



## LNG냉열이용 수소액화 공정해석 및 설계

†윤상국

한국해양대학교 기계정보공학부  
(2010년 7월 19일 접수, 2011년 3월 2일 수정, 2011년 4월 7일 채택)

### Design and Analysis for Hydrogen Liquefaction Process Using LNG Cold Energy

†Sang-Kook Yun

*Dev. of Mechanical and Enrgy ngeenerings, Korea Maritime University,  
Busan 606-791, Korea*

*(Received July 19, 2010; Revised March 2, 2011; Accepted April 7, 2011)*

#### 요 약

수소액화 공정은 수소 예냉 에너지, 액화에너지 그리고 Ortho/Para 변환열 제거 등 다량의 에너지가 요구되어 진다. 본 논문은 기존의 수소액화 공정에 LNG냉열을 이용하여 에너지절약 효과를 얻고자 기본설계 및 열해석을 수행하였다. 액화 소요에너지에 LNG냉열을 적용하면 수소액화공정의 에너지절약효과와 함께, LNG기지의 해수에 버려지는 LNG냉열을 회수, 이용하는 일석이조의 에너지절약기술이 된다. 열해석에 의한 설계를 수행한 결과 현재의 액체질소 예냉식 수소액화 플랜트의 소요에너지에 비하여 LNG냉열을 이용할 경우 소요동력량은 75%가 절감되었다. 이는 에너지를 액체질소 대신에 냉열을 사용하기 때문이다. 또한 LNG냉열량은 수소액화량 1T/D 기준할 때 15T/D 유량이 요구되었다.

**Abstract** - For the hydrogen liquefaction, the large amount of energy is consumed, because precooling, liquefaction and ortho/para conversion heats should be eliminated. In this paper the basic design and thermal analysis are carried out to reduce the energy consumption by using LNG cold energy for precooling process in hydrogen liquefaction processes. The LNG cold energy utilization for hydrogen precooling enables not only to get energy saving for liquefaction, but to recover the wasted cold energy to sea water at the LNG terminal. The results show that the energy saving rate for liquefaction using LNG cold energy is almost 75% of current industrial hydrogen liquefaction plant. The demand flow-rate of LNG is only 15T/D for 1T/D hydrogen liquefaction.

**Key words** : hydrogen, liquefaction, energy saving, LNG cold energy, precooling, liquid nitrogen, basic design, thermal analysis

#### 1. 서 론

21세기는 화석에너지로 부터 수소에너지로의 에너지 패러다임의 대변환이 예견되고 있다. 수소는 연소 후 물만 생성되는 미래의 청정에너지원으로 CO<sub>2</sub> 및 온실가스 저감 효과가 매우 커서 산업용 연료, 자동차,

비행기, 연료전지 등 현재의 에너지시스템에서 사용되는 거의 모든 분야에 응용이 가능하여 미래의 에너지시스템에 가장 적합한 에너지원으로 평가되고 있다. 국내에서도 가까운 미래 수소경제의 구현을 위해서 수소생산, 수소저장, 수소운반, 연료전지 등 수소이용기술을 개발 중에 있다[1].

수소는 이미 40년 이상 산업체에서 화학 원료로서 그리고 우주탐사용 연료로서 대량 사용되어 왔으므로,

†주저자:skyun@hhu.ac.kr

이미 수소를 생산하고, 저장 및 이용할 수 있는 기술을 상당부분 구축해 온 셈이다. 수소의 제조는 물, 천연가스 또는 기타 유기물질로부터 얻을 수 있으며, 공기 중 산소와 반응하여 열과 전기를 생산하고 다시 물로 재순환 된다. 수소에너지 이용기술 분야는 대표적으로 연료전지를 들 수 있다. 연료전지는 전기와 열을 동시에 얻을 수 있기 때문에 용도가 매우 넓으며, 전세계적으로 분산전원용, 이동기기용, 자동차, 우주개발, 항공우주선, 비행기, 잠수함 등에 사용하기 위해 활발한 연구가 이루어지고 있다.

