

연료전지시스템을 위한 탄화수소 및 알코올 연료의 수증기 개질 특성에 관한 열역학적 연구

오진숙⁵ · 이경진⁵ · 김선희⁵ · 오세진³ · 임태우¹ · 김종수² · 박상균⁴ · 김만웅⁴ · 김명환[†]

(원고접수일 : 2011년 2월 17일, 원고수정일 : 2011년 5월 2일, 심사완료일 : 2011년 5월 25일)

Thermodynamic Analysis on Steam Reforming of Hydrocarbons and Alcohols for Fuel Cell System

Jin-Suk Oh⁵ · Kyung-Jin Lee⁵ · Sun-Hee Kim⁵ · Sae-Gin Oh³ · Tae-Woo Lim¹ · Jong-Su Kim²
· Sang-Kyun Park⁴ · Mann-Eung Kim⁴ · Myoung-Hwan Kim[†]

요약 : 온실가스 및 대기오염물질 배출 규제는 고효율 및 친환경에 적합한 새로운 선박용 동력장치의 필요성을 제기하고 있다. 최근 이와 같은 문제들을 근본적으로 해결하기 위한 지속가능한 방법으로서 연료전지를 선박의 동력발생장치로 도입하고자 하는 검토가 진행되고 있다. 본 논문은 선박용 연료전지시스템에 사용될 수 있는 최적의 연료를 파악하기 위하여 다양한 탄화수소계 및 알코올계 연료의 수증기 개질 특성을 열역학적으로 검토하고 있다.

주제어 : 선박동력시스템, 연료전지시스템, 수증기 개질, 탄화수소계 연료, 알코올계 연료

Abstract: The strengthened regulations for atmospheric emissions from ships have caused a necessity of new, alternative power system in ships for the low pollutant emissions and the high energy efficiency. Recently, new kinds of propulsion power system such as fuel cell system, which use hydrogen as an energy source, have been sincerely considered. Fuel conversion system to hydrogen is an essential part for fuel cell ship. We have investigated thermodynamically the steam reforming characteristics of hydrocarbons and alcohols for the fuel conversion systems.

Key words: Ship power system, Fuel cell, Steam reforming, Hydrocarbons, Alcohols

1. 서 론

서부 텍사스 중질유(WTI)를 기준으로 곧 100 달러 원유시대가 예상되고 있는 시점에서 선박유의 대표격인 IFO 380과 MDO의 가격은 이미 톤당 500 달러와 800달러를 넘어 섰다. 고유가시대에 대비하여 해운선사, 조선소, 엔진 메이커들은 선박의 유류비 절감을 위하여 효율이 높은 선박 엔진의 개발과

채용에 많은 노력을 기울이고 있다.

지구 온난화와 대기오염은 글로벌 사회의 모든 구성원들이 공동으로 대처해야 할 문제로 선박도 예외는 아니다. 선박은 엔진으로 기인하는 NO_x, SO_x 등의 대기오염물질의 배출을 억제하기 위하여 실질적인 규제를 받기 시작하였으며, 단순한 엔진의 기계적 조작에서부터 새로운 장치를 부착하는

† 교신저자(한국해양대학교 기관공학부, E-mail:mhkim@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4267)

1 한국해양대학교 기관공학부

2 한국해양대학교 기관시스템공학부

3 한국해양대학교 운항훈련원

4 한국선급 에너지환경사업단

5 한국해양대학교 대학원

시스템의 변경 등 다양한 대응책들이 마련되고 있다.

지구 온난화와 대기오염과 같은 환경적 문제를 해결하기 위한 방법들은 고효율의 추구라는 경제적 가치와 상충하는 경우가 많다. 따라서 환경과 경제적 가치를 함께 추구할 수 있는 새로운 엔진 및 시스템에 대한 관심이 높아지고 있으며 그 중의 하나가 수소연료전지시스템이다. 수소연료전지는 오래된 기술이지만 최근에 들어 휴대용 전원, 주거용 에너지공급, 자동차용 동력, 선박용 동력, 분산형 발전 등의 용도로 상업화를 위한 기술개발이 활발하게 진행되고 있다[1].

