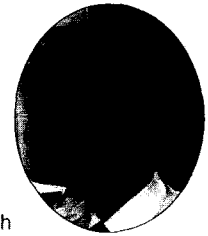


디젤엔진 대체연료로서의 디메틸에테르

Dimethyl Ether as Alternative Diesel Fuel

이 영 재 · 한국에너지기술연구원 팀장
 Young Jae Lee · Korea Institute of Energy Research



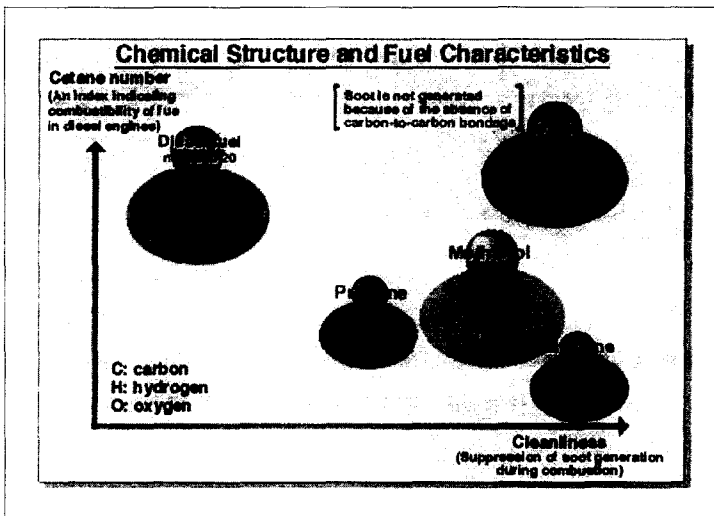
1. 머릿말

디젤엔진은 가솔린엔진보다 열효율이 우수하고 지구온난화가스인 이산화탄소의 배출이 적은 장점이 있으나, PM과 NOx의 배출량이 많은 단점이 있다. 이에 디젤엔진의 저공해 대체연료로서 천연가스나

LPG의 적용이 추진되고 있으나 이들은 스파크점화 방식의 오토사이클로 운전되기 때문에 엔진 개조범위가 넓어지고 열효율이 감소하는 등 여러 문제점이 있다.

DME는 세탄가가 높기 때문에 압축착화에 의한 디젤사이클 운전이 가능하여 디젤엔진과 같은 수준의 열효율과 이산화탄소 배출량을 얻을 수 있고 합산소연료이기 때문에 PM을 거의 배출하지 않는 등 디젤 대체연료로서 우수한 특성을 많이 가지고 있다(그림 1). 특히, 최근에 낮은 가격으로 DME를 제조할 수 있는 직접 합성반응기술이 개발됨에 따라 차세대의 유망한 저공해 대체연료로서 각광을 받고 있다.

따라서 그간 스프레이용 추진체, 올레핀 생산, MTG(Methanol to Gasoline), 메틸아세테이트 합성용으로 주로 사용되어 오던 DME에 대하여 대체연료로서의 제조 및 활



〈그림 1〉 DME의 세탄가 및 저공해성

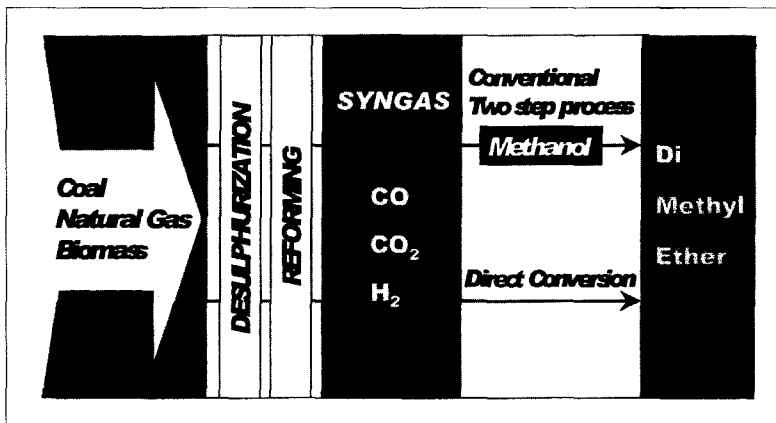
특집 자동차 연료 및 운할유

용기술이 활발히 연구되고 있으며 국제에너지기구(IEA)에서도 유럽, 미국, 일본 등 약 10개 국가의 업체가 참여하여 제조 및 이용기술을 연구중에 있다.