수소의 자동차 연료용으로는 고압가스 상태의 수소를 이용하고 있으며, 국내에서도 주행거리 400km 정도를 얻기 위한 압력인 700bar를 적용하기 위한 관련 시스템 기술을 개발 중에 있다. 그러나 선진국과는 달리 개발도상국 여건에서는 교통사고의 발생 빈도와 강도를 볼 때 에너지 인프라에 고압가스 이용체계를 갖추는 것은 여러 위험성과 사회적 비용을 요구하게 되는 우려를 야기하게 된다. 반면, 대기압이 적용되는 액체상태의 수소는 상대적으로 안전성을 확보할 수 있으므로 이의 이용 인프라 구축이 필수적으로 필요하다고 판단된다.

수소 액화는 수소의 온도를 대기압에서 -253℃까지 강하시켜야 한다. 즉 액화를 위한 에너지 소비량이 매우 크게 되는 단점을 갖게 되는 것이다. 또한 수소 액화를 위하여는 역전온도(inversion temperature) 이하로 낮추는 예냉 공정이 필수적으로 필요하게 된다. 이 예냉 공정에 기존의 모든 액화플랜트는 -196℃의 액체질소를 사용하고 있다. 예를 들어 20기압으로 가압된 수소는 -93℃까지 예냉을 한 후 교축팽창을 하여야 온도가 저하되어 액체를 얻게 되는 것이다[2].

수소 액화 과정에서 수소의 예냉을 위하여 액체질소 대신에 -162℃의 LNG를 사용한다면, 수소의 예냉과 LNG의 증발이라는 두 가지 목적을 동시에 달성할 수 있어 국가 에너지이용 측면에서 매우 효율적이 될 것이다.

국내에서는 -162℃의 극저온 액체인 LNG를 도입하여 발전용과 가정, 산업용 연료로 공급하고 있다. 이 LNG를 기화시키는 열원으로는 해수를 사용하고 있으며, 연간 바다에 버려지고 있는 냉열의 양은 LNG 공급량 2,500만톤을 기준하면 약 1백만 Toe에 이르게 된다. 국내 LNG기지는 인천, 평택, 통영, 그리고 건설 중인 삼척과 제주도기지가 있다. 이 중 인천기지는 천연가스로부터 수소가스를 얻는 소규모 설비를 갖추고 있다.

액화천연가스(LNG)는 메탄(Methane)이 주성분인 천연가스(Natural gas)를 대기압하 -162℃에 액화시

킨 것으로서, 가스전의 천연가스 중에 포함된 불순물을 제거시킨 후 극저온에서 액화시킨 무색 투명하고 냄새가 없는 청정한 액체이다. 이 극저온의 액화에 소요되는 비용은 도입하는 LNG 중 냉열로 존재하므로 LNG를 재기화시켜 사용할 때 발생하는 냉열을 유효 적절하게 활용한다는 것은 우리나라와 같이 에너지자원이 빈곤한 나라에서는 필수적인 일이 될 것이다.

국의 액체수소 이용체계 기술개발을 보면 독일과 미국이 대표적 국가로 액체수소 차량개발과 함께 충전소도 갖추고 있다. 또한, 일본의 액체수소관련 기술개발을 보면 New Sunshine Project의 하나로 액체수소 운송선박 및 버스 개발을 WE-NET 프로그램을 추진한 바 있다[3].

국내 상황을 보면, 타국과 달리 극저온의 LNG를 보유하고 있는 좋은 여건에도 불구하고 이를 전량 바다에 버리고 있으며, 수소액화에 이용하는 기술개발 및 검토는 전혀 이루어지지 않고 있다. 본 논문에서는 LNG냉열이용 수소액화 공정의 기본설계 및 열해석을 수행하여 에너지절약 효과를 얻고자 하였다.

