

# LNG-FPSO용 천연가스 전처리 기술 개발

지현우<sup>†</sup>, 이선근, 정제호\*, 민광준, 김미진

GS건설(주) 기술본부 GS건설기술연구소, \*GS건설(주) 플랜트사업본부

## Development of the Pre-treatment Technology for LNG-FPSO

Hyun-Woo Jee<sup>†</sup>, Sun-Keun Lee, Je-Ho Jung\*, Kwang-Joon Min, Mi-Jin Kim

GS E&C Technology Research Institute, Technology Division,

GS Engineering & Construction, Yongin 449-831, Korea

\*Plant Business Division, GS Engineering & Construction, Seoul 100-722, Korea

(Received July 15, 2013; revision received August 6, 2013)

**초 록** : 지속적인 유가 상승과 환경규약 및 안전성, NIMBY현상 등의 문제로 해상 가스전에 대한 관심이 높아지고 있다. LNG-FPSO는 해양 가스전에서 채취된 천연가스의 불순물을 제거하고, condensate와 LPG를 회수하며, 정제된 가스를 이송 가능한 형태로 액화시키는 최첨단 해양플랜트이다. 반면 작업 시 해상 환경에 많은 영향을 받으므로 선체 운동을 고려한 전처리 공정 효율을 파악하고 설계에 반영해야 한다. 본 연구는 LNG-FPSO의 선체 운동 영향 및 제한된 선상 공간의 최적화를 고려한 해상 전처리 기술을 개발하기 위한 기초 연구이다. 이에 아민 흡수공정과 멤브레인 공정을 혼합한 hybrid 공정을 검토하였으며, 일반 아민흡수공정에 비하여 낮은 용매 순환량, 낮은 열용량, 작은 컬럼 크기가 요구되어 해상용 전처리 공정에 적합함을 확인하였다. 이것은 또한 6자유도 운동 실험 및 CFD 해석을 병행하여 시뮬레이션을 가시화함으로써 다양한 해상상태에 따른 LNG-FPSO의 공정 효율을 검토할 수 있다.

**ABSTRACT** : Submarine gas fields have focused because of the increasing fuel cost, the environmental regulations, and the safety & NIMBY problems. LNG-FPSO which is available for acid gas removal, recovery of the condensate & LPG and Liquefaction in topside process is one of high technology offshore structures. On the other hands, it is necessary to verify the pre-treatment efficiency by the ship motion and to apply to the design for LNG-FPSO. This study is to develop the pre-treatment technology for LNG-FPSO as taking account to the process efficiency by ship motion effects and the area optimization. Based on the simulation results, it finds that hybrid process shows the low circulate rate, the low heat duty and the small size of column dimensions compared to typical amine process. It will be verified the process efficiency in the various conditions by sea states as performing the 6-DOF motion test and CFD simulation.

**Key words** : LNG-FPSO(부유식 액화천연가스 생산·저장·하역 설비), pre-treatment(전처리), hybrid process(복합 공정), ship motion(선체 운동), Computerized Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학)

### 1. 서 론

#### 1.1 개요

천연가스를 액화시켜 이송하는 방식은 종래의 pipe-line을 통하여 가스를 이송하는 방식에 비하여 더욱 경제적이고, 안전성이 높으며, 계절 및 일시적인 수요에 유연하게 대응할 수 있는 장점이 있어 미래 가치가 높다<sup>[1]</sup>. 육상용 LNG 플랜트는 상업성이 높은 대형 가스전이지만 이미 대부분 개발되어 사용되고 있는 반면, 최근 경제성이 증가하고 있는 중규모의 가스전은 신규 사업 진출에

<sup>†</sup> Corresponding author  
2013 Korea Institute of Plant Engineering & Construction  
E-mail address: hwjee01@gsconst.co.kr

용이하고 70% 정도가 해상에 위치하고 있어 석유업계에 서는 해상 중소형 가스전을 효과적으로 활용할 수 있는 LNG-FPSO(LNG-Floating, Production, Storage and Offloading) 개발에 박차를 가하고 있다.

본 연구는 LNG-FPSO용 천연가스 해상 전처리 공정 기술 개발로서 고농도의 산성가스를 효율적이고 경제적으로 제거하며, 선체 운동에 따른 성능 저하를 최소화함과 동시에 제한된 선상 공간을 최소화할 수 있도록 초점을 맞추고 있다.

## 1.2 LNG-FPSO의 개념 및 특징

LNG-FPSO는 해상 가스전에서 채취한 천연가스의 불순물을 정제하고, 액화시켜 부피를 약 1/600로 줄임으로써 저장 및 수송효율을 높이며, 자체적으로 LNG carrier에 하역(off-loading)할 수 있는 최첨단 해양플랜트이다<sup>4)</sup>.