중대형선박에 동력장치로 연료전지시스템을 채용할 경우 가장 큰 문제점 중의 하나는 다량의 수소연료 저장 방식이다. 수소를 극저온의 액체 상태로 또는 초고압의 기체 상태로 저장하는 방식은 안전성, 간편성, 용량성의 측면에서 바람직하지 못하며 수소의 흡장 금속을 이용하는 금속 수소화물(metal hydride) 저장 방식 또한 큰 중량과 충전 등의 문제를 야기한다. 따라서 부하에 따라 쉽게 수소화할 수 있는 상온 액체상태의 연료 저장 방식이 가장 적합한 방식이라 생각된다. 수소화가 쉬운 액체연료(수소운반체)로는 탄화수소계와 알코올계 연료인 메탄, 가솔린, 디젤유, 메탄올, 에탄올 그리고 합성연료인 DME(dimethyl ether) 등이 있다. 수소운반체로부터 수소를 만드는 방식에도 열분해, 부분산화, 수증기 개질 등이 있으나 중대형 선박과 같이 다량의 연료를 소비하여 효율이 증시되는 경우에는 수증기 개질이 바람직하다[2-4].

본 논문은 연료전지시스템 구조화 및 성능 평가에 대한 연료적 측면의 기초적 자료를 마련하기 위하여 선박용 연료로 채용될 수 있는 다양한 수소운반체들에 대한 수증기 개질의 특성을 열역학적 근거로 시뮬레이션을 통하여 평가한 것이다. 특히 연료전지의 연료로 사용될 수 있는 수소와 일산화탄소(고온형 연료전지의 경우)의 생성률을 반응온도, S/C(Steam/Carbon ratio, 수증기 몰수/연료중 탄소 몰수) 그리고 반응압력에 대하여 검토하였다.

2. 계산 방법

Figure 1은 연료전지 선박의 동력발생시스템의

개념도이다. 연료저장 탱크의 수소운반체는 개질기를 거쳐 고농도 수소의 혼합기체로 변환되고 연료전지 스택으로 보내어진다. 연료전지 스택에서의 전기화학 반응으로 생산된 전기는 적당한 변환 과정을 거쳐 추진용 모터 및 기타 선내의 전원 부하로 사용된다.

Figure 2는 수증기 개질기의 개념도이다. 그림에서처럼 기체화된 탄화수소계 또는 알코올계 연료가 적당한 비율(S/C)로 수증기와 혼합, 주어진 온도와 압력에서 개질반응이 진행되고, 주된 생성물인 수소, 일산화탄소, 이산화탄소 그리고 미반응 연료 및 수증기가 개질기 출구로 토출된다.

주어진 S/C, 온도와 압력 하에서 수소운반체의 수증기 개질에 의한 혼합가스 조성은 평형정수(K)와 깁스에너지(G)의 관계인 다음의 화학 평형식으로부터 계산하였다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right) \quad (1)$$

여기에서 R은 기체정수이고, T는 온도이다. 평형정수는 반응식에 따라 달라지며 대표적인 개질반응 평형정수(K_r)와 전이반응 평형정수(K_s)는 다음과 같다.

$$K_r = \frac{P_{H_2}^{(n+m/2)} \cdot P_{CO}^n}{P_{C,H_m} \cdot P_{H_2O}^n} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} \quad (3)$$

여기에서 P는 각각의 분압이다.

생성 혼합가스 조성에 대한 계산 과정을 후술하는 3.1절 메탄 연료를 예로 들어 설명하면 아래와 같다. 메탄에 대한 개질반응과 전이반응의 화학 평형식은 식 (4), (5)와 같이 정리된다(식 (6), (7) 참조).

$$K_r = \exp\left(-\frac{\Delta G_r}{RT}\right)$$

$$K_r = \frac{P_{H_2}^3 \cdot P_{CO}}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}} \quad (4)$$

$$\Delta G_r = G_{CO} + 3G_{H_2} - G_{CH_4} - G_{H_2O}$$

$$K'_s = \exp\left(-\frac{\Delta G'_s}{RT}\right)$$

$$K_s = \frac{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} \quad (5)$$

$$\Delta G'_s = G_{CO_2} + G_{H_2} - G_{CO} - G_{H_2O}$$

여기에서 동시반응인 이들 반응의 생성 혼합가스 조성에 대한 계산 방법은 다음과 같다. 먼저 주어진 초기 계산 조건으로부터 식 (4)의 개질반응이 평형상태에 도달하는 생성물의 몰농도를 구하고 이들이 동시에 전이반응도 만족해야하므로 식 (5)의 전이반응이 평형상태에 도달하는 생성물의 몰농도를 재차 구한다. 이들 생성물 조성에 대한 결과는 다시 개질반응과 전이반응의 반복적 수렴 계산에 반영되어 식 (4)와 (5)를 동시에 만족하는 생성물의 조건을 찾는다. 즉, 반응들이 서로 평형상태에 도달할 때까지의 수렴 계산을 반복한다.