## II. 수소액화 에너지량

### 2.1. 액화소요 에너지량

수소의 액화에 소요되는 에너지를 보면 수소의 온도를 역전온도 이하로 낮추는 예냉 에너지, 액화잠열 그리고 수소분자의 Ortho/Para 변환 때 발생하는 에너지 제거가 필요하게 된다. Table 1은 종류별 에너지량으로 수소 1kg을 액화하는 이론적 소요 에너지량은 1.246 kWh가 된다.

### 2.2. LNG냉열량 및 공정

LNG는 생산지에 따라 화학조성이 다른 여러 가지 탄화수소의 혼합물로 이루어지며, 기화시키는 압력에 따라 냉열량이 1기압 상태에서 0℃까지 기화시키는 경우 202 kcal/kg정도(잠열: 120 kcal/kg, 현열:

Table 1. Theoretical liquefaction heat of hydrogen

	Heat quantity
Latent heat	0.123 kWh/kg
Sensible heat	0.977 kWh/kg
Ortho/para conversion heat	0.145 kWh/kg
Total	1.246 kWh/kg

82 kcal/kg)가 되고, 75 kg/cm<sup>2</sup> 압력하에서 기화시키는 경우에 발생하는 냉열량은 175 kcal/kg(잠열: 50 kcal/kg, 현열: 125 kcal/kg)으로 기화압력상승에 따라 이용 가능한 보유 냉열량은 점점 적어지게 된다.

LNG냉열이용 공정을 보면, 먼저 LNG는 1차 펌프에 의해 15kg/cm<sup>2</sup>으로 승압된 후 2차펌프에 의해 75kg/cm<sup>2</sup>로 가압된다. 가압된 LNG는 고압기화기(Open Rack Vaporizer)를 통과하면서 해수와 열교환하여 열을 흡수함으로써 이루어진다. 이때 LNG와 열교환하는 해수는 열을 빼앗기게 된다. 냉열이용은 해수이용 고압기화기 대신에 냉열회수 열교환기에서 열매체를 이용하여 LNG냉열을 회수, 저온을 필요로 하는 산업에 열매체가 지닌 냉열을 적용하는 것이다[4].

### III. LNG냉열이용 수소액화공정 설계

수소액화에 필수적으로 사용되는 액체질소대신에 LNG가 보유하고 있는 냉열을 사용하여 액화에 필요한 에너지를 절감하게 된다. 먼저 기존 전력을 이용한 수소액화 공정의 소요 에너지를 분석하고, LNG냉열을 사용하는 공정의 절감될 수 있는 동력을 비교 분석하였다.

#### 3.1. 액화소요 에너지량

Fig. 1은 현재의 수소액화공정으로 액체질소를 이용하여 수소 예냉을 하는 공정이다[4]. 그림의 상부

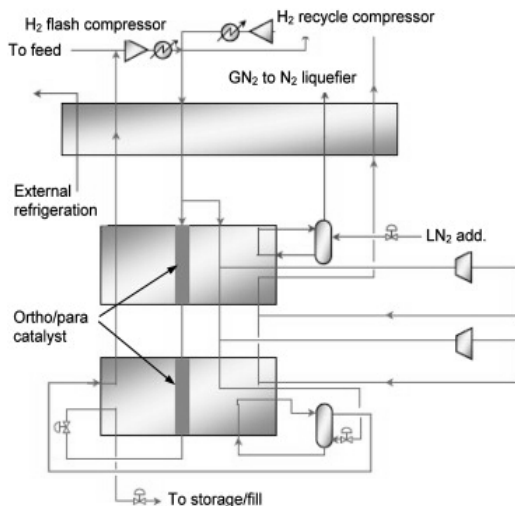


Fig. 1. Current liquefaction process of hydrogen[5].

Table 2. Power consumption of current hydrogen liquefaction process[6].

