

DME 상용화 플랜트 예비 타당성 조사

모용기 · 강민서 · 송택용 · 백영순 · 조원준[†]

한국가스공사 연구개발원 DME기술연구센터

Preliminary Feasibility Study for Commercial DME Plant Project

YOUNGGI MO, MINSEO KANG, TAEKYOUNG SONG, YOUNGSOON BAEK, WONJUN CHO[†]

DME Technology Research Center, KOGAS R&D Division, 960 Incheonshinhang-daero,
Yeonsu-gu, Incheon, 406-840, Korea

Abstract >> Dimethyl ether (DME) is a new clean fuel as an environmentally-being energy resources. DME has similar characteristics to those of LPG and can be substituted Diesel fuel. KOGAS has investigated and developed new innovative DME synthesis process from synthesis gas with KOGAS's own technologies. KOGAS had finished the construction of 10ton/day DME demonstration plant in 2008, we have established the basic design of commercial plant which can produce 3,000ton/day DME. Specifically, an economic model for a commercial DME project will be presented. It accounts for all the major cost factors that are considered in a commercial scale project as the model input for performing cash flow analysis, after which key economic indicators are produced including the internal rate of return (IRR), net present value (NPV). Sensitivity analysis is performed to identify dominant cost factors to the project economics and quantify their impact. The inputs to the economic analysis will be based on representative cost factors from the commercial-scale design of KOGAS' direct DME process supplemented by literature data. Case study results will be presented based on recent commercialization projects.

Key words : DME commercialization(DME 상용화), Feasibility study(타당성 조사), KOGAS direct DME process (KOGAS DME 직접합성법), Economic model(경제성 모델)

1. 서 론

에너지 다원화와 지구온난화 등 기후변화에 대한 적극적 대응방안으로 떠오르는 DME는 환경 친화적인 에너지로서 LPG와 디젤 대체연료로서 주목을 받고 있다.

DME는 물성이 액화석유가스(LPG)와 유사하여 기존의 LPG 유통 인프라구조를 이용할 수 있어 저

렴한 비용으로 수송용, 가정용 및 상업용으로 보급이 가능한 연료이다¹⁾. 최근 천연가스 배관 공급이 어려운 농어촌 지역에서 소형 LPG 보급 사업이 활발히 진행되고 있는 상황에서 LPG와 혼합하거나 대체할 수 있는 DME는 타연료에 비하여 보다 저렴하게 공급이 가능하다^{2,3)}. 또한 자동차용 경우보다 높은 세탄가를 가지고 있어 압축착화가 가능하기 때문에 디젤 기관의 경우 대체연료로서 활용이 가능하고, 분자구조 내에 탄소-탄소간 결합이 없기 때문에(CH₃-O-CH₃) 연소시 매연이 거의 배출되지 않는 청정연료로서의 특성을 지니고 있다⁴⁾.

[†]Corresponding author : wicho@kogas.or.kr

[접수일 : 2014.3.7 수정일 : 2014.4.1 게재확정일 : 2014.4.30]

Copyright © 2014 KHNES

이러한 이유로 중국, 일본 등 에너지 수입 비중이 높으며 다소비 국가를 중심으로 DME 시장이 성장하고 있다. 유럽 및 미국을 중심으로 바이오매스를 원료물질로 DME를 생산하는 실증플랜트를 운영하는 등 세계적으로 활발히 연구가 진행되고 있으며 앞으로 청정 수송용 연료로 수요가 증가할 것으로 예상된다.

2000년대에 한국가스공사는 DME 상용화라는 궁극적인 목표를 가지고 촉매와 공정개발에 착수하였다. KOGAS DME 기술은 직접 DME 합성공정으로 간접합성공정과 비교하였을 때 낮은 투자비 및 생산비용으로 DME 생산이 가능하다.

한국가스공사 DME기술연구센터에서는 2008년부터 3,000톤/년 Demo 플랜트를 운영하고 있으며 이 데이터를 기반으로 2011년에는 30만톤/년의 기본 설계(Basic Engineering Package)를 완료하였고 이와 병행하여 산업통상자원부 지원 하에 최종 소비자에게 DME 시범 보급 사업을 진행하였다^{1,5)}.

한국가스공사에서는 해외 DME 상용플랜트 건설 및 운영을 위해 중동 및 동남아시아 가스전을 중심으로 해외 DME 상용화 사업을 추진 중에 있고 국내외에 다양한 DME 수요개발 연구 및 실증보급사업을 추진하고 있다.

본 연구에서는 한국가스공사에서 독자적인 기술 개발로 국산화에 성공한 DME 생산기술을 기반으로, 연간 30만톤 DME생산 플랜트에 대한 예비 사업타당성 조사를 실시하였으며, 기술성, 시장성, 경제성으로 분류하여 DME상용화 사업의 타당성을 검토하였다.

2. DME 시장 분석

DME는 단기적으로 LPG-DME 혼합연료로, 장기적으로 디젤 대체연료로 사용될 전망이다. 연간 30만톤 DME를 생산하면 한 해 한국 LPG 소비량인 640만톤/년의 약 5%를 차지하게 되며, 대규모 LPG 수입

국인 한국, 일본, 중국, 동남아시아, 인도 등에서 DME 시장을 기대해 볼 수 있다. 현재 중국에서 대규모의 DME가 생산되고 있으며 전 세계 DME 시장의 90% 이상을 차지하고 있다. 2012년 기준 1,500만톤/년의 DME 생산능력을 보유하고 있으며, 현재 20~30%(300만톤/년~450만톤/년) 정도의 양을 DME 연료로 생산하여 중국 전역에 상용공급하고 있다.

