

CO₂ 액화 사이클의 액화 성능 특성에 관한 연구

송 찬 호[†], 이 공 훈

한국기계연구원 에너지플랜트연구본부

Study on the liquefaction performance characteristic of CO₂ liquefaction cycle

Chan Ho Song[†], Kong Hoon Lee

Energy Plant Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-343, Korea

ABSTRACT: Growing interest in CO₂ capturing from industrial processes and storage in underground formations is emerging from commitments in reducing CO₂ emissions manifested in the Kyoto Protocol. In this paper, CO₂ liquefaction system is treated in focus of liquefaction efficiency & production rate. Presently CO₂ is transported in ships or trucks at a pressure of 14-20 bar. Considering this, the liquefaction pressures of 20, 15, 6.5 bar are selected. Compressor work and cooling capacity are calculated and compared. In order to investigate the effect of intercooling, the compressed gas after compressor work is cooled by ambient air or seawater. In case of applying the intercooling to the system, consuming energy can be saved larger than 20%. In the lower liquefaction pressure, the more CO₂ can be obtained due to higher density. In the liquefaction pressure of 6.5 bar, its CO₂ production is about 35% higher than that of the system with the liquefaction pressure, 20 bar.

Key words: carbon dioxide(이산화탄소), liquefaction(액화), transport(수송), input energy(투입 에너지)

1. 서 론

교토 의정서로부터 강조되어 온 이산화탄소 감축에 대한 활동으로부터 플랜트 등에서 배출되는 이산화탄소 포집과 지층으로의 저장에 관한 관심이 증가하고 있다.

EOR(enhanced oil recovery)은 이산화탄소를 대수층 또는 지하저장공간에 투입하여 oil 회수를 용이하게 하는 것으로 이산화탄소를 처리함에 있어서 경제적으로 유리한 방법으로 소개되고 있

다.^(1,2) 이러한 배경으로 이산화탄소 포집과 저장 사이에 있어서 이산화탄소의 수송은 반드시 필요하다. 이산화탄소는 수송압력으로 압축되고 정제, 건조된 후 액화된다. 액화된 이산화탄소는 배로 운송되는데 용기 사이즈는 1000에서 1500 m³ 사이이고 수송압력은 약 14~20 bar이다.⁽³⁾ 이러한 배들은 대용량의 이산화탄소 운반에는 적합하지 않다. 저장탱크공간을 크게 확보하기 위하여 낮은 압력이 요구되어 진다.

이산화탄소의 배로의 수송에 있어서 기술적, 비용적 측면을 기술한 연구는 일부 진행되고 있다. 비용측면에서 파이프 수송에 관한 연구가 진행되었고⁽⁴⁾, 비용 및 액서지 해석 등이 다루어졌다.⁽⁵⁾

