

수소 연료전지 하이브리드 시스템 기반 메탄올 연료추진 선박에서 CCU 적용에 따른 시스템 특성 분석

이윤호* · 김준호**†

* 국립목포해양대학교 해양경찰학부 교수, ** 국립목포해양대학교 해양메카트로닉스학부 교수

Characteristics of the Carbon Capture and Utilization System in Methanol Fuel Propulsion Ships Based on the Hydrogen Fuel Cell Hybrid System

YoonHo Lee* · JunHo Kim**†

* Professor, Division of Coast Guard, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

** Professor, Division of Marine Mechatronics Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요약 : 본 연구에서는 온실가스 배출을 감축하기 위해 메탄올을 추진 연료로 사용하는 선박에 수소 연료전지 시스템이 추가된 하이브리드 시스템 공정을 설계하였다. Case1에서는 메탄올 연료 엔진 시스템을 설계하여, 엔진에 가솔린 대신 메탄올을 연료로 공급했을 때의 배기가스 배출량을 알아보았다. Case2에서는 Case1에 메탄올 개질 시스템을 추가해, 수소연료전지 시스템을 설계하였다. 이 하이브리드 시스템에서는 그레이 수소를 생산하며, 엔진과 연료전지의 출력을 조합하여 선박을 구동한다. 하지만 그레이 수소는 수소를 생산하는 과정에서 탄소를 배출한다는 단점이 있다. 이 점을 보완하기 위해 Case3에서는 CCU시스템을 추가하였다. Case2에서 배출한 Flue gas의 이산화탄소를 포집한 후, 그레이 수소와 합성해 블루 메탄올을 생산하였다. 본 연구에서는 Case study를 통해 개질 온도 220°C, 개질 압력 500kPa, SCR은 1.0, flow ratio가 0.7일 때 최적의 운전조건임을 알 수 있었다. Case3의 시스템은 Case1에 비해 탄소 배출량을 42% 감소시켰다. 결과적으로, Case3의 하이브리드 시스템을 통해 선박의 이산화탄소 배출을 유의미하게 저감할 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어 : 메탄올, 수증기 개질, 최적 운전, 시스템 효율, 수소 연료 전지

Abstract : In this study, a hydrogen fuel cell process based on methanol was developed to reduce greenhouse gas emissions. In Case1, the methanol fuel engine system was designed to investigate the emission of exhaust gas when methanol was supplied as fuel instead of gasoline to the engine. In Case2, a hydrogen fuel cell system was designed by adding a methanol reforming system to Case1. This hybrid system produced gray hydrogen and combined the output of the engine and fuel cell to drive the ship. However, gray hydrogen emits carbon in the process of producing hydrogen. To address this problem, a carbon capture and utilization (CCU) system was added to Case3. The CO₂ of the flue gas discharged from Case2 was synthesized with gray hydrogen to produce blue methanol. The results of the case studies revealed that the optimal operating conditions were 220 °C, 500 kPa, SCR = 1.0, and flow ratio = 0.7. The system of Case3 reduced carbon emissions by 42% compared with that Case1. Thus, the hybrid system of Case3 could considerably reduce the ship's CO₂ emissions.

Key Words : Methanol, Steam reformer, Optical operation, System efficiency, Hydrogen fuel cell

1. 서론

계속해서 심각해지고 있는 지구 온난화 문제에 따라 전 세계적으로 온실가스의 배출을 감축시키기 위한 노력이 지

속적으로 이루어지고 있는 가운데, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 본부가 위치한 런던에서 2023년 7월에 열린 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC) 80차 회의에서 국제 해운 온실가스를 퇴출을 위해 2050년 경, 또는 그에 근접한 시기에 탄소 순 배출량 제로(Net-Zero)를 달성하고, 2030년까지 국제해운에서 사용되는 에너지 총량의 최소 5%를 저·무배출 기술이나 연료

* First Author : yhlee@mmu.ac.kr, 061-240-7209

† Corresponding Author : junho.kim@mmu.ac.kr, 061-240-7241

로 전환하여 10%까지 사용하자는 목표를 제시하였다. 이러한 탄소 저감 목적 달성을 위해 기존 내연기관에서 벗어나 장기간 장거리 운행할 때 전력원으로 친환경 수소 연료전지를 사용하는 방안에 대한 연구가 이루어졌으며(Cheon et al., 2018), 수소 연료전지를 위한 수소 연료 공급에 대한 연구로서 메탄올 수증기 개질을 이용한 수소 생산에 관한 선행 연구가 이루어졌다(Cho et al., 2022). 선박에서 배출되는 오염물질을 줄이기 위해 수소연료를 사용하는 연료전지가 연구되고 있는데 연료전지는 연료로 사용되는 수소 내부의 화학에너지를 공기 중에 존재하는 산소와 전기 화학반응을 통해 전기에너지와 열에너지로 변환시키는 장치이다. 연료전지 기반 발전은 기존 발전 방식에 비해 온실가스 배출량을 30%까지 줄일 수 있다(Roh et al., 2019). 이러한 수소 연료전지에서의 수소 생산을 위한 탄화수소의 종류로 메탄, 에탄올, 메탄올, 경유, 가솔린 등이 있을 수 있는데 특히 메탄올은 LNG를 사용하는 기존 선박이 LNG를 저장하기 위해 영하 162℃의 극저온 저장 창고가 필요한 것과 다르게 메탄올의 경우 끓는점이 약 65℃로 상온, 상압에서 액체로 저장 및 운송이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 메탄올을 개질하는 방법으로는 상대적으로 고 순도의 수소를 생산할 수 있는 수증기 개질 방식이 주로 이루어지고 있으며, 수증기 개질 반응 시 사용할 수 있는 촉매로는 촉매활성이 높고 대체 촉매인 귀금속 기반 촉매보다 상대적으로 가격이 저렴한 니켈 촉매가 수증기 개질 반응을 위한 촉매로 가장 널리 이용되고 있다(Lee 2014).

최근 선박의 주 동력원인 디젤 엔진에 연료전지 시스템을 결합한 하이브리드 시스템에 대한 연구는 활발하게 진행되어 오고 있다(Kim et al., 2022; Vuong et al., 2022). 하지만 이러한 연구는 일반적으로 하이브리드 시스템의 성능 또는 시스템 구성을 개선하는데 목적이 있으며, 하이브리드 동력으로 인한 이산화탄소 배출량 감소에 대한 실험적 연구는 전무했다. 따라서 이번 연구에서는 디젤 엔진이 아닌 메탄올 연료를 이용한 SI(Spark Ignition) 엔진과 메탄올 수증기 개질기를 통해 수소 연료를 공급한 수소 연료 엔진과의 하이브리드 시스템에서의 System 성능과 이산화탄소 저감에 대한 실증적 연구를 수행하였다. 이때 해당 하이브리드 시스템은 이산화탄소 저감 능력을 최대화하고 메탄올 연료 소모를 최소화하기 위해 메탄올 엔진에서 생성된 flue gas에서의 이산화탄소를 포집하여 수소화 반응을 통해 다시 메탄올로 전환하는 공정을 포함한다.

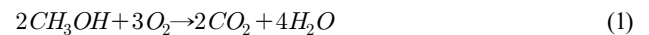
본 연구에서 메탄올 수증기 개질기의 특성 분석을 위해 상용 화학공정모사기인 UniSim R470을 이용했다. 최근까지도 공정설계 프로그램을 통한 연료전지 시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 결과값 또한 높은 신뢰도를

가지고 있다(Seo et al., 2009; Cheon et al., 2018; Oh et al., 2016). 연구를 통해 운전 및 개질 온도, 압력, SCR(Steam to Carbon Ratio), 그리고 메탄올 엔진과 연료전지 간의 메탄올 소모량에 따른 수소 생성물의 분율과 반응물의 소모량 등을 예측하였다. 또한, 주요 공정 변수의 변화에 따른 전환율과 개질기에 초점을 맞춰 계산한 전체 시스템 효율, 수소 연료전지 효율, 메탄올 생산량을 평가하여 최적의 운전점을 도출하여 최종적으로 얼마나 이산화탄소를 저감할 수 있는지에 대해 분석하였다. 이때 개질공정에서 물질의 전달 특성 및 상거동 특성을 계산하기 위하여 기존의 기체방정식 중 비교적 정확성이 높고 각 성분 간의 상호작용에 대한 관계가 포함되어 있는 Peng-Robinson식을 사용했다(Cho and Kim, 2009).

