

LNG 냉열이용 기술개발 동향

Trends of Research and Development for LNG Cold

윤 정 인

1. 서론

1987년 LNG공급을 시작한 이래 1997년에는 공급이 연간 1000만톤 이상이었으며, 수요는 매년 증가할 것으로 예상되고 있다. LNG란 액화천연가스(Liquefied Natural Gas)의 약자로 천연가스 생산지에 따라 그 조성이 약간씩 차이는 있지만, 메탄을 주성분으로 하는 천연가스를 액화시킨 것이다. LNG는 -160°C 의 초저온이므로 에너지 가치가 매우 크기 때문에 에너지 절약 차원에서 냉열회수를 위한 기술개발이 세계각국에서 진행되고 있다. 우리나라에서도 1987년 인천 생산기지 준공과 함께 LNG사업 다각화를 위하여 LNG 냉열이용산업에도 노력을 기울이고 있다.

천연가스는 환경부하가 가장 작은 화석연료이다. 천연가스의 주성분은 탄화수소 중에서도 가장 탄소의 함유율이 낮은 메탄이다. 천연가스에는 대부분 유황분이 포함되어 있지 않아 연소에 따른 CO_2 배출량은 적고 SO_x 양은 무시될 수 있을 정도로 미량이다. 천연가스는 경질가스 연료이기 때문에 저 NO_x 연소법을 채용하기 용이하여 이에 발생하는 NO_x 를 낮게 제어할 수 있다.

이 글에서는 최근 전기와 함께 주된 에너지원으로 자리 매김하고 있는 천연가스의 냉열이용에 관한 여러 자료를 소개하고자 한다.

2. 저장량과 소비량

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 천연가스는 세계각지에 널리 매장되어 있어, 석유가 중동지역에 66%나 편중되어 있는 것과는 대조적이다. 천연가스의 확인매장량은 약 144.7조m^3 로, 이 양은 석유 확인매장량의 95%에 상당한다. 최대매장량은 약 400조m^3 로 추정되고 있다.

Fig. 2에 LNG 주요 수출국과 수입국을 나타내었다. 주요 수입국은 동아시아의 나라들로, 이중 일

본은 전 LNG의 65%, 연간 약 4000만톤 이상을 수입하고 있다. 우리나라에서 소비하는 천연가스의 대부분은 LNG를 재가스화한 것으로, 우리나라의 천연가스 도입경로는 Fig. 3과 같다.