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7071; fax: +82-42-868-7355

E-mail address: sch@kimm.re.kr

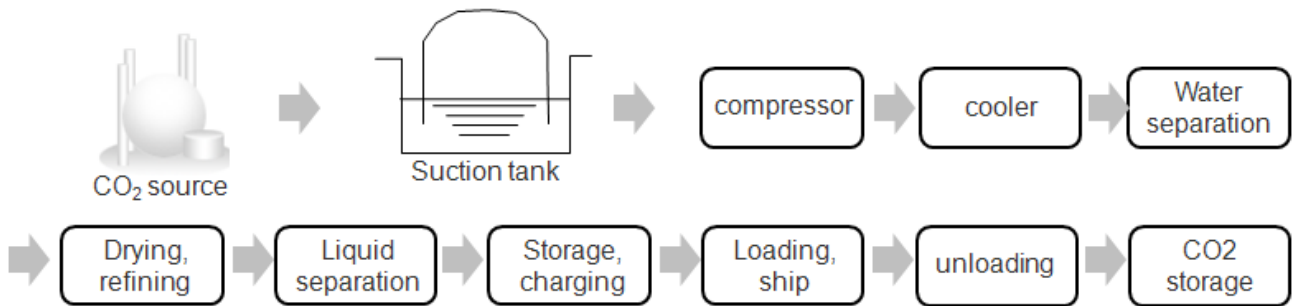


Fig. 1 CO₂ liquefaction transport process

본 논문에서는 이산화탄소의 액화시스템에서 액화압력에 따른 이산화탄소의 액화특성을 알아보고자 한다. 서로 다른 액화압력조건에서 이산화탄소를 액화시키고 이때 투입되는 압축기일, 냉각기 열량을 고려한 투입에너지와 생산된 이산화탄소량을 시뮬레이션하여 최적의 액화시스템 설계에 대한 방안을 제시한다.

2. 액화시스템 구성 및 기본원리

이산화탄소의 저장을 위해서는 수송에 적절한 온도, 압력 상태로 만드는 과정을 가지게 된다. 기체 보다는 액체 상태로 운반하는 것이 유리하므로 이산화탄소를 액화시키는 공정을 거친다. Fig. 1은 이산화탄소 액화 수송 프로세스를 나타내고 있다. 석유화학 또는 발전 플랜트 등에서 배출되는 상온, 상압의 이산화탄소를 포집하여 흡입탱크에 저장한 후 압축기를 통하여 고온 고압 상태로 압축시킨다. 이 때 발생하는 압축열을 냉각기에 의해 냉각시키고, 동시에 발생하는 수

분을 제거한다. 몇 차례 압축과 냉각의 절차를 수행한 후 건조 및 정제과정을 거치고, 액분리후에 임시 저장을 한다. 저장된 액체질소를 운송차량 등에 탑재하여 이동시키고, 해저 저장의 경우, 배에 선적하여 이송한 후 해저에 저장을 하게 된다.

이산화탄소는 대기압에서 기체 또는 고체의 상태로 존재한다. 고체의 이산화탄소(드라이아이스)는 상온상태에서 액체상태를 거치지 않고 바로 기체로 승화되는데 이러한 특성 때문에 기체 이산화탄소를 액체로 만들기 위해서는 삼중점 이상의 압력에서 냉각을 시켜야 한다(Fig. 2). 이산화탄소의 삼중점은 압력 5.17 bar, 온도 -56.6 °C로 Fig. 1의 프로세스 상에 나타나 있는 바와 같이 상온, 상압 상태의 기체를 압축기를 이용하여 압축시켜 5.17 bar 이상의 기체 상태로 만든 후 냉각시킨다. Fig. 2의 P-T 그래프를 살펴보면 고압으로 압축시킬수록 액화를 위한 냉각열량이 감소할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

3. 액화조건에 따른 해석

일반적으로 이산화탄소의 액화는 냉동기의 효율성을 고려하여 14~20 bar의 압력까지 압축하여 약 -20 °C까지 냉각하여 액화시킨다. 현재 이산화탄소 액화압력과 삼중점 근처의 액화압력을 고려하여 액화시킬 때의 액화성능을 알아보기 위해 6.5, 15, 20 bar의 액화압력을 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

공급되는 이산화탄소의 압력, 온도 조건은 1.1 bar, 15 °C이고, 단위 질량당의 값으로 해석을 하였다. 압축기는 등엔트로피 과정으로 가정하였고, 냉각기의 손실은 없다고 가정하였다. 압축은 2단 압축 과정으로 하였으며 중간냉각이 있는 경우와