본 연구에서 검토한 수소운반체는 메탄(CH₄), 가솔린, 디젤유, 메탄올(CH₃OH), 에탄올(C₂H₅OH) 그리고 합성연료인 DME(CH₃OCH₃)이나, 다성분 혼합유인 가솔린과 디젤유에는 이들의 대용연료로 주로 사용되는 이소옥탄(C₈H₁₈)과 헥사데케인(C₁₆H₃₄)으로 평가하였다[5-8].

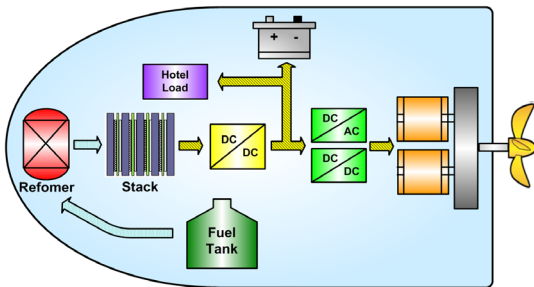


Figure 1: Layout of power system for fuel cell ship

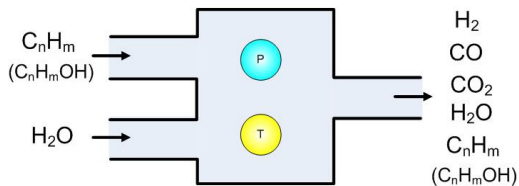


Figure 2: Layout of steam reforming

3. 수증기 개질 특성

3.1 메탄

메탄 수증기 개질의 주반응은 아래와 같은 개질반응과 전이반응으로 이루어진다.



Figure 3은 S/C=3, 반응압력=1 atm의 조건에서 메탄의 개질률과 개질가스 몰 생성률을 반응온도에 대하여 나타낸 것이다. 여기에서 개질률은 수소 운반체의 감소량을 초기 값에 대하여 나타낸 것이고 생성물은 해당 가스의 몰수를 개질가스의 총 몰수에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 메탄의 개질률이 반응온도의 상승과 함께 s자 곡선을 그리면서 증가하며, 95% 이상의 개질률을 위해 반응온도는 970 K 보다 높아야 함을 알 수 있다. 1000 K에서 개질가스의 몰 조성률은 대략 수소 56%, 일산화탄소 10%, 이산화탄소 6%, 수증기 28% 정도이다. 수소의 생성률은 식 (6)의 개질반응의 진행에 따라 메탄의 개질률과 연동되어 반응온도와 함께 증가하며 반대로 수증기는 감소한다. 또한 이산화탄소의 생성률은 식 (7)의 전이반응의 영향으로 반응온도가 높아짐에 따라 증가하나 일정 온도를 정점으로 전이반응이 억제되기 시작하여 점차 감소한다. 한편 일산화탄소의 생성률은 일산화탄소의 생성률 거동과 반대로 나타난다. 따라서 1000 K 이상의 영역에서 수소의 생성률이 다소 감소하는 것은 전이반응의 억제로 일산화탄소가 늘어난 만큼의 영향이 나타나기 때문이다. 그림에서 수소의 최고 생성률 부근에서 일산화탄소의 생성률도 높게 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 일산화탄소가 다량 함유된 개질 가스는 일산화탄소를 전기화학반응에 활용할 수 있는 SOFC나 MCFC와 같은 고온형 연료전지의 연료로는 적합하지만 일산화탄소에 의한 강한 피독성을 보이는 PEMFC와 같은 저온형 연료전지의 연료로는 부적합하며 일산화탄소를 제거하기 위한 별도의 후처리장치가 필요하게 된다.