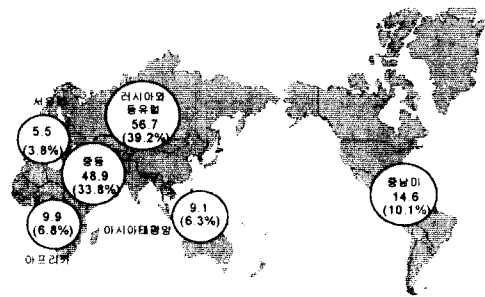


Fig. 1 세계 천연가스 매장량

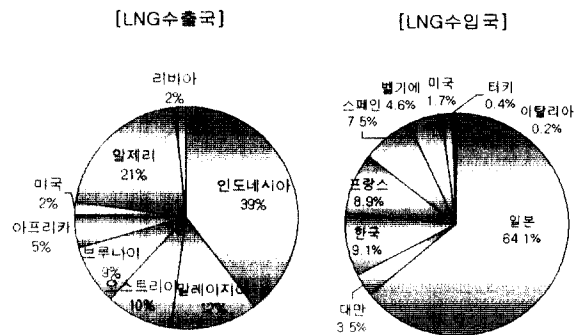


Fig. 2 LNG 수입국과 수출국

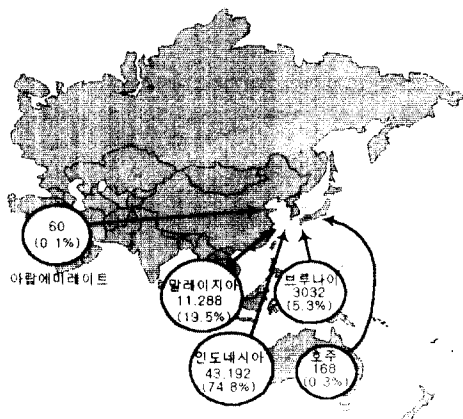


Fig. 3 우리나라 천연가스 도입경로

접수일 : 2001년 10월 7일
 윤정인 : 부경대학교 기계공학부

3. LNG수송 및 저장

LNG의 수송방법으로는 탱크로리나 기차에 의한 육상수송과 LNG선에 의한 대용량 해상수송으로 크게 나눌 수 있지만, 여기에서는 대용량 LNG 수송 기술인 해상수송에 대하여 알아보려고 한다. LNG선의 특수성은 초대형 저온탱크를 탑재하고 있는 점이다. 따라서 탱크지지 방법, 탱크방열 방법 및 탱크열응력경감 방법 등이 큰 문제가 되어 지금까지 여러 가지 대책이 검토되어 왔다.

선체와 탱크의 독립여부에 따라 독립된 탱크를 선창내에 만들어 외측 또는 선창의 내측을 단열한 독립탱크식인 모스형(moss)과 선창의 안쪽에 단열재를 부착시킬 곳을 만들어 놓고 다시 안쪽을 얇은 금속막으로 덮어씌운 멤브레인(membrane) 식으로 크게 구분할 수 있으며, Fig. 4와 Fig. 5는 LNG선의 각 방식을 나타내고 있다. 이들은 또 하중지지방식이나 열응력 제거방식의 차이에 따라 세분화될 수 있다.



Fig. 4 LNG선(모스형)

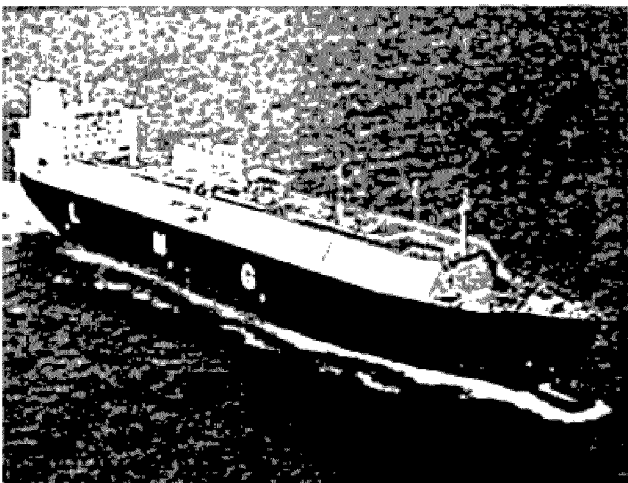


Fig. 5 LNG선(멤브레인형)

LNG탱크 재료로는 -160°C 의 초저온에 견딜수 있는 금속재료(알루미늄합금, 9%Ni강, 스테인레스강 등)가 이용되어 진다. 또 방열층은 모스방식이외는 하중지지와 탱크판 고정을 겸하기 위해 비교적 강도가 높은 지지재료와 방열재료의 복합구조가 이용된다. 지지재료로는 목재나 경량발포 콘크리트가 사용되며, 방열재료로는 플라스틱 발포재(폴리우레탄폼, 폴리염화비닐폼, 페놀폼 등), 분말방열재(perlite 등) 및 섬유방열재(그라스울 등)가 사용된다.