Fig. 1은 2011년도에 2010년을 기준으로 LPG 와 DME의 향후 2035년까지 가격 전망을 나타낸 그래프 이다. LPG 가격은 미국 에너지정보청(EIA, 미국)에서 예측한 에너지 가격이며, DME는 현재까지 시장 규모가 작고 새로운 연료로서 가격 예측이 매우 어렵기 때문에 DME를 LPG 대비 동일 발열량(LPG의 63%)으로 환산하여 LPG 가격으로부터 DME 가격을 예측을 하였다.

2010년 중국 에너지 보고서에 따르면 2분기 DME 평균판매 가격은 \$ 468/ton, 4분기 평균판매 가격은 \$ 607/ton이다⁶⁾. 이를 토대로 예측하면 2011년에서 2035년까지 평균 DME 가격은 \$ 678/ton이 된다. 본 연구에서는 DME 판매 가격을 예측된 가격에 비하여 보수적인 관점을 적용하여 약 \$ 650/ton으로 책정하였다. DME 연료는 기존의 화석연료와 비교할 경우 연소배기가스가 매우 청정한 연료로써 기후변화

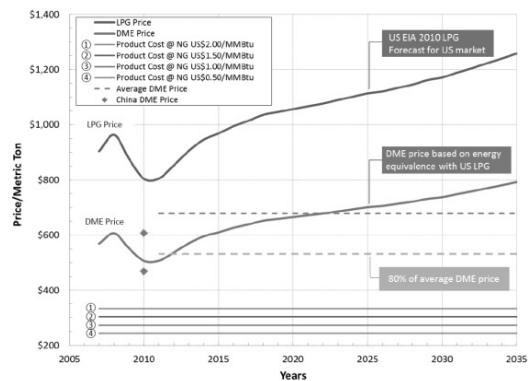


Fig. 1 DME & LPG Price Forecast (2005-2035). Also shown in the figure is the production cost of DME using the KOGAS DME Process over a range of Natural Gas feed prices targeted by KOGAS.

대응에도 적절한 해결책으로 제시되고 있는 상황에서 \$ 650/ton이란 판매 가격은 매우 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 디젤 연료의 배기가스는 최근 WHO에서 일급 발암물질로 규정하여 대책 마련이 시급한 실정이며, Euro VI가 발효되는 2016년부터는 엔진 개발이나 고가의 배기가스 후처리 설비보다는 연료 자체를 청정연료로 전환하는 시장이 보다 확대될 것으로 기대되기 때문에 현재 시점에서 DME를 보급하는 것이 좋은 기회라고 사료된다⁷⁾.

Fig. 2는 DME 사용처에 따른 시장 전망을 나타낸 그래프로 세계 DME 시장은 LPG대체연료로 가장 많이 사용 될 것으로 보인다. 현재 DME-LPG 혼합연료는 중국을 중심으로 일반 가정 및 상업용으로 보급되고 있다^{2,3)}. 2014년부터 해외플랜트에서 DME 생산

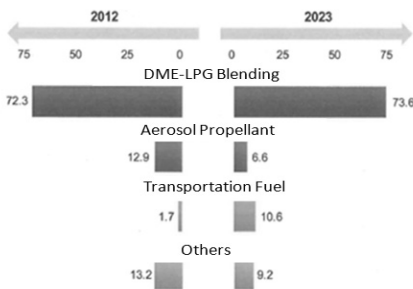


Fig. 2 DME: Market share, by applications⁸⁾

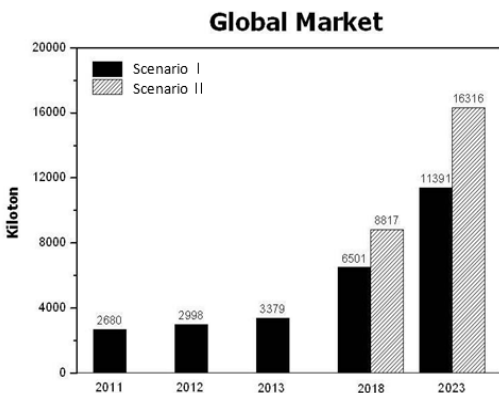


Fig. 3 DME Market forecast: global 2011-2023⁸⁾

및 공급이 원활해지고, DME를 가정용, 발전용, 수송용으로 사용하면서 DME-LPG 혼합연료 시장이 커진다고 가정하면 DME 수요량은 2013년 338만톤/년에서 2023년엔 1,139만톤/년으로 증가할 수 있다(Fig. 3, Scenario I). 또한 유럽에서 Bio-DME가 상용화 되는 등 DME 시장의 개척 및 발전을 통하여 다양한 나라에서 디젤 및 LPG 대체연료로 DME를 최대한으로 사용한다고 가정한 경우 2013년에 비해 약 4.8배 정도 증가한 1,632만톤/년으로 DME의 수요가 증가할 것으로 예상된다(Fig. 3, Scenario II).

