



## 선박 연료로서의 메탄올 특성과 고려사항

서울대학교 조선해양공학과  
임영섭 교수



가속화되고 있는 기후 변화로 인하여 선박 업계에도 큰 변화의 바람이 불어오고 있다. 온실가스 저감을 위하여 다양한 친환경 대체연료들이 대두되고 있는 가운데, 메탄올에 대한 관심이 크게 높아지고 있다. 현재 선박 연료로서 메탄올이 주목을 받고 있는 가장 큰 이유는 다음과 같은 복합적 특징들 때문이다.

- 1 바이오 메탄올이나 e-메탄올과 같이 온실가스 배출량이 적은 그린 메탄올을 생산하는 것이 가능하다.
- 2 메탄올은 상온 상압에서 기체가 아닌 액체 연료로서, 기존 액체 저장 시설 및 기반 인프라를 큰 개조 없이 활용할 수 있다.
- 3 메탄올을 연료로 이용할 수 있는 엔진의 상용화 수준이 높아져 현재 바로 상업적 활용이 가능하다.

단, 메탄올은 고인화성이자 유독성 물질로, 취급에 주의가 필요하며 이로 인해 요구되는 안전 설비의 특징도 편차가 있다. 본고에서는 메탄올의 특성을 소개하고, 다른 연료의 특성과 비교하여 주요한 차이점을 전달하고자 한다.

안전에 대한 주의가 필요하지만  
현재 바로 사용이 가능한  
선박 대체연료, 메탄올

## 블루 메탄올, 그린 메탄올

메탄올은 다른 대체연료와 마찬가지로 어떻게 생산되었는지에 따라서 온실가스 배출 집약도에 큰 편차를 보인다. 메탄올은 연소 단계에서 발생하는 TtW(Tank-to-Wake) 온실가스(GHG, Greenhouse gas) 배출 집약도가 중유와 같은 화석 연료보다 낮은 값을 가진다. 그러나 화석 연료로부터 생산되는 경우 생산 단계를 포함한 WtW(Well-to-Wake) GHG 배출 집약도는 아래의 표와 같이 중유보다도 높은 값( $100.4g_{CO_2eq}/MJ$ )을 가지게 된다. 즉, 화석 연료로부터 생산되는 메탄올은 친환경 대체연료라 할 수 없다.

IMO MEPC 80차 논의에서는 기준 한계점(Threshold)을 도입하여, IMO의 화석 연료 기준 WtW GHG 배출 집약도인  $94g_{CO_2eq}/MJ$ 의 65% 이상 저감 가능한 바이오 연료만 인정하는 방식을 명시하였다. 즉  $32.9g_{CO_2eq}/MJ$  이하의 WtW GHG 배출 집약도를 가지는 경우만 바이오 연료로 인정받을 수 있게 되었다. e-연료에 대한 논의는 아직 IMO MEPC에서 완료되지 않았으나, FuelEU maritime / RED II의 RFNBO(Renewable Fuel of Non-Biological Origin) 합성 연료 요건을 살펴보면 화석 연료 기준 온실가스 배출 집약도가 70% 이상 저감된 연료만을 인정하고 있다. 만약 IMO에서도 e-연료에 대한 인정 조건을 화석 연료 기준 WtW GHG 배출 집약도가 70% 이상 저감된 연료로 국한하게 된다면,  $28.2g_{CO_2eq}/MJ$  이하의 WtW GHG 배출 집약도를 가지는 경우만 e-연료로 인정받을 수 있게 된다. 즉, 미래에는 이러한 조건을 만족하는 경우에만 그린 메탄올의 자격이 부여될 것으로 예상해볼 수 있다.

수소와 마찬가지로 메탄올은 생산 과정에 따라 색상 분류를 적용할 수 있다. 화석 연료보다 온실가스 배출량이 적은 메탄올은 블루 수소와 그린 수소를 기반으로 하는 블루 메탄올과 그린 메탄올이다. 그린 메탄올은 크게 두 종류로 구별할 수 있다. 첫 번째는 이산화탄소를 흡수하여 성장한 바이오 매스로부터 생산되는 바이오 메탄올이다. 두 번째는 재생 에너지를 이용하여 생산된 전기로 물을 전기 분해해서 얻은 그린 수소를 재생 이산화탄소와 합성함으로써 생산되는 e-메탄올이다. 이때 그린 수소를 이용하더라도 화석 연료로부터 기인된 비재생 이산화탄소(Non-renewable CO<sub>2</sub>)와 합성하여 생산되는 메탄올은 그린 메탄올이 되기 어려움을 유의하여야 한다. 비재생 CO<sub>2</sub>는 LCA 관점에서 온실가스 저감 효과가 없으므로 이렇게 생산된 메탄올의 WtW GHG 배출량이 그린 메탄올에 요구되는, 낮은 배출 집약도를 가지기 어렵기 때문이다.