LNG저장 탱크는 천연가스 액화기거나 인수기지 등의 임시저장용으로 필요한데, 이것은 거대한 보온병이라 생각하면 이해하기 쉽다. 보온병은 겉병과 안쪽의 내병으로 이루어져 있다. LNG저장 탱크도 보온병과 같은 2중 구조로써 외부는 콘크리트로 모든 힘을 여기에서 받게 되어 있으며, 보온병의 겉병에 해당된다. 내부탱크는 액체와 기체상태인 LNG 또는 증발가스가 새어 나오지 못하도록 스테인레스강으로 된 밀폐된 멤브레인벽으로 이루어져 있는데, 외벽과 내벽사이에는 고분자 재료이며 단열 특성이 우수한 PV폼(Poly Vinyl Chloride Foam)을 채워 넣어 밖에서 들어오는 열을 차단한다.

육상 LNG탱크의 분류는 탱크구조와 탱크설치 위치에 따라 달라진다. 탱크구조에 의한 분류는 LNG선 탱크와 같이 독립 탱크형식과 멤브레인 탱크형식이 있다. 설치장소에 따른 분류는 지상방식과 지하방식이 있다. 지하방식 LNG탱크는 지반밑에 설치되는 탱크로, 만일의 파손사고에 대해 안전성이 높으나, 지반구조와 지하수맥 등의 제약조건이 많다.

4. 액화 및 냉열이용 기술

Fig. 6은 액화기지의 예로 Brunei Lumut기지 개념도이다. 채굴된 천연가스는 먼저 가스중에 함유된 액체성분이 제거된 후, 액화과정에 장애가 되는 성분, 즉 산성가스, 수분, 중질탄화수소가 정제과정에서 제거된다. 채굴된 천연가스에 황화수소나 수은이 함유된 경우에도 정제과정에서 이들 성분이 제거된다. 정제된 천연가스는 프로판으로 예냉된 후 열교환기에서 질소·탄화수소계 혼합냉매와 열교환, 냉각되어 LNG로 된다. LNG는 LNG탱크 등 저장설비에 저장되어 LNG수송선에 선적되고 출하된다.

Fig. 6의 액화과정은 프로판 예냉 혼합냉매 방식이다. 이 방식은 혼합냉매방식의 대표적인 예로 많

은 액화기지에서 이용되고 있다. 이 방식의 특징은 시스템이 비교적 간단하여 설비가 싸고 열전달 손실이 작아 효율이 높은 점이다.

1m³의 메탄을 대기압 하에서 -162℃까지 냉각시키면 0.0017m³의 액체로 액화되고 체적은 1/600로 된다. 이와같은 액화를 이용함으로써 산지에서 수요지까지 대량으로 수송이 가능하다. LNG는 인도네시아, 말레이시아 등 천연가스 산지로부터 액화과정중 분진제거, 탈황, 탈탄산, 탈수의 처리과정을 거쳐 액화된 후, LNG수송선에 의해 해상으로 운반되어 LNG 생산기지(LNG Receiving Terminal)에 하역, 특수하게 제작된 탱크에 저장된다. 저장된 LNG를 발전소 연료 및 도시가스용으로 공급하기 위하여 -160℃의 초저온액체인 LNG를 0℃의 기체로 기화시킨 후 공급배관망을 통하여 전국으로 공급하게 된다. 이때 LNG를 기화시키기 위한 열원으로 해수를 이용하거나 천연가스 연소열에 의한 열원을 이용한다. LNG냉열이용기술 개발은 에너지 절약 및 효율적 이용 차원에서 외부로 버려지는 LNG저온에너지를 유용하게 활용하기 위한 기술개발이다. Fig. 7은 인천 LNG기지의 천연가스 생산공급 흐름도를 나타낸 것이다.