Power consumption of each process(MW)	1T/D	10T/D	30T/D
Compressor for source hydrogen	0.0850	0.850	2.550
Compressor for low pressure hydrogen	0.0133	0.133	0.408
Compressor for high pressure hydrogen	0.2480	2.217	6.408
-40℃ refrigerator	0.0046	0.047	0.149
N2 re-liquefaction	0.1341	1.283	3.775
Total consumption	0.4850	4.530	13.29
Unit consumption (kWh/Nm <sup>3</sup> )	1.0480	0.978	0.955

는 액체질소를 사용하여 주입되는 수소가스를 예냉하고, 기화된 질소는 다시 액화시키게 된다. 하단은 수소가스가 다단의 열교환기를 통과하면서 단계적으로 온도가 저하되어 액화되는 공정이다. 수소의 온도를 저하시키는 액화시스템은 수소를 작동유체로 하는 밀폐사이클로 이루어진다[5].

Table 2는 액화량이 1T/D, 10T/D, 30T/D 용량일 때 기존 액화공정에서 소요되는 동력 및 효율을 보여준다. 수소액화공정 비교는 일본의 WE-NET Project에서 수행한 내용이다[3],[6]. 기존 액화공정의 효율은 34%~37%이며, 하루 1 T/D의 용량을 기준 할 때 소요동력은 0.485MW, 10T/D는 4.53MW, 30T/D는 13.29MW의 동력이 소요되고 있으며, 용량이 클수록 단위 액체량 당 소요 동력이 감소하게 된다.

#### 3.2. LNG냉열이용 공정 설계

본 연구에서 설계하고자 하는 공정 용량은 하루 1 Ton(40kg/h) 규모로 하였으며 수소를 액화시키는 냉동시스템은 수소를 작동유체로 하는 밀폐사이클(지점 21→52)로 하였다. 이는 헬륨을 작동유체로 하는 시스템 보다 콤팩트화 될 수 있는 장점을 갖는다. LNG의 기화온도는 대기압에서 -160.3℃, 3.2MPa에서는 -90℃, 7.5MPa는 -56℃로 하였다.

설계 흐름도(Flow diagram)와 각 지점의 조건은 Fig. 2, 3과 같다. 흐름도의 Fig. 2는 LNG냉열을 이용한 Feed 수소가스의 예냉공정이며, Fig. 3은 예냉된 수소가스가 다단의 열교환기를 거쳐 액화되는 공정

으로 편의상 2개의 공정도로 구분하였다.

먼저, 수소를 냉각, 액화시키는 공정인 밀폐사이클의 작동유체 수소는 40kg/cm<sup>2</sup>까지 압축(공정 22→26)된 후 LNG냉열에 의하여 -150℃까지 온도를 저하(지점 26→28)시킨다. 밀폐사이클에는 2개의 팽창터빈(E1, E2)을 적용하여, E1 팽창기에 필폐순환수소의 59%를 팽창시켜 저온의 수소가스를 제조하여 압축기로 반송(지점 50→24)되면서 Feed 수소를 냉각시킨다. E2 팽창기(지점 34→35)는 압력 40kg/cm<sup>2</sup>에서 1kg/cm<sup>2</sup>까지 팽창시켜 건도 28%, 즉 액체 72%

를 생성시켜, 이 냉에너지를 이용하여 냉각된 Feed 수소(지점 8→10)를 과냉시키게 된다.

한편, 주입되는 수소의 조건은 천연가스로부터 수소가스가 스팀개질에 의하여 제조되는 것으로 간주하였다. 즉, 개질의 압력은 1.0~ 2.8MPa로 Feed 되는 수소의 주입압력(지점 1)은 20kg/cm<sup>2</sup>로 하였다. 액화될 Feed수소가스는 LNG냉열에 의하여 -150℃까지 예냉 (지점 1→2', 2'→4)과정으로 온도가 저하된 후 Fig. 2와 Fig. 3의 CEX1~CEX7 열교환기(지점 3→8)를 거친다. 여기서 CEX는 축매층을 갖춘 열교환 공정을 의미한다. 이 공정은 수소의 액화를 위한 냉각 및 잠열제거 및 Ortho-para 변환을 위한 열제거가 수행된다.

