

LNG 생산과 냉열 이용

윤 상 국, 김 영 일*
한국해양대학교, 한국과학기술연구원*

1. 서 론

우리가 사용하는 에너지의 대부분은 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료로 총 에너지원의 85%를 넘는다. 그러나 그 양이 한정되어 있고 환경 문제를 유발하고 있어 재생 가능한 에너지 자원의 개발이 시급한 실정이다. 가장 널리 쓰이는 원유의 남은 매장량은 1조 배럴 정도로 앞으로 약 40년간 사용 가능한 분량이다. 석탄은 200년 (1 조ton), 천연가스는 60년 (146 조m³) 동안 사용할 수 있는 양이 남아있다고 알려져 있다. 이러한 화석연료가 전부 고갈되는 날이면 인류는 역사상 최대의 위기를 맞이하게 되며 생존 자체를 위협받게 될 것이다. 에너지 문제를 해결하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데 하나는 대체에너지를 개발하는 것이고, 다른 하나는 남아있는 에너지를 효율적으로 사용하여 그 사용 기간을 좀 더 오래 연장하는 것이다. 대체에너지 개발은 인류의 영원한 숙제이며 이 방면으로는 핵융합, 태양열, 풍력, 지열, 바이오 에너지 등이 고려되고 있다. 에너지를 효율적으로 이용하는 방안은 에너지 이용기기의 효율을 향상시키거나 주변에서 미활용되고 있는 에너지를 활용하는 것이다. 우리나라는 최근 LNG(liquified natural gas, 천연액화가스)의 사용량이 증가하고 있는데, LNG 냉열을 유용하게 사용할 경우 많은 에너지가 절약될 수 있다. 본 원고에서는 천연가스로부터 LNG를 생산하는 공정기술과, LNG를 도입한 후 그 극저온의 LNG가 가스화 되어 소비자에게 공급될 때 기화 저온에너지(냉열)를 이용하는 기술을 소개하고자 한다.

우리나라는 에너지자원의 97%를 수입한다. Table 1은 우리나라 1차 에너지의 소비량을 나타내고 있다. 가장 많이 사용하는 순서로는 석유, 석탄, 원자력, LNG, 기타 그리고 수력이다. 우리나라의 경우 석유는 해

다 비율이 조금씩 감소하고 있지만 아직도 전체의 반 정도를 차지하는 중요한 에너지원이다. 석탄은 주택용으로는 그 수요가 급격히 감소하였지만 발전과 산업 현장에서는 아직도 널리 사용되고 있으며 현재 전체의 20%를 약간 상회하는 중요한 에너지원이다. 2001년 기준 LNG 사용량은 전체의 10.5%를 차지하고 있으며 그 장점 때문에 해마다 비율이 증가하고 있다. 1999년부터 2001년까지 2년 동안의 전체 1차 에너지의 평균 증가율은 약 4.6%인데 반하여 동기간 LNG의 평균 증가율은 11.1%이었다. 1998년 1차 에너지 소비량은 전년도에 비하여 감소하였는데 이는 IMF의 영향으로 경제가 위축되어 에너지 소비량도 그 영향으로 감소하였기 때문이다.

Table 1. 우리나라의 1차 에너지 소비량 (백만TOE) (괄호 안은 비율, %)

년도 \ 에너지원	1997	1998	1999	2000	2001
석탄	34.8 (19.3)	36.0 (21.7)	38.2 (21.0)	42.9 (22.2)	45.7 (23.0)
석유	109.1 (60.4)	90.6 (54.6)	97.3 (53.6)	100.3 (52.0)	100.4 (50.6)
수력	1.4 (0.7)	1.5 (0.9)	1.5 (0.8)	1.4 (0.7)	1.0 (0.5)
원자력	19.3 (10.7)	22.4 (13.5)	25.8 (14.2)	27.2 (14.1)	28.0 (14.1)
LNG	14.8 (8.2)	13.8 (8.3)	16.8 (9.3)	18.9 (9.8)	20.8 (10.5)
기타	1.3 (0.7)	1.5 (0.9)	1.8 (1.0)	2.1 (1.1)	2.5 (1.2)
소계	180.6 (100.0)	165.9 (100.0)	181.4 (100.0)	192.9 (100.0)	198.4 (100.0)

2. LNG 현황

1980년대부터 청정 에너지원으로 널리 사용되고 있는 천연가스는 중동지역, 동남아시아, 호주 등에서 생산되고 있다. 천연가스는 천연적으로 생성된 가스로 지하의 탄화수

소계 기름 성분이 지열에 의하여 분해되어 가스화 된 것이다. 그 성분은 제일 가벼운 메탄(CH₄) 90%, 에탄 8% 그리고 프로판과 부탄가스로 이루어져 있다. 산지의 천연가스는 이러한 가스들 외에 황, 질소, 인, 수분 등 많은 불순물이 포함되어 있으나 액화 과정에서 제거되고 순수한 탄화수소 가스만이 생산된다. 천연가스는 메탄이 90% 정도 포함되어 있으므로 통상 천연가스의 액화점은 메탄가스와 동일하게 대기압에서 -162℃이다. 이 천연가스가 액화된 것을 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)라 한다.

-162℃의 극저온 유체를 취급하기 위하여는 초저온 설비 및 재료기술이 중요하게 된다. 이 중요성은 1944년에 발생한 미국 Cleveland에서의 대규모 도시 폭발사고로 130여명의 인명사고와 함께 인지되었다. 그 원인은 탄소강으로 제작한 저장탱크의 균열에 의하여 액체메탄이 도시 하수관 등으로 흘러 들어간 때문이었다. 그 이후 극저온 유체의 생산, 저장, 운송 등 이용 및 취급을 위한 제반 기술개발이 이루어져 현재의 LNG 교역에 적용되고 있다.