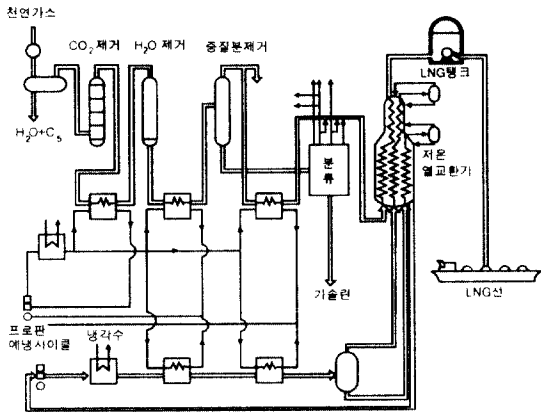


Fig. 6 액화기지 흐름도

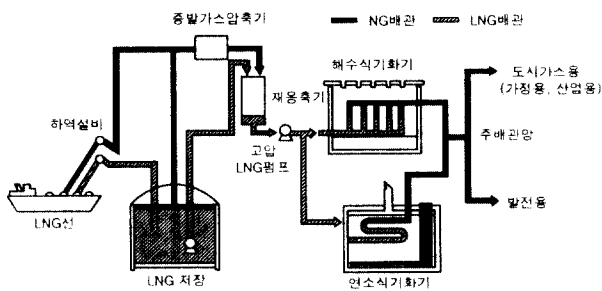


Fig. 7 인천LNG 천연가스 생산공급 흐름도

(1) LNG냉열의 질적 평가

LNG의 비등점은 -160℃부근이므로 이 냉열을 이용할 경우 여러 가지 산업에 응용할 수 있다. 액체상태인 LNG가 대기압하에서 상온까지 기화될 때는 증발잠열 502.3 kJ/kg과 현열 334.9 kJ/kg을 합하여 약 837.2 kJ/kg의 냉열에너지가 발생된다. 양적으로 837.2 kJ/kg인 LNG냉열을 질적인 가치로 평가하기 위해서는 역카르노 사이클을 고려할 수 있으며, 이 경우 냉동기에 의한 냉열량 Q_L을 얻기 위해 소요되는 동력은 외기온도 T_H, 저온 T_L일 경우 $W=Q_L(T_H/T_L - 1)$ 로 나타낼 수 있다. T_H를 상온 25℃로 보았을 경우 T_L=-162℃에서 1 kcal의 열량을 얻기 위해서는 W=7.1kJ이 필요하지만 T_L=0℃이면 W=0.4kJ이 요구될 뿐이다. 즉 -162℃에서 4.2 kJ의 냉열을 얻기 위해서는 0℃의 경우보다 17배의 동력이 필요하게 된다. 따라서 -162℃에서 4.2 kJ의 냉열은 0℃에서의 4.2 kJ보다 이론적으로 17배의 가치가 있다. 또한 실제 사이클에서는 온도가 낮아질수록 기계효율이 떨어지므로 소요 동력은 더 커지게 되며 -160℃에서의 냉열은 0℃에서의 냉열보다 17배 이상의 가치가 있다고 할 수 있다. 따라서 낮은 온도범위에서 냉열을 회수할 경우 경제적 가치는 커지게 된다.

(2) LNG냉열이용 방법

LNG냉열이용 방법으로는 생산기지 부근에서 LNG와 열교환 과정을 거친 냉매를 연속적으로 사용하는 직접이용방식(1차 이용방식)과 직접이용방식에서 생산된 이동가능한 냉매(액체질소, 액체탄산가스)를 생산기지에 멀리 떨어진 원격지로 이동시켜 냉열을 이용하는 간접이용방식(2차 이용방식)이 있다. 일반적으로 LNG냉열이용이란 직접이용을 말하며 전세계적으로 직접이용방식으로 실용화된 산업으로는 공기액화분리, 냉열발전, 식품동결 및 저장, 초저온 창고, 드라이아이스 및 액체탄산가스 제조, 저온분쇄산업등이 있다. LNG냉열이용 산업이 실제 적용되기 위해서는 저온의 냉열을 발생시키기 위한 냉동기 소비전력비 비교, 사업성 등 종합적인 경제성분석이 필요하다.

냉열이용 온도범위가 낮을수록 냉열발생에 소요되는 전력이 크게되며 냉동기 효율도 저하되므로 LNG냉열이용시 경제성이 높아지게 된다. LNG냉열이용 사업의 실용화는 일본에서 활발하게 진행되고 있으며, 냉열산업기술도 일본이 선도적 위치에 있다.