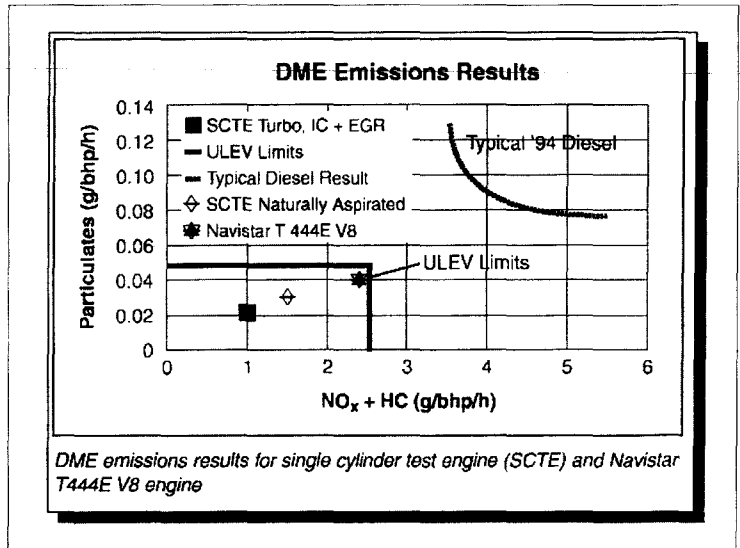
2. DME의 물리화학적 성질

DME는 1개의 산소분자와 2개의 메탄기가 결합한 에테르화합물로서(CH₃OCH₃), 디젤연료로서 아래와 같은 여러 장점이 있다.

- ① 세탄가(약 60)가 높기 때문에 디젤사이클 운전이 가능하여 디젤엔진과 같은 수준의 열효율과 이산화탄소 배출량을 얻을 수 있다.
- ② 함산소연료(34.8wt%)이므로 PM의 발생이 극히 적고 황분을 함유하지 않아서 황화합물을 배출하지 않는다.
- ③ EGR을 적용하면 저NO_x 및 저PM의 동시실현이 가능하다(그림 2).
- ④ 인체에 위해성이 없고 금속계통에 대한 부식성이 없다.



〈그림 3〉 DME 제조경로



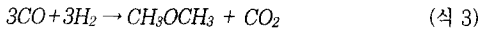
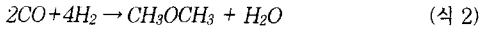
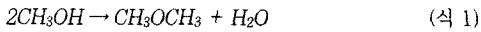
〈그림 2〉 DME엔진의 배출가스

- ⑤ LPG와 마찬가지로 약 5기압정도에서 상온 액화가 가능하기 때문에 현행 LPG차량의 연료용기나 연료공급인프라 등을 대부분 준용할 수 있다.

3. DME의 제조기술

DME의 제조경로를 〈그림 3〉에 나타낸다. DME는 통상 메탄올의 탈수반응에 의한 간접법에 의해 제조되고 있으며(식 1), 그림의 합성가스→메탄올→DME의 경로를 거쳐 제조된다. 그러나 최근에 덴마크의 Haldor Topsoe사 등에서 천연가스, 석탄, 바이오매스 등에서 만들어지는 CO, H₂ 등의 합성가스로부터 DME를 직접 합성하는 제조기술이 개발되고 있다(식 2 및 식 3).

종래의 메탄올 탈수반응에 의한 DME 제조기술은 생산효



율이 낮고 고가인 메탄올을 사용하기 때문에 값싸게 합성할 수 없는 문제점이 있었으나 합성가스로부터 DME를 직접 합성·제조하는 기술은 천연가스, 석탄가스화 가스, 바이오매스, LNG탱크의 BOG(Boil Off Gas), 제철소의 부생가스, 석유잔사, 폐기물(플라스틱 등), 가축분뇨 등 다종다양한 값싼 원료를 활용 가능한 점, 메탄올 탈수법에 비해 에너지소비비가 적고 자기열형 개질기(Auto Thermal Reformer) 등에 의해 개질 프로세스의 경비를 저감할 수 있어서 제조가격을 대폭 낮출 수 있는 점 등 이점이 많다.

현재 <표 1>에서와 같이 일본강관(NKK), Air Products & Chemicals사(미국) 및 Haldor Topsøe사(덴마크) 등에서 DME 직접 합성프로세스 개발 연구를 활발히 추진하고 있으며, NKK방식이 DME만을 약 99%의 높은 수율로 제조하는 방식임에 대하여 나머지 두 방식은 메탄올과 DME를 병산

하는 방식이다.