Fig. 3의 점선 부(지점 4→8)는 열손실을 막기 위하여 하나의 단열조(Cold box)에 설치하는 것으로 하였다. Fig. 2와 Fig. 3에서 열교환이 다수개의 열교환기로 구성되는 것은 단위 열교환기 당 적정 열용량을 고려하여 설계한 것이다. 최종 단계인 그림 3의 지점 10에서 팽창밸브를 통하여 등엔탈피 팽창을 시키게 된다. 팽창은 20kg/cm<sup>2</sup>에서 1kg/cm<sup>2</sup>으로 감압되면서 건도는 18%가 생성되어 액체수소가 82% 수율로 얻어지게 된다.

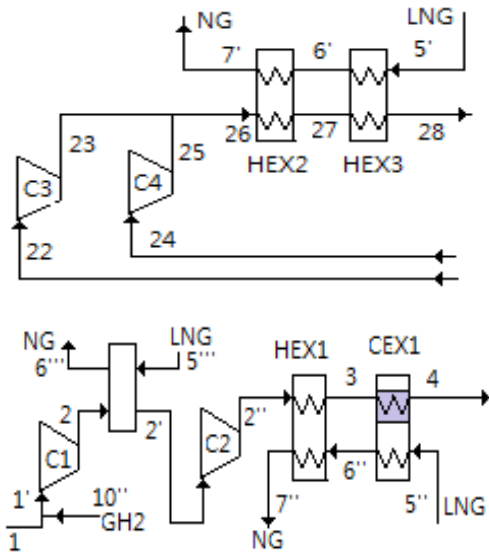


Fig. 2. Flow diagram of hydrogen precooling process using LNG cold energy(1).

Table 3. Condition of each point of Fig. 2 process

	1	10''	1'	2	2'	2''	2'''
T(°C)	25	-253	-20	86	-20	25	-156
P(kg/cm <sup>2</sup> )	1	1	1	10	10	20	75
Flowrate(kg/h)	42.8	9.5	52.3	52.3	52.3	52.3	188
Quality	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0

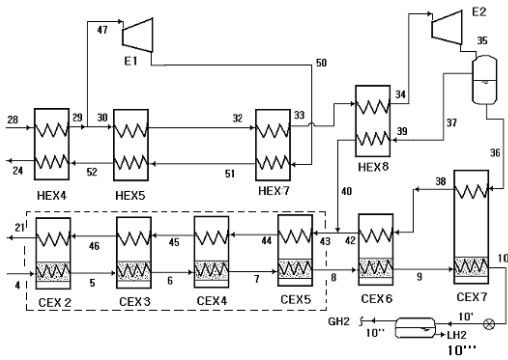


Fig. 3. Flow diagram of hydrogen liquefaction process using LNG cold energy(2).

	5'''	6'''	3	4	5''	6''	7''	22(21)	23'
T(°C)	-156	-40	-85	-150	-155	-95	-40	-156	-20
P(kg/cm <sup>2</sup> )	75	75	20	20	75	75	75	1	40
Flowrate(kg/h)	188	188	52.3	52.3	220	220	220	43.3	43.3
Quality	0	1.0	1.0	1.0	0	0.57	1.0	1.0	1.0

	24	25	26	27	28	5'	6'	7'
T(°C)	-160	-20	-20	-85	-150	-156	-95	-40
P(kg/cm <sup>2</sup> )	1	40	40	40	40	75	75	75
Flowrate(kg/h)	62.7	62.7	106	106	106	220	220	220
Quality	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0.57	1.0