2. 하이브리드 시스템 기반 메탄올 연료추진 공정

2.1 Case 1 : 기존 메탄올 연료추진 공정

Fig. 1은 기존 메탄올 연료 엔진의 시스템의 공정흐름도이다. 공정에서 보이는바와 같이 엔진으로 메탄올과 공기가 유입되며 엔진에서 연료와 공기 혼합물이 연소되어 발생한 에너지로 선박을 움직인다. 이 과정에서 나온 배기가스는 엔진의 후단으로 배출된다. 이때, Table 1은 공정 해석을 위한 운전 및 가정을 보인다. 여기서, Conversion 반응기는 엔진으로의 역할을 하며 식(1)의 메탄올 연소 반응식을 이용하였다.



개질기로 유입되는 메탄올의 몰 유량은 실제 선박에서 사용되는 메탄올 엔진인 6G80ME 모델을 기준으로 하여 이 엔진의 연속최대출력(MCR) 상태에서의 질량 유량을 참고하여 8,199kg/h로 설정했다(MAN Energy Solutions, 2022).

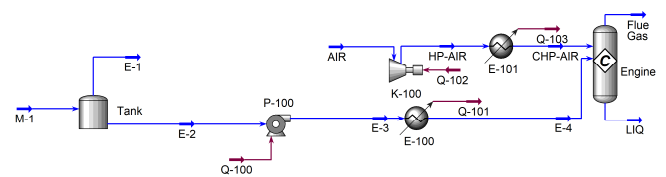


Fig. 1. Process flow diagram of Methanol fueled engine system.

Table 1. Setting parameters of the methanol fueled engine

Parameters	Value
Methanol mass flow (kg/h)	8,199
Reactor Temperature (°C)	229
Reactor Pressure (kPa)	1601

수소 연료전지 하이브리드 시스템 기반 메탄올 연료추진 선박에서 CCU 적용에 따른 시스템 특성 분석

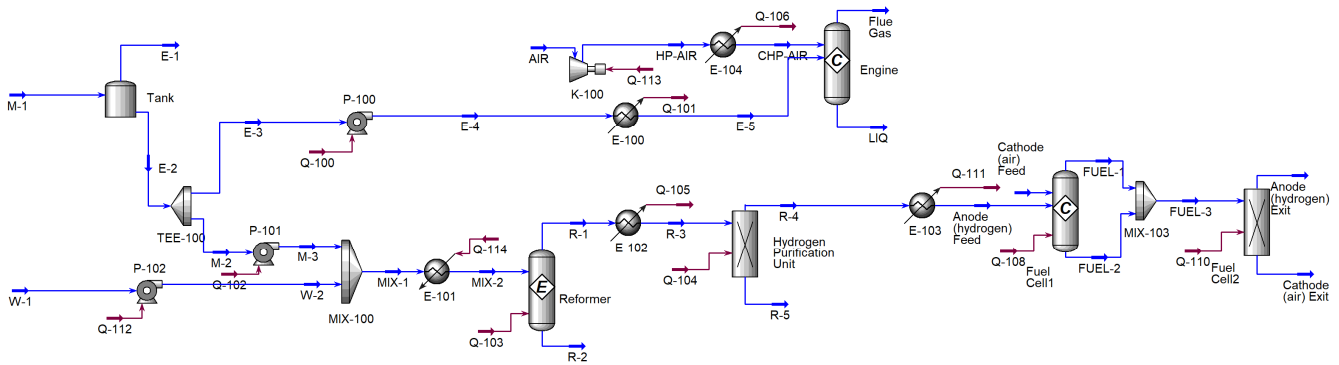


Fig. 2. Process flow diagram of Hybrid system.

Table 2. Setting parameters of flue gas

Parameters	Value
Flue gas mass flow (kg/h)	59880
Flue gas composition (mol%)	
N ₂	0.782
O ₂	0.021
H ₂ O	0.074
CO ₂	0.123

엔진에서 배출되는 배기가스의 유량 및 조성은 Table 2에 정리했다. Flue gas의 온도는 실제 선박에서 사용되는 메탄올 엔진인 6G80ME 모델을 기준으로 이 엔진의 MCR 상태에서의 배기가스 온도를 참고하여 229℃로 설정하였다.

2.2 Case 2 : 하이브리드 시스템 기반 연료추진 공정

Fig. 2는 Case 1의 기존 메탄올 연료 엔진 시스템에 메탄올 수증기 개질 시스템과 수소연료전지 시스템을 추가한 것으로, 엔진과 연료전지의 출력을 조합하여 선박을 구동하는 방식이다. 본 연구에서의 하이브리드 시스템은 엔진, 기화기, 개질기, 수소정제장치, 연료전지로 구성되어 있으며, 아래 Fig. 3에 시스템의 BFD(Block Flow Diagram)을 도시했다.

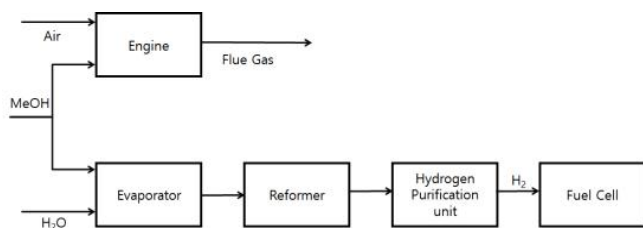


Fig. 3. Block flow diagram of hybrid system.

메탄올은 엔진과 개질기 두 흐름으로 유입되며, 메탄올과 물은 기화기에서 완전 기화되고 개질기로 유입되어 수소가 풍부한 개질가스를 생성한다. 개질 가스는 수소정제장치를 통해 수소와 불순물로 분리된다. 이때 수소 정제 장치는 압력 변동 및 혼합가스의 흡착제에 대한 선택도의 차이에 의해 수소를 분리하는 PSA(Pressure Swing Adsorption)와 팔라듐을 이용한 금속 치밀막을 통해 수소를 분리하는 Pd membrane으로 구분할 수 있다(Cho et al., 2022). 수소 정제장치에서 분리된 고 순도의 수소는 고분자 전해질막 연료전지 (PEMFC) 모듈로 공급된다.

2.2.1 메탄올 개질 공정

메탄올 수증기 개질의 경우 70 - 80vol% 수준의 더 높은 수소 수율을 얻을 수 있으며, 개질 가능 온도가 200 - 300℃로 메탄올 포함한 다른 연료에 비해 낮은 편이며, 일산화탄소 함량이 1 - 2 vol%로 작다는 장점이 있다. 또한 메탄올 수증기 개질은 다른 두 개질 공정에 비해 촉매 수명이 길고 연료 흐름 제어가 용이하다는 장점이 있다(Li et al., 2023). 본 연구에서 개질 반응에 사용된 식은 다음과 같다.



개질기로 유입되는 메탄올의 양은 설정한 전체 유량 8,199kg/h에서 엔진으로 들어가는 양을 제외한 값이며 TEE-100에서 나뉘지는 flow ratio를 변경하며 최적화를 진행하였다. 메탄올 수증기 개질기의 주요 변수로는 개질 온도, 개질 압력, SCR이 있다. 이 3가지 변수를 모두 고려하여 최적화를 진행하였다. 메탄올과 수증기의 공급 비율인 SCR은 식(4)로 계산된다. 본 연구에서 수소 정제 장치는 Pd membrane으로 가정하고 모델링을 진행하였다.

$$SCR = \frac{S}{C} = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{CH_3OH}} \quad (4)$$

메탄올 수증기 개질 시스템에서 생성된 수소가 연료전지로 유입될 때 미처 반응하지 못한 부산물이 들어가면 연료전지의 백금 촉매가 망가질 가능성이 있기 때문에 Pd membrane을 통해 99.995% 이상의 보다 고 순도의 수소를 얻을 수 있다고 가정하였다. 아래 Table 3에 나타낸 변수를 조절하며 수소 수율(Y_{H_2})과 전체 시스템 효율(η_{system}) 변화를 확인하며, 시스템 최적화를 수행하였다.