우리나라는 1986년 10월 처음으로 인도네시아로부터 LNG를 도입한 이래 해마다 도입량이 증가하여 2002년에는 1700만톤을 수입하였으며 그 장점 때문에 해마다 LNG 사용량이 증가하고 있다. 1999년부터 2002년까지 3년 동안 LNG 사용량의 평균 연간 증가율은 11.8%이다. 이는 다른 에너지원에 비하여 증가율이 높아 향후 LNG가 에너지원으로 차지하는 위상은 더 높아질 전망이다. LNG는 공기보다 가볍기 때문에 누설시 대기 중으로 날아가므로 공기보다 무거운 타 연료가스에 비하여 위험성이 적다. 최근에는 LNG 가스관이 국내 각 지역에 공급되어 있어 사용시 배관만 연결하여 밸브만 열면 되므로 이용이 편리하다. 액화석유나 LPG의 경우 저장탱크에 저장하여 이동하여야 하는데 이러한 방식에 비하여 매우 편리하다.

Table 2는 우리나라의 LNG 사용량을 보여주고 있다. LNG의 최초 도입 목적은 발전용이었으나 현재는 난방용으로도 많이 사용되고 있다. 2002년 기준 주택용으로 34.4%를 사용하고 있는데 이는 주로 난방과 취사용이다. LNG는 난방용으로 널리 활용되므로 겨울철에는 소비량이 많으나 여름철에는 소비

량이 감소한다. LNG는 저장에 많은 비용이 발생하므로 공급자 입장에서는 계절 간에 나타나는 불균형 수요가 큰 문제점이 아닐 수 없다. 그동안 여름철에도 가스 수요를 촉진시킬 수 있는 각종 제도를 장려한 결과 표 2와 같이 최근에는 난방을 위한 LNG 수요가 전체의 약 10%를 차지하게 되었다. 이는 일정 규모의 건물에서는 흡수식 냉동기 또는 빙축열 시스템의 사용을 의무화하였고 또한 난방용 LNG의 가격을 낮춘 결과이다.

Table 2. 우리나라의 LNG 사용량 (만톤) (괄호 안은 비율, %)

년도 용도	1999	2000	2001	2002
주택	475.5 (37.6)	546.3 (38.4)	570.7 (36.6)	608.4 (34.4)
난방	116.4 (9.2)	138.4 (9.7)	161.4 (10.4)	176.5 (10.0)
산업	196.7 (15.5)	268.1 (18.9)	297.9 (19.1)	334.5 (18.9)
발전	476.9 (37.7)	468.9 (33.0)	528.8 (33.9)	650.9 (36.8)
소계	1265.5 (100.0)	1421.7 (100.0)	1558.8 (100.0)	1770.3 (100.0)

3. LNG 생산기술

천연가스 산지에서는 교역을 위하여 천연가스에 포함된 불순물을 제거한 다음 -162℃에서 액화시키며, 이 때 체적은 약 1/600로 감소하게 된다. 액화공정은 MCR, PRICO 그리고 TEALARC 공정이 있다.

가. MRC 액화공정

MRC(Mixed Refrigerant Cascade)공정은 Fig. 1과 같으며, 이 공정의 특징은 여러 개의 열교환기를 다단으로 설치하여 온도를 저하시키는 것이다. 먼저 불순물이 제거된 천연가스는 액체프로판과 열교환되면서 -35℃가 된 다음, 2, 3차 열교환기에서 질소, 메탄, 에탄, 프로판으로 구성된 혼합매체와 열교환되어 냉각되고 LNG로 액화된다. 열교환 혼합매체는 수냉식 2단 압축으로 40 bar까지 가압한 다음 JT 팽창밸브를 통하여 감압, 온도를 저하시킨다. 이 공정은 인도네시아 브르나이, 리비아, 알제리아 등지에 적용되고 있다.

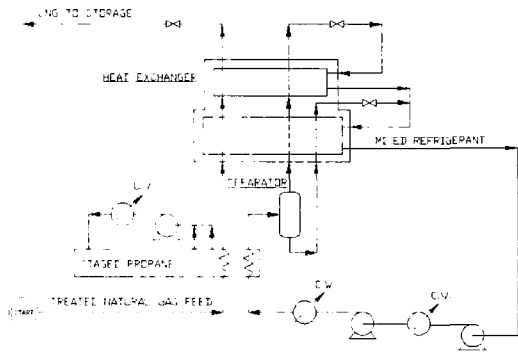


Fig. 1. MRC LNG 액화 공정도

나. PRICO 액화공정

Fig. 2의 PRICO 공정 특징은 냉각사이클이 저압의 밀폐사이클로 이루어진 반면, 주입되는 천연가스는 압력이 높게 된다. 밀폐 냉각사이클은 질소, 메탄, 에탄, 프로판이 혼합된 매체를 원심식 압축기를 적용하여 저압으로 압축한 다음 JT 팽창밸브를 이용하여 온도를 저하시킨다. 주입되는 천연가스는 50 bar까지 압축된 후 열교환되어 액화된다. 과정 중 액체프로판, 부탄 등의 분리 제조가 가능하게 된다. 이 공정은 침투부하 흡수용 LNG 생산공정으로 적용되고 있다.

