

자연냉매 CO₂를 이용한 고효율 LNG 냉동 트럭의 개발

†정세진·곽현섭·민호기

(주)삼진야드 기업부설연구소

(2020년 12월 4일 접수, 2020년 12월 23일 수정, 2020년 12월 24일 채택)

Development of a High Efficient LNG Refrigerated Truck using Natural Refrigerant CO₂

†Se Jin Jeong, Hun Sub Kwak, Ho Ki Min

Samjinyard co.,ltd.

(Received December 4, 2020; Revised December 23, 2020; Accepted December 24, 2020)

요약

본 논문에서는 자연냉매로 주목받고 있는 이산화탄소(CO₂)를 이용하여 냉동탑차용 고효율 냉동시스템을 개발하였다. 기존의 디젤 차량을 LNG 차량으로 개조하여, 화물차의 배출가스를 개선하고, LNG 연료의 기화 잠열을 활용하여 CO₂ 냉동시스템의 효율을 높은 친환경적인 냉동탑차를 개발하였다. 그 결과 가스 쿨러에 LNG 연료의 기화 잠열을 활용하여 냉동탑차의 COP를 144%로 향상 시켰다.

Abstract - In this paper, we developed a cooling system for the refrigeration truck using natural carbon dioxide refrigerant which is attracting attention as an environmentally-friendly refrigerant. We developed a high efficient environmentally-friendly refrigerated truck that converted the existing diesel vehicle into an LNG vehicle to improve emissions of truck and improved the efficiency of the cooling system by utilizing a heat of LNG vaporization. The COP of refrigerated truck system was increased 144%.

Key words : natural refrigerant CO₂, LNG refrigerated truck, LNG, CO₂

1. 서론

최근에 전 세계적으로 몬트리올 의정서 및 교토 의정서에 의거하여 오존층 파괴물질(ODP)의 사용 규제 및 온실가스(GWP) 배출억제 등 국제환경규제에 따라, 대체냉매를 이용한 새로운 냉동공조 시스템의 개발이 지속적인 발전의 관건이 되고 있다¹⁻⁵⁾.

우리나라의 경우 2018년부터 시행된 대기환경보전법 개정으로 냉매사용 기기의 냉매관리기준 규정, 냉매회수기술인력의 규정, 냉매회수기기 구조 및 성능기준에 관한 규정 등 냉매의 판매, 회수, 사용기기에 대해 구체적인 규제가 2018년 11월 29일부터 시행되고 있다.

본 연구에서는 냉동탑차에 자연냉매인 이산화탄소(CO₂)를 적용하기 위하여 11MPa의 CO₂ 용 고압 냉매 열교환기를 개발하였으며, CO₂ 냉동 시스템용 압축기, 팽창밸브도 CO₂ 냉매용으로 대체하였다. 또한 LNG 연료의 기화 냉열을 CO₂ 냉동시스템의 응축기 냉각을 위하여 활용함으로써 보다 효율적이고, 친환경적인 냉동탑차를 개발하였다. 실제 냉동차를 이용하여 냉동탑차의 LNG 기화 냉열을 활용한 냉동시스템과 미활용한 냉동시스템에 대한 냉동기 효율(COP)을 각각 측정하여 비교 검토함으로써 LNG 트럭용 고효율 CO₂ 냉동시스템을 개발하였다.

†Corresponding author:sjjeong@samjinyard.com
Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

II. 이론

2.1. CO₂ 자연냉매 특성 분석

CO₂ 냉매는 열역학적 특성상 열 교환 손실 및 팽창손실이 기존의 CFC 및 HFC계 냉매에 비하여 큰 것으로 알려져 있다. 또한 Fig.1과 같이 초임계 사이클(super critical cycle)의 특성상 시스템의 용량 제어를 위하여 고압단의 온도와 압력을 동시에 제어하여야 한다.

일반적인 증기 압축식 냉동사이클과는 달리 이산화탄소를 사용한 초임계 냉동사이클에서는 고온 열원(응축기)에서의 방열 과정이 임계점 이상에서 일어나고, 저온열원(증발기)에서의 증발과정은 임계점 이하에서 일어나므로, 기존의 역 카르노 사이클로 운전되는 증기 압축기 냉방시스템과는 구분되는 특징을 가지고 있다.