그린 수소와 비재생 CO<sub>2</sub>, 혹은 블루 수소와 재생 CO<sub>2</sub>로부터 합성되는 메탄올은 블루 메탄올로 볼 수 있다. 블루 메탄올은 그린 메탄올에 요구되는 낮은 배출 집약도를 달성하지는 못하더라도 화석 연료 대비 낮은 GHG 배출 집약도를 가지게 된다. 그린 메탄올의 공급 규모는 아직 전세계 에너지 수요를 충족할 수 있는 수준이 아니므로, 향후 기존 연료와 블루·그린 메탄올의 사용 비중을 조절하여 점진적인 온실가스 배출 목표를 달성하게 될 것으로 예상된다.

### 선박 연료들에 대한 WtW GHG 배출 집약도 분석 결과 (RED II / FuelEU Maritime 기준)

LHV: Lower Heating Value; ICE: Internal Combustion Engine; DFMS: Dual Fuel Medium Speed; DFSS: Dual Fuel Slow Speed; OPS: On-shore Power Supply; ILUC: Indirect Land Use Change

Fuel Class	Pathway Name	LHV (MJ/g)	WtT Intensity (g <sub>CO2eq</sub> /MJ)	Fuel Consumer Unit Class	TtW Intensity (g <sub>CO2eq</sub> /MJ)	WtW Intensity (g <sub>CO2eq</sub> /MJ) <sup>1)</sup>	Source
Fossil	HFO (ISO 8217 Grades RME to RMK)	0.0405	13.5	All ICEs	78.2	91.7	FuelEU Maritime (EU, 2023)
	LFO (ISO 8217 Grades RMA to RMD)	0.041	13.2		78.2	91.4	
	MDO/MGO (ISO 8217 DMX to DMB)	0.0427	14.4		76.4	90.8	
	LNG (Liquified Natural Gas)	0.0491	18.5	LNG Otto(DFMS)	70.7	89.2	
				LNG Otto(DFSS)	64.4	82.9	
				LNG Diesel(DFSS)	57.6	76.1	
	LPG (Liquified Petroleum Gas)	0.046	7.8	ICE (Butane)	65.9	73.7	
	H <sub>2</sub> (from Natural Gas)	0.12	132.0	ICE (Propane)	65.2	73.0	
	NH <sub>3</sub> (from Natural Gas)	0.0186	121.0	ICE/Fuel Cells	0.0 <sup>2)</sup>	132.0	
	Methanol (from Natural Gas)	0.0199	31.3	ICE/Fuel Cells	0.0 <sup>2)</sup>	121.0	
Biodiesel				ICE	69.1	100.4	
	Crop Biodiesel	0.0372	-61.7 to -0.9	All ICEs	76.6	44.7 ~ 50.1	
	Oil Crop Biodiesel					51.6 ~ 75.7	
	Waste Cooking Oil Biodiesel					14.9	
	Animal Fats from Rendering Biodiesel					20.8	
Fischer-tropsch Diesel	0.044	-54.2 to -47.7		64.4	11.7 ~ 18.2		
Biomethanol	Waste Wood Methanol in Free-standing Plant	0.02	-55.3	All ICEs	68.8	10.4	
	Farmed Wood Methanol in Free-standing Plant		-52.6			13.5	
	Methanol from Black-liquor Gasification		-58.4			16.2	
RFNBO <small>Renewable Fuels of Non-Biological Origin (e-fuels)</small>	e-diesel	0.0427	-48.2 이하	ICE	76.4	RED II (EU, 2018) / FuelEU Maritime (EU, 2023)	
	e-methanol	0.0199	-40.9 이하	ICE	69.1		
	e-LNG	0.0491	-42.5 ~ -29.4 이하	LNG Otto/Diesel	57.6 ~ 70.7		
	e-H <sub>2</sub>	0.12	28.2 이하	ICE/Fuel Cells	0.0 <sup>2)</sup>		
	e-NH <sub>3</sub>	0.0186	28.2 이하	ICE/Fuel Cells	0.0 <sup>2)</sup>		