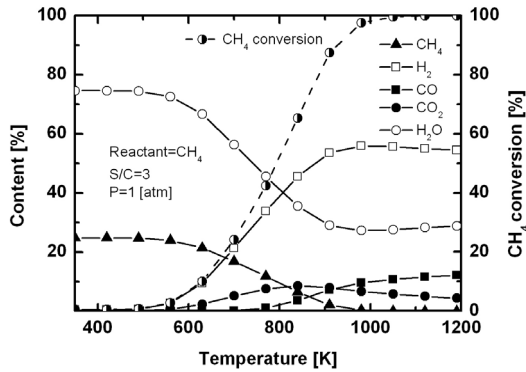


Figure 3: Equilibrium composition and conversion rate for methane steam reforming

3.2 가솔린

가솔린의 대용연료로 사용한 이소옥탄의 수증기 개질 반응에는 탄소의 연쇄적 고리들에 의하여 복잡한 많은 부반응들이 참여하지만 주된 반응은 아래와 같은 식 (8)의 개질반응, 식 (9)의 전이반응 그리고 식 (10), (11)의 메탄화 반응이다.

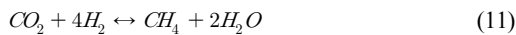
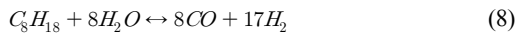


Figure 4는 S/C=3, 반응압력=1 atm의 조건에서 이소옥탄의 개질률과 개질가스 몰 생성률을 반응온도에 대하여 나타난 것이다. 그림으로부터 이소옥탄의 개질반응은 메탄과 비교하여 보다 낮은 온도 영역에서 그리고 급격하게 진행됨을 알 수 있다. 이것은 개질반응 생성 깃스 자유에너지의 변화에서 이소옥탄이 메탄보다 낮은 온도영역에서 그리고 큰 기울기로 변하기 때문이다[9]. 또한 그림은 550 K 이상의 반응온도에서 이소옥탄의 개질률은 95% 보다 높음을 알 수 있다. 그러나 이소옥탄 개질률의 상승은 즉시 수소 생성률의 증가에 반영되지 않으며 개질온도 보다 높은 온도 영역에서 서서히 증가하는 수소 생성률의 거동을 보인다. 이것은 개질반응과 전이반응의 진행으로 증가되어야 할 수소가

식 (10), (11)의 메탄화 반응의 반응물로 사용되어 수소의 생성이 억제되기 때문이다. 따라서 수소의 생성률은 반응온도의 증가와 함께 메탄화 반응이 감소하면서 증가하기 시작하므로 최고 수소 생성률에 해당하는 반응온도는 메탄 연료의 경우와 비슷하게 된다. 이산화탄소와 일산화탄소의 거동은 메탄의 수증기 개질에서 기술한 바와 같다.

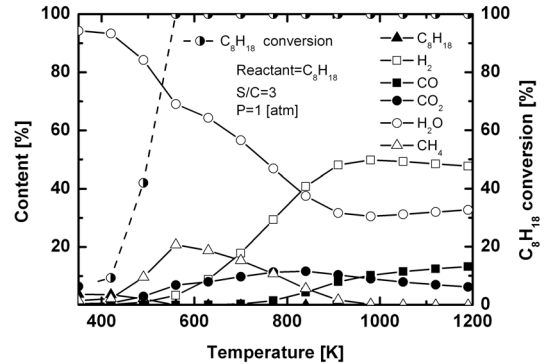


Figure 4: Equilibrium composition and conversion rate for iso-octane steam reforming

3.3 디젤유

디젤유의 대용연료로 사용한 헥사데케인의 수증기 개질 반응은 가솔린의 경우와 같이 식 (12)의 개질반응, 식 (13)의 전이반응 그리고 식 (14), (15)의 메탄화 반응으로 이루어진다.

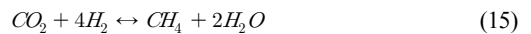
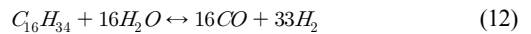


Figure 5는 S/C=3, 반응압력=1 atm의 조건에서 헥사데케인의 개질률과 개질가스 몰 조성을 반응온도에 대하여 나타난 것이다. 그림에서 헥사데케인의 증발온도인 560 K 이하의 자료는 비교를 위해 참고로 나타난 것이다. 그림으로부터 헥사데케인의 개질 거동 특성은 이소옥탄의 경우와 대단히 유사함을 알 수 있다.