2.2 LNG 기화 냉열 활용

LNG 연료의 기화 냉열(-162℃)을 CO₂ 냉동시스템의 응축기 냉각에 이용하기 위하여 LNG 연료 탱크와 CO₂ 냉동시스템의 응축기를 일체화한 Gas Cooler를 설치하였다. 이 가스 쿨러에서 초저온 액체 LNG와 고온고압의 냉매 CO₂ 가스가 열교환함으로써 냉매의 응축압력 및 온도를 낮추어 효율 및 냉동기의 성능을 향상시키고자 하였다. Gas Cooler의 열평형 및 효율은 식(1)~(5)식으로 계산할 수 있다. 즉,

냉매 측의 열전달량 (Q_R)은

$$Q_R = m_r (h_{in} - h_{out}) \quad (1)$$

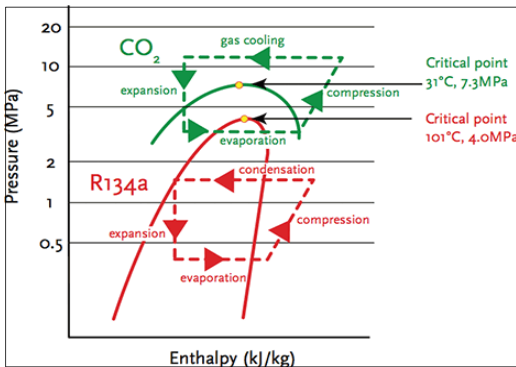


Fig. 1. Comparison of CO₂ refrigerant and freon refrigerant(R-134a) cycle.

여기서, m_r : 냉매유량(kg/h)

h_{In} and h_{out} : 냉매 입출구 상태의 엔탈피(kJ/kg)

공기 측의 열전달량 (Q_A)

$$Q_A = V_a \rho_a C_{p_a} (T_{out} - T_{ain}) / 1000.0 = \epsilon (G_c)_{min} (T_{rin} - T_{ain}) \quad (2)$$

여기서,

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{1 - \exp(-1 - \exp(-Ntu))(G_c)_{min}/(G_c)_{max}}{(G_c)_{min}/(G_c)_{max}} & \text{for refrigerant} \in \text{single-phase} \\ 1 - \exp(-Ntu) & \text{for refrigerant} \in \text{two-phase} \end{cases} \quad (3)$$

$$Ntu = \frac{(UA)_{tot}}{(G_c)_{min}} \quad (4)$$

$$(UA)_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{(UA)_0} + \frac{1}{(UA)_i}} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_f \alpha_0 A_0} + \frac{1}{(U_i A_i)}} \quad (5)$$

또는 열교환 효율은 열용량이 작은 유체가 지배하므로 간단히 열교환기의 효율 ϵ 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

1) $C_h = C_{min}$ 일 때,

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{C_h (t_{hi} - t_{ho})}{C_{min} (t_{hi} - t_{ci})} = \frac{t_{hi} - t_{ho}}{t_{hi} - t_{ci}}$$

2) $C_c = C_{min}$ 일 때,

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{C_c (t_{co} - t_{ci})}{C_{min} (t_{hi} - t_{ci})} = \frac{t_{co} - t_{ci}}{t_{hi} - t_{ci}}$$

III. 실험 장치 및 방법

3.1 CO₂ 자연냉매 사용 유니트쿨러 설계

CO₂ 냉매용 열교환기 부속 및 기기(UnitCooler)를 Fig. 2와 같이 1, 2차에 걸쳐 설계, 제작하여 성능 평가를 실시하였다. 1차의 설계, 제작과정에서 COP 및 제품 증량에 문제가 있어 이를 보완하기 위해 설계압력 및 설계온도에 적합한 열교환기 코일의 재질, 송풍기 및 흡입방향 등의 구조를 재설계하여 유니트쿨러의 성능 향상 및 경량화에 부합하도록 하였다.

자연냉매 CO₂를 이용한 고효율 LNG 냉동 트럭의 개발

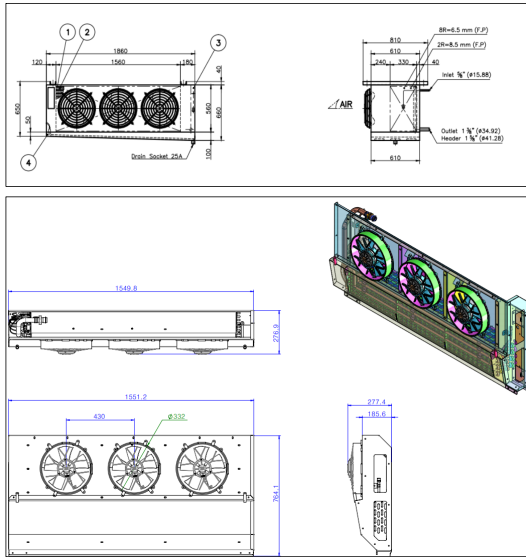


Fig. 2. Unit cooler drawing(1stdesign, 2nddesign).