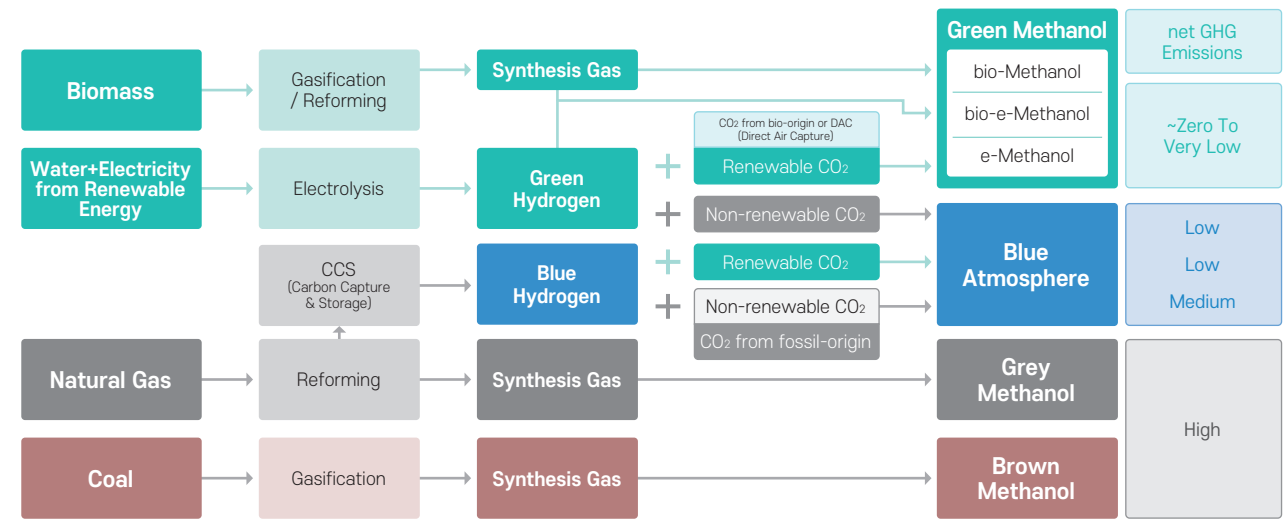
1) 현재 화석 연료 WtW 온실가스 기준 배출 집약도가 IMO 기준( $94g_{CO_2eq}/MJ$ )과 FuelEU Maritime 기준( $91.2g_{CO_2eq}/MJ$ )이 동일하지 않음

2) 연소 과정에서 배출되는 CO<sub>2</sub> 이외 온실가스(CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 영향력 현재 미포함, 추후 수정될 수 있음

3) RED II 기반 e-연료 인정 기준은 화석 연료 WtW 기준 배출 집약도 대비 70% 감축, 바이오 연료 인정 기준은 65% 감축



메탄올 생산 경로에 따른 색상 분류



메탄올 엔진 및 벙커링

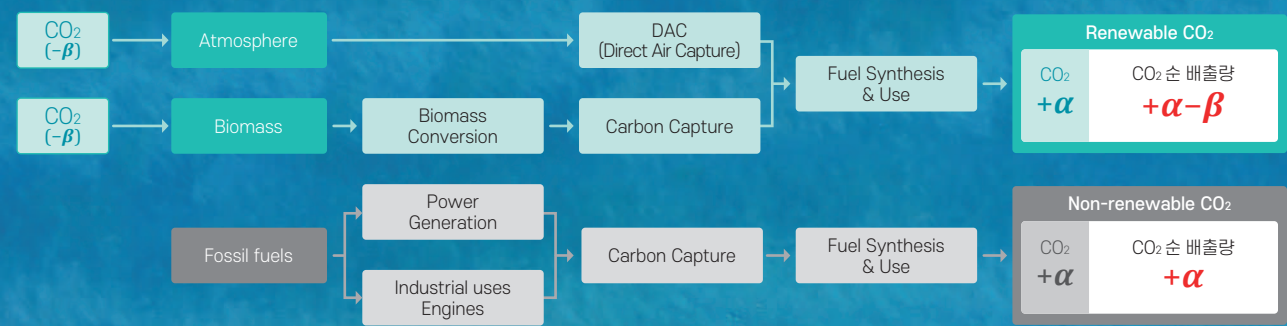
현재 다수의 엔진 개발 업체들이 메탄올을 연료로 하는 이중 연료 추진 엔진을 이미 개발했거나, 개발하고 있는 과정에 있다. 클락슨(Clarksons)에 따르면 2022년 43척의 메탄올 연료 추진 선박이 발주되었으며, 메탄올 준비 선박도 22척 발주되었다.