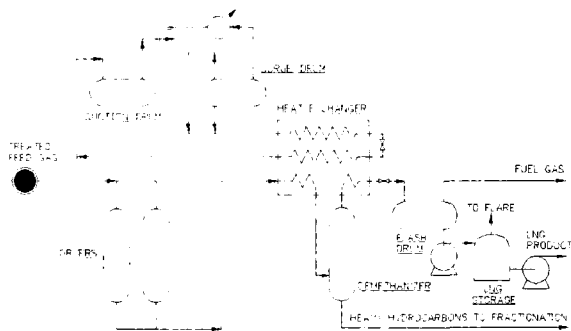


Fig. 2. PRICO LNG 액화 공정도

다. TEALARC 액화 공정

Fig. 3의 TEALARC 공정은 다단의 정류탑을 적용하여 온도를 저하시키는 방식이다. 열교환 매체는 MCR 등과 동일하게 혼합매체로 되어 있으나, 정류탑의 지점별로 혼합매체의 성분이 변하게 되어 기화온도가 다르

게 된다. 천연가스는 정류탑을 폐회로로 상승하면서 온도가 저하되어 액화된다. 이 공정은 프랑스 낭뜨, 캐나다 몬트리올, 알제리아 등지에 적용되고 있다.

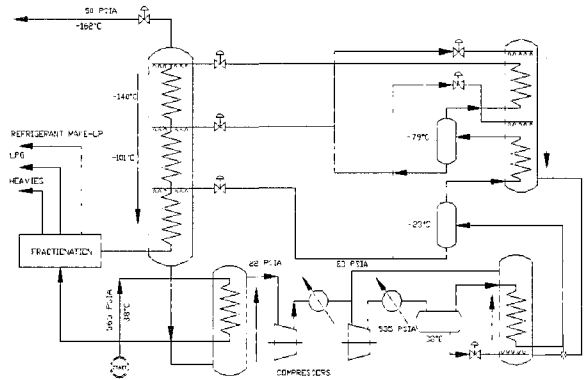


Fig. 3. TEALARC LNG 액화 공정도

4. 냉열 이용 기술

LNG는 -162℃의 저온으로 저장되므로 0℃까지 기화시 잠열과 현열을 포함하여 약 200 kcal/kg의 냉열을 사용할 수 있다. 이 냉열을 활용할 경우 냉동에 소요되는 막대한 동력을 절약할 수 있다. 냉열 이용 방법에는 LNG 인수기지 근방에 이용 설비를 건설하여 LNG의 저온액과 열교환하여 LNG 냉열을 직접 이용하는 방법과 여기에서 얻어진 저온 물질(예, 액체질소)을 원격지에 이송하여 그 냉열을 타 산업에 이용하는 간접 이용 방법이 있다.

Fig. 4는 LNG를 이용하는 과정을 보여 준다. LNG는 저장과 이동시 부피 감소를 위하여 -162℃로 냉각되어 액체로 저장되는데 이때 당초의 600분의 1로 체적이 감소된다. 수요처에는 가스 상태로 공급되어야 하므로 1차 펌프로 15 bar로 승압된 후 2차 펌프에 의하여 80 bar로 승압된 후 해수 기화기에서 해수와 열교환하여 기화된 후 70 bar로 주배관을 통하여 수요처로 공급된다. 해수와 열교환하면서 고급 에너지가 바다로 폐기되는데 -162℃의 액체 LNG 1 kg이 상온 0℃로 기화하는데 필요한 열량이 약 200 kcal이

로 1700만톤의 LNG 기화시 연간 약 3.4×10^{12} kcal의 냉열이 바다로 폐기되고 있는 셈이다. 이는 34만TOE에 해당하며 이는 우리나라 전체 사용 최종에너지의 0.21%에 해당하는 많은 양이다.

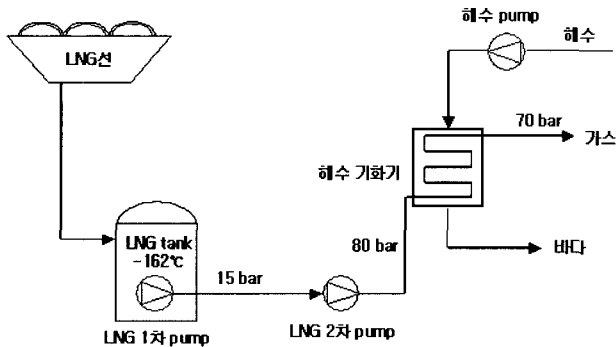


Fig. 4. LNG 이용 과정의 개략도

해수로 폐기되는 LNG 냉열 3.4×10^{12} kcal의 냉열을 전부 냉열 발전에 활용할 경우 열 효율을 30%라고 가정한다면 연간 1.675×10^9 kWh(1,675 억원)의 전력이 생산될 수 있다. LNG 냉열을 냉열 발전 분야 외에도 저온이 필요한 타 분야에 활용한다면 추가로 많은 양의 에너지 절약이 가능하다. LNG 냉열을 이용할 수 있는 분야로는 냉열 발전, 수소 액화 및 저장, 액체탄산 제조, 냉동 및 냉장, 지역냉방, 저온 분쇄, 동결 건조, 공기 액화 및 분리, 해수 담수, 저온 케이블 전송 등 무수히 많으며 각 분야마다 활용하는 온도 범위가 다르다. LNG 냉열을 이용할 때 각 분야의 온도 범위에 적합하게 순차적으로 활용할 경우 효율도 높아진다. LNG 냉열을 이용할 경우 막대한 양의 유효에너지가 생산되나 이를 실용화하기 위해서는 연구개발이 필요하다. 현재 국내 도입된 LNG로부터 버려지는 냉열량을 보면 연간 25만톤의 원유량에 이른다.