Table 3. Variable conditions of the reforming system

Parameters	Value
Flow ratio of TEE-100 (-)	0.1~0.9
SCR (-)	0.1~0.3
Reformer inlet Temperature (°C)	100~400
Reformer Pressure (kPa)	500~2,000

$$Y_{H_2} = \frac{\dot{n}_{H_{2out}}}{\dot{n}_{CH_3OH_{feed}}} \quad (5)$$

$$W_{pump} = \dot{m}_{in}(h_{out} - h_{in}) \quad (6)$$

$$W_{airblower} = \dot{m}_{in}(h_{out} - h_{in}) \quad (7)$$

$$W_{heater} = \dot{m}_{in}(h_{out} - h_{in}) \quad (8)$$

$$\eta_{system} = \frac{\dot{m}_{product, H_2} \cdot LHV_{H_2}}{\dot{m}_{CH_3OH} \cdot LHV_{CH_3OH} + W_{pump} + W_{airblower} + W_{heater}} \quad (9)$$

2.2.2 연료전지 공정

Fig. 4는 PEMFC의 기본 도식도를 보여주며, 일반적으로 PEMFC의 단위 셀은 고분자 전해질막(Polymer Electrolyte Membrane)에 의하여 분리된 연료극(음극, Anode)과 공기극(양극, Cathode)의 두 전극으로 구성되었고, 각 셀은 분리판(separator)에 의하여 분리 되고 있다. PEMFC의 전기화학 반응은 연료극에서의 수소는 수소 이온과 전자를 공급하며, 이 전자가 외부회로를 통해 흘러서 음극에 도달하며, 수소 이온은 수소 이온교환막을 통해 확산하여 음극에 도달하고 산소와 반응하여 물을 생성한다. 고분자전해질 연료 전지는 저온인 60 - 80°C에서 동작이 가능하며, 높은 전류밀도를 유지할 수 있다.

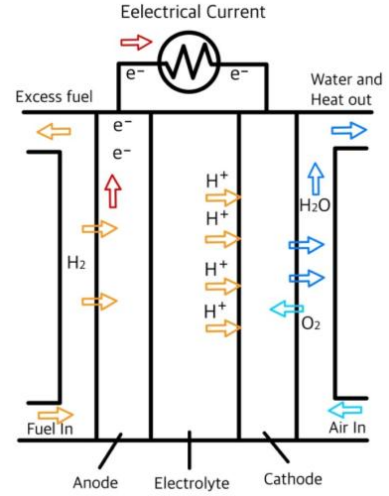


Fig. 4. Schematic of PEMFC.

이러한 이유로 고분자전해질 연료전지는 저온에서도 빠른 시동능력이 있으며, 소형화할 수 있고, 가벼운 전지를 만들 수 있어서 이동 전원으로 매우 적합하다고 판단된다(Minnehan and Pratt, 2017; Sim et al., 2012; Nazerifard et al., 2021).



Table 4. Setting parameters of the fuel cell system

Parameters	Value
Cell Area (cm ²)	850
Number of cells	105
Operating Temperature (°C)	70

Table 5. Example constrains

Constants	Ballard Mark V PEMFC at 70°C
Eoc (V)	1.031
r (kΩ cm ²)	2.54 × 10 ⁻⁴
A (V)	0.03
m (V)	2.11 × 10 ⁻⁵
n (cm ² mA ⁻¹)	8 × 10 ⁻³

수소 연료전지 하이브리드 시스템 기반 메탄올 연료추진 선박에서 CCU 적용에 따른 시스템 특성 분석

연료전지 공정 시스템의 운전 조건 및 가정은 Table 4에 정리하였다. 연료전지의 면적을 850cm²로 설정하였으며, 35-42% 범위 내 PEMFC의 발전효율을 보이도록 연료전지 cell 개수를 설정하였다. 연료전지 공정 시스템 최적화를 위해 연료전지의 효율, 출력을 아래 식(13)을 이용해 계산하였다.

$$\text{Cell Voltage (V)} = E_{oc} - ir - A \ln(i) + m \exp(ni) \quad (13)$$

$$\text{Current (A)} = \frac{\frac{\text{mole } e^-}{\text{mole } H_2} \times \text{Faradays' s constant} \times \text{Total flow } H_2O}{\text{Number of Cells}} \quad (14)$$

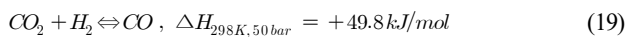
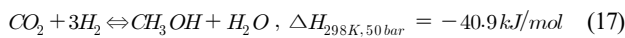
$$\text{Total Voltage (V)} = \text{Cell Voltage (V)} \times \text{Number of Cells} \quad (15)$$

$$\text{Power (W)} = \text{Cell Voltage (V)} \times \text{Current (A)} \quad (16)$$

연료전지에서의 출력은 배터리 저장 효율을 95.5%로 설정하고, 식(16)인 Power에 0.955를 곱한 결과로 최종 분석하였고, 연료전지 효율과 동시에 고려하여 공정 최적화를 진행하였다.

2.3 Case3 : 배기가스 및 수소 재사용 공정

메탄올 합성 공정은 원료로써 수소, 일산화탄소 또는 이산화탄소 등으로 구성된 합성 가스를 필요로 하며 상용 메탄올 합성 공정은 합성가스 생산과 메탄올 합성 공정 2개의 부분으로 나누어진다. 메탄올 합성 반응은 이산화탄소의 수소화 반응에 의하여 메탄올을 합성하는 반응과 부반응으로 일어나는 역수성가스 전환반응(RWGS; Reverse Water-Gas Shift Reaction)으로 구성되며 아래의 식과 같이 표현할 수 있다(Kim, 2011).



식(18)의 반응은 평형에 의해 제한을 받는 반응이며 열역학적으로 반응압력이 높아질수록, 그리고 반응온도가 낮아질수록 메탄올 수율이 증대될 수 있다. 식(19)의 역수성가스 전환반응은 수소를 소모시켜 일산화탄소와 물을 생성시키는 부반응으로써 메탄올 합성 반응과 경쟁적으로 일어나 생성물인 메탄올에 대한 선택도를 감소시킬 수 있다.

식(17)과 식(18)을 조합하여 반응계를 열역학적으로 나타낼 수 있는데, 식(1)의 평형 상수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_1 = \frac{a_{CH_3OH} \cdot a_{H_2O}}{a_{CO_2} \cdot a_{H_2}^3} = K_{\varphi_i} \cdot K_p \quad (20)$$

$$= \frac{\varphi_{CH_3OH} \cdot \varphi_{H_2O}}{\varphi_{CO_2} \cdot \varphi_{H_2}^3} \cdot \frac{p_{CH_3OH} \cdot p_{H_2O}}{p_{CO_2} \cdot p_{H_2}^3}$$

여기서 a_i 는 fugacity, φ_i 는 fugacity 계수, 그리고 φ_i 는 분압을 의미한다. 메탄올 합성의 실제 압력과 온도에서 메탄올과 물은 ideal gas와는 다른 거동을 보이기에 fugacity의 이용이 필요하다.

해당 반응 조건에서 기체의 non-ideal 함 때문에 ideal한 것보다 더 큰 메탄올 전환율을 얻게 되는데 1986년 Graaf 등 상업적인 촉매를 이용한 실험결과를 발표하였으며, 그 결과 Soave-Redlich-Kwong 방정식, Peng-Robinson 방정식, Virial 및 Redlich-Kwong 방정식 중 Peng-Robinson 방정식이 가장 잘 실험 결과들과 일치한다고 발표하였다. 메탄올 합성 반응은 식(18), 식(19)이 발열 반응이며 반응에 따라 물수가 감소하므로 Le Chatelier 법칙에 따라 전환율은 저온, 고압에서 최대한으로 얻을 수 있고 합성 가스의 조성 또한 전환율에 영향을 줄 수 있다. 또한 질소 등의 비활성 기체 역시 전환율을 낮출 수 있다(Kim et al., 2015).

2.3.1 Flue Gas Recycle 공정

메탄올을 이용해 엔진과 연료전지를 통해 하이브리드로 동력을 얻는 공정에 엔진에서 배출된 flue gas와 개질 공정 도중 나온 부산물을 recycling하여 메탄올을 생산하는 전체적인 공정은 크게 배기가스 재사용 공정과 수소 재사용 공정 두 요소로 구분할 수 있다(Kim et al., 2015).