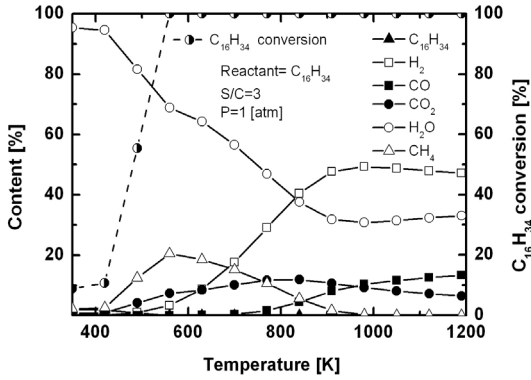


Figure 5: Equilibrium composition and conversion rate for hexadecane steam reforming

3.4 메탄올

메탄올 연료에 의한 수증기 개질의 주반응은 식 (16)의 분해반응과 식 (17)의 전이반응으로 이루어진다. 메탄올 수증기 개질에 주로 사용되는 구리 기반의 촉매는 메탄화 반응에 대하여 비활성이므로 낮은 온도 영역에서도 메탄이 없는 개질가스가 조성된다.



Figure 6은 S/C=3, 반응압력=1 atm의 조건에서 메탄올의 개질물과 개질가스 물 조성을 반응온도에 대하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 메탄올의 개질반응은 본 연구에서 검토하고 있는 탄화수소계 연료인 메탄, 가솔린, 디젤유와는 다르게 200°C 근방의 낮은 온도영역에서 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 그리고 반응온도에 대한 수소 농도의 증가는 개질물의 증가와 연동하고 있다. 또한 낮은 온도 영역에서 빠른 진행을 보이는 식 (17) 전이반응의 영향으로 수소의 최고 생성물이 형성되는 반응온도 부근에서 일산화탄소의 농도는 낮게 그리고 이산화탄소의 농도는 높게 나타난다. 이것은 메탄, 가솔린, 디젤 연료가 수소의 최고 생성물이 형성되는 반응온도 부근에서 일산화탄소의 농도도 높게 나타나는 것과 대별된다. 즉, 메탄올 연료는 수증기 개질기에서 높은 수소의 생성물과 함께 일산화탄소 생성물이 낮으므로 저온형 연료전지시스템에서 일

산화탄소를 위한 후처리과정이 필요 없거나 크게 축소될 수 있음을 나타낸다.

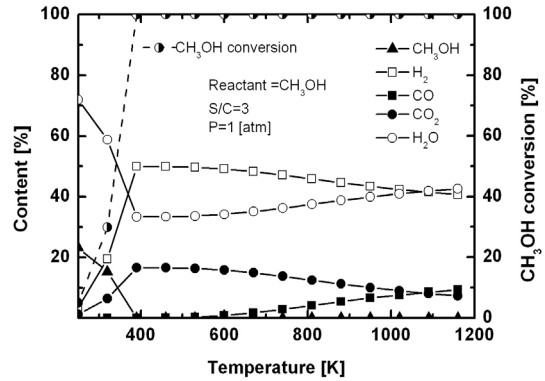


Figure 6: Equilibrium composition and conversion rate for methanol steam reforming

3.5 에탄올

에탄올 연료에 의한 수증기 개질의 주반응은 식 (18)의 개질반응, 식 (19)의 전이반응 그리고 식 (20), (21)의 메탄화 반응으로 이루어진다. 에탄올 수증기 개질반응은 C-C 결합으로 인한 복잡한 다수의 부반응이 동반되나 여기에서는 간략히 아래의 주반응만을 다룬다.

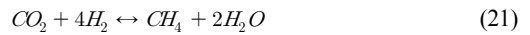
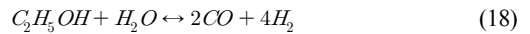


Figure 7은 S/C=3, 반응압력=1 atm의 조건에서 에탄올의 개질물과 개질가스 물 조성을 반응온도에 대하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 에탄올의 개질 반응온도는 메탄올의 것보다는 다소 높게 나타나지만 탄화수소계인 메탄, 가솔린, 디젤유보다는 낮음을 알 수 있다. 식 (20), (21)의 메탄화 반응의 진행으로 가솔린과 디젤유처럼 수소의 생성물은 메탄화 반응이 감소되는 고온의 영역에서 증가하기 시작한다. 따라서 에탄올은 메탄올과 비교하여 수소의 최고 생성물이 형성되는 반응온도가 높게 나타난다.