3. DME 합성공정

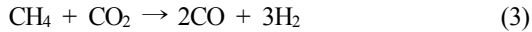
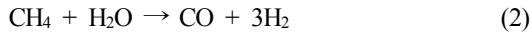
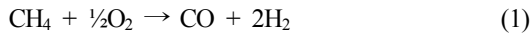
3.1 KOGAS DME 공정

KOGAS DME 공정은 크게 4개의 주요 공정으로 구성되어 있다. 먼저 원료가스로부터 합성가스를 제조하는 ‘Syngas section’은 천연가스로부터 삼중개질반응(Tri-reforming)을 통하여 1.0~1.5 비율의 합성가스(H₂/CO)를 제조한다. 두 번째는 합성가스로부터 부산물인 CO₂를 분리 및 회수하는 ‘CO₂ removal section’으로 DME 합성반응기로 공급되는 CO₂의 농도를 약 4% 이하로 낮추고 회수된 CO₂는 다시 삼중개질반응의 원료로 공급하게 된다. 세 번째로 DME를 합성하는 ‘DME synthesis section’은 CO₂가 제거된 합성가스로부터 DME를 합성하는 공정으로 합성가스로부터 DME를 직접 합성하는 직접합성공정을 적용하였다. 마지막으로 생산된 DME를 분리·정제하는 ‘DME purification section’에서 DME를 약 99.6% 이상의 고순도·연료급 DME를 생산하게 된다⁹⁾. 이와 같이 생산된 DME의 순도는 ISO Standard에서 규정하는 연료급 DME 순도인 99.5% 이상을 만족하는 결과이다.

3.1.1 삼중개질반응(Tri-reforming)

한국가스공사에서 독자적으로 개발한 합성가스 제조 촉매는 삼중개질반응기를 이용하여 천연가스,

스팀, 산소, 이산화탄소에 의한 개질반응을 하여 H₂ 와 CO로 구성된 합성가스를 생산한다^{10,11)}.



위 식에서 식(1)은 메탄의 부분산화반응을 나타내며 식(2)에서는 수증기 개질반응 식(3)은 이산화탄소 개질반응을 나타낸다. 한국가스공사의 삼중개질반응기는 위와 같이 세 가지 원료를 이용하여 메탄가스를 개질하는 반응기로서 원료가스의 조성을 변화시켜 합성가스 비율(H₂/CO)을 효과적으로 조절할 수 있는 시스템이다.

삼중개질반응은 기존의 스팀과 산소를 이용하여 메탄을 개질하는 autothermal reforming (이하 ATR)을 개선한 반응으로 이산화탄소를 사용하여 합성가스 비율을 DME 합성반응에 가장 유리한 1 : 1에 가깝게 얻을 수 있는 것이 장점이다¹⁾. 한국가스공사 삼중개질반응기는 내부에 연소버너가 있으며 산소를 조절하여 고온, 고압의 반응 조건을 운영을 할 수 있도록 설계되었다.

한국가스공사에서 상용축매로 개발이 완료된 삼중개질축매의 주성분은 Ni/Ce-ZrO₂/Al₂O₃이며, Feed gas 조성의 변화에 따라 합성가스 비율을 4.0~1.0까지 조절이 가능하기 때문에 향후 다양한 화학플랜트에 상용축매로 이용이 가능하다¹²⁾.

3.1.2 CO₂ 분리공정

전통적인 CO₂ 분리기술인 흡수탑을 이용한 CO₂ 분리공정은 에너지 다소비 공정이며 전체 공정설비에서 차지하는 설비비율이 매우 높아 장치비, 운영비가 매우 높은 공정이다. 따라서 보다 저비용이며 효

율적인 CO₂ 분리공정을 위하여 보다 콤팩트한 CO₂ 분리막 공정 시스템을 개발하였다.

분리막 공정기술은 여러 분리기술 중 분리를 필요로 하는 혼합물을 상변화 없이 분리할 수 있기 때문에 대표적인 에너지 절약 공정이다.

한국가스공사 DME 상용 플랜트에 적용할 분리막 공정기술은 KORMEX[®]이다. KORMEX[®] 분리막 공정 시스템은 합성가스가 분리막에 들어가기 전에 액체를 제거하는 전처리 공정과 중공사 막을 통해 합성가스를 분리하는 공정으로 구성되어 있다. 이때 분리막 구성에 따라 순도와 회수율을 최적화 할 수 있다.

Fig. 4는 KORMEX[®] 분리공정 시스템으로 제조된 지지체 중공사막(a)을 고압에서 운영할 수 있도록 설계된 하우징에 장착하였고(b) 이를 직렬 및 병렬로 연결하여 모듈화 하였다¹³⁾.

분리막 모듈은 양극 처리된 알루미늄 틀 안에 중공섬유의 다발로 구성되어 있으며 압축된 합성가스는 관으로 들어가서 중공섬유 외측에서 흐르고 CO₂는 선택적으로 중공사막 내부로 투과한다.