Flue gas는 Case1의 메탄올 엔진에서 생산된 것으로 완전히 연소되어 온전히 물과 이산화탄소가 배출되어 Table 6의 조건으로 일정하다고 공급된다고 가정한다. 이때 공정의 개질 조건은 SCR 1.0, flow rate 0.5, 250°C, 500kpa이다. Flue gas의 폐열을 활용하기 위해 Case2의 수소 개질에서 사용된 히터는 메탄올과 물을 Pre-heating하는 공정으로 이용했다. 열교환을 마친 가스는 Splitter에 의해 순수한 이산화탄소와 그 외의 물질로 분리된다. 여기서 분리된 이산화탄소는 수소 개질 공정 과정에서 배출된 Byproduct와 연료전지에서 반응하고 남은 수소와 함께 Mixer Component에서 만나 Methanol Synthesis를 위한 반응기로 전달되는 흐름으로 정의된다.

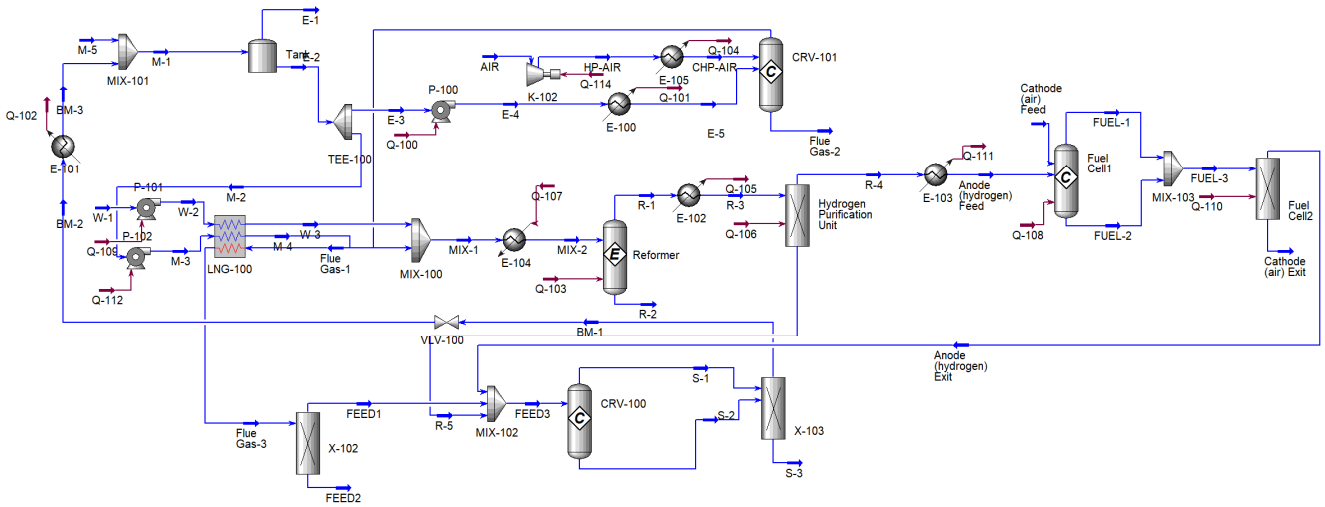


Fig. 5. General view of the proposed model Simulation.

Table 6. Properties of the flue gas stream

Properties	Value
Vapour Fraction	1.0
Temperature (°C)	229
Pressure (kPa)	1,601
Molar Flow (kgmole/h)	13,446
Mass Flow (kg/h)	386,503
H2O Mole Fraction	0.0190
CO2 Mole Fraction	0.0095
O2 Mole Fraction	0.1927
N2 Mole Fraction	0.7787

2.3.2 수소 재활용 및 메탄올 합성 공정

메탄올 생산을 위해 Feed로 공급되는 흐름은 3가지로 구분할 수 있다.

Table 7. Properties of the feed stream

Properties	Value
Vapour Fraction	1.0
Temperature (°C)	96.2
Pressure (kPa)	500
Molar Flow (kgmole/h)	381.3
Mass Flow (kg/h)	11,516
H2O Mole Fraction	0.053742
CO2 Mole Fraction	0.617311
CO Mole Fraction	0.052018
N2 Mole Fraction	0.001724

열교환기를 거쳐 Splitter를 통해 분리된 Flue gas의 이산화탄소, 연료전지에서 사용되고 남은 수소, 수고 개질 공정에서 고 순도의 수소 추출을 위해 기존에 분리되었던 잔여 이산화탄소와 물, 일산화탄소이다. Feed를 통해 공급된 이산화탄소와 수소, 일산화탄소는 반응기를 통해 메탄올을 생성해 내며, 이때의 Feed Stream의 변수 조건은 Table 7에 정리하였다. 그리고 반응기에서 생성된 메탄올은 최초의 메탄올 투입을 위한 저장 탱크로 보내진다. 본 시스템에서 제안한 최종적인 공정의 PFD는 Fig. 5와 같다.

3. 연구 결과

메탄올 수증기 개질기와 이산화탄소 수소화에 의한 메탄올로의 전환 공정에서 중요한 설계 변수로는 개질 온도, 개질 압력, SCR로 생각될 수 있다. 또한 엔진으로 가는 메탄올과 수소 연료 전지로 나누어지는 메탄올의 유량비율 역시도 주요 변수로 볼 수 있다. 이에 따라 각 Case별 공정을 설계하였으며, 조건에 따른 결과 도출을 위해 설정한 각각의 변수는 다음과 같다.

- 1) 개질 온도와 개질 압력에 따른 수소 전환율
- 2) 개질 온도에 개질 압력에 따른 시스템 효율
- 3) SCR에 따른 Flow ratio별 전체 시스템 효율
- 4) SCR에 따른 Flow ratio별 연료전지 효율
- 5) Flow ratio에 따른 연료전지 출력
- 6) Flow ratio에 따른 메탄올 생산량
- 7) 각 공정별 이산화탄소 배출량

3.1 엔진 최대 출력 및 최초 메탄올 공급 유량 조건

Case 1의 시스템은 개질기를 통한 수소 연료전지와 메탄올 합성 공정을 이용하지 않고 메탄올 엔진을 100%로 운영되는 시스템으로, 그 때 출력과 요구되는 메탄올 유량은 Man Energy Solution에서 제공하는 CEAS(Computerized Engine Application System) 선박 엔진 데이터 보고서, CEAS Engine Data report 6G80ME-C10.5-LGIM-EGRTC를 이용하여 계산하였다(MAN Energy Solutions, 2022). 해당 선박 엔진의 보고서는 ISO ambient conditions(ambient air: 25°C, scavenge air coolant: 25°C) 조건일 때 Tier III NOx Emissions Regulations를 만족하는 시험 규정에 맞추어 측정되었으며, Table 8은 엔진의 계약상 엔진이 연속해서 운전할 수 있는 최대 출력인 계약 연속 최대 출력, SMCR(Specified Maximum Continuous Rating)을 나타낸 것이다. 엔진의 SMCR이 100% 일 때의 출력은 24,682kW이며 이때의 SGC(Specific Gas Consumption)는 332.2g/kWh이다. 이 두 값을 이용하여 엔진이 연속해서 운전할 수 있는 최대 출력을 내는데 필요한 메탄올의 유량 계산이 가능하다. 결과적으로 그 값은 8,199kg/h이며 이 값을 이용하여 설계한 메탄올 공정에서의 메탄올 최초 투입 유량을 설정했다.

Table 8. Fuel consumption and exhaust gas data low flash point fuel

Load %SMCR	Power (kW)	SGC (g/kWh)	Mass flow (kg/h)	Exh. gas mass flow (kg/s)	Exh. Gas Temperature (°C)
100	24,682	332.2	8,199	36.7	229

3.2 개질 온도에 따른 수소 전환율

개질 온도가 수소 전환율에 미치는 영향을 알아보기 위해 온도를 100°C에서 400°C까지 10°C 단위로 변경하며, 수소 전환율의 변화를 알아보았다. 수소의 수율을 식(21)을 이용하여 계산하였다.

$$Y_{H_2} = \frac{\dot{n}_{H_2, out}}{\dot{n}_{CH_3OH, feed}} \quad (21)$$

본 실험에서는 수소의 수율 대신, 메탄올의 질량유량을 8,199kg/h로 설정하고, 이에 대한 수소의 몰 유량을 산출했다.

온도와 압력의 변화가 수소 전환율에 미치는 영향을 알아보기 위해 SCR은 1, flow ratio는 0.9로 고정한 후 개질 압력을 500kPa, 1,000kPa, 1,500kPa, 2,000kPa로 개질 온도를 100°C에서 400°C까지 10°C 단위로 변할 때 수소 전환율을 확인하고자 했다.