LNG 냉열 이용이란 Fig. 5처럼 이 해수 대신에 저온을 필요로 하는 산업에 LNG 냉열을 이용하는 것이다. Table 3은 대표적 LNG 도입국인 일본과 한국의 LNG 냉열 이용 현황을 보여준다.

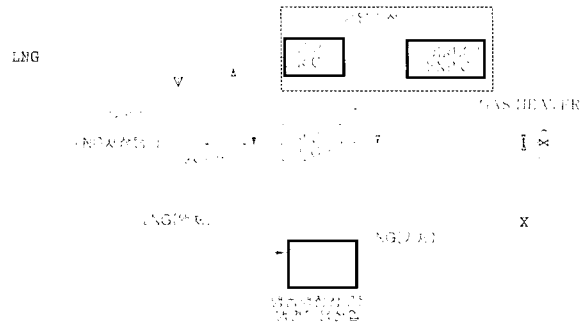


Fig. 5. LNG 냉열 이용 공정도

Table 3. 일본과 한국의 LNG 냉열 이용 현황

기술	플랜트명	회사명	용량	운전일	비고
냉열 발전	Negishi 외 3	Tokyo Gas Osaka Gas Toho Gas Kansai Electric Chubu Electric Kitakyushu LNG Tohoku Electric	4000 kW	'85.12	엔진사이클 직접냉방-엔진 엔진사이클 직접냉방-엔진 직접냉방-엔진 직접냉방-엔진 직접냉방
	Senbuku 외 2		6000 kW	'81.12	
	Chita LNG		1000 kW	'81.12	
	Himeji LNG		400 kW	'80.12	
	Yokachi LNG 외 2		7000 kW	'89.12	
	Tobada		9400 kW	'89.11	
	Nihonkai LNG		5600 kW	'84.6	
	공기 액화 분리 공장		평택인수기지	서울냉열(주) Tokyo Tokyo Cold Air Product	
Negishi		15,150Nm ³ /hr	'71.7		
Sodegaura		18,460Nm ³ /hr	'78.10		
Senbuku 외 2		15,200Nm ³ /hr	'82.12		
냉동 저장	Negishi	Negishi Techno Utility Co.	90 RT	'88.6	LNG이용: 4T/hr 쌀, 소스, 고기, 스프
저온 저장	Negishi	Japan Super of Freeze Co.	120 RT	'74.10	LNG: 7T/hr 용량: 20,000Ton
액화 탄산	Negishi 외 2	Tokyo Carbonic Co.	LCO2:86T/D Dryice:48T/D	'83.6	LNG: 6.4Nm ³ /hr
분쇄	-	Tire recycle Center	7,000 T/Y	'77.9	액체질소 사용

가. 냉열 발전

LNG 냉열을 이용하기 위해서는 -162°C 의 저온과 $0 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 범위의 상온과의 온도차를 이용하는 기술 개발이 필요하다. 이 온도차를 가장 유효하게 사용할 수 있는 방법이 냉열 발전인데 기존 방식과는 온도 범위가 상이하므로 실용화하기 위한 관련 기술 개발이 필요하다. 우선 저온에서의 금속 재료의 특성이 문제가 된다. -162°C 의 저온에서는 금속은 저온 취성 특성이 있다. 체심입방의 결정체적을 갖는 철강재료는 상온 이하의 저온 환경에서는 미끄럼 변형에 대한 저항은 급격히 커지지만 인장 응력은 조금밖에 증가하지 않는다. 따라서 미끄럼 변형은 어렵고 흡수 에너지가 작게 되므로 저온 취성이 발생한다. 이를 해결하기 위하여 다양한 성분이 첨

가되어야 하며 또한 재료의 물리적, 화학적 처리가 필요하다. 냉열 발전 시스템을 개발하기 위해서는 저온 사이클에 적합한 작동유체와 새로운 사이클이 개발되어야 한다. 운전 온도 범위와 작동유체가 달라지므로 발전 시스템의 핵심인 터빈도 새로 설계되어야 한다. 이와 아울러 저온용 응축기, 해수 가열기, 저온액체 펌프 등의 요소기술도 새로 개발되어야 한다. LNG를 이용한 냉열 발전 시스템은 폐기되는 LNG 냉열을 이용하여 유효한 전력을 생산하는 장점은 있으나 이를 실용화하기 위해서는 많은 분야의 연구개발이 필요하다.

LNG 냉열 발전은 폐기되는 냉열을 이용하여 유효한 전력을 생산할 수 있으므로 그만큼 발전설비의 신규 건설을 대체할 수 있다. 발전소 건설 비용을 절약할 수 있고 이산화탄소 배출량도 그만큼 감소시킬 수 있다. 최근에는 지역 주민들의 NIMBY (not in my back yard) 현상이 공공시설물의 건설에 큰 장애가 되고 있는데, 발전소 설비는 주민이 기피하는 대표적인 시설물 중 하나임을 고려할 때, 본 기술은 이러한 문제점도 예방할 수 있다.

