니아는 50 ppm 수준의 농도까지는 악취만 발생하지만, 300ppm이상에서는 눈 등에 부상을 야기하며 3000ppm 이상에서는 사망에 이를 수 있다. 따라서 기존 화재폭발 위험도를 중심으로 설계된 LPG시스템을 그대로 적용해서는 안 되며, 누출 방지 및 누출 시 위험도 저감을 위한 방재시스템이 반드시 병행 설계되어야 한다. 그 외 낮은 발열량(가솔린의 약 45%수준) 및 질소 원자의 존재로 인한 NOx 추가 생산 등의 문제가 존재하나, 이는 기술적으로 보완할 수 있는 부분이라고 판단된다.

4. 결론

본고에서는 Zero-Carbon Fuel 즉 탄소무배출 선박 연료로 수소와 암모니아에 대해 살펴보았다. 수소는 내연 엔진과 연료전지 모두를 위한 연료로도 사용될 수 있어 선박 추진 연료로 가능성을 가지고 있지만, 저장 및 수송을 위한 기술적 어려움이 있다. 신재생 에너지와 연결된 수전해의 경우 용량과 지리적인 요건을 극복해야하고, 천연가스 같은 화석연료 기반의 수소는 CCUS 기술이 함께 사용되어야 한다. 수소를 LNG와 같이 수송하기 위해서는 -250 °C의 낮은 온도에서 유체를 수송할 수 있는 화물창의 설계가 필요하고, 낮은 밀도와 증발 가스를 처리할 수 있는 시스템 개발이 요구된다. 특히 현재 국내에서 연구되고 있는 다양한 기술들은 세계적인 수소 경제의 흐름과 맞물려 조화를 이루면서 진행되어야 기술 고립을 피할 수 있을 것이다. 암모니아는 수소 수송을 위한 원료와 선박 추진을 위한 연료로 모두 활용 가능하다. 암모니아는 -34 °C 이하의 온도에서 액화가 가능하기 때문에 LPG와 유사한 액화 조건을 가지고 있어 현재의 기술로도 충분히 수송 및 저장이 가능하다. 연료전지를 위한 연료로도 공급이 가능하고,

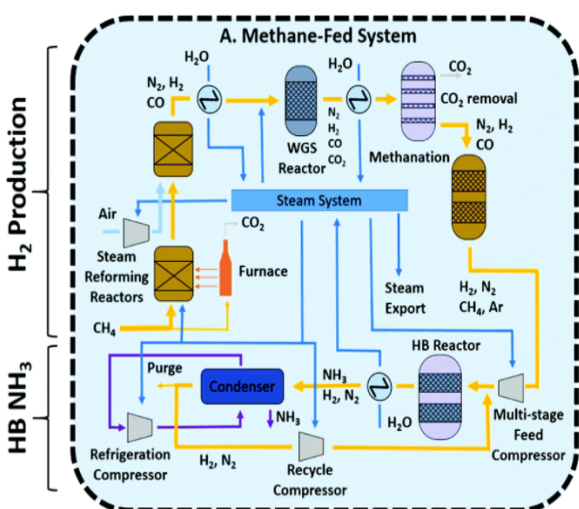


그림 8 하버-보쉬 암모니아 생산공정 개념도

통상 엔진에서도 사용이 가능한 장점이 있지만, 현재의 하버-보쉬 합성 공정은 고에너지 소비와 더불어 이산화탄소 배출을 피할 수 없다. 신재생 에너지원과 수전해 기술과 결합해 수소를 생산하고, 공기 중으로부터 분리된 질소와 반응시켜 합성하는 기술을 개발하고 있지만, 경제성을 확보하기 위한 노력이 더 필요하다. 암모니아의 또 다른 어려움은 독성이다. 미량의 누출로도 인체에 치명적이기 때문에 화재 폭발 위험도를 중심으로 설계된 기존 시스템을 보완할 필요가 있다. 수소와 암모니아 모두 탄소무배출 선박 연료로 높은 가능성을 가지고 있지만, 선박 추진 연료로 선택받기 위해서는 다양한 기술 개발 노력이 이루어져야 한다.

Yuki Ishimoto et al. 2020, Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers. Int'l J. Hydrogen Energy, Vol. 45, pp. 32865 - 32883.

참고 문헌

Collin Smith et al., Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape, Energy Environ. Sci., 2020, 13, pp.331-344.

Fraunhofer, <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2021/march-2021/worlds-first-high-temperature-ammonia-powered-fuel-cell-for-shipping.html>.

Hwalong You H, et al. 2018. Effect of ortho-para conversion on economics of liquid hydrogen tanker with pressure cargo tanks, Ships and Offshore Structures, Vol. 13, pp.79-85.

MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia, <http://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/man-b-w-two-stroke-engine-operating-on-ammonia.pdf>

Mizuno, Y. et al. J. Japan Society of Energy & Resources, Vol. 38(3), pp.11-17.



장대준

- 한국과학기술원 화학공학과
- 현 재 : 한국과학기술원 기계공학과 부교수
- 관심분야 : 친환경선박, 수소수송, 안전
- E-mail : djchang@kaist.ac.kr



임영섭

- 서울대학교 화학생물공학과 박사
- 현 재 : 서울대학교 조선해양공학과 부교수
- 관심분야 : 선박/해양 공정시스템
- E-mail : s98thesb@snu.ac.kr