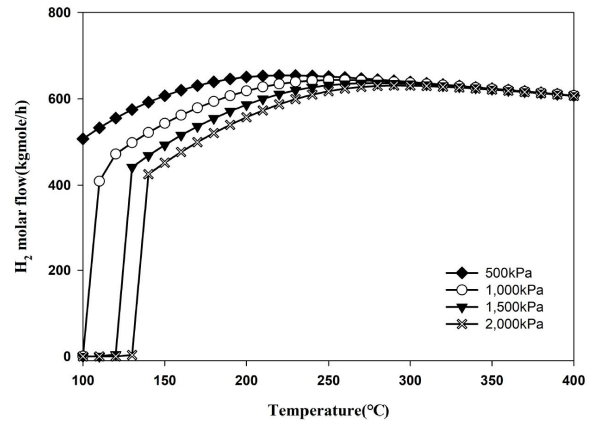


Fig. 6. Case2 H₂ molar flow as Reforming Temperature.

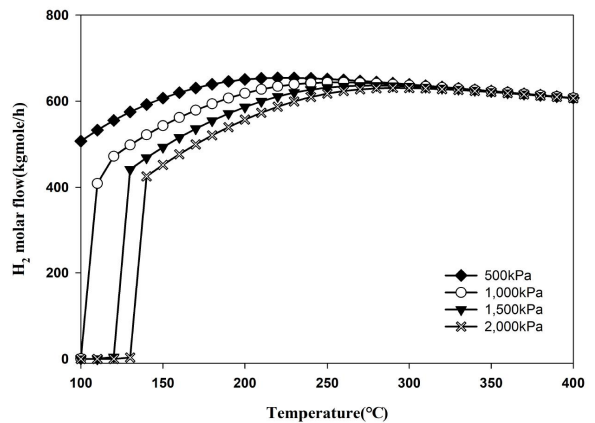


Fig. 7. Case3 H₂ molar flow as Reforming Temperature.

Fig. 6은 Case2에서 압력별 온도에 따른 수소의 몰 유량을 나타낸 것이다. 모든 온도에서 압력이 작을수록 높은 전환율을 보였다. 가장 작은 압력인 500kPa에서는 온도가 100°C에서 220°C로 증가함에 따라 수소 몰 유량이 507kg/h에서 654kg/h로 약 29% 증가하였다. 이후 온도가 220°C에서 400°C로 증가함에 따라 수소 몰 유량은 654kg/h에서 608kg/h로 약 7% 감소하였다. Fig. 7은 Case3에서 압력별 온도에 따른 수소의 몰 유량을 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과는 Fig. 6의 결과와 완전히 동일한 개형을 보인다. 이는 온도에 따른 압력별 수소의 전환율이 Case2와 3에서 완전히 동일한 공정을 가지고 있기 때문이다. 이에 따라 Case 2, 3에서 500kPa의 압력과 220°C의 온도개질 운전을 위한 최적 운전 조건임을 확인했다.

3.3 개질 온도에 따른 시스템 효율

개질 온도가 시스템 효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 flow ratio와 SCR을 고정한 후, 온도를 100°C에서 400°C까지 10°C 단위로 변경하며 시스템 효율의 변화를 알아보았다.

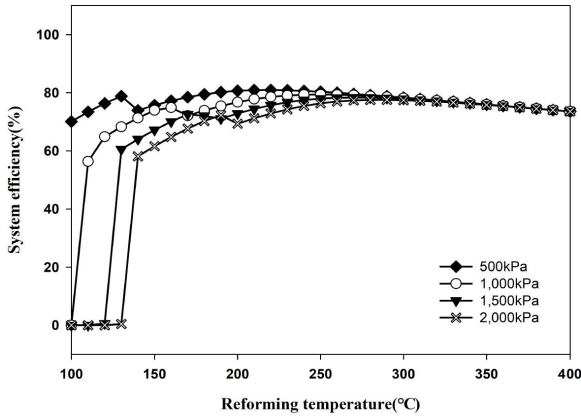


Fig. 8. Case2 System efficiency as temperature.

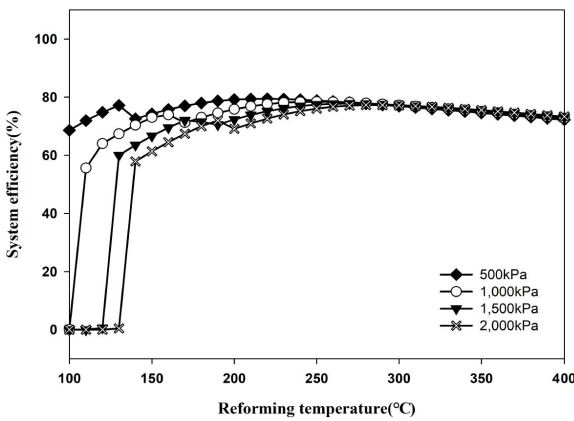


Fig. 9. Case3 System efficiency as temperature.

그리고 식(22)를 이용하여 전체 시스템의 효율을 산출했다.

$$\eta_{system} = \frac{m_{product, H_2} \cdot LHV_{H_2}}{m_{CH_3OH} \cdot LHV_{CH_3OH} + W_{pump} + W_{air blower} + W_{burner}} \quad (22)$$

Fig. 8은 Case2에서 압력별 온도에 따른 시스템 효율을 나타낸 것이다. Case2에서 온도와 압력의 변화가 시스템 효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 SCR은 1로, flow ratio는 0.9로 고정한 후, 500kPa, 1,000kPa, 1,500kPa, 2,000kPa에서 온도를 100°C에서 400°C까지 10°C 단위로 변경하며 전환율의 변화를 알아보았다.

370°C 이하의 온도에서는 압력이 작을수록 높은 효율을 보였다. 가장 작은 압력인 500kPa에서는 온도가 100°C에서 220°C로 증가함에 따라 시스템 효율이 70%에서 81%로 약 15%가 증가했다. 이후 온도가 220°C에서 400°C로 증가함에 따라 시스템 효율은 81%에서 74%로 약 7% 감소하였다. 이는 온도가 지나치게 높아질 때 역반응이 증가하기 때문으로 추정된다. 따라서, Case2에서 공정을 실행하기 위한 최적의 조건은 500kPa의 압력과 220°C의 온도이다.

Fig. 9는 Case3에서 압력별 온도에 따른 시스템 효율을 나타낸 것이다. Case3에서 온도와 압력의 변화가 시스템 효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 SCR은 1로, flow ratio는 0.9로 고정한 후, 500kPa, 1,000kPa, 1,500kPa, 2,000kPa에서 온도를 100°C에서 400°C까지 10°C 단위로 변경하며 전환율의 변화를 알아보았다. 온도가 100°C에서 260°C 사이일 때 압력이 작을수록 높은 시스템 효율을 보였고, 이후 온도가 상승하자 시스템 효율이 감소하며 압력 순서가 역전되었다. 압력이 1,000kPa, 1,500kPa, 2,000kPa일 때 온도가 증가함에 따라 시스템 효율이 증가하다 감소하는 경향을 2번씩 반복하였다. 압력이 500kPa이고 온도가 220°C일 때 79%로 가장 높은 효율을 보였다. 따라서, Case3에서도 공정을 실행하기 위한 최적의 조건은 500kPa의 압력과 220°C의 온도이다. 수소 전환율과 달리, 온도와 압력에 따른 시스템 효율은 Case2와 Case3에서 서로 상이한 수치를 보였다. 이는 Case3가 Case2에 비해 다른 공정이 추가되었기 때문이다. 하지만 양 Case 모두 압력 500kPa와 온도 220°C에서 가장 높은 시스템 효율을 보였다. 따라서 시스템 효율을 극대화하기 위해서 500kPa, 220°C에서 가장 적절한 가동범위를 확인했다.

3.4 SCR에 따른 시스템 효율

Case2와 3의 연구 결과를 기반으로 개질 온도는 220°C, 개질 압력은 500kPa로 고정을 해두었다. Fig. 5에서 Tee-100에서 분리되는 flow ratio를 메탄올 개질 반응에 쓰이는 양의 비율이 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9일 때 SCR에 따른 개질 반응기 시스템의 효율을 비교해보았다.