메탄올은 상압에서의 끓는점이 64.7℃로 휘발성은 높으나 상온에서 안정적인 액체이므로 저온용 강재를 사용할 필요가 없다. 그러나 일부 재료에 부식을 유발하기 때문에 탱크 및 배관, 실(Seal) 및 기타 구성 요소에 대한 재료 선택에 유의해야 한다. 화학 물질 운반선(Chemical Tanker)의 화물창에 적용되는 특수 도장을 메탄올 연료 탱크에 동일하게 적용하여, 일반적으로 선체 구조에 적용되는 선급 강재(AH grade, A grade 등)로 메탄올 연료 탱크의 제작이 가능하다. 규산 아연으로 탱크를 코팅하는 경우 일반적으로 날카로운 모서리가 없는 평평한 표면이 필요하므로 외부 구조와 탱크 내부는 평평한 표면으로 제작해야

한다. 특수 도장을 위해서는 탱크 내측으로 부재가 배치되지 않도록 주의해야 하며, 화물창 탱크의 접근을 위한 의장 설비를 최소화해야 한다.

메탄올의 에너지 밀도는 LNG보다 낮으나, 저온 단열재 등 부가적인 공간에 대한 필요성이 적고 선박 하단의 공간을 이용할 수 있기 때문에, 코퍼덱 등을 고려하더라도 상대적인 화물창 크기는 LNG와 유사하게 기존 연료의 2배 수준으로 평가받고 있다. 이는 액화 암모니아 화물창 크기의 약 절반, 액화 수소 화물창 크기의 30% 수준으로 추정된다. 메탄올 추진으로 전환하는 경우 공간 전환으로 인해 약 1.5%에서 4% 정도의 화물 용량 감소가 예상되고 있으며, 이러한 손실을 줄이기 위해서는 메탄올 전환을 위한 구조적 요소 및 시스템을 미리 갖추어 두는 준비가 필요하다.

재생 CO<sub>2</sub>와 비재생 CO<sub>2</sub>의 개념



업체별 메탄올 엔진 개발 현황

Anglo Belgian Corporation (ABC)	955kW ~ 3,536kW 출력의 6기통 및 8기통 인라인 엔진, 12기통 및 16기통 V 엔진으로 구성된 DZD 메탄올 엔진 제품군 개발
Caterpillar	Cat® 3500E 시리즈 엔진을 메탄올 연료 추진 엔진으로 전환 가능
CSSC Power Research Institute, Anqing CSSC Diesel Engine, and Hudong Heavy Machinery	M320DM 메탄올 연료 엔진을 개발했으며, 최대 20,000GT의 다양한 선박에 적용 가능
Hyundai Heavy Industries Engine & Machinery Division (HHI-EMD)	5,400마력급 메탄올 이중 연료 발전 엔진 개발 및 50대의 엔진 수주 (2022년 10월 기준)
MAN Energy Solutions	2행정 메탄올 이중 연료 엔진인 ME-LGIM 개발 완료 (145,000시간 이상의 작동 시간 축적) 및 4행정 메탄올 엔진 개발 중
mtu Marine solutions (by Rolls-Royce)	2026년 mtu Series 4000 기반의 메탄올 엔진을 출시하고, 2028년 메탄올 연료 전지 출시 예정
Nordhavn Power Solutions A/S	ScandiNAOS사와 협력하여 13L/6기통 및 16L/8기통 메탄올 엔진 제공
Wärtsilä	2015년 이후 축적된 메탄올 엔진 운항 경험을 바탕으로 ZA40S, W32 Methanol 엔진 개발 완료 및 W20, W46 메탄올 엔진 개발 예정
WinGD and HSD Engine	공동 개발 프로젝트를 통해 2024년 메탄올 엔진 개발 완료 예정

선박 연료 저장 특성

연료	발열량(LHV)(MJ/kg)	에너지 밀도(GJ/m³)	저장 압력(bar)	저장 온도(°C)	상대적 화물창 크기(단열재 고려)*
MDO/MGO	42.7	36.6	1	20	1
LNG	55.6	25.0	1	-162	2.3
메탄올	19.9	15.8	1	20	2.3
액화 암모니아	18.6	12.7	1	-34	4.1
액화 수소	120.0	8.5	1	20	7.6
				-253	