일반적인 증기 발전 시스템은 물이 작동유체이며 화석연료 또는 원자력에너지로 물을 가열하여 고온, 고압의 증기를 생성시킨 후 증기터빈에서 팽창하면서 터빈을 회전시키면서 전기를 발생시킨다. 이 시스템의 주 동력은 증기를 가열하기 위한 열에너지이며 출력과 입력의 비인 열효율은 일반적으로 35%이다. 증기의 터빈 입구 온도를 400℃, 응축 온도를 50℃라고 가정하면 이론적인 최대 열효율은 카르노 사이클 (Carnot)이며 그 값은 52.0%이다. 각종 손실 때문에 실제 열효율은 35%이므로 카르노 사이클의 약 67.3%에 해당하는 값이 실제로 얻을 수 있는 열효율이다.

LNG 냉열 발전은 열 공급과 방출이 일반 증기 발전 시스템과는 다르다. 이 경우 작동유체의 가열은 무료로 얻을 수 있는 해수를 사용하고 응축시키기 위한 흡수열로는 LNG 냉열을 이용한다. 운전이 상온과 저온 사이에서 이루어지므로 물이 아닌 다른 매체가 사용되며 순수물질로는 프로판, 메탄, 에탄, 부탄, R22, R13, R23, 혼합물질로는 이들의 혼합물이 사용된다. 열교환시 작동 열매체

간의 온도차를 고려하여 고온측을 -10℃, 저온측을 -150℃라고 가정하면 카르노 사이클의 열효율은 53.2%로 고온과 저온의 온도차는 기존 증기 발전 시스템에 비하여 350℃에서 140℃로 감소했지만 열효율은 약간 더 크게 된다. 실제 열효율이 기존 증기 발전 시스템의 카르노 사이클에 대한 비율과 유사하다면 LNG 냉열 발전 시스템의 열효율은 약 36%가 된다.

냉열 발전을 분류하면 Fig. 6과 같다. 이중 Rankine + LNG 직접 팽창 사이클의 효율이 가장 높으며 Fig. 7은 이 사이클의 예를 보여 준다.

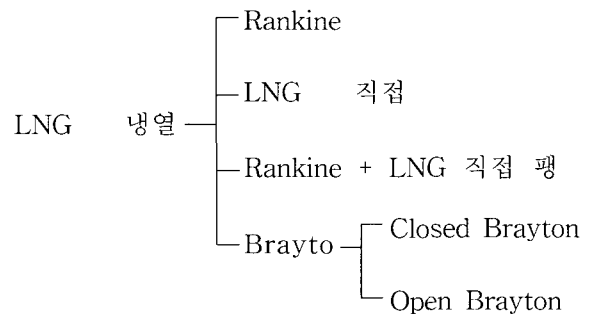


Fig. 6. LNG 이용 냉열 발전 방식

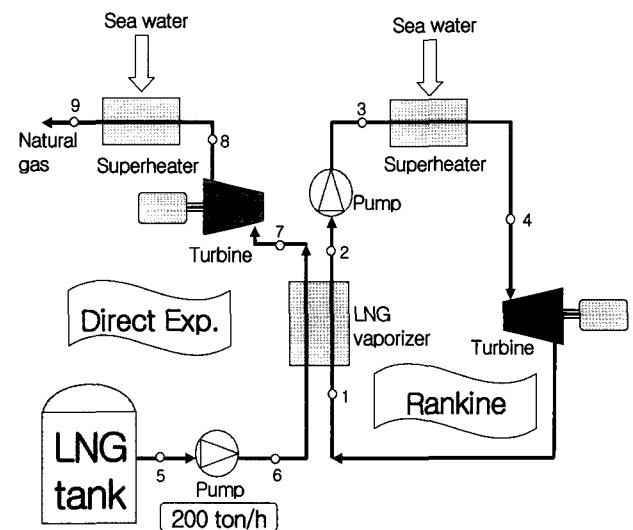


Fig. 7. Rankine과 직접팽창 복합 사이클 냉열 발전

나. 공기액화 분리

기존 공기액화 분리공정은 불순물이 제거된 공기를 압축기로 약 100~125 bar로 가압하여 열교환기를 거친 다음 정류탑에서 비점차로 -183℃의 액체 액체산소와 -196℃의 액체 질소를 분리 제조하게 된다. Fig. 8의 LNG 냉열 이용 공정은 -162℃의 냉열을 이용하여 분리하고자 하는 공기 온도를 강하시킬 뿐 아니라, 분리 공정 중 순환되는 60 bar의 질소가스 온도를 저하시키는 데 사용된다. 이 냉각된 고압의 질소가스는 JT 팽창을 통하여 액화되게 된다. LNG 냉열 이용 공정의 장점은 저압공정과 에너지절약에 있다. LNG 냉열공정은 기존 공정에 비교하여 운전비용이 1/2로 절감될 수 있다.

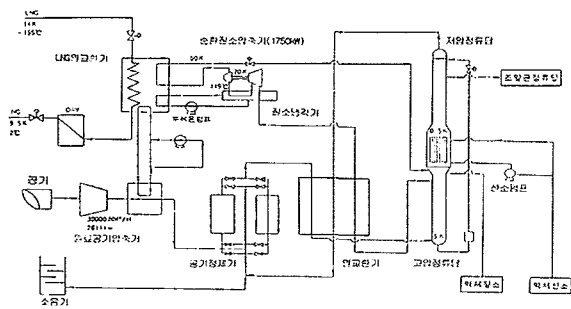


Fig. 8. LNG 냉열을 이용한 공기액화 분리 공정

다. 냉동냉장 창고

기존 냉동냉장 공정은 식품을 -40~0℃의 저온으로 저장하기 위하여 단단압축 냉동사이클을 적용하고 있다. 그러나 어류 중 참치의 선도를 유지하는 적정 온도는 -50~-60℃로, 이의 최적 저장을 위하여는 2단 압축이나 이원 압축시스템이 필요하게 된다. LNG 냉열을 이용한 냉동냉장은 -162℃의 저온을 이용하기 때문에 -60℃의 온도를 단 순 열교환 만으로 얻을 수 있을 뿐 아니라, 압축기가 필요하지 않게 되는 장점을 지닌다. LNG 냉열이용 공정은 Fig. 9와 같이 R22를 LNG와 열교환시켜 액화시킨 다음, 펌프로 냉동냉장 창고의 각 실의 강제 순환식 증발기로 공급하여 기화시킨다. 기화된 R22 기체는 다시 LNG 열교환기에서 액화된다.