Fig. 5와 같이 KORMEX[®] 분리공정 시스템은 3 Stage 공정을 적용하였다. 먼저, Stage1에서 CO₂를 분리한 다음 CO₂ 회수율을 높이기 위해 Stage2에서 한 번 더 합성가스를 분리하여 DME 반응기로 4%미만의 CO₂를 포함한 합성가스를 보낸다. Stage3에서는 Permeate

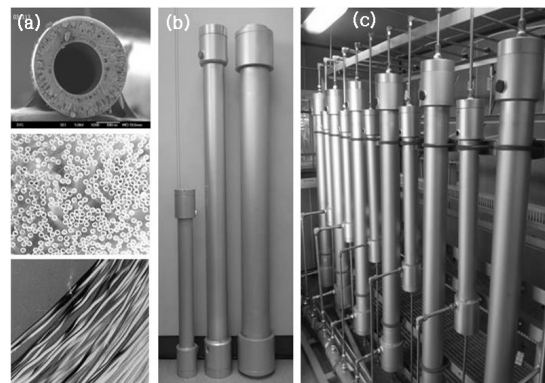


Fig. 4 KORMEX[®] Membrane module : (a)Membrane, (b) High pressure housing, (c) Membrane Module

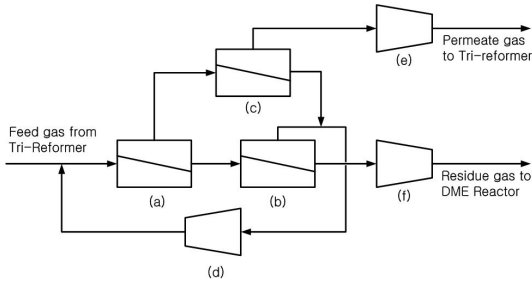


Fig. 5 3 stage process : (a) Pre-membrane (stage1), (b) Membrane (stage2), (c) Membrane (stage3), (d) recycle compressor, (e) Permeate gas compressor, (f) Residue gas compressor

gas를 분리하여 재순환 시킴으로써 H₂와 CO 회수율을 높였다.

KORMEX[®] 분리공정 시스템은 흡수, 흡착공정에 비하여 에너지 효율이 뛰어나며, 환경친화적인 청정 공정이다. 그리고 운영도 매우 단순하여 기존 공정인 흡수법이나 흡착법보다 설치비용 및 운전비용 또한 저렴한 장점을 가지고 있다. 또한 모듈화가 가능하여 적층형 구성을 통하여 소규모 대용량 설비 구축이 가능하기 때문에 FPSO (Floating production Storage and Offloading)에 적용 가능하다.

3.1.3 DME 합성

DME 합성반응은 합성가스(H₂/CO)를 원료로 DME를 합성하는 반응으로 전통적으로 아래에 나타난 공정단계로 생산되어왔다. 먼저 합성가스로부터 메탄올을 합성하고 합성된 메탄올을 탈수공정을 통하여 DME를 제조하는 간접합성방법이다.

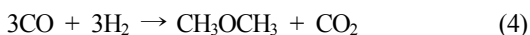
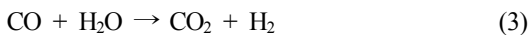
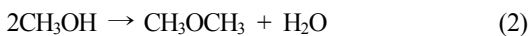


Fig. 6 KOGAS Catalyst for DME Synthesis Reaction

식(1)에서는 합성가스로부터 메탄올을 합성하는 반응을 나타내었고, 식(2)에서는 메탄올의 탈수반응에 DME가 생성되는 반응을 나타내었으며, 식(3)는 수성가스 전환반응(Water Gas Shift Reaction)을 나타내었다. 마지막으로 식(4)는 전체 반응을 나타내었다.

일반적으로 합성가스로부터 메탄올을 합성할 때는 CuO/ZnO/Al₂O₃계의 촉매를 사용하고 메탄올로부터 DME를 제조할 때는 고체산 촉매인 γ-Al₂O₃가 사용된다.

메탄올로부터 DME를 제조하는 방법보다 더 효율이 높으면서 공정이 단순화된 DME 제조방법으로 합성가스로부터 DME를 직접 합성하는 기술이 개발되었다. DME 직접합성법은 기존 간접합성법에 비하여 공정이 단순하면서 효율이 높기 때문에 훨씬 경제적이다. 여기서 사용되는 DME 촉매의 주성분은 CuO-ZnO-Al₂O₃/γ-Al₂O₃이며 CO₂/CO의 역수성반응 (Reverse Water Gas Shift Reaction) 향상 및 DME의 선택도를 높이기 위하여 첨가물을 넣어 제조하였고 반응기에 공급되는 합성가스의 비율이 1.0~1.5에서 최적의 효율을 나타내는 촉매를 개발하였다(Fig. 6).

DME 합성반응은 발열반응으로 반응온도가 급격히 상승하여 촉매의 비활성화 가능성이 있기 때문에 반응열의 효율적인 제거가 매우 중요하다¹²⁾. 효율적인 반응열 제거를 위해 실증 플랜트의 DME 합성반응기에서는 Shell&Tube형태의 고정층 촉매 반응기

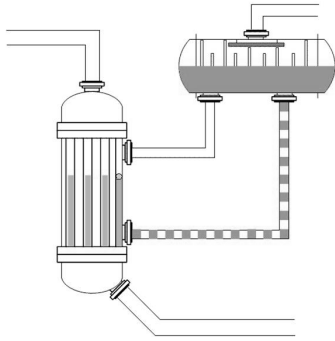


Fig. 7 Schematic Illustration of KOGAS DME Synthesis Reactor

를 적용하였으며, Fig. 7과 같이 자연 순환식 방법과 강제 순환식 방법을 병행하여 사용하는 시스템으로 구성하여 운영하였다^{12,14-15)}.