Fig. 10의 시스템 효율을 살펴보면 Tee-100에서 메탄올 개질 반응으로 가는 메탄올의 양이 0.9의 비율일 때 가장 반응기의 시스템 효율이 좋고 0.7이 두 번째, 0.5가 세 번째인 것을 볼 수 있다. 개질기로 가는 메탄올의 양이 많아질수록 수소 생산량이 늘어나기 때문에 시스템 효율이 좋아지는 것으로 추정된다. Fig. 11의 Case3 역시 SCR의 비율이 1.0일 때 기율기의 변화가 급격하게 줄고, Tee-100에서 메탄올이 메탄올 개질기로 흘러가는 양이 0.9의 비율일 때가 시스템의 효율이 제일 좋고 0.7이 두 번째, 0.5가 세 번째 순으로 좋은 것을 알 수 있다.

수소 연료전지 하이브리드 시스템 기반 메탄올 연료추진 선박에서 CCU 적용에 따른 시스템 특성 분석

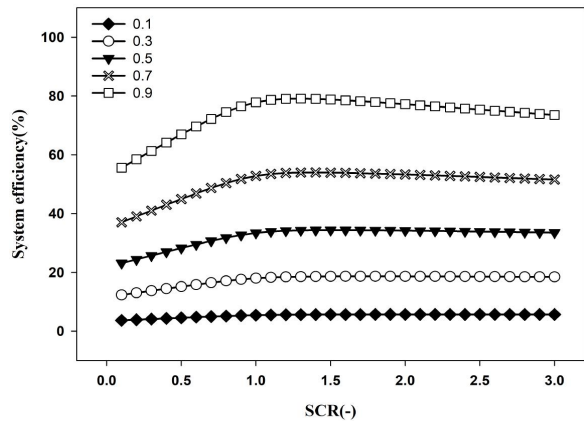


Fig. 10. Case2 System efficiency as SCR

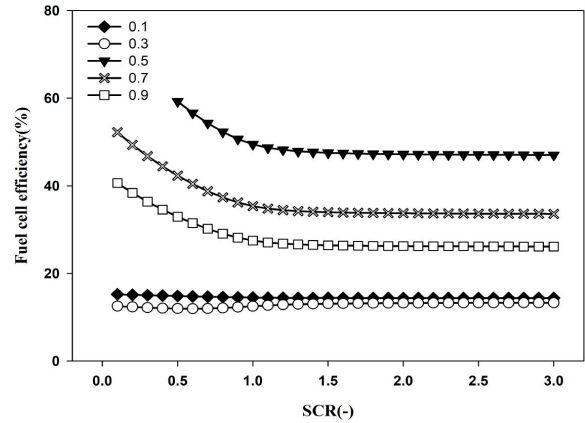


Fig. 12. Case2 Fuel cell efficiency as SCR

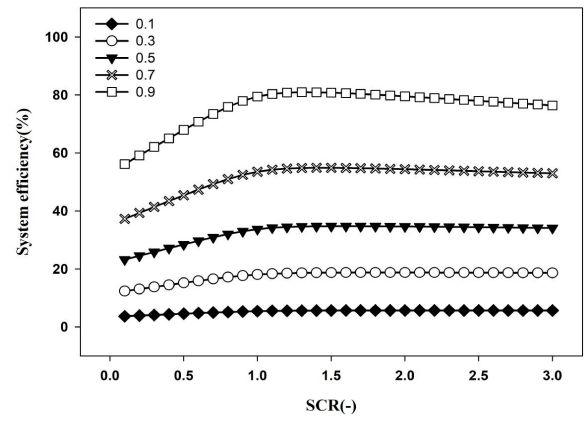


Fig. 11. Case3 System efficiency as SCR

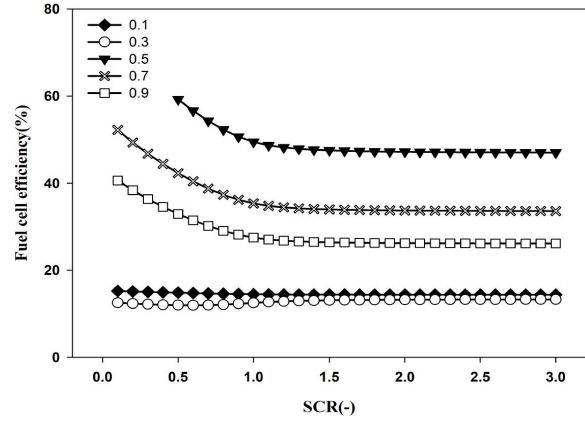


Fig. 13. Case3 Fuel cell efficiency as SCR

이와 같이 개질 반응기의 시스템 효율은 Case3일 때 약 81%, Case2일 때는 약 79%로 나타나 Case3의 효율이 더 높은 것을 알 수 있다. Case3의 시스템 효율이 좋은 이유는 메탄올을 엔진으로 쓴 후 나오는 flue gas를 다시 재활용한 공정으로, flue gas의 폐열을 이용하여 기존의 히터에 필요한 열량을 줄여주었기 때문이다. Case3의 경우 Case2와 달리 연료전지에서 반응하고 남은 수소를 다시 회수하고 메탄올 개질의 부산물인 이산화탄소와 일산화탄소를 다시 재활용한 후, 수소와 부산물들을 합성하여 메탄올을 생성 후 그 메탄올이 다시 Feed로 들어가는 전반적인 블루 메탄올의 공정을 활용한다.

3.5 SCR에 따른 연료전지 효율

개질 온도와 개질 압력을 각각 220°C, 500kPa일 때 Tee-100에서 분리되는 flow ratio별 SCR에 따른 연료전지의 효율을 비교하였다.

Fig. 12에서 보이는 결과와 같이 시스템 효율과 유사하게 연료전지의 효율 역시 SCR이 1.0일 때 이후로 기울기가 완만해진 것을 확인할 수 있다. 또, 연료전지의 효율은 flow

ratio가 메탄올 개질 반응으로 들어가는 메탄올의 양의 비율이 0.5일 때 가장 효율이 좋고 0.7이 두 번째, 0.9가 세 번째로 좋은 걸 알 수 있다.

시스템 효율과 달리 연료전지의 효율은 메탄올 개질 반응기로 가는 메탄올의 비율이 0.5일 때 효율이 가장 높았다. 메탄올 합성 공정에 들어가는 수소가 연료전지에서 사용하고 남은 수소이다. 즉, 반응할 수 있는 수소의 양은 한계가 있게 되고, 거기서 생산되는 파워 역시 한정된다. 따라서 일정량 이상의 수소가 들어오더라도 생산되는 파워는 같게 된다. 이와 같은 이유로 flow ratio가 0.5일 때 연료전지로 들어가는 수소가 대부분 파워로 전환이 되고 그 이상의 수소가 들어가면, 0.5일 때와 비교해서 효율이 떨어지기 때문에 연료전지의 효율은 개질 반응으로 가는 flow ratio의 양이 0.5일 때 효율이 좋다.

Fig. 13의 그림을 살펴보면 Case3의 연료전지의 효율 역시 SCR이 1.0일 때 이후로 기울기가 완만해진 것을 확인할 수 있다. 또, 연료전지의 효율은 flow ratio가 메탄올 개질 반응으로 들어가는 메탄올의 양의 비율이 0.5일 때 가장 효율

이 좋고 0.7이 두 번째, 0.9가 세 번째로 좋은 걸 알 수 있다. 따라서, 연료전지의 효율의 경우, Case2와 Case3에서 두 경우 다 최대의 효율이 약 59% 정도로 비슷한 수치가 나온 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로 메탄올을 개질 후 생산된 수소로 쓰이는 연료전지의 효율은 재활용을 하는 경우인 Case3의 경우에서도 재활용을 하지 않는 경우에 비해 효율이 떨어지지 않음을 알 수 있다.

연구 결과를 통해 flow ratio가 0.7일 때가 연료전지의 효율과 시스템 효율에서 각각 두 번째로 좋은 수치가 나왔기 때문에 고정 변수로 가정하였다. SCR은 1.0일 때 연료전지와 시스템 효율 그래프 두 가지 모두 그래프의 기울기가 안정적인 형태를 갖추는 것으로 보아 고정 변수로 설정했다.