\* 상대적 탱크 크기는 항속 거리 1,000해리의 헥사덱스급 화물선을 기준으로 추산



## 메탄올의 위험 요인 및 안전

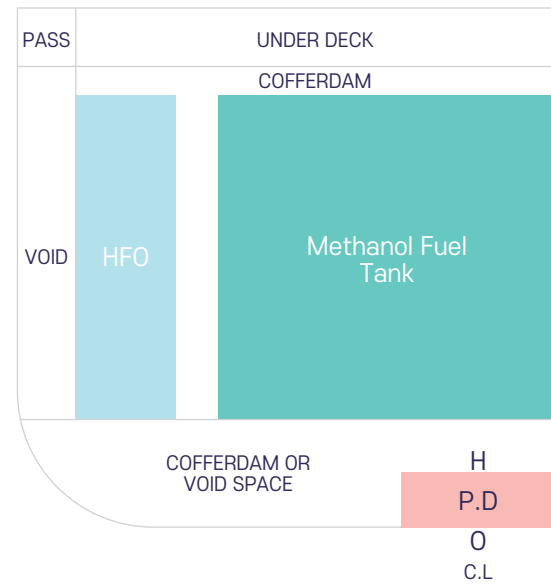
메탄올은 부식을 유발하며 화재 폭발이 가능한 고인화성 물질이며, 특히 유독성 물질로 취급에 주의가 필요하다. 메탄올은 섭취, 흡입, 피부 접촉의 모든 경로로 인체에 흡수될 수 있으며, 인체에 흡수된 메탄올은 산화되어 포름알데하이드(Formaldehyde)로 전환된 뒤 알코탈수소효소(Alcohol Dehydrogenase)에 의하여 포름산(개미산, Formic Acid)이 되며, 최종적으로는 산화되어 물과 이산화탄소로 분해된다. 그러나 메탄올의 분해 속도는 매우 느려서, 독성 물질인 포름알데하이드의 체내 축적이 발생하게 되며 인체 피해로 귀결된다. 포름알데하이드는 뇌척수액, 혈액, 소변 등 인체의 다양한 조직으로 분산되며, 특히 안구 및 유리체 체액에 흡수되어 피해를 유발하는데 시신경과 망막에 위축을 유발하며 실명으로 연결될 수 있다. 메탄올의 불완전 연소 또한 포름알데하이드를 형성할 수 있으므로 주의가 필요하다. USA NIOSH(National Institute for Occupational Safety & Health) 기준에 따르면 메탄올의 1일 작업 시간 동안의 시간 가중 평균 노출 기준(TWA, Time Weighted Average)은 200ppm, 단시간 노출 기준(STEL, Short Term Exposure Limit)은 250ppm이다.

위험 사고 예방을 위하여 메탄올 취급 시설은 열원 및 점화원으로부터 격리되어야 하며, 저장용기는 밀폐되어야 한다. 저장 용기는 접지되어야 하며, 방폭형 설비 및 환기·배기 설비, 스파크 및 정전기 방지 수단이 요구된다. 메탄올 증기를 흡입해서는 안 되며, 취급 시 먹거나 마시거나 흡연해서는 안 된다. 실외 혹은 환기 시설이 갖추어진 곳에서 사용되어야 하며 직접 접촉해야 하는 경우 개인 보호구를 착용해야 한다. 삼켰다면 입을 씻고 즉시 의료 기관의 진료를 받아야 하며, 피부

또는 머리카락에 묻은 경우 오염된 모든 의류를 즉시 벗고 피부를 물로 세척해야 한다. 오염된 의류는 재사용 전에 세척해야 한다. 흡입시 신선한 공기가 있는 곳으로 이동하여 안정을 취해야 한다. 메탄올 중독 치료 약물로는 포메피졸(Fomepizole, 혹은 4-methylpyrazole)이 존재하며 WHO 필수 의약품 목록에 등재되어 있다.