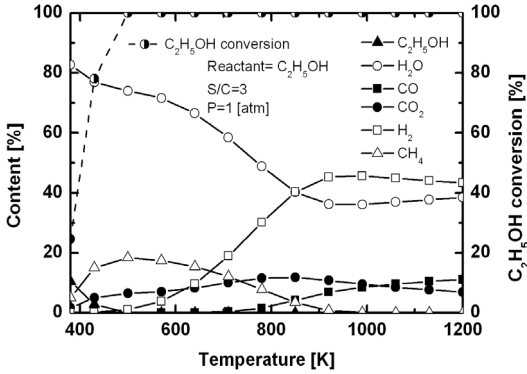


Figure 7: Equilibrium composition and conversion rate for ethanol steam reforming

3.6 DME

대체연료인 DME에 의한 수증기 개질의 주반응은 식 (22)의 개질반응, 식 (23)의 메탄올 분해반응 그리고 식 (24)의 전이 반응으로 이루어진다. 즉, DME의 수증기 개질은 중간 생성물인 메탄올의 생성반응과 메탄올의 수증기 개질반응으로 구성된다.



Figure 8은 S/C=3, 반응압력=1 atm의 조건에서 DME의 개질물과 개질가스 물 조성을 반응온도에 대하여 나타낸 것이다. DME의 개질반응은 메탄올 연료보다 다소 낮은 반응온도 영역에서 진행되나

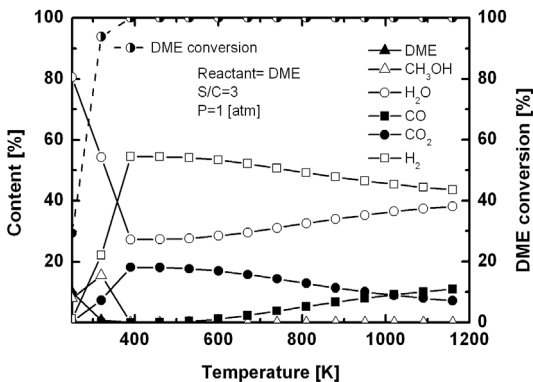


Figure 8: Equilibrium composition and conversion rate for DME steam reforming

중간 생성물인 메탄올에 의하여 수소나 일산화탄소의 생성 거동이 지배되기 때문에 DME의 수증기 개질 결과는 메탄올 연료와 유사하게 나타난다.

3.7 S/C의 영향

Figure 9는 수증기 개질에 미치는 S/C의 영향을 검토한 것으로 이소옥탄의 수증기 개질에 의한 수소와 일산화탄소의 몰 조성을 반응온도에 대하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 같은 반응온도에 대하여 수소 생성률은 S/C의 증가와 함께 크게 늘어남을 알 수 있다. 이것은 화학평형식 (1)과 평형정수식 (2)와 (3)으로부터 알 수 있듯이 S/C의 증가에 따라 개질반응과 전이반응이 촉진되기 때문이다. 또한 S/C의 증가와 함께 빠른 개질반응의 진행으로 수소의 최고 생성률에 해당하는 반응온도도 점차 낮아짐을 알 수 있다. S/C에 의한 수소와 일산화탄소의 생성률 변화의 결과를 종합해 보면 수소의 최고 생성률에 해당하는 반응온도 이하의 영역에서는 빠른 개질반응에 의한 결과가 지배적으로 나타나며, 수소의 최고 생성률에 해당하는 반응온도 이상의 영역에서는 전이반응의 촉진에 의한 결과가 지배적으로 나타나고 있다. 본 연구에서 검토하고 있는 다른 연료들에 대한 S/C의 영향들도 Figure 9와 유사한 경향을 보여준다.

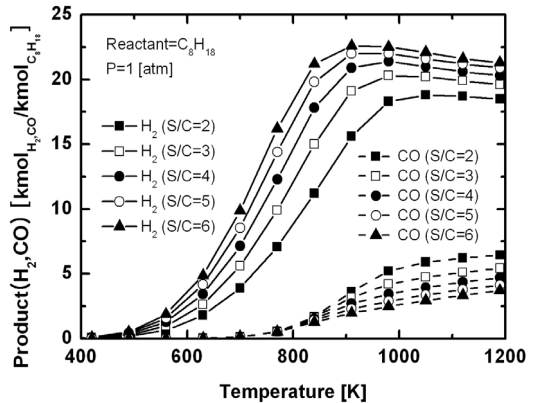


Figure 9: Equilibrium composition of H₂ and CO at different S/C for octane steam reforming