3.6 Flow ratio에 따른 특성 분석

메탄올은 Fig. 5의 Tee-100을 통해 E-3로 이어지는 메탄올 엔진 공정과 M-2로 이어지는 개질 공정으로 나누어진다. 이때 두 흐름 간의 적절한 메탄올 유량 분배 비율을 찾아 해당 선박 엔진이 낼 수 있는 최대한의 출력을 계산할 수 있다. E-3 : M-2를 물 유량을 변수로 두어 연료 전지의 출력을 Case Study를 통해 도출해내었다. 이때 연료 전지에 사용되는 화학적 저장방식의 배터리는 나트륨 황(NaS Battery) 배터리, 레독스 흐름(Redox Flow Battery, RFB) 배터리, 리튬이온 배터리(Lithium Ion Battery, LIB)로 분류될 수 있는데, 가볍고 기억 효과가 적어 충전용량을 유지하기 쉽고 자연 방전이 적어 장기간 에너지를 적은 손실로 저장할 수 있는 리튬 이온 배터리를 사용하였다고 가정한다. 이 때 LIB는 열화로 인해 연차적으로 성능이 감소할 수 있으므로 이러한 부분을 고려하여 연료전지의 출력 효율은 95.5%라 가정한다(Woo et al., 2020). PEMFC 연료전지의 출력은 Andrew. Dicks, James Larminie의 Fuel Cell Systems Explained 문헌을 참고하여 계산하였다. Faraday 상수, Cell의 개수, Cell의 면적, 유량 등을 이용해 Current(A)와 Current Density(mA/cm²), Cell Voltage(V), Total Voltage(V)를 계산한 후 최종적으로 연료전지의 Power(W)를 도출해낼 수 있다(Larminie and Dicks, 2003).

3.6.1 Flow ratio에 따른 연료전지 출력

Fig. 14와 Fig. 15는 앞선 결과들을 토대로 개질 온도를 220°C, 개질 압력을 500kPa, SCR을 1.0으로 고정하고, 메탄올 엔진과 개질 공정으로 나누어지는 메탄올 유량의 비율, flow ratio가 연료전지의 출력에 미치는 영향과 Case1의 메탄올 엔진의 SMCR이 100% 일 때의 Power를 얼마나 Cover 가능한 범위를 계산한 결과를 나타낸 그림이다. 이때 flow ratio를 0.1부터 0.9까지 0.2 단위로 증가했을 때 Case별 연료전지 출력 및 커버 가능한 범위를 산출했다.

공정 Case3의 경우 flow ratio가 0.1에서 0.9 까지 증가함에 따라 연료전지의 출력은 2,432W에서 41,584W까지 증가하였는데 이는 수증기 개질기에 공급되는 메탄올이 증가함에 따라 수소 생산량이 증가하기 때문이다.

공정 Case3과 Recycling 공정이 없는 공정 Case2 둘 다 소수점 단위의 결과값은 다르나 오차 0.001% 미만으로 그 값이 크게 차이가 나지 않는 것으로 결과가 나타났다. 이는 공정에서 투입되는 메탄올의 유량은 8,199kg/h 로 변함이 없기 때문인 것으로 추측된다. 이미 앞선 연구에서 온도와 압력에 따른 수소 전환율 분석에서 같은 개질 조건일 때 공정 Case2와 Case3의 결과가 크게 차이가 나지 않은 것으로 분석된 것과 일맥상통한다. 개질을 통한 수소 생산량은 연료전지 출력에 직접적인 영향을 주기 때문이다.

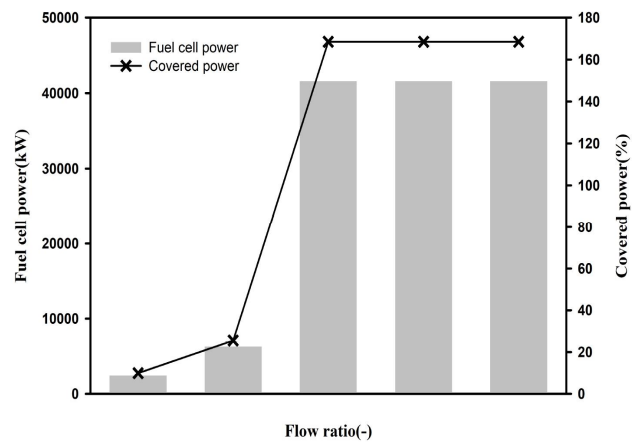


Fig. 14. Case2 Power covered power of fuel cell as function of flow ratio of process.

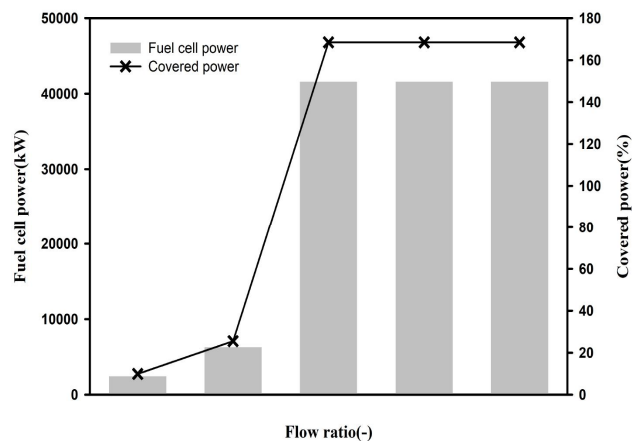


Fig. 15. Case3 Power covered power of fuel cell as function of flow ratio of process.

Flow ratio가 0.3에서 0.5로 넘어가는 지점에서 연료전지의 출력이 크게 증가함을 볼 수 있어 최적의 flow ratio 조건은 출력이 크게 향상된 이후 안정화되는 구간인 0.5 - 0.9로 한정 지을 수 있다(Kim, 2011).

메탄올 엔진 부하가 SMCR 100% 일 때와 출력 24,682kW와 flow ratio에 따른 각 조건 별 연료 전지 출력 간의 차를 구한 후 백분율로 나타낸 Covered Power 그래프에서는 flow ratio가 0.1에서 0.9까지 증가함에 따라 연료전지의 출력이 SMCR 100% 일 때의 출력을 보조하는 % 수치는 9.86%에서 168.5%까지 증가하였다. flow ratio가 0.5인 부분부터 메탄올 엔진으로만 출력을 낼 때보다 68.5% 더 큰 출력을 낼 수 있는 것이라 볼 수 있어 최적의 flow ratio 조건을 0.5 - 0.9로 한정 지을 수 있는데 그 이후부터는 증가폭이 매우 크게 둔화되므로 잉여 출력을 LIB(Lithium Ion Battery)에 저장한다고 할 때의 수소 생산량과 LIB의 용량을 고려하여 최적의 flow ratio를 결정하는 것이 필요한 것으로 보인다.

3.6.2 Flow ratio에 따른 메탄올 생산량

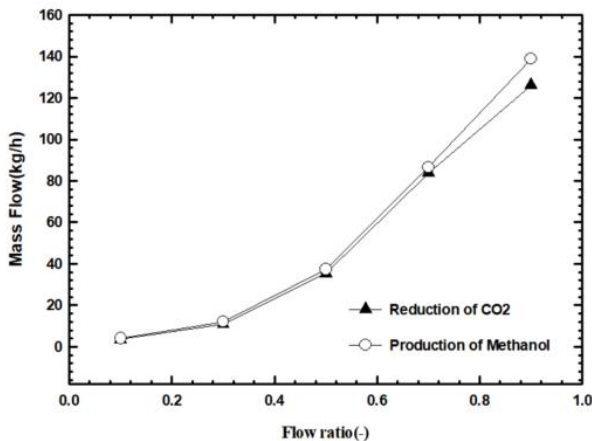


Fig. 16. Reduction of CO₂ and production of Methanol.

Fig. 16은 최적의 개질 조건에서 공정 Case 3에서의 CO₂ 포집을 통한 메탄올 합성 공정에서 flow ratio에 따른 최종적으로 합성된 메탄올의 메탄올 생산량을 나타내는 그래프와 얼마나 이산화탄소가 저감되는지 보기 위해 메탄올 합성 반응기에 들어가기 이전 Feed에서의 이산화탄소의 유량과 최종적으로 배출된 이산화탄소의 유량 간의 차를 나타낸 그림이다. 이때 3.1 - 3.2에서의 분석을 바탕으로 개질 온도는 220℃, 개질 압력은 500kPa, SCR이 1.0일 때 최적의 개질 조건이라 결정되었다.

Flow ratio가 0.1에서 0.9까지 증가함에 따라 생성되는 메탄올의 양은 4kg/h에서 138kg/h까지 증가하였다. 특히 flow

ratio 0.3에서 0.5를 넘어가는 지점에서 메탄올의 생산량이 급격하게 증가함을 알 수 있으며 flow ratio 0.7부터는 이산화탄소 간의 차를 나타내는 그래프의 기울기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 flow ratio가 높을수록 더 많은 메탄올을 생산하고 더 많은 이산화탄소를 저감 시키나 0.7을 기점으로 저감 효율이 소폭 감소한다는 것을 알 수 있다.