3.1.4 DME Separation & Purification Section

DME 합성반응기로부터 생성물은 DME뿐만 아니라 부산물인 메탄올과 이산화탄소, 물이 있으며 미반응 합성가스(H_2 , CO) 등이 함유되어 있기 때문에 DME를 연료로 활용하기 위하여 DME를 고순도로 분리·정제하는 공정이 필요하다.

DME 합성반응으로부터 생성되는 생성물은 저온 분리를 통하여 미반응 합성가스를 분리한 후 DME 합성반응기로 재순환 시켜 반응성을 향상시킨다. 여기서 미반응 합성가스가 분리된 나머지 성분은 초저온 분리(-65°C)를 통하여 CO_2 를 회수하고 이후 증류탑에서 DME와 메탄올을 분리하는 공정을 통하여 고순도의 DME를 정제하게 된다¹⁴⁾.

정제된 DME의 순도는 99.6% 이상으로 국제표준(ISO/TC28/SC4/WG13)의 연료기준인 99.5%를 만족하는 순도이다⁹⁾.

3.1.5 일 10톤 생산 Demo 플랜트 데이터

한국가스공사에서 Fig. 8과 같이 2008년에 준공한 10톤/일 DME Demo 플랜트는 2013년 현재 약 4,000시간 이상의 운전을 통하여 최적화 공정을 도출하였



Fig. 8 KOGAS' 3,000 Metric Tons/Year Demonstration Plant Located in Incheon, Korea

으며, 이를 반영한 30만톤/년 DME 상용플랜트 기본 설계를 완성하였다. 2013년에는 Operation Training Simulator (OTS) 시스템을 구축하여 플랜트 운영기술 고도화를 구현하고 있다.

한국가스공사의 10톤/일 DME Demo 플랜트 운전 데이터는 촉매의 성능과 긴 수명, 내구성, 공정 및 에너지 효율성, 운영의 안정성을 포함하며, 모든 대상의 사양을 충족하는 우수한 처리 성능을 보여주고 있다.

- Fig. 9에서의 삼중개질 촉매의 4,000시간 long-term test는 98% 이상의 우수한 CH_4 conversion과 합성가스 비율(H_2/CO ratio)은 DME 합성에 최적인 1.0~1.3을 보여준다.
- Fig. 10에서 보여주는 DME 촉매 3,000시간 테스트에서 CO conversion은 약 80%로 매우 우수한 성능을 나타냈다.

Fig. 10에서 CO conversion이 일정하지 않고 많은 변화를 나타내는 이유는 DME 상용 플랜트 설계기술 확보를 위하여 다양한 공정평가 및 운전기술을 적용하여 실험적인 운전이 실시되었기 때문이다. 한국가스공사에서는 DME 상용플랜트 기본설계에 최적의 설계기술을 적용하여 안정적이면서 최적의 효율을 나타내는 공정기술을 적용하였다.

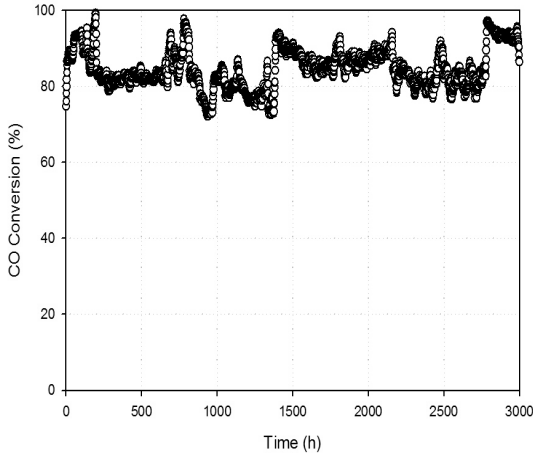


Fig. 9 CO Conversion Test Data from the DME Reactor in KOGAS' Demonstration Plant

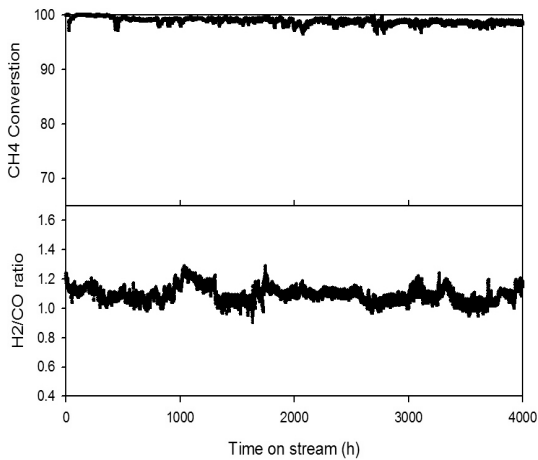


Fig. 10 Long-Run Test Data from the Tri-Reformer Reactor in KOGAS' Demonstration Plant

3.2 DME 상용플랜트 기본설계

한국가스공사 상용화 DME 플랜트의 개략적인 PFD (Process Flow Diagram)는 Fig. 11과 같다.