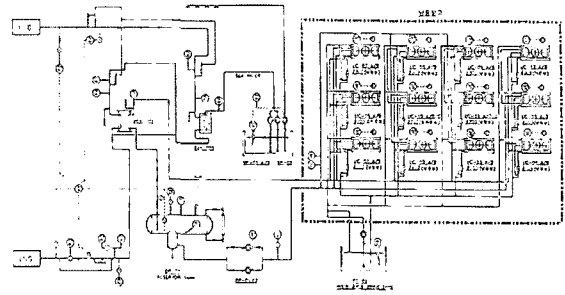


Fig. 9. LNG 냉열을 이용한 냉동냉장 창고

라. 폐기물 동결분쇄

LNG 냉열 이용 폐기물 동결분쇄 공정은 LNG와 R22, R134a 등을 열교환시켜 액화된 냉매를 이용하여 폐기물을 동결 분쇄하는 것이다. 동결분쇄가 가능한 폐기물로는 폐타이어, 폐플라스틱 등을 들 수 있다.

마. 액체탄산 및 드라이아이스

액체탄산가스의 제조공정은 원료 탄산가스를 정제한 다음 20 bar 정도로 압축한 후, 암모니아 냉동기에 의하여 온도를 저하시켜 액체탄산을 생산하고 있다. LNG 냉열 이용 공정은 Fig. 10과 같이 암모니아 냉동기 대신에 LNG 냉열을 사용하는 것으로 생산비용이 절감되는 장점을 갖는다.

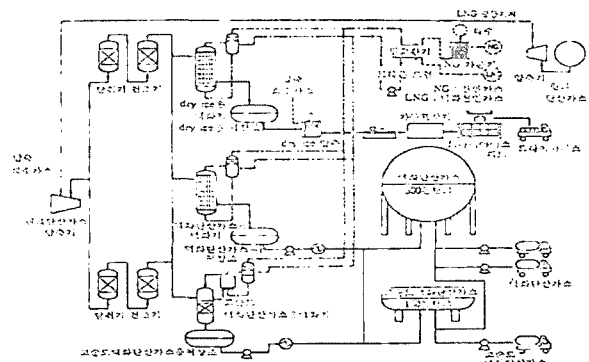


Fig. 10. LNG 냉열을 이용한 액체탄산 제조 공정

5. 인천 LNG 인수기지에서의 LNG 냉열 이용 시뮬레이션

인천 LNG 인수기지를 대상으로 LNG 냉열 이용 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 인천 인수기지에서는 2002년 기준 연간 700만톤의 LNG가 사용되고 있으며 이를 시간당으로 환산하면 800 ton/h이다. 여름철 최소 사용량은 평균의 60%이므로 480 ton/h이라고 가정할 수 있다. 실제로는 안전을 고려하여 최소 소비량보다 17% 적은 400 ton/h을 사용한다고 가정한다. 이 중 50%인 200 ton/h는 냉열 발전, 나머지 50%는 수소 액화, 액체탄산 제조, 냉동 및 냉장, 지역냉방에 순차적으로 사용한다고 가정한다. 모든 LNG 냉열 이용 설비는 인수기지에 설치되므로 LNG가 냉열 이용을 위하여 인수기지 외부에 설치되는 일은 없어 LNG 누설에 의한 안전성 문제는 무시할 수 있다. 물론 지역냉방을 위한 얼음죽(ice slurry)은 인수기지에서 생성되지만 배관을 통하여 10 km 거리에 위치한 지역을 냉방한 후 다시 귀환한다. 상기한 이용 분야 및 운전 조건은 경제성 분석을 위하여 가정한 것 일뿐 최적화된 수치는 아니다.

냉열 발전 방식은 Rankine과 직접팽창 복합 사이클 방식으로 계산하였다. Rankine 냉열 발전 사이클의 작동유체는 프로판이 사용된다. LNG 냉열을 200 ton/h 사용시 냉열 29.7 MW의 냉열 사용이 가능하며, 발전 효율 30% 가정시 12.7 MW의 전력이 생산된다. 이는 12.7 MW의 발전소 건설 대체 효과를 가져온다. 계약과 사용 전력 요금을 종합적으로 고려하여 전력 비용을 100 원/kWh라고 가정시 연간 112 억원의 전력 판매 수입이 발생한다. 발전소 건설 비용이 일반 발전소 건설 기준인 1000 \$/kW라고 가정하면 발전소 건설 비용은 152억원이 소요된다. 따라서 회수 기간은 1.4년으로 매우 경제적이다. LNG 냉열을 이용한 저온 발전 시스템은 일본에서는 여러 곳에서 운전되고 있으나 운전 데이터 분석에 의하면 열효율이 15% 이하이며 물러 아직 최적화된 시스템이라고 보기는 어렵다. LNG 냉열 발전 시스템을 최적화하기 위해서는 냉열 발전 시스템의 설계, 운영, 정비 기술, 저온 운용 금속 제조 및 응용

(취성, 신축성), 작동매체 선정, 저온용 터빈, 저온 영역에서의 제어 시스템 기술 등이 개발되어야 한다.