Table 1. Specification of unit cooler.

구분	1차 설계 제작분	2차 설계 제작분
coil	1/2" 10Rx14Sx1560	3/8" 8Rx8Sx1300
fan	φ400x3ea	φ300x3ea
중량	310kg	51kg
비고	후면흡입, 전면토출형(일반형)	하부흡입, 전면토출형(슬림형)

3.2 LNG 냉열을 활용한 CO₂냉매 사용 가스 쿨러 설계

일반 냉동 사이클에서는 냉매의 열방출 과정(응축과정)이 임계점 이하의 포화곡선 영역(액+가스 공존구간)에서 이루어지지만, 이산화탄소를 사용하는 냉동사이클은 이산화탄소의 임계온도가 31.1°C로 낮기 때문에 대부분의 경우 열방출 과정이 초임계 영역(super critical zone)에서 이루어진다.

가스쿨러는 고압에 견딜 수 있어야 하고, 냉매의 온도변화가 크므로 대향류 형태가 바람직하며, 임계점 부근에서의 냉매 물성치 변화를 고려하여 설계하였다.

가스쿨러는 전면측에 LNG와 외부 공기가 열교환하는 냉각 코일부와 후면측에 CO₂ 가스가 냉각되는 응축 코일부가 2중으로 배열된 상태로 제작되어 있으며, By-Pass 밸브를 설치하여 LNG 기화 냉

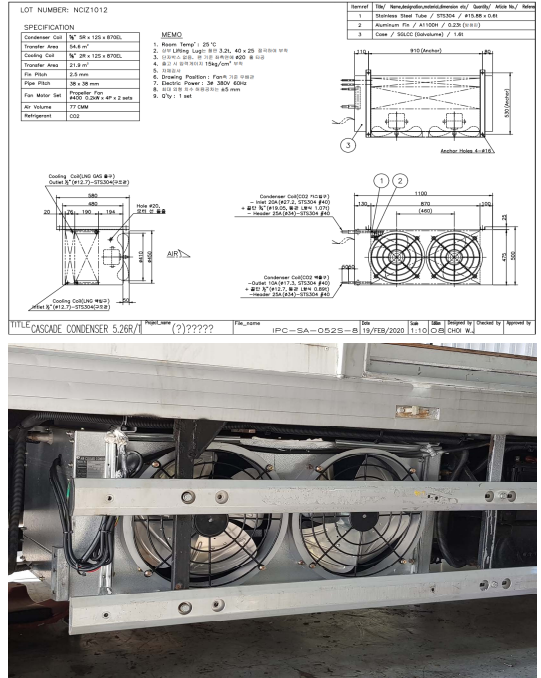


Fig. 3. Gas cooler drawing and installation photo.

열의 흐름을 On, Off 제어할 수 있다.

따라서 냉각 코일은 가스 쿨러의 콘덴서 코일에 유입되는 고온, 고압의 CO₂ 가스와 열교환하는 외기온도를 낮추어 줌으로써 CO₂의 응축온도가 동시에 낮아져 냉동시스템의 효율이 상승하는 역할을 하도록 하였다.

3.3 CO₂ 자연냉매 냉동시스템 5톤탑차 시제품

본 연구를 위해 자연냉매(CO₂)가 적용된 냉동사이클을 개발하고, 개발된 부속기기(가스쿨러, 유니트쿨러)를 적용하여 냉동탑차에 설치, 운전하여 실제 COP를 측정하였다. 냉동시스템의 COP를 측정하고 검증하기 위해 상용 소프트웨어인 Clima Check Program을 사용하였다. CO₂ 냉매를 사용한 5톤 냉동탑차의 시스템 개략도 및 냉동실내 사진을 Fig. 4, 5에 나타내었다.