LNG-FPSO가 채취하는 천연가스는 메탄을 주성분으로 에탄, 프로판, 부탄 등으로 구성된 혼합물이며, 해저에서 채취 시 질소, 탄산가스, 유황분 등 미량의 불순물이 함유되어 있다. 이러한 산성가스와 수분 및 수은 등을 전처리 공정을 통하여 제거하고 중질분을 분리한 후 액화공정에서 LNG로 액화한다<sup>7)</sup>.

한편 해상 천연가스 전처리 공정은 선상의 제한된 공간과 해상상태에 많은 영향을 받으므로, 공간 최적화 및 선체 운동에 의한 Column maldistribution 효과 등을 고려하여 LNG-FPSO 설계 시에 반영되어야 한다. 이에 공간을 최적화할 수 있는 분리·정제 기술을 선정하고, 목표하는 사양에 맞춰 기술을 개발함이 필요하다. 또한 선체 운동에 주요한 영향을 미치는 i) 해양환경(파도, 조류, 파랑 등), ii) cargo tank loading 상태, iii) topside 탑재 구조물의 위치 검토가 필요하며, 특히 유의파고(significant wave height) 및 파 주기(wave period)에 따른 선체 경사(tilt) 및 운동(motion)이 builder의 guarantee 범위 내에서 공정 효율 저하에 얼마나 영향을 미치는지 반드시 검토되어야 한다.

본 연구는 LNG-FPSO 전처리 기술을 개발하기 위하여, 공정 효율 및 공간 최적화에 적합한 hybrid 공정을 검토하였으며 선체 운동에 대한 실험 및 CFD 해석의 필요성에 대하여 설명한다.

## 2. LNG-FPSO 전처리 공정

### 2.1 천연가스 전처리 공정

LNG-FPSO topside 공정은 천연가스에 포함되어 있는 산성가스와 수분 및 수은 등의 불순물을 제거하는 전처리 공정과 에탄, 프로판 및 부탄 성분 등을 회수하는 공정, 그리고 탈메탄탑 상부의 주성분인 메탄을 액화시키는 공정으로 크게 나눌 수 있다<sup>1)</sup>.

천연가스 전처리 공정 중 가장 주요한 공정으로, 천연가스 중에 포함되어 있는 이산화탄소와 황화수소 등을 제거하는 산성가스 제거공정(AGRU: Acid Gas Removal Unit)이 있으며, 일반적으로 흡수법, 흡착법, 심냉분리법, 막분리법, hybrid 공정 등이 있다<sup>6)</sup>. 현재 산성가스 제거공정은 대부분이 용매 흡수법으로, 흡수제로는 화학적 흡수제, 물리적 흡수제 및 혼합 아민을 이용한 흡수제 등이 있다<sup>6)</sup>.

본 연구는 경제적·효율적으로 우수한 LNG-FPSO용 전처리 공정을 개발하기 위하여, 일반적인 아민흡수공정과 막분리법을 적용한 hybrid 공정에 대하여 전산모사(PRO/II v.9.1 사용)를 수행하였으며 열역학식은 아민공정에 amine package를 사용하고, 막분리법에 SRK(Soave Redlich Kwong)를 사용하였다.

### 2.2 Hybrid 공정

Hybrid 공정은 막분리법과 아민흡수법의 단점을 상호 보완하면서 다양한 해양가스전의 천연가스 조성에 쉽게 적용이 가능하고, LNG-FPSO의 선상부(topside)의 제한된 공간을 최대한 효율적으로 이용할 수 있는 복합 공정이다. 본 연구에서 hybrid 공정으로 정제된 sweet gas는 CO<sub>2</sub> 50 ppm 이하, H<sub>2</sub>S는 3 ppm 이하를 목표로 하고 있다. 이것을 통하여 에너지 소비량 및 컬럼 크기를 최소화함으로써 LNG-FPSO용으로 적합한 전처리 공정을 개발한다.

기존의 아민흡수공정은 reboiler나 pump 등에서 발생하는 duty와 work로 인하여 에너지 소비량이 많으나, hybrid 공정은 아민흡수공정의 전단에 막분리공정을 적용하여 일부 이산화탄소를 제거해 줌으로써, 아민흡수

공정에서의 이산화탄소 부하(load)를 줄여 전체적인 에너지 절감 및 경제성을 높여 준다(Fig. 1, Table 2). 또한 산성가스 제거를 위한 아민흡수제의 양이 줄어들어 흡수탑 및 재생탑의 크기(column 높이 및 직경)를 줄여줌으로써 LNG-FPSO 선상부의 제한된 공간을 최대한 이용할 수 있다<sup>[5]</sup>.