LNG 냉열 200 ton/h는 그림 11과 같이 순차적으로 수소 액화, 액체탄산 제조, 냉동냉장, 지역냉방에 사용한다고 가정하여 시뮬레이션하였다. 수소 액화에는 -160℃에서 -150℃까지, 액체탄산 제조에는 -140℃에서 -110℃까지, 냉동냉장에는 -100℃에서 -70℃까지, 지역냉방에는 -60℃에서 -20℃까지 사용한다고 가정하였다. 배관 사이마다 온도가 10℃씩 감소한다고 가정하였는데 이는 열전달 손실을 포함하여 기타 손실을 종합적으로 고려한 수치이다. 위의 가정에 의하면 수소 액화, 액체탄산 제조, 냉동냉장, 지역냉방 설비에는 각각 29.7 MW, 3.5 MW, 3.5 MW, 4.7 MW의 냉열이 사용된다.

수소 액화에 LNG 냉열을 사용할 경우, 기존 방식처럼 고가인 팽창 터빈을 사용하지 않아도 된다. 200 ton/h의 LNG 냉열을 -161℃에서 -150℃까지 활용할 경우 29.7 MW의 냉열이 사용 가능하며 수소 액화량은 40 ton/h가 된다. 이 냉열은 400 ton/h의 액체질소를 대체할 수 있다. 액체 질소의 가격은 625 원/kg이므로 액체질소 비용은 2.5 억원/h이며 연간으로는 2.2 조원에 해당한다. 실제로는 액체질소를 폐기하지 않고 냉각하여 재순환하여 사용하므로 성능계수 0.15 가정시 냉동 동력으로 198,000 kW의 전력이 소요된다. 전력 비용을 100 원/kWh로 가정시 연간 전력비로 1,730 억원이라는 막대한 비용이 절약된다. 냉열을 활용한 수소 액화를

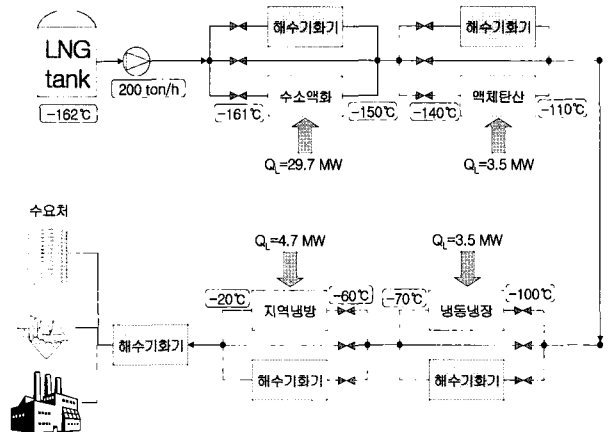


Fig. 11. LNG 냉열 이용 시스템

실용화하기 위해서는 ortho/para 변환, LNG 냉열 이용 수소 액화 시스템, 기화율 2%/d 미만인 LNG 냉열 이용 수소 저장 시스템, 시스템 설계, 구성, 제어 등의 기술 개발이 필요하다.

LNG 냉열 200 ton/h을 -140℃에서 -110℃까지 액체탄산 제조에 활용할 경우와 기존 암모니아 시스템과의 비교를 Table 4에 나타내었다. 용량은 액체탄산 20 ton/d, 드라이아이스 15 ton/d을 생산한다고 가정하였다. 액체탄산의 가격은 140 원/kg, 드라이아이스는 350 원/kg이므로 연간 24 억원이 매출이 발생한다. LNG 냉열을 이용할 경우 초기 투자비는 5 억원 감소하면서 운전비는 연간 4.14 억원이 절약되므로 큰 이득이 아닐 수 없다. 냉열을 활용한 액체탄산 제조 시스템을 실용화하기 위해서는 발전소 응축수 분리 CO2 가스 생산, LNG 냉열 이용 액체탄산 및 드라이아이스 제조, LNG 냉열 이용 액체탄산 시스템의 설계, 구성, 제어 등의 기술 개발이 필요하다.

Table 4. 액체탄산 제조 초기 투자비 및 운전비 비교

	암모니아 냉동기	LNG 냉열 이용
주요 설비	압축기 23 bar, 200 kW × 4대 암모니아 냉동기 175 kW액화기	압축기 7 bar, 100 kW × 4대 LNG 냉열 이용 액화기
초기 투자비 (억원)	45	40
운전비 (억원) 가동 300일 가정	7.02	2.88

LNG 냉열 200 ton/h을 -100℃에서 -70℃까지 냉동 및 냉장 창고에 활용할 경우와 기존 냉동 시스템과의 비교를 Table 5에 나타내었다. 용량은 220 RT, 냉동창고 3000평, 12,000 ton급으로 가정하였다. LNG 냉열을 이용할 경우 초기 투자비는 7.2 억원 감소하면서 운전비는 연간 1.63 억원이 절약된다. LNG 200 ton/h 활용시 12,000 ton급 냉동창고 3개의 운영이 가능하므로 초기 투자비 21.6 억원, 연간 운전비 4.89 억원의 절감이 가능하다. 냉열을 활용한 냉동냉장 시스템을

실용화하기 위해서는 저온 환경에서 2차냉매의 열교환, 순환시스템, LNG 냉열 이용 냉동냉장 시스템의 설계, 구성, 제어 등의 기술 개발이 필요하다.