(3) LNG냉열 이용시 검토사항

LNG냉열이용을 실제 적용하기 위해서는 다음과 같은 항목에 대한 검토가 필요하다

1) 신뢰성

생산기지 운영의 목적은 안정적인 천연가스 공급에 있다. 따라서 냉열이용으로 인하여 생산기지 운영에 영향을 주지 않도록 면밀한 검토와 설비 및 공정설계가 이루어져야 한다.

2) 경제성

냉열이용 산업에 대한 수요 및 경제성이 우수하여야 한다. 전력 절감 등의 에너지절약 효과가 크다 할지라도 수요가 적으면 실용화 가능성이 없으며, 전력 절감효과가 작더라도 수요가 많으면 실용화 가능성이 크다.

3) 입지조건

LNG공급을 위한 초저온 재료 및 단열재로 이루어진 배관을 사용하므로 초기투자비가 많이 든다. 따라서 냉열이용설비는 생산지와 근접한 곳에 위치해야 경제성이 있다. 사업성이 우수하더라도 생산기지 위치가 수요가 적은 곳이면 실용화는 곤란하다.

4) LNG부하변동

LNG는 발전용 및 도시가스용으로 사용함에 따라 주야간, 계절간 LNG송출량의 변동이 크다. 따라서 연속적으로 LNG냉열을 회수하기 위해서는 LNG부하변동 상황을 고려하여 총 LNG송출량의 20~30%정도의 기저부하(base load)만을 사용한다.

5) 이용온도 및 압력

냉열온도가 낮을수록 냉동기 효율이 저하되므로 전력소비량이 급격히 커지게 된다. 따라서 LNG냉열이용 온도가 낮을수록 에너지 회수효율이 높게 되므로 가급적 냉열이용온도는 낮을수록 유리하다. 또한 회수가능한 LNG냉열에너지는 LNG운전압에 크게 영향을 받는다.

따라서 낮은 압력에서 냉열을 회수할수록 냉열 회수율이 크나 냉열회수후 기화된 천연가스 처리에 대한 대책이 필요하다. 이는 저압에서 냉열회수 후 천연가스 수요처에 공급하기 위한 압축기 동력 비용이 크기 때문이다. 따라서 LNG냉열 회수온도 및 압력에 대한 검토가 요구된다.

5. LNG 냉열이용 사례

(1) 공기액화분리

공기를 냉각하여 액화시키면 산소는 -183℃, 질소는 -196℃에서 액체가 된다. 공기액화분리란 공

기중의 각 성분의 액화온도 차를 이용하여 산소와 질소로 분리하여 액체질소 및 액체산소를 생산하는 것을 말한다. LNG냉열을 이용하지 않고 전기 구동으로 생산할 경우, 순환질소 압축기와 팽창터빈을 사용하여 액화에 필요한 냉열을 공급하는데, 이때 생산량 10배정도의 순환질소량이 필요하기 때문에 압축기 동력이 커지게 된다. 그러나 LNG냉열을 이용할 경우 직접 LNG와 순환질소가 열교환하여 냉열을 획득하기 때문에 순환질소량이 감소되어 압축기가 소형화된다. 전기사용량이 60%정도 절감된다. Fig. 8은 평택생산기지에서 현재 운영 중인 흐름도이다.

공기분리과정은 1) 원료공기의 압축, 냉각 2) 공기중 수분, 아황산가스, 탄산가스 제거 3) 공기 예냉기에서 냉각, 액화 4) 분리기 공급 5) 분리기에서 산소와 질소의 비점차를 이용하여 액체산소와 질소가스로 분리 6) 순환질소가스는 공기에냉기에서 열교환 된 후 압축과정을 거쳐 LNG와 열교환되어 냉각 7) 냉각된 순환질소가스는 분리기하부탑에 공급되어 응축되는 과정으로 이루어진다.