3.4 ClimaCheck Program 활용

실험은 Fig. 6과 같이 유니트쿨러, 가스쿨러, 압축기 및 배관 등에 써모 커플 온도센서(c.c)를 부착하여 ClimaCheck program(스웨덴, version 5.0, 냉동기 성능 분석기)으로 냉동 고내 온도, 외기온도, 압축기 입출구 온도, 응축기 입출구 온도, 가스쿨러 입

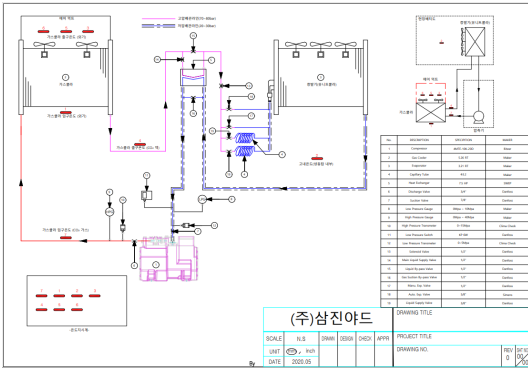


Fig. 4. The layout of refrigerated truck system.



Fig. 5. Photo. of cooling room.

출구 온도 및 모터의 소요동력 등의 실험 데이터를 획득하여, 냉동시스템의 COP 분석에 사용하였다.

3.5 LNG 냉열 활용 및 미활용

가스 쿨러에 LNG 기화 냉열을 활용하지 않았을 때와 활용하였을 때의 흐름도를 Fig. 7에 나타내었다. Cooling Coil에 액체의 LNG가 유입되어 기화됨으로써 Gas Cooler 콘덴서 코일에 유입되는 고온, 고압의 CO₂ 가스와 열교환하는 외기온도를 사전에 냉각시켜(임계점 이하 운전) CO₂의 응축온도가 낮아짐과 동시에 냉동시스템의 성능계수(COP)를 상승시키는 역할을 한다.

냉동탑차의 LNG 기화 냉열을 활용한 냉동시스템과 미활용한 냉동시스템에 대한 냉동기 성능계수(COP)를 각각 측정하여 비교 검토하였다. 본 실험에서 외기온도가 31°C일 때 냉동실내 온도는 -10°C로 하였다.

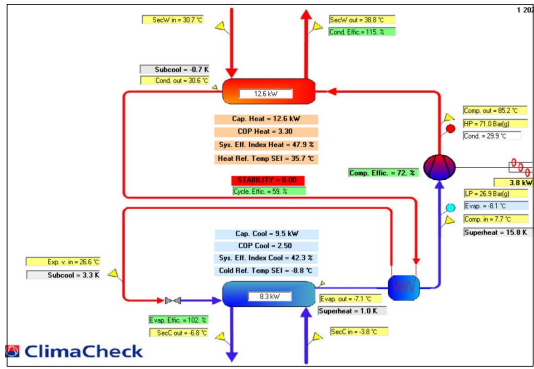


Fig. 6. ClimaCheck Flowchart.

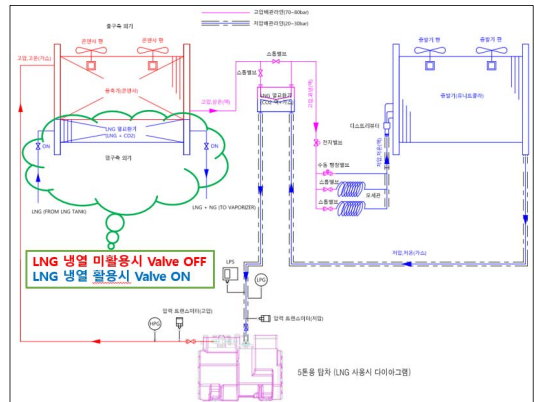


Fig. 7. Air, LNG when LNG cold heat is not used or used and refrigerant flow chart.

IV. 결과 및 고찰

자연냉매 CO₂를 이용한 냉동탑차의 LNG냉열 활용 여부에 따른 실험 및 측정 결과는 Table 2와 같다(ClimaCheck 측정값).

ClimaCheck 측정값을 사용하여 Fig. 8과 같이 p-h 선도를 작도하였으며, 이를 이용하여 가스쿨러에 LNG 기화냉열 미활용시와 활용시의 냉동시스템의 COP(냉동효과/압축일량)를 계산하여 비교하였다.