3.8 압력의 영향

Figure 10는 수증기 개질에 미치는 반응압력의

영향을 검토한 것으로 이소옥탄의 수증기 개질에 의한 수소와 일산화탄소의 몰 조성을 반응온도에 대하여 나타낸 것이다. S/C의 영향과는 반대로 반응압력의 증가와 함께 수소의 생성률은 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 반응압력의 증가와 함께 개질반응이 억제되어 수소의 최고 생성률에 해당하는 반응온도가 점차 올라감을 알 수 있다. 이것은 S/C의 영향과 마찬가지로 화학평형식 (1)과 평형정수식 (2)와 (3)으로부터 그 결과를 예측할 수 있다. 전이반응은 반응물과 생성물의 몰 수가 같으므로 압력에 의한 영향은 나타나지 않는다. 따라서 같은 반응온도에 대한 수소 생성률의 변화는 모두 개질반응의 진전과 관련하고 있다. 이것은 Figure 11의 결과에서 확인된다. Figure 11은 수증기 개질에 미치는 반응압력의 영향을 검토한 것으로 메탄올의 수증기 개질에 의한 수소와 일산화탄소의 몰 조성을 반응온도에 대하여 나타낸 것이다. 수소의 최고 생성률에 해당하는 반응온도 이상의 영역에서 즉, 개질반응의 영향이 소멸된 영역에서 반응압력에 따른 수소와 일산화탄소의 생성률에 변동이 나타나지 않는다. 이것은 전술한 바와 같이 전이반응은 반응압력의 영향을 받지 않기 때문이다. 본 연구에서 검토되고 있는 다른 연료들에 대한 반응압력의 영향들도 Figure 10, 11과 유사한 경향을 보여준다.

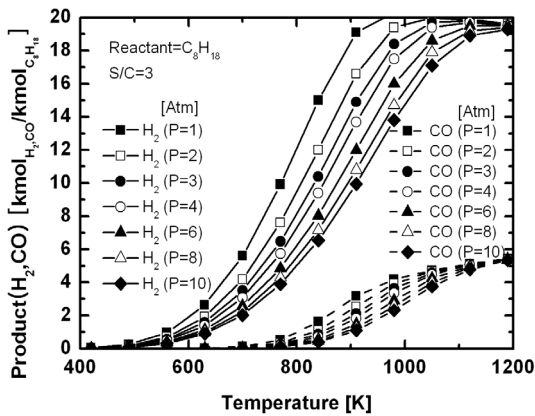


Figure 10: Equilibrium composition of H₂ and CO at different pressure for iso-octane steam reforming

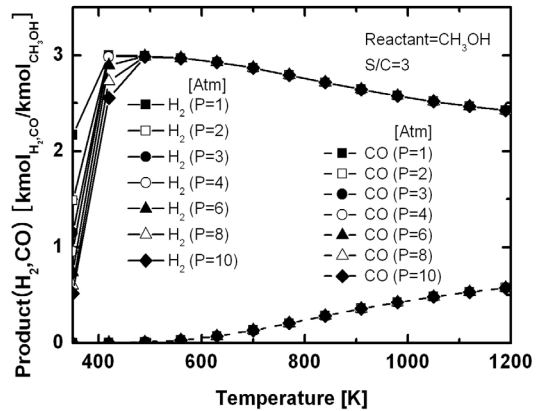


Figure 11: Equilibrium composition of H₂ and CO at different pressure for methanol steam reforming

4. 결 론

본 논문은 연료전지시스템 구조화 및 성능 평가에 대한 연료적 측면의 기초적 자료를 마련하기 위하여 메탄, 가솔린, 디젤유, 메탄올, 에탄올, DME와 같이 선박용 연료로 채용 가능한 수소운반체들에 대한 수증기 개질의 열역학적 특성을 시뮬레이션으로 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 메탄은 반응온도의 증가에 따라 연료의 개질률, 수소 및 일산화탄소 생성률이 연동하여 증가되며 수소의 최고 생성률에 해당하는 반응온도는 1000 K 근방이다.

(2) 가솔린의 대용연료인 이소옥탄과 디젤유의 대용연료인 헥사데케인은 동일한 수증기 개질 특성은 보이며 메탄 보다 낮은 반응온도에서 개질반응이 진행되나 메탄화 반응의 촉진으로 수소의 생성률은 연료의 개질률과 함께 증가하지 않으며 중간 생성물인 메탄에 의하여 지배된다.