한국 가스 공사 상용화 DME 플랜트 공정은 연간 30만톤/년(1,000ton/day)의 규모로 공정 최적화를 통해 전체적인 열효율을 향상시켰고 총 열효율은 70.3%이다. DME 생산기술을 보유하고 있는 Haldor-Topsøe사에 따르면 하루 1,800 ~ 4,313톤의 DME를 생산할 때 총 열효율(LHV)은 site condition에 따라 약 64~68%

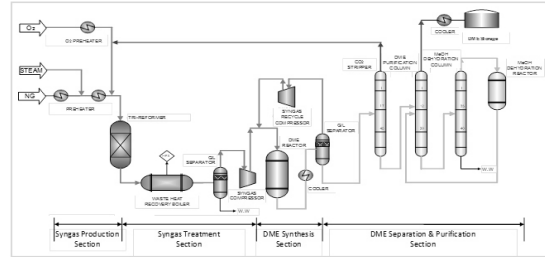


Fig. 11 PFD of KOGAS DME Commercial-Scale Plant

Table 1 Overall thermal efficiency for Direct Syngas-to-DME production - KOGAS process¹⁶⁾ Vs. Haldor Topsøe process¹⁷⁾

	KOGAS (1,000 ton/day) energy usage, GJ/hour	Topsoe (1,800-4,313 ton/day) ATR based
NG Process Feed	1,464	NA
OSBL Boiler	131	NA
Tail Gas Purge (as fuel)	-149	NA
Sub Total	1,445	NA
Product	1,077	NA
Energy efficiency %	74.5	NA
Electricity consumption	30.01	NA
Net overall thermal efficiency (LHV), %	70.3	68.4

로 나타났다(Table 1). 이를 통해 KOGAS DME 공정의 열효율이 Haldor-Topsøe사에서 발표한 열효율보다 상대적으로 더 높음을 알 수 있다.

4. 경제성 분석

본 연구에서는 자본비용(CAPEX) 및 운영비용(OPEX)으로 경제성 분석을 수행 하였으며 전제조건 및 결과는 다음과 같다.

30만톤/년 DME 생산 상용 플랜트에 공급되는 원료 가스는 중동이나 동남아시아에서 생산되는 천연 가스를 배관을 통하여 공급 받는다고 가정하였다. 생산된 DME는 연간 30만톤으로 1/3에 해당하는 10만톤은 중동 및 아시아 소비용으로 판매하고 나머지 20만톤을 국내로 도입하는 것으로 간주하였다. 그리

Table 2 Bases for natural gas-derived DME

	Site I	Site II
Plant capacity, ton/day	1,000	3,000
Natural gas cost, \$ /MMBtu	4.0	4.0
Natural gas consumption, ton per ton product	0.94	0.94
Operating costs (non-natural gas)	20% CAPEX/yr	
Transportation, \$ /ton	42	42

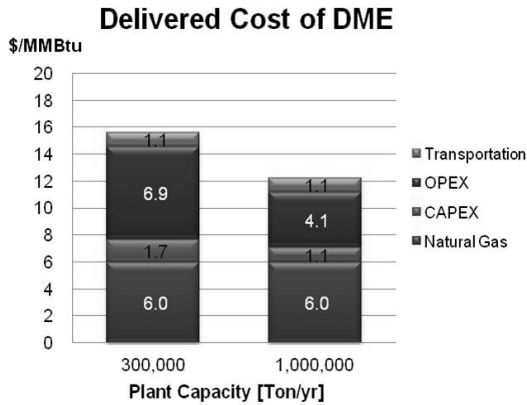


Fig. 12 Delivered Cost of DME by Plant capacity

고 국내로 도입되는 연간 20만톤의 DME는 국내 판매를 위해 해상운송 및 저장까지의 계획을 수립하여 수익성 분석에 반영하였다. 플랜트가 해외에 건설되는 점을 고려하여 원료 및 연료로 사용되는 천연가스의 가격은 \$ 4.0/MMBtu으로 선정하였다. 플랜트 공사기간은 3년, 총 운전기간은 20년으로 가정하여 현금흐름분석(Cash flow Analysis)방법을 도입하였다.

지금까지 설명한 경제성 분석의 전제조건을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 Site I은 30만톤/년 DME 생산플랜트의 경제성 분석 전제조건이며, Site II는 100만톤/년 DME 생산 플랜트의 경제성 분석 전제조건이다. 100만톤/년 DME 생산 플랜트의 경제성 분석은 30만톤/년 DME 생산 플랜트를 기준으로 Estimating factor를 적용하여 scale-up하여 실시하였다.