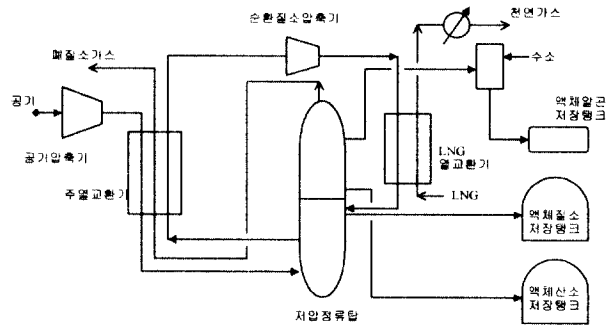


Fig. 8 공기액화분리과정 흐름도

(2) 냉열발전

LNG냉열발전이란 수요처에 배관을 통해 공급하기 위해 -160℃의 초저온 상태인 LNG를 0℃의 가스로 기화시킬 때 발생하는 냉열을 이용하여 발전하는 것으로서 현재 세계 최대의 LNG수입국인 일본에서는 활발히 건설 및 운전되고 있다.

냉열발전으로 발생하는 전력은 대개 6000 kW이하의 소형으로 대부분 인수기지 자체동력으로 소비된다. 냉열발전은 시동, 정지가 용이하고 LNG부하변동이 큰 경우에도 적용이 가능하다. LNG소비량이 많은 주간에 냉열 엑서지(exergy)를 회수하고 소비량이 적은 심야시간대에는 정지가 가능한 장점이 있다. 현재 일본에서 실용화되고 있는 냉열발전 방식에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 저온엑서지를 이용한 Rankine 사이클방식
- 2) LNG 압력 엑서지를 이용한 직접팽창방식
- 3) Rankine 사이클과 직접팽창을 혼합한 방식

Fig. 9는 일본 Osaka Gas에서 적용하고 있는 Rankine 사이클방식의 흐름도로 작동매체는 프로판올을 사용하고 있다. 이 방식은 프로판이 응축, 승압, 증발, 팽창의 과정을 거치며 순환하고 응축열원으로 LNG냉열을, 증발열원으로 해수를 사용하며 팽창과정에서 터빈을 회전시켜 발전하는 방식이다. 효율향상을 위하여 프로판 대신 다성분매체를 사용하는 경우도 있으며 열원으로 해수를 사용함에 따라 해수온도가 높은 여름철에는 발전효율이 높으나, 해수온도가 낮은 겨울철에는 여름철에 비해 효율이 20%정도 감소한다.

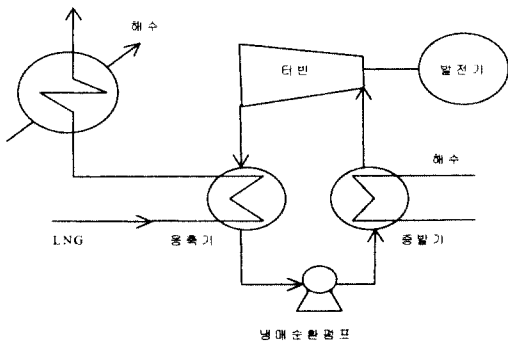


Fig. 9 Rankine Cycle 방식 냉열발전

식과 LNG냉열을 이용하여 저렴하게 생산된 액체질소를 이용하는 간접이용방식이 있다.

식품은 저장온도를 낮추면 일반적으로 장기간 저장이 가능하다. 일본의 경우 Fig. 10에서와 같이 LNG냉열을 이용하여 프레온을 -65°C 까지 냉각시킨 후 저장창고의 온도를 -55°C , -35°C 로 유지시키며 -55°C 에서는 참치, -35°C 에서는 일반냉동어류를 저장하고 있다. LNG냉열을 이용하는 냉동·냉장창고는 생산기지과 근접한 곳에 있어야 하는 입지적 제약이 있으나 냉동기, 냉각탑등이 필요없기 때문에 건설비가 적게 든다. 그리고 소음, 진동이 적고, 전력비가 60%정도 절감가능하고 온도조절이 용이한 장점이 있다.