메탄올 추진 선박에 요구되는 안전 규정은 IMO의 메틸/에틸 알콜을 연료로 사용하는 선박의 안전에 대한 잠정 가이드라인(MSC.1/Circular.1621) 및 KR 저인화점 연료 선박 규칙 부록5 메틸/에틸 알코올 연료 선박 요건을 따른다. IGF 코드를 기반으로 하고 있으나 독성 등 LNG와는 매우 다른 특징들을 가지기 때문에 요구되는 안전 규정 또한 차이가 다수 존재한다. 메탄올은 상온에서 액체로 존재하므로, 저장 시 저온 유지를 위한 별도의 조치가 필요하지 않고 때문에 취성 파괴를 방지하고자 설계하는 2차 방벽(Secondary Barrier)이 요구되지 않는다. 결과적으로 메탄올 탱크는 LNG 연료 탱크나 암모니아 연료 탱크와는 다르게 선체 구조 일부가 탱크를 형성하는 일체형 연료 탱크로 배치가 가능하다. 반면 유독성 물질이기 때문에 최저 수위선 아래에 설치되는 메탄올 탱크 주변에는 보호용 코퍼댐(Cofferdam)이 필요하며 작동 중에 항상 불활성 상태를 유지해야 한다. 폐위 구역을 통과하는 연료관은 누출 방지를 위해 이중관 등으로 밀폐되어야 하며, 배출 및 누설된 연료는 드립 트레이를 통하여 전용 누설물 저장 탱크로 배수되어야 한다.

메탄올 연료 탱크 배치 사례



## 메탄올 경제성

현재 대체연료의 가격 변동성이 매우 크며 기간 및 지역에 따라 편차가 매우 커서 일반적으로 비교하기는 어렵다. 2021 년도를 기준으로 할 때 그레이 LNG는 평균 \$17.6/GJ 수준, 그레이 메탄올은 \$20.0/GJ 수준의 가격대를 보이고 있으나 시기와 장소에 따라 LNG 가격이 메탄올의 2배 이상의 가격대를 형성하기도 하였다.

바이오 메탄올의 경우 바이오 매스나 MSW(Municipal Solid Waste, 도시 고형 폐기물) 등에서 얻어진 바이오 가스로부터 합성이 가능하여 그린 메탄올 중에서는 비교적 저렴한 \$30.0/GJ 수준으로 추정된다. 반면 e-메탄올의 경우 신재생 발전을 통한 그린 수소로부터 합성되어야 하므로, 현재 \$66.0/GJ 수준의 높은 가격대를 보이고 있으며, 만약 DAC를 통하여 이산화탄소를 포집하여 합성하는 경우 높은 이산화탄소 포집 비용으로 인하여 \$80/GJ 이상의 가격을 형성할 것으로 예상된다.

e-메탄올의 생산 단가에 가장 큰 영향을 미치는 것은 그린 수소 생산을 위한 신재생 발전 단가로, 향후 시간이 경과하고 기술이 성숙함에 따라 신재생 발전 단가와 수전해 비용이 감소하면서 e-메탄올의 생산 단가도 점진적으로 낮아질 것으로 예측되고 있다. 바이오 메탄올의 경우 기술 성숙기가 되더라도 원료가 되는 바이오 매스의 수요 증가로 인하여 원재료 가격이 상승할 것으로 예상되어, 평균 가격 감소폭은 크지 않을 것으로 보인다. 다음의 그림은 타 연료 대비 향후 바이오 및 e-메탄올의 가격 변화에 대한 예상치를 보여준다.

## | 결론 | 선박을 위한 대체연료로서 메탄올

메탄올은 액체 연료로 기존 액체 저장 시설 및 기반 인프라를 큰 개조 없이 활용할 수 있고, 메탄올 엔진이 상용화되어 있으므로 현재 바로 사용이 가능하다는 장점을 지닌다. 동시에 블루 메탄올 및 그린 메탄올을 그레이 메탄올과 혼용하여 사용함으로써 온실가스 배출 규제 또한 만족할 수 있다. 상대적으로 낮은 가격으로 인하여 상당 기간 동안 바이오 메탄올의 수요가 높은 것으로 예상되며, 이후 기술 발전에 따라서 e-메탄올의 가격이 하락하면 다수의 대체연료와 경쟁이 가능해질 것으로 보인다.

메탄올은 섭취, 흡입, 피부 접촉의 모든 경로로 인체에 흡수될 수 있는 유독성 물질로, 실명 등 안전 사고 발생이 많은 위험한 물질이므로 취급에 주의가 필요하다. 코퍼댐 및 이중관 밀폐 등 차별적인 안전 규정이 요구되므로 이에 대해서 주의가 필요하다. 또한 아직 선원을 위한 메탄올 안전 교육이 충분하게 제공되고 있지 않으므로, 교육 훈련 프로그램이 확충될 필요성이 있다.

Bio-/e-LNG, 블루/e-암모니아, bio-/e-메탄올의 연료 가격 예측