Fig. 12는 플랜트 규모에 따른 DME 생산가격을 비교한 그래프다. DME 생산가격은 해외플랜트에서 DME를 생산하고 국내로 도입하였을 때 CIF (Cost

Insurance Freight) 가격이다. 공급되는 원료가스 가격은 \$ 4.0/MMBtu이지만 공정으로 들어가기 전 전처리 공정을 필요로 하기 때문에 연료로서의 가격은 \$ 6.0/MMBtu로 상승하게 된다. 플랜트 규모가 증가하면 자본비용(CAPEX)은 소폭으로 감소하지만 운영비용(OPEX)은 \$ 6.9/MMBtu에서 \$ 4.1/MMBtu로 대폭 감소하게 되며 열량대비 DME 생산비용은 크게 낮아진다. 이와 같은 이유로 플랜트 규모가 큰 대량 생산 공정의 경우 가격 경쟁력을 높일 수 있는 반면에 총 투자비용이 대량으로 발생하므로 가장 적절한 경제성을 확보할 수 있는 플랜트 규모를 선정하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 12에서 30만톤/년 DME 생산 플랜트의 DME 생산가격은 \$ 15.7/MMBtu로 중량으로 환산하면 \$ 472/ton이 된다. DME 판매 가격은 국내 운송업체에 판매하는 금액으로, 동일한 조건에서 비교하기 위하여 LPG 대비 열량을 보정한 최종 소매가에서 유통단계별 마진을 제외하는 역추정 방식을 적용하였고, 그 결과 국내 DME 판매 가격은 \$ 516/ton이 된다. DME 생산가격과 판매 가격을 비교해 보았을 때 적정금액 이상의 충분한 마진이 발생하므로 경제성을 확보할 수 있다고 판단된다.

30만톤/년 DME 생산 플랜트에서 원료가스 가격 변동에 따른 DME 생산가격의 민감도 분석을 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 13에 나타난 것처럼 천연가스 공급가격이 \$ 4.0/MMBtu에서 \$ 6.0/MMBtu로 증가하게 되면 공정상에 공급되는 천연가스의 가격은 \$ 6.0/MMBtu에서 무려 \$ 8.9/MMBtu로 급격하게 증가된다. OPEX 또한 증가하게 되는데 \$ 6.9/MMBtu에서 \$ 7.4/MMBtu로 증가하게 된다. 따라서 전체 DME 생산가격은 천연가스 공급가격이 MMBtu당 \$ 4.0일 때 DME 판매가격이 \$ 15.7에서 \$ 6.0일 때 \$ 19.1로 증가하게 된다. 즉 천연가스 가격이 \$ 2.0/MMBtu 상승할 때 DME 생산단가는 약 \$ 3.4/MMBtu가 상승하게 되므

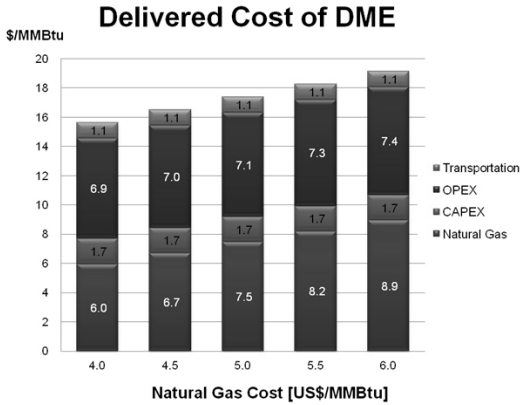


Fig. 13 Delivered Cost of DME by Natural Gas Cost

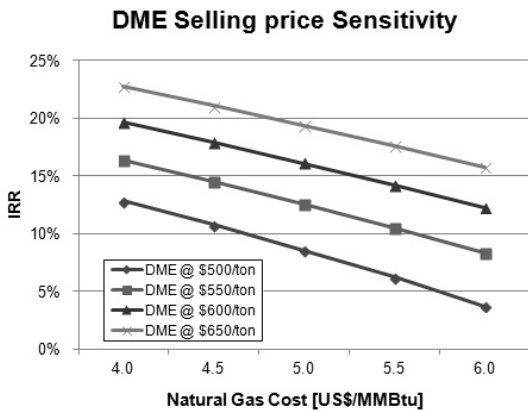


Fig. 14 Sensitivity Analysis for DME Selling Price

로 원료가스 상승에 대한 DME 생산단가는 동일비율 이상으로 높아지므로 경제성을 감소시키는 매우 중요한 인자이다.

앞서 개발된 경제성 분석 모델을 가지고 천연가스와 DME 판매 가격에 따른 내부수익률 (IRR)을 분석하는 민감도 분석을 실시하여 Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 14에서 30만톤/년 DME 생산 플랜트에서 천연가스 공급가격 \$ 5.0/MMBtu 기준으로 DME 판매 가격이 각각 \$ 500/ton, \$ 550/ton, \$ 600/ton, \$ 650/ton 일 때 IRR 민감도 분석 결과는 8.6%, 12.5%, 16.1%, 19.4%로 나타나서 천연가스 가격에 대한 민감도가 높다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 중동 및 아시아 등 해외에서 공급되는 천연가스를 원료로 하는 30만톤/년 규모의 DME 플랜트에 대한 상용기술을 언급하고 사업타당성의 경제성 평가를 수행하여 그 결과를 다음과 같이 요약하였다.

KOGAS DME 상용플랜트는 천연가스로부터 삼중개질반응을 통하여 합성가스를 제조하고 CO₂ 등을 효과적으로 제거 분리하여 효율을 높였다. 제조된 합성가스로부터 DME를 직접 합성하는 공정을 개발하였으며 이는 국내 가스화학플랜트의 독자적 기술로 평가받고 있으며, 공정개선, 최적화를 통하여 상용플랜트 기술 가치를 높이고자 한다.