Table 5. 냉동냉장 초기 투자비 및 운전비 비교

		기존 냉동냉장		LNG 냉열 이용	
		사양	비용 (백만원)	사양	비용 (백만원)
초기 투자 비	수전 설비	1,250 kW	250	400 kW	80
	주요 설비	스크류 냉동기 5기 Evacon 3기 Unit cooler	1,000	LNG/brine HX Unit cooler	500
	공사비	냉동설비 배관 제상수 배관 2차전기/자동제어 덕트	475	냉동설비 배관 제상수 배관 2차전기/자동 제어 덕트	425
	소계		1,725		1,005
연간 전력비			299		136

LNG 냉열 200 ton/h을 -60℃에서 -20℃까지 지역냉방에 활용할 경우와 타 시스템과의 비교를 Table 6에 나타내었다. 타 시스템으로는 터보 냉동기, 빙축열, 흡수식 냉동기의 3가지 방식이 고려되었다. 냉방 용량은 4,730 kW (1,350 RT)이며 하루 32,000 RTh의 냉방부하가 필요한 건물 군을 대상으로 하였다. 냉방 기간은 6개월로 가정하였다. 이는 약 3 만평 규모의 복합건물에 해당한다. LNG 냉열 이용 시스템은 인수기지에서 LNG 냉열과의 열교환으로 얼음죽(ice slurry)을 생성한 후 단열된 배관을 통하여 10 km 거리에 위치한 지역을 냉방한다고 가정하였다. 냉방 부하를 처리한 얼음죽은 해빙되어 7℃의 액체 상태로 귀환된다. 흡수식 냉동기 방식은 원거리에서 110℃ 정도의 고온수가 지역냉방 지역에 공급되어 해당 건물에서는 흡수식 냉동기를 가동한다고 가정하였다. 흡수식 시스템의 고온수와 대기와의 온도차는 LNG 냉열 방식에 비하여 크므로 단열이 더 요구된다. 또한 잠열을 이용하는 ice slurry 방식과는 달리 흡수식 냉동기는 현열만 이용하므로 배관 직경도 더 커져야 한다. 이러한 요소들의 영향으로 배관 비용은 흡수식 냉동기인 경우 LNG 냉열 이용 방식에 비하여 50% 많다고 가정하였다. 투자비는 흡수식 냉동기, 빙축열, LNG 냉열,

터보 냉동기 순으로 많고, 운전비는 터보 냉동기, 빙축열, 흡수식 냉동기, LNG 냉열 순으로 많다.

LNG 냉열을 이용할 경우 가장 일반적인 터보 냉동기 방식에 비하여 초기 투자비는 9.45 억원 증가하지만 운전비는 연간 6.66 억원이 절약되어 단순 회수 기간은 1.4년이 됨을 알 수 있다. LNG 냉열을 활용한 지역냉방 시스템을 실용화하기 위해서는 LNG 이용 얼음축 제조, 얼음축 수송, 시스템 설계, 구성, 제어법 등의 기술 개발이 필요하다.

Table 6. 지역냉방 초기 투자비 및 운전비 비교

	초기 투자비 (백만원)			운전비 (백만원)
	설비	배관	소계	
터보 냉동기	1,750	0	1,750	831
빙축열	2,930	0	2,930	473
흡수식 냉동기	2,210	1,500	3,710	260
LNG 냉열 이용	1,695	1,000	2,695	165

6. 결 론

편리하고 청정하며 보유량이 석유의 2배에 이르는 천연가스를 중요한 에너지원으로 이용할 수 있게 된 것은 초저온 기술의 개발과 응용이 있기에 가능하게 된 것이다. 즉 -162℃에 이르는 LNG를 다량으로 생산하고 액화, 저장, 운송, 기화 등을 위하여 극저온 재료기술, 액화기술, 열전달기술, 단열기술, 극저온 유체기술, 제어기술 등을 안전성과 경제성을 갖도록 개발 적용한 것이다. 또한 LNG를 도입하고 있는 국가에서는 해수에 버려지는 LNG 냉열을 회수하여 냉열 이용 산업에 이용함으로써 막대한 양의 에너지 절약이 가능하게 된다. LNG 냉열을 이용하기 위하여는 저온이 적용되는 기존 공정을 LNG 냉열로 대체하면 가능하게 되는 비교적 간단한 기술에 불과하나, 현재 국내에서는 극저온 기술에 대한 이해 부족과 실제 공정이 국내 기술로 운용되지 않고 있다는 이유로 일본 등 외국 플랜트의 도입에 의존하고 있는 것은 대단히 안타까운 일이다. 국내에서도 이 분야 연구개발에 많은 참여와 관

심, 지원이 필요한 것으로 생각된다.

저자이력

윤상국 (尹相國)



1955년 10월 26일생, 1977년 성균관대학교 화학공학과 졸업, 1982년 연세대학교 대학원 졸업(공학석사), 1989년 Southampton University 초저온공학과 졸업(공학박사), 1983~1993년 한국가스공사 연구개발원, 1993~현재 한국해양대학교 교수.

김영일 (金英一)



1961년 5월 8일생, 1984년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1986년 동대학원 졸업(공학석사), 1993년 University of Michigan 졸업(공학박사), 1998년 ~ 현재 고려대학교 대학원 기계공학과 객원교수, 세종대학교 기계공학과 겸임교수, 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터장