Table 2, 3은 Table 1의 feed stream 조건을 사용하여 공정모사를 수행한 결과이며, 일반적인 아민흡수공정과 비교하였다. 흡수탑의 CO<sub>2</sub> 농도 제거량, 용매순환량

(solvent circulation rate), reboiler duty를 비교해 볼 때, hybrid 공정의 우수함을 알 수 있다(Table 2). 또한, 흡수탑의 컬럼 크기도 일반 아민공정에 비하여 약 15% 정도 줄었다(Table 3).

따라서 hybrid 공정은 메탄 회수율을 향상시키고, CO<sub>2</sub> 제거 및 용매 순환량 감소에도 효과적이며, 흡수 컬럼 크기를 줄여 공간의 최적화를 가능하게 함을 확인할 수 있다.

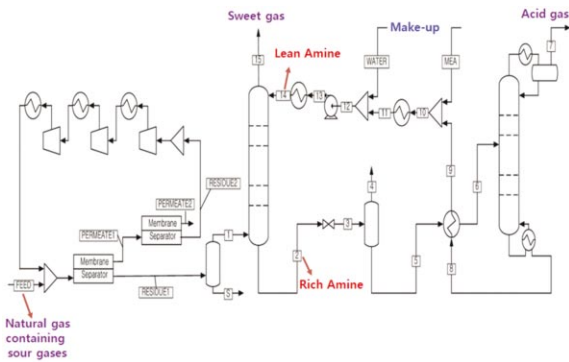


Fig. 1 Process schematic for a hybrid process (Membrane - amine absorption process)

Table 1 The condition of feed stream

Component	Mole fraction (Mol%)
N <sub>2</sub>	0.0027
CO <sub>2</sub>	0.1500
CH <sub>4</sub>	0.7614
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.0501
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.0170
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.0029
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.0049
Trace	0.0110
Total	1.0000
<b>Contents</b>	<b>Value</b>
Temperature (°C)	45
Pressure (bar)	60
Flow rate (ton/hr)	467

Table 2 The comparison of main results between a typical amine process and hybrid process

	Amine process	Hybrid process (2stage)
Solvent	MEA	MEA
Solvent concentration (wt%)	30	30
Lean amine CO <sub>2</sub> loading	0.12	0.12
Rich amine CO <sub>2</sub> loading	0.68	0.64
CO <sub>2</sub> at absorber top (ppm)	48.90	48.67
Solvent circulation rate (kg/hr)	1,164,600	743,008
Reg-ene-rator	Bottom temp (°C)	111.70
	Top pressure (bar)	1.10
	Reboiler duty (Mkcal/hr)	148.82
Compressor actual work (kW)	-	2,608
Compressor duty (Mkcal/hr)	-	5.90

Table 3 The comparison of the absorption column sizing between a typical amine process and hybrid process

Tray	Design diameter (mm)	
	Amine process	Hybrid process (2stage)
1	4,095	3,491
2	4,459	3,733
3	4,534	3,780
4	4,543	3,783
5	4,539	3,776
6	4,485	3,751

### 3. 선체 운동 실험 및 해석

해저 3000 m 이상의 심해에서 작업이 수행되는 LNG-FPSO는 해상상태(sea state)에 따라 작업성과 안정 및 안전성에 큰 영향을 받는다. 이에, 장·단기 해양파의 주파수와 LNG-FPSO의 고유주파수(natural frequency)가 만나 공진(resonance)이 발생되지 않도록 설계되어야 하며<sup>[3]</sup>, 이로 인한 sprit level effect, 1st & 2nd turbulence에 따른 영향에 주의해야 한다.

한편, LNG-FPSO의 흡수탑과 같이 구조물 자체의 무게중심과 선체의 무게중심과의 거리가 멀리 떨어져 관성반경이 커짐으로써 과도한 가속도가 걸리는 구조물은 선체 운동에 따라 내부 유동 및 공정에도 영향을 미치므로 반드시 공정 효율에 대한 검토가 필요하다.

흡수탑이 경사진 상태에서 sweet gas가 CO<sub>2</sub>의 기준(50 ppm 이하)을 충족하려면 amine 용액 양이 30% 증가하게 됨을 공정모사를 통하여 확인할 수 있으며, 따라서 선체 운동영향에 대한 검토가 필요함을 알 수 있다.