먼저 DME 수요는 2023년엔 1,139만톤/년으로 증가할 것으로 예상되며 현재 판매 가격인 \$ 650/ton은 매우 높은 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

DME 상용 플랜트의 경제성은 DME의 판매 가격의 영향보다 원료가스인 천연가스의 공급 가격에 대한 영향이 더 크게 나타났다.

30만톤/년 DME 생산 플랜트에서 천연가스 공급가격이 \$ 5.0/MMBtu이고 DME 판매 가격이 \$ 550/ton 일 때 IRR은 12.5%이며, 이때 NPV는 \$ 123MM이다. 모든 비용요소를 적용하여 IRR, NPV 등의 경제지표들로 검토해본 결과 KOGAS DME 상용플랜트는 양호한 투자가치를 확보한 것으로 판단할 수 있다.

KOGAS DME 직접합성공정을 적용한 DME 상용 플랜트의 전체 공정 효율은 70.3%이며, 모든 공정은 실증플랜트(10톤/일)에서 최적화 되었다.

References

1. J. T. Chung, W. J. Cho, Y. S. Baek, and C. H. Lee, "Optimization of KOGAS DME Process From Demonstration Long-Term Test", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society (2012. 10),

- Vol. 23, No. 5, pp. 559-571.
2. T. S. Lee, J. Y. Sung, and D. J. Park, "Experimental investigations on the deflagration explosion characteristics of different DME-LPG mixtures", *Fire Safety Journal* 49 (2012) 62-66.
 3. M. Marchionna, R. Patrini, D. Sanfilippo, and G. Migliavacca, "Fundamental investigations on di-methyl ether (DME) as LPG substitute or make-up for domestic uses", *FUEL PROCESSING TECHNOLOGY* 89(2008) 1255-1261.
 4. F. Trippe, M. Fröhling, F. Schultmann, R. Stahl, E. Henrich, and A. Dalai, "Comprehensive technoeconomic assessment of dimethyl ether (DME) synthesis and Fischer-Tropsch synthesis as alternative process steps within biomass-to-liquid production", *Fuel Processing Technology* 106 (2013) 577-586.
 5. W. J. Cho, "DME Manufacturing Technology and Development Trend of CO₂ Reduction Technology", *Meteorological Technology & Policy*, 2010, pp. 78-84.
 6. China DME Analysis: Overview and Outlook 2009-2014.
 7. G. Thomas, B. Feng, A. Veeraragavan, M. J. Cleary, and N. Drinnan, "Emissions from DME combustion in diesel engines and their implications on meeting future emission norms: A review", *Fuel Processing Technology* 119 (2014) 286-304.
 8. Dimethyl Ether (DME) Market By Applications (LPG blending, Aerosol Propellant, Transportation Fuel & Others), By Raw Materials (Coal, methanol, Natural Gas, Bio-based) & Geography - Global Trends & Forecasts to 2018 & 2023.
 9. W. J. Cho, and Y. S. Baek, "Development of KOGAS DME Technology and Status of DME Commercialization", *The Korea Gas Union*, 2010, pp. 26-39.
 10. S.-H. Lee, W. Cho, W.-S. Ju, B.-H. Cho, Y.-C. Lee, and Y.-S. Baek, "Tri-reforming of CH₄ using CO₂ for Production of Synthesis Gas to Dimethyl Ether," *Catalysis Today* 87 (2003):133-137.
 11. C. Song, and W. Pan, "Tri-reforming of Methane: A Novel Concept for Catalytic Production of Industrially Useful Synthesis Gas with Desired H₂/CO Ratios," *Catalysis Today* 98 (2004): 463-484.
 12. W. Cho, T. Song, A. Mitsos, J. T. McKinnon, G. Ko, J. E. Tolsma, D. Denholm, and T. Park, "Optimal Design and Operation of a Natural Gas Tri-reforming Reactor for DME Synthesis," *Catalysis Today* 139 (2009):261-267.
 13. J. T. Chung, C. S. Lee, H. C. Koh, S. Y. Ha, S. Y. Nam, W. J. Jo, and Y. S. Baek, "Polymeric Membrane Modules for Substituting the CO₂ Absorption Column in the DME Plant Process", *Membrane Journal* Vol. 22, No. 2 April, 2012, 142-154.
 14. C. W. Choi, W. I. Cho, W. S. Hu, S. H. Lee, Y. S. Baek, and K. H. Row, "The Experimental Study on the Direct Synthesis of the (Dimethyl Ether) in the Fixed Bed Reactor", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society* (2004.12), Vol. 15, No. 4, pp. 283-290.
 15. R. Vakili, E. Pourazadi, P. Setoodeh, R. Eslamloueyan, and M. R. Rahimpour, "Direct dimethyl ether (DME) synthesis through a thermally coupled heat exchanger reactor", *Applied Energy* 88 (2011) 1211-223.
 16. S. H. Lee, W. J. Cho, T. Y. Song, and Y. J. Ra, "Scale up Study of DME direct Synthesis Technology", 24th World Gas Conference, Argentina.
 17. T. H. Fleisch a, A. Basu b, and R. A. Sills c, "Introduction and advancement of a new clean global fuel: The status of DME developments in China and beyond", *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 9 (2012) 94-107.