(3) 메탄올과 DME는 유사한 수증기 개질 거동을 보이며 검토된 연료들 중에서 수소의 최고 생성률에 해당하는 반응온도가 가장 낮다. 또한 수소의 최고 생성률이 형성되는 반응온도 부근에서 일산화탄소의 생성률도 낮게 나타난다.

(5) 에탄올은 개질온도는 메탄올, DME 보다는 높고 메탄, 가솔린, 디젤유보다는 낮지만 중간 생성물인 메탄에 의하여 수소의 생성 거동이 지배된다.

(6) S/C의 증가는 개질반응과 전이반응을 촉진시켜 수소의 생성률을 높이며 수소의 최고 생성률에

해당하는 반응온도를 낮추고 일산화탄소의 생성률을 감소시킨다.

(7) 반응압력의 증가는 개질반응에 큰 영향을 미치며 수소의 생성률을 낮추고 수소의 최고 생성률에 해당하는 반응온도를 높인다.

후 기

본 연구는 국토해양부 해양과학기술연구개발사업과 해양에너지 전문인력 양성사업의 지원으로 수행된 연구결과임

참고문헌

- [1] 김명환, “선박 동력발생용 연료전지시스템 기술 개발의 전망에 대한 고찰”, 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 제8호, pp. 924-931, 2007.
- [2] James Larminie and Andrew Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Wiley, 2003
- [3] Gunther Kolb, Fuel Processing, WILEY-VCH, 2008
- [4] T. Aicher, B. Lenz, F. Gschnell, U. Groos, F. Feferici, L. Caprile and L. Parodi, “Fuel processors for fuel cell APU application”, Journal of Power Sources, vol. 154, pp. 503-508, 2006.
- [5] Qimin Ming, Todd Healey, Lloyd Allen and Patricia Irving, “Steam reforming of hydrocarbon fuels”, Catalysis Today, vol. 77, pp. 51-64, 2002.
- [6] Finn Joensen and Jens R. Rostrup-Nielsen, “Conversion of hydrocarbons and alcohols for fuel cells”, Journal of Power Sources, vol. 105, pp. 195-201, 2002.
- [7] W. Wiese, B. Emonts and R. Peters, “Methanol steam reforming in a fuel cell drive system”, Journal of Power Sources, vol. 84, pp. 187-193, 1999.
- [8] Yong-Kul Lee, Kyoung-Suk Kim, Jin-Goo Ahn, In-Hyuk Son and Woo-Cheol Shin, “Hydrogen production from ethanol over Co/ZnO catalyst in a multi-layered reformer”, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 35, pp. 1147-1151, 2010.
- [9] Carl L. Yaws, The Yaws Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals, Gulf Publishing Company, 2006.

저 자 소 개



오진숙(吳眞淑)

1987년 4월생, 2010년 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 졸업(공학사), 2010년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학과 열·유체전공, 선박용 연료전지시스템 연구실 석사과정



이경진(李慶眞)

1988년 2월생, 2010년 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 졸업(공학사), 2010년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학과 열·유체전공, 선박용 연료전지시스템 연구실 석사과정



김선희(金善喜)

1984년 12월생, 2008년 한국해양대학교 해사대학 선박전자기계공학부 졸업(공학사), 2011년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학과 열·유체전공, 선박용 연료전지시스템 연구실 석사과정



오세진(吳世眞)

1972년 5월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2000, 2003년 동 대학원 졸업(석사, 박사), 2월 현재 한국해양대학교 운항훈련원 실습전담교원
※관심분야:전동기속도제어, 인버터 및 컨버터



임태우(林兌禹)

1970년생 6월생, 1995년 부경대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1997년 부경대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 큐슈대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2005년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관공학부 교수



김종수(金宗洙)

1970년 6월생, 1994년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1998, 2002년 동 대학원 졸업(석사, 박사) 현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수
※관심분야:전동기속도제어, 전력전자, 인버터



박상균(朴相均)

1974년 10월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 2001년 한국해양대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사), 2005년 일본 북해도대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 (사)한국선급 에너지환경사업단 근무



김만응(金晩應)

1980년 한국해양대 기관공학과 졸업, 2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과(공학박사), 현재 (사)한국선급 에너지환경사업단 단장



김명환(金明煥)

1959년생 1월생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업(공학사), 1983년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(공학석사), 1994년 일본 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1984년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관공학부 교수