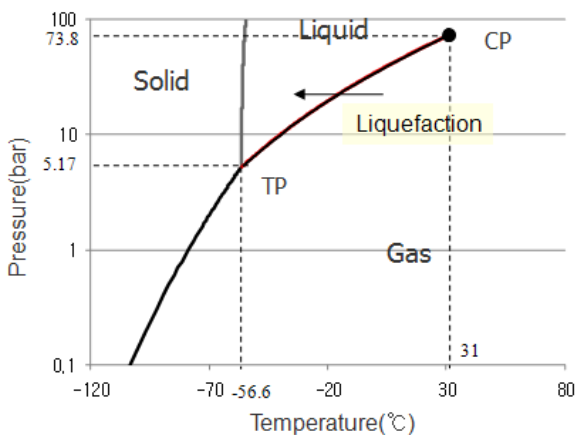


Fig. 2 CO₂ P-T diagram

없는 경우에 대하여 각각 살펴보았다. 중간냉각을 하는 경우 대기 또는 바닷물과 열교환을 하여 온도를 20 °C까지 떨어뜨린다고 가정하였다. 이 경우 냉각열량은 냉동기에서 필요한 부하에서 제외된다. 액체 이산화탄소는 과냉도를 2도 부여하여 그 때의 상태값을 취하였다.

각 액화압력에 따른 액화 프로세스를 Fig. 3~5에 나타내었다. 각 액화압력에서의 이산화탄소 상태값은 중간냉각을 적용한 결과를 나타내었다. 액화압력 6.5 bar에서 살펴보면(Fig. 3), 2단 압축 후 기체의 온도는 82.5 °C, 냉각 후 액체의 온도는 -53.1 °C이다. 15 bar의 경우에는 116.1 °C, -30.5 °C(Fig. 4), 20 bar의 경우에는 128.9 °C, -21.5 °C(Fig. 5) 이다. 중간냉각이 없는 경우는 각 액화압력에서 압축 후 기체의 온도가 각각 147.5 °C, 222.1 °C, 249.8 °C로 계산되었다. 이와 같은 각 상태점에서 엔탈피를 구하여 먼저 중간냉각이 없는 경우 투입 에너지량을 비교하여 보았다. Fig. 6에 나타나 있는 바와 같이 액화압력이 증가할수록 압축기 일이 증가하고, 냉각열량이 증가함을 알 수 있다. 냉각열량의 증가는 액화압력이 증가함에 따라 액체이산화탄소 엔탈피 증가대비 압축 후 기체의 엔탈피 증가가 더 크기 때문에 나타난 결과이다. 따라서 전체적인 투입 에너지는 액화압력이 증가함에 따라 커지고 있음을 알 수 있다. 압축기 효율을 고려한다면 액화압력 증가에 따라 냉각열량은 더 증가할 것으로 예측할 수 있다. Fig. 7은 중간냉각을 적용하는 경우 투입에너지의 비교 그래프이다. 중간냉각이 있는 경우 액화압력이 증가할수록 압축기 일은 증가하나 냉각열량은 감소한다. 대기(또는 바닷

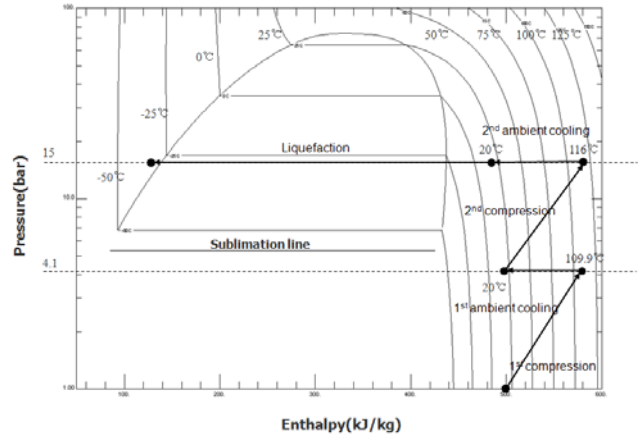


Fig. 4 CO₂ P-h diagram at 15 bar

물)을 이용하여 냉각시키게 되면 실제 액화압력이 높을수록 투입 냉각부하가 감소되는 효과를 얻을 수 있다. 따라서 전체적인 에너지 투입은 비슷한 값을 나타내고 있다. Fig. 7의 결과로부터 중간 냉각이 매우 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 중간 냉각의 적용은 6.5 bar에서도 많은 효과가 있으나 액화압력이 높을수록 효과의 정도는 커진다. 실제 투입되는 냉동기의 부하를 많이 저감시킬 수 있는 부분이므로 액화시스템 설계시 반드시 고려해야 한다.