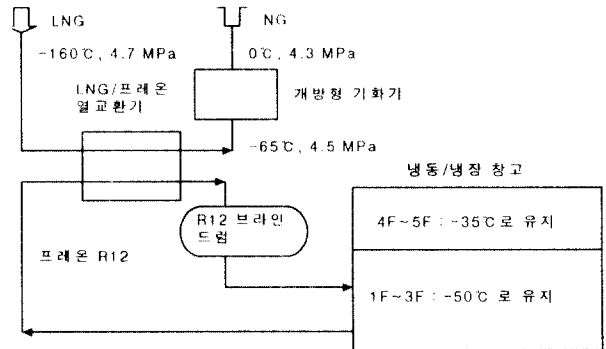


Fig. 10 냉동창고 공정흐름도

(3) 냉동·냉장창고

냉동·냉장창고에 LNG를 이용하는 방식은 공기 등 냉매를 직접 열교환시켜 이용하는 직접이용방

(4) 액체탄산, 드라이아이스 제조

액체탄산가스는 석유화학공업의 정제과정중 부산물로 발생되어 대기로 방출되는 폐가스를 원료

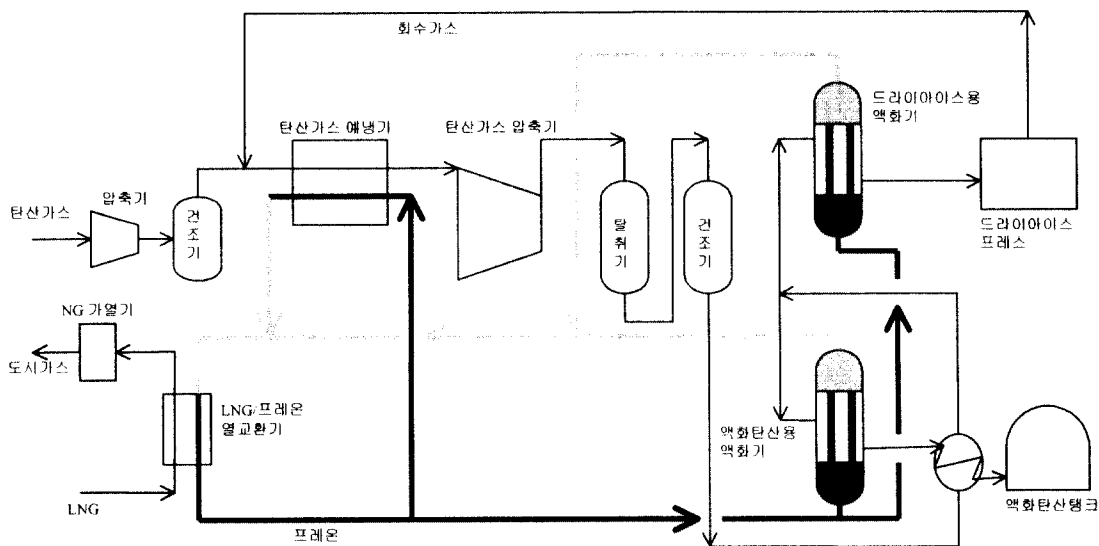


Fig. 11 LNG냉열이용 액체탄산, 드라이아이스 제조 공정

로 하여 액화시켜 제조하며 용접용, 주물용, 음료용으로 사용된다. 일반적인 제조방법은 CO₂가스의 압축, 예냉정제, 액화 공정으로 이루어지며, 냉열원으로는 냉동기를 사용한다. LNG냉열을 이용할 경우 온도범위는 -55℃ 정도로 저온, 저압 운전이 가능하여 냉동기, 압축기동력 절감이 가능하다. 따라서 Table 1에서와 같이 전력절감효과가 커 전기구동방식과 비교하여 50%정도 절감이 가능하다.