Table 4. Condition of each point of Fig. 3 liquefaction process

	5	6	7	8	9	10	10'	10''	10'''	29	30	32	33	34	35
T(°C)	-177	-195	-214	-230	-238	-245	-253	-253	-253	-190	-190	-207	-232	-235	-253
P(kg/cm <sup>2</sup> )	20	20	20	20	20	20	1	1	1	40	40	40	40	40	1
Flowrate(kg/h)	52.3	52.3	52.3	52.3	52.3	52.3	52.3	9.5	42.8	106	43.3	43.3	43.3	43.3	43.3
Quality	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.18	1.0	0	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0.28

	36	37	38	40	42	43	44	45	46	47	50	51	52
T(°C)	-253	-253	-246	-234	-236	-237	-219	-200	-182	-190	-244	-214	-201
P(kg/cm <sup>2</sup> )	1	1	1	1	1	1	1	1	1	40	1	1	1
Flowrate(kg/h)	31.1	12.2	31.1	12.2	31.1	43.3	43.3	43.3	43.3	62.7	62.7	62.7	62.7
Quality	0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

3.3. LNG냉열이용 수소액화공정 소요동력

본 LNG냉열이용 수소액화공정 설계에 의한 소요 동력은 예냉에 필요한 질소 압축공정이 불필요하기 때문에 기존 공정과는 달리 동력소요가 적은 장점을 갖는다. LNG냉열이용 수소액화공정의 압축기는 총 4기로 Fig.2의 Feed 수소가스를 압축하는 C1, C2 압축기, 그리고 밀폐사이클의 순환수소 가스압축기인 C3, C4 압축기가 소요된다. C1압축기(지점 1'→2)는 고온이므로 중간 LNG냉열이용 냉각식 2단 압축으로 하였으며, 소요동력은 37.5kW 2기로 75kW(효율 70%)가 소요된다. 밀폐사이클의 C3압축기(지점 22→23)는 20kW, C4압축기(지점 24→25)는 29.6kW가 각각 소요된다. 그러므로 총 소요동력은 124.6kW로 표 2의 기존 시스템 소요동력인 485kW의 25.7%에 불과하게 된다. 이는 예냉을 위한 액체질소 동력이 크게 절감되기 때문이다. 이에 따른 소요 LNG 냉열량을 보면 Feed 압축기 냉각용 188Kg/h, 밀폐사이클용 440kg/h로 총 628kg/h (15T/D)가 요구된다.

VI. 결론

수소액화 공정 중 예냉 소요에너지에 LNG냉열을 적용하면 수소액화공정의 에너지절약 효과와 함께, 해수에 버려지는 LNG냉열을 회수하는 일석이조의 에너지절약기술이 된다. 본 연구에서는 LNG냉열이용 수소액화공정을 설계, 열해석을 수행한 결과 다

음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현재의 액체질소 예냉식 수소액화 플랜트의 소요에너지에 비하여 LNG냉열을 이용할 경우 소요동력량은 25.7%로 75%가 절감되었다.
- 2) LNG 소요냉열량은 수소액화량 1T/D을 기준할 때 15T/D의 LNG 유량이 보유하고 있는 냉열이 소요되었다.

참고문헌

- [1] A. Bouza, etc., *Hydrogen Storage*, Annual DOE Hydrogen Program Review, (2004)
- [2] Linde Co., *Technical Information for a 150L/h Hydrogen Liquefaction Plant*, (2006)
- [3] C. Mitsugi A. Harumi, F. Kenzo, "WE-NET: Japanese Hydrogen Program", *Int. J. Hydrogen Energy*, **23**(3), 159-165, (1998)
- [4] 한국가스공사, LNG플랜트 핸드북, (2006)
- [5] S. Krasae-in, J. H. Stang, P. Neksa, "Development of Large-scale Hydrogen Liquefaction Processes from 1898 to 2009", *Int. J. Hydrogen Energy*, **35**(10), 4524-4533, (2010)
- [6] www.ena.or.jp/WE-NET, New Energy and Industrial Technology Development Organization(NEDO).