액화 시 각 액화압력에 대한 액화생산량을 비교하기 위하여 Fig. 8에 액화상태에서의 액체 이산화탄소의 밀도를 나타내었다. 액화압력 6.5 bar에서의 밀도는 20 bar 대비 12.2 % 크다. 즉, 동일 체적 유량에서 12.2 % 더 많은 액화량을 생산할 수 있음을 의미한다. 고밀도의 액체 이산화탄소는 생산효율 뿐만 아니라 운송효율 측면에서도

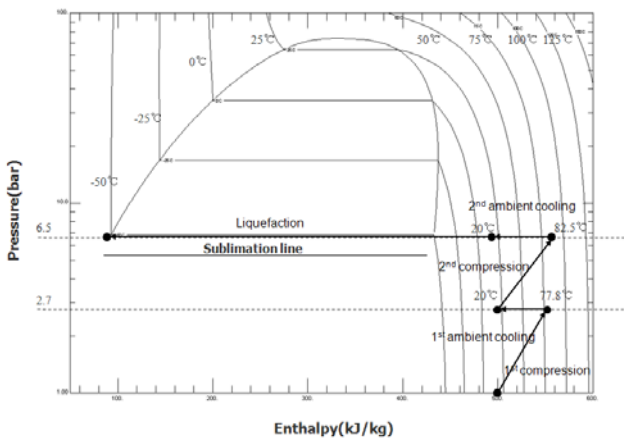


Fig. 3 CO₂ P-h diagram at 6.5 bar

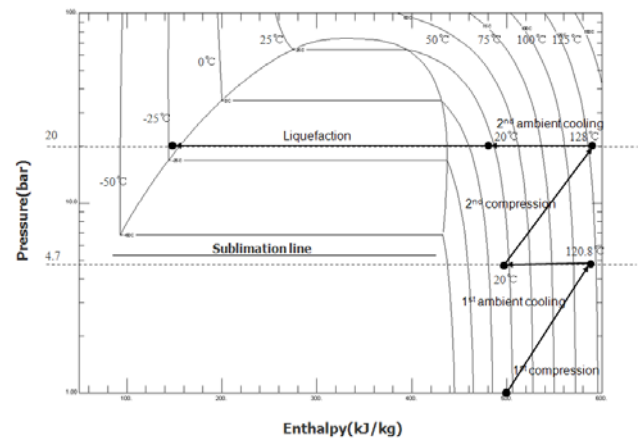


Fig. 5 CO₂ P-h diagram at 20 bar

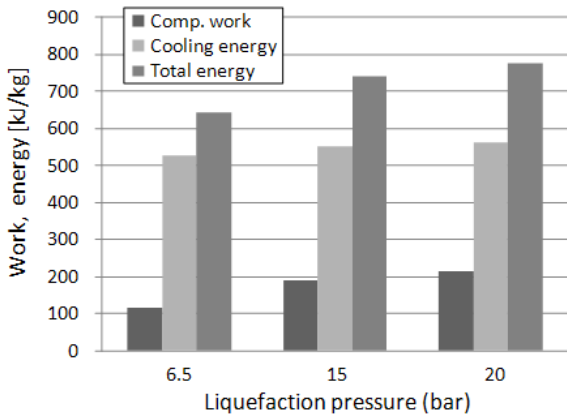


Fig. 6 Input work & energy(w/o intercooling)