Fig. 11과 같이 탄산가스 액화를 위해 LNG와 열교환할 경우 직접 열교환하는 것은 탄산가스 고체화될 위험이 있기 때문에 중간 열매체를 사용하여 열교환하며 이때는 보통 프레온을 사용한다.

Table 1 액체탄산제조공정 전력비 비교

	LNG냉열사용	냉동기사용
제조능력(t/d)	100	200
운전압(kPa)	676.7	2745.9
냉동기	-	5대(R-22)
전력량	370	1380
전력원단위(kWh/Nm ³)	0.17	0.33

(5) 저온분쇄

LNG냉열을 이용하여 생산된 액체질소, 액체탄산 등을 사용하는 간접이용방식으로서 물질을 취화점 이하로 냉각시키면 쉽게 부서지는 저온 취성(glass transition)을 이용한 것이다. 고무, 플라스틱, 페타이어 등 상온에서는 분쇄하기 힘든 물질의 분쇄가 가능하다. 응용범위는 폐기물처리, 화학제품, 식품 등의 분쇄 등 광범위하며 분쇄시 동력이 적게 들고 유동성이 좋은 분말형태가 가능하다. 냉각방법으로는 장치소형화, 환경 문제 등을 고려하여 암모니아, 프레온보다는 액체질소나 액체탄산가스를 이용하여 직접 냉각시키며, 액체질소를 이용할 경우 -196℃까지 온도를 낮출 수 있다. 액체질소를 이용하여 페타이어를 분쇄할 때는 상온분쇄 및 선별작업을 거친후 타이어의 고무부분을 저온 냉각시켜 미분쇄시키는 공정으로 이루어지며 유동성이 좋은 분말 형태를 얻을 수 있다.

(6) 기타 이용분야

현재 실용화 검토되고 있는 LNG냉열이용 분야로는 우주개발용, 연료전지, 자동차, 항공용 연료로 사용 가능한 수소의 액화에 필요한 냉열공급, 압축기 흡입온도 저하등에 LNG냉열을 이용한다. 또한

대규모 전력수송시 발생하는 전기저항 감소를 위한 극저온 저항케이블과 초전도현상을 이용한 초저온케이블 개발등이 있으며, 해수를 냉각, 결빙시켜 담수를 분리 생산하는 해수담수화 기술 등이 있다. 그리고 LNG생산기지 공정에서는 LNG송출부하 변동에 대응하여 송출량이 많을 때 냉열을 저장하고 필요할 때 사용하기 위한 냉열저장기술등이 실용화 연구되고 있다.

후 기

이 글의 내용은 대한설비공학회 냉동공조편람에 저자가 기술한 내용의 일부를 편집한 것입니다.

참고문헌

1. KOGAS Annual Report, 1999
2. LNG HAND BOOK, 1981, 日本LNG會議, pp. 284~322
3. 이우진, LNG 냉열이용발전, 냉동공조기술, Vol. 10, No. 4, pp. 50~57
4. 가스보급확대를 위한 기술개발 연구(Ⅱ) : pp. 143~239, 한국동력자원연구소(1984. 12)
5. 猪俣正則, 1991, LNG冷熱利用と蓄冷システムの將來, 冷凍, 1991, Vol. 66 No. 762, pp. 23~33
6. Fuchigami, Takehiko, 1977, Use of LNG cold energy, Kagaku Gijutsushi, Vol. 15, pp. 37~44
7. LNG冷熱利用に關する調事研究報告 : 中央電力協議會 (1979. 4)
8. Tomitaka et al. "Developments in the commercial use of LNG cold", Int. Conf. Liquefied Natural Gas, Vol. 6, Session II, Paper 9
9. 홍성호, 손영순, 아이스링크 및 LNG 냉열이용을 위한 열교환시스템 개발, 한국가스공사 연구보고서 (1997. 11)
10. 윤정인, 김재돌, 1998, 냉동공학, 문운당, pp. 329~354