- (1) LNG 냉열 미활용시 COP :
(442-303)/(538-442)=139/96=1.45 (100%)
- (2) LNG 냉열 활용시 COP :
(442-275)/(522-442)=167/80=2.09 (144%)

Table 2. Changes in COP of CO₂ refrigeration when LNG vaporization cold heat is not used or used in gas cooler(based on internal temperature -10.0)

구 분		LNG 미활용	LNG 활용
냉동실내 공기온도(°C)	U/C 입구	-10.0	-10.0
	U/C 출구	-10.4	-10.6
저압부압력 (MPa)	저압	2.35 (-14.2°C)	2.35 (-14.2°C)
외기온도(°C)	Cond.입구	31.1	31.0
	Cond.출구	44.6	36.5
고압부압력 (MPa)	고압	8.62	7.35
냉매온도 (고압부)(°C)	Cond.입구	116.6	98
	Cond.출구	35.0	25.0
COP	-	1.45	2.09

LNG 냉열을 미활용했을 때의 p-h 선도는 고온 열원(응축기)에서의 방열 과정이 임계점 이상의 super critical 영역에서 일어난 반면, LNG 냉열을 활용했을 때의 p-h 선도는 임계점 이하에서 응축과정이 일어났다. 즉, LNG 기화 냉열이 응축과 정에서 냉각열원으로 작용하여 응축온도를 낮추어 주는 역할을 한다는 것을 알 수 있으며, 따라서 냉동시스템의 성능계수(COP)도 144%로 향상되었다.

V. 결론

본 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가스쿨러 측에 LNG 기화냉열 활용 기술을 적용함으로써 주로 상온의 온도에서 임계점 이상에서 응축되는 CO₂ 냉매의 특성을 임계점 이하에서도 응축 가능하게 하여 냉동시스템의 성능계수(COP)를 극대화 시켰다.

(2) 외기온도 31°C, 냉동 고내 온도를 -10°C의 실험조건에서 LNG 냉열을 활용했을 때의 냉동시스템 COP는 미활용시 보다 144%로 향상되었다.

(3) LNG 연료를 사용한 냉동차에 자연냉매(CO₂) 냉동시스템을 적용하여 고압운전부(11MPa)에서 적용 가능한 가스쿨러 및 초경량화시킨 유니트쿨러를 개발함으로써, 기존 냉동차에 적용되었던 프레

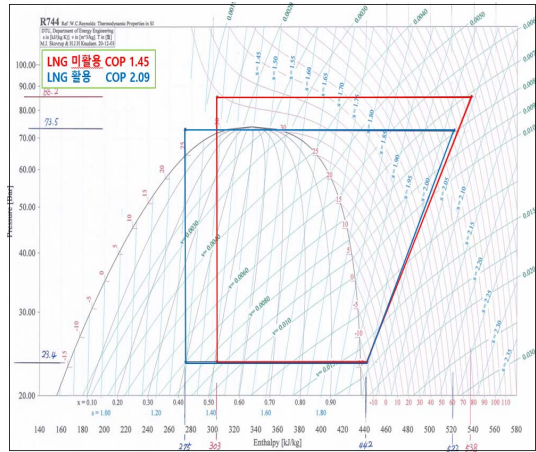


Fig. 8. P-h diagram when LNG vaporization cold heat is not used or used in gas cooler(based on internal temperature -10.0°C).

온계 냉매를 대체시켰으며, LNG 기화냉열을 가스쿨러의 냉각에 활용함으로써 친환경적이며 고효율의 냉동 트럭을 개발하였다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 자연냉매 활용 항만장비, 냉동탑차 소형 냉방시스템 및 핵심부품 개발사업으로 연구되었습니다. (2017002430002)

REFERENCES

- [1] Didion, D. A. and Bivens, D. B., "Role of Refrigerant Mixtures as Alternatives to CFCs", *International Journal of Refrigeration*, 13(3), 163-175, (1990)
- [2] Neks, P., Rekstad, H., Zakeri, G.R. and Schiefloe, P.A., "CO₂-heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results", *Int. J. Refrigeration*, 21(3), 172-179, (1998)
- [3] Lorentzen G., "Revival of carbon dioxide as a refrigerant", *Int. J. Refrigeration*, 17(5), 292-301, (1994)
- [4] Hashimoto, K., Saikawa, M., and Iwatsubo, T., "Experimental study about heat transfer coefficient of CO₂ on supercritical condition", *THE heat transfer society of Japan, The proceedings*

- of 37th National Heat Transfer Symposium, 401-402, (2000)
- [5] Pettersen, J., Rieberer, R., and Leister, A., "Heat transfer and pressure drop characteristics of supercritical carbon dioxide in microchannel tubes under cooling", Preliminary Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids at Purdue, 99-106, (2000)