Waldie et al.<sup>[8]</sup>에 의하면, liquid distribution에 영향을 미치는 요인은 i) motion or tilt 각도, ii) 파 주기(wave period), iii) 컬럼 직경, iv) packing bed의 수직 위치 및 길이, v) 흡수제의 표면장력 등이 있다.

Waldie et al.<sup>[8]</sup>는 motion or tilt 상태에서 컬럼의 maldistribution을 측정할 수 있도록 컬럼 하부에 컬렉터(collector)를 설치하고, collection cell에 전도 계량기(conductivity meter)를 연결함으로써, 시간 및 위치에 따른 liquid 축적 수위(level), 플럭스(flux) 및 유량(flow

rate) 등을 측정하였다(Fig. 2).

본 연구의 다음 단계에서는 선체 운동에 따른 흡수탑 공정 효율을 알아보기 위하여, 먼저 물과 공기를 이용한 maldistribution test를 수행함으로써 컬럼 내부에서의 유체 흐름 및 불균일도를 검토할 예정이다. 또한 실제 amine absorption column을 6자유도 운동을 구현할 수 있는 sloshing facility에 얹어, 화학 반응까지 고려한 실험을 통하여 실제 현상을 구현할 계획에 있다.

이러한 선체 운동 실험을 통하여 얻을 수 있는 유동의 특성을 수식화하여, 전산유체역학(CFD) 해석 모델에 적용함으로써 다양한 해상상태에 따른 조건(motion 및 tilt 각도, 파 주기)을 보다 경제적으로 얻어낼 수 있다. 또한 실험에서 발생할 수 있는 위험(유독가스 방출 등)을 방지할 수 있으며, 실험장비 크기에 따른 공간적 제약도 완화할 수 있다.

### 4. 결론

LNG-FPSO용 천연가스 전처리 기술을 개발하기 위하여 hybrid 공정을 적용함으로써, 기존의 아민흡수공정보다 용매 순환량, 열용량 등이 좋아짐을 공정모사를 통하여 확인하였으며, 이를 통하여 컬럼 크기도 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 한편, LNG-FPSO가 해상상태에 영향을 많이 받는 특성을 고려하여 motion 및 tilt 상태에서 흡수 공정 효율을 검토하기 위한 실험이 필요하다. 또한 실험에서 얻은 유동의 특성값을 이용하여 CFD 해석을 수행하면, 높은 경제성으로 다양한 해상조건을 고려할 수 있고, 위험도를 낮출 수 있으며, scale effect 최소화할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 국토교통부 LNG 플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Cho, J., 2010, Introduction of pre-treatment of natural gas & NGL recovery and liquefaction process, CHERIC.
2. DNV, 2012, FLNG System Course, DNV Aca-

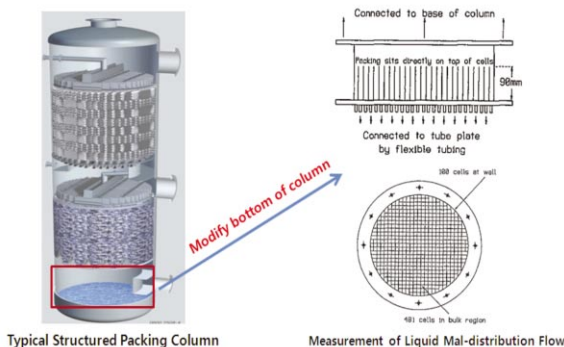


Fig. 3 Liquid mal-distribution test

- demy.
3. Jee, H.W., Park, B.J., Jeong, S.G., Choi, Y.D., Hong, S.W., Sung, H.G., Cho, S.K., 2011, Study on Ship Motion Analysis of Turret-Moored LNG FSRU Compared with Model Test, Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, pp.127-132.
  4. Jee, H.W., Jeong, J.H., Min, K.J., Kim, M.J., Lim, D.H., 2012, A Study for Development of LNG-FPSO Topside Pre-treatment Process, p.36.
  5. Jeong, J.H., Min, K.J., Kwon, O.H., Jee, H.W., Kim, M.J., Lim, D.H., 2012, Development of membrane-absorption hybrid process for the acid gas removal in LNG-FPSO, Korea Institute of Plant Engineering & Construction.
  6. Kim, M.J., 2012, A study on the acid gas removal process using aqueous solvent, Kongju National University.
  7. Lee, S.G., 2012, Technical Trend for LNG-FPSO, Korean Society of Marine Engineering, Vol.36, No.1, pp.608-624.
  8. Waldie, B., Kalbassi, M.A. and White, V., 2004, Liquid Distribution From Structured Packings Under Tilt and Motion Relevant To Floating Cryogenic Separation Plants, AIChE Distillation Meeting, New Orleans.