결론적으로 메탄올 수증기 개질과 이산화탄소의 메탄올 전환 공정에서 최적의 flow ratio는 flow ratio별 시스템 효율과 연료전지 효율, 연료전지 출력, 이산화탄소 저감량의 산출 결과를 종합적으로 분석하여 flow ratio이 0.7일 때 최적 운전 조건임을 확인했다.

3.7 공정별 이산화탄소 배출량 비교

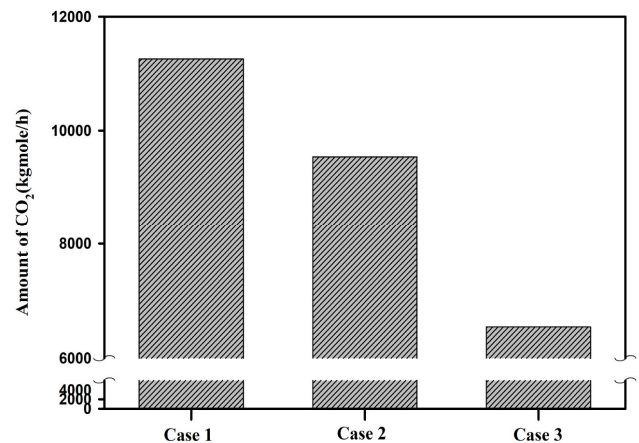


Fig. 17. Emissions of CO₂ for each process.

Fig. 17은 개질 온도를 220℃, 개질 압력을 500kPa, SCR을 1.0, flow ratio를 0.7로 고정하고 3가지의 각 공정에서 최종적으로 배출되는 이산화탄소의 양을 나타낸 그림이다. 이때 메탄올 엔진에서 pilot 연료 사용시 발생되는 이산화탄소의 양은 무시하고 계산하였다. 메탄올 엔진만으로 운전되는 Case1 공정에서 이산화탄소 배출량은 11,261kg/h, 수소 개질 공정을 포함하는 Case2의 이산화탄소 배출량은 9,538kg/h, Flue Gas에서의 이산화탄소를 포집하여 다시 메탄올로 만드는 공정을 포함하는 Case3의 이산화탄소 배출량은 6,546kg/h로 나타났다. 결과적으로 단일 메탄올 엔진 대비 약 42% 수준의 이산화탄소를 저감할 수 있는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 메탄올 엔진과 메탄올 수증기 개질기 그리고 이산화탄소 포집을 통한 블루 메탄올 생산과 활용에 관

한 공정을 Unisim Simulator를 통해 공정설계하고, 개질 온도, 압력, SCR 등의 조건 변화에 따른 결과를 분석하였다.

- 1) 개질온도에 따른 수소 전환률 Case2와 Case3일 때 모두 500kpa, 220℃에서 가장 높은 전환률을 동일하게 보였다.
- 2) 개질온도에 따른 시스템 효율의 경우 Case2, Case 3에서 개질 압력, 온도가 500kpa, 220℃일 때 각각 81%, 79%의 최대 효율을 보였다.
- 3) SCR에 따른 시스템효율 Case2와 Case3의 경우 모두 SCR이 1.0일 때 기올기가 완만해지고, Tee-100에서 분리되어 개질반응으로 가는 메탄올의 flow ratio가 0.9일 때 가장 시스템 효율이 좋은 것을 알 수 있었다.
- 4) SCR에 따른 연료전지효율 Case2와 Case3 두 경우 모두 SCR이 1.0일 때 기올기의 변화가 줄어들고, Tee-100에서 분리되어 개질반응으로 가는 메탄올의 양이 0.5일 때 가장 연료전지의 효율이 좋은 것을 알 수 있었다.
- 5) Flow ratio에 따른 연료전지의 출력은 공정 Case2와 Case3 모두 0.3에서 0.5로 넘어가는 구간에서 크게 증가하였으며 0.5 구간 이후부터는 안정적인 흐름을 보였다.
- 6) 공정 Case3에서 flow ratio에 따른 메탄올 생산량은 0.1에서 0.9까지 증가함에 따라 지속적으로 증가하였다.
- 7) 각 공정별 이산화탄소 배출량은 Case1 공정 대비 Case3에서 42% 저감되는 것으로 분석되었다.

메탄올 추진 선박에서 탄소 배출을 감소시키기 위해서 탄소를 포집하여 한 번 더 개질을 함으로써 최종적으로 Case1 공정 대비 Case3에서 탄소 배출량을 42% 가량 줄일 수 있었다. 향후 본 연구 결과를 기반으로 촉매의 영향이나, 열분해에 따른 탄소 침착 현상 그리고 감소시킨 메탄올 연료양에 따른 경제성 분석 등이 반영된 후행 연구가 필요하다고 사료된다.

사 사

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2023-0048).

References

- [1] Cheon, U. R., K. S. Ahn, and H. H. Shin(2018), Study on the Characteristics of Methanol Steam Reformer Using Latent Heat of Steam, The Korean Hydrogen & New Energy Society, Vol. 29, No. 1, pp. 19-24.
- [2] Cho, H. J., S. B. Hyeon, S. G. Jung, H. J. Ji and J. H. Choi(2022), A Study on Optimal Operation of Methanol Steam Reforming System for Hydrogen Fuel Cell Propulsion Ships, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 6, pp. 733-742.
- [3] Kim, H. S.(2011), Effect of CeO₂-ZrO₂ enhancer on Cu/ZnO/Al₂O₃ Methanol Synthesis Catalyst, Korea University.
- [4] Kim, H. J., S. K. Jeong, K. T. Park, and M. H. Youn(2015), Catalytic Conversion of Carbon Dioxide to Methanol by Hydrogenation, The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 18, No. 2.
- [5] Kim, H. C., H.-M. Jeon, and J.-S. Kim(2022), Study on an RTGC hybrid system for energy saving of harbor cranes. Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, 46(6), pp. 402-408.
- [6] Larminie, J. and A. Dicks(2003), Fuel Cell Systems Explained, Wiley, p. 80.
- [7] Lee, K. Y.(2014), Recent research trends on hydrogen production through water gas conversion and steam reforming, Korea Institute of Science and Technology Information.
- [8] Li, N., X. Cui, J. Zhu, M. Zhou, V. Liso, G. Cinti, S. L. Sahlin, and S. S. Araya(2023), A Review of Reformed Methanol-High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 182, 113395.
- [9] MAN Energy Solutions(2022), CEAS Engine Data report 6G80ME - C10.5 - LGIM - EGRTC, p. 16.
- [10] Minnehan, J. J. and J. W. Pratt(2017), Practical Application Limits of Fuel Cells and Batteries for Zero Emission Vessels, SANDIA REPORT SAND2017-12665.
- [11] Nazerifard, R., L. Khani, M. Mohammadpourfard, B. Mohammadi-Ivatloo, and G. G. Akkurt(2021), Design and Thermodynamic Analysis of a Novel Methanol, Hydrogen, and Power Trigeneration System Based on Renewable Energy and Flue Gas Carbon Dioxide, Energy Conversion and Management, Vol. 233, 113922.
- [12] Roh, G., H. Kim, H. Jeon, and K. Yoon(2019), Fuel Consumption and CO₂ Emission Reductions of Ships Powered by a Fuel-Cell-Based Hybrid Power Source, Journal of Marine Science and Engineering, 7(7), 230.
- [13] Shim, J. P., C. R. Lee, and H. K. Lee(2012), Principles and Application of Hydrogen Fuel Cells as Renewable Energy Source, The Korean Institute of Electrical Engineers, 61(11), pp. 15-22.

- [14] Vuong, Q. D., Y. Kim, and J.-W. Lee(2022). Study on the vibration behavior of a G/T 3-ton class composite fishing boat hybrid propulsion system. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 46(6), pp. 317-325.
- [15] Woo, H. I., Y. H. Jang, and Y. S. Choi(2020), Study on Designing Battery Energy Storage System (BESS) Related to Renewable Energy and Power Efficiency According to Charging - Discharging, *Journal of Next-generation Convergence Technology Association*, Vol. 4, No. 1, pp. 61-69.

Received : 2024. 01. 30.

Revised : 2024. 04. 03.

Accepted : 2024. 04. 26.