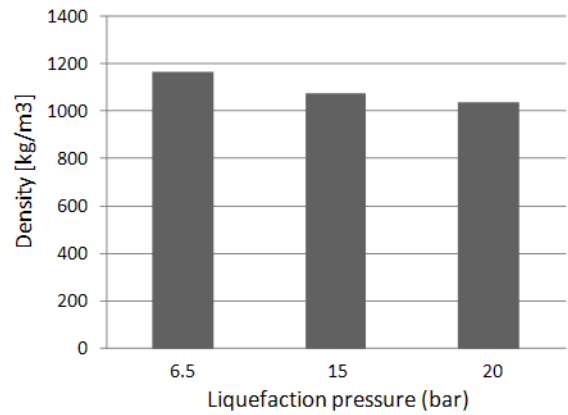


Fig. 8 Liquid density at different liquefaction pressure

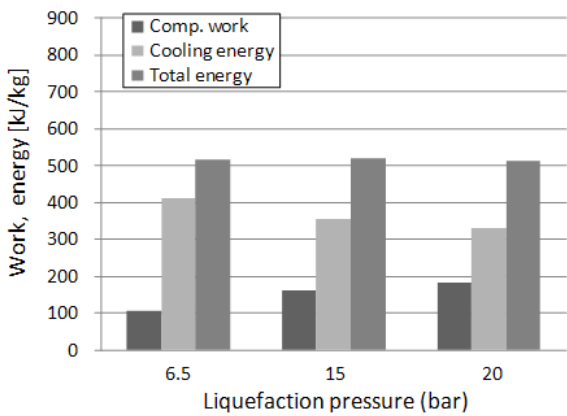


Fig. 7 Input work & energy(w intercooling)

단위 시간 당 많은 양을 수송할 수 있으므로 매우 바람직하다.

4. 결론

본 논문에서는 이산화탄소 액화시스템에 대한 액화특성을 알아보기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 기본적인 액화공정으로부터 상태값을 파악하고 서로 다른 세 가지 액화압력(6.5, 15, 20 bar)에 대하여 투입에너지 및 액체 이산화탄소 생산량 측면에서 특성을 파악하였다. 다음과 같이 결과를 요약할 수 있다.

- (1) 중간냉각이 없는 경우 액화압력이 감소할수록 투입에너지가 감소한다. (20 bar 대비 6.5 bar에서의 에너지 저감율은 17.1%)
- (2) 중간냉각이 있는 경우에 중간냉각이 없는

경우 대비 6.5 bar에서는 20%, 20 bar에서는 33.9%의 에너지 저감 효과가 있다. 이로부터 많은 냉동 부하를 줄일 수 있다.

(3) 중간냉각이 있는 경우 액화압력이 높을수록 에너지 저감 효과가 크다.

(4) 액화압력이 낮을수록 액체 이산화탄소의 밀도가 증가하여 동일체적유량 당 많은 액화량 생산이 가능하다.(20 bar 대비 6.5 bar에서 12.2% 밀도 증가)

(5) 중간냉각이 없는 경우 액화량은 에너지 저감 효과 및 밀도 증가 효과로 인하여 20 bar 대비 6.5 bar에서 35% 증가한다.

이상의 결과로부터 이산화탄소 액화시스템은 대기 또는 바닷물을 통하여 중간냉각하도록 하고 삼중점 근처에서 액화가 이루어지도록 하면 고효율, 고밀도의 액체 이산화탄소를 생산할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Hendriks, C., Van der Waart, A. S. and Byrman, C., 2002, Building the cost curves for CO₂ storage, Part 1: Sources of CO₂, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, PH4/9
2. Berger, B., Kaarstad, O. and Haugen, H. A., 2004, Greeting a large-scale CO₂ infrastructure for enhanced oil recovery,

- proceedings, 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), Vancouver, Canada.
3. Hegerland, G., Jorgensen, T. and Pande, J. O., 2004, Liquefaction and handling of large amounts of CO₂ for EOR, 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies(GHGT-7), Vancouver, Canada.
 4. Skovholt, O., 1993, CO₂ transportation system, *Energy Conversion and Management*, 34 (9-11): 1095-1103.
 5. Aspelund, A., Molnvik, M. J. and Koeijer, G., 2006, Ship transport of CO₂ technical solutions and analysis of costs, energy utilization, exergy efficiency and CO₂ emissions, *Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, Part A*, September 2006.