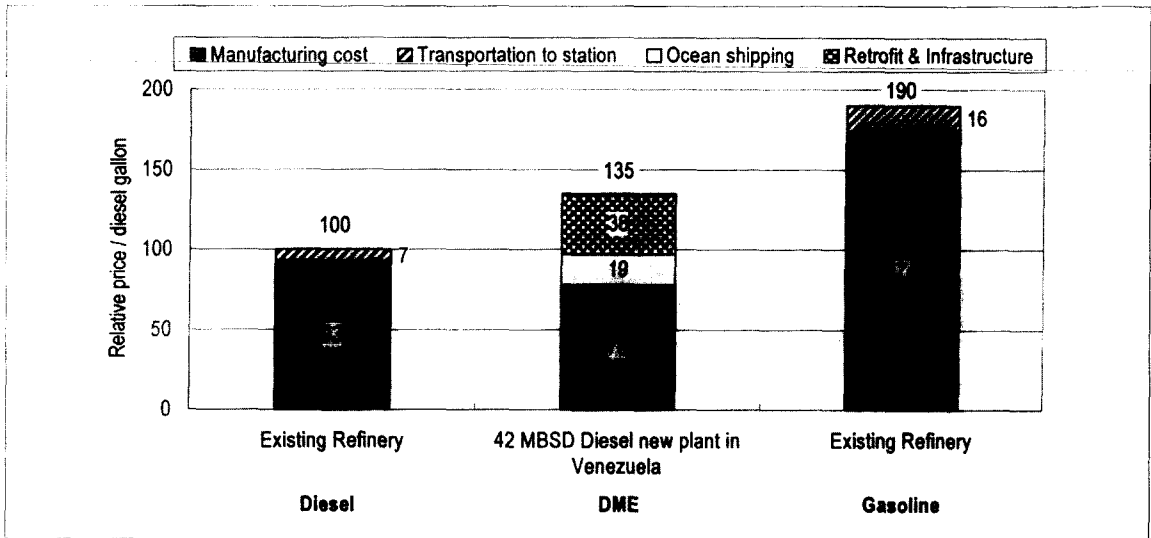
종래의 메탄올 탈수반응에 의한 DME 제조방법에서는 DME 연료가격이 기존 연료에 비하여 높아지거나 직접 합성법을 이용하는 경우에는 단일 플랜트에서 1일당 경유 5,400톤 상당의 DME가 제조가능한 조건을 기준으로 비교하면, <그림 4>에서와 같이 DME의 제조가격은 경유보다 낮아지고 수송비나 새로운 인프라의 정비 등에 소요되는 경비를 포함해도 가격경쟁력이 있는 것으로 예측되고 있다(Haldor Topsøe의 시산).

일본에서 NKK방식의 제조기술을 바탕으로 시산한 경우에도<그림 5>, 석탄에서 DME를 제조하는 경우에 2,500톤/일 규모의 플랜트에서(DME선택율 90%) CIF가격기준으로 US\$2.2/Mcal를 예상하고 있어서(천연가스로부터는 2.3\$), LNG의 1.7\$, 경유의 2.0\$, LPG의 2.35\$에 대비하여 연료로서 충분히 가격 경쟁력이 있는 것으로 평가하고 있다. 또한, 설비 규모가 커지면 가격이 보다 낮아질 것으로 전망하고 있다.

<표 1> DME 직접합성프로세스의 비교

개발사	NKK	Air Products & Chemicals	Haldor Topsøe
대상원료가스	석탄가스	석탄가스	천연가스리포밍
원료가스조성(H ₂ /CO비)	1	0.7	2
반응기 타입	슬러리상 반응기	슬러리상 반응기	고정상 반응기
반응조건			
온도 (°C)	250~320	250~280	210~290
압력 (atm)	30~50	50~100	70~80
공간속도 (kl/kg-cat/hr)	2.0~6.0	1.5~10	불명
반응율 (원스루) (%)	55~60	33	불명
최종제품	DME : 99%	DME + Methanol (DME : 30~80%)	DME + Methanol (DME : 60~70%)
개발경과	1989~ : 1kg/d 비커 1995~ : 50kg/d 벤치 1997~ : 5t/d 대형벤치	1986~ : 비커 1991~ : 4t/d 파일롯트	1993~ : 50kg/d 벤치 1995~ : 2t/d 파일롯트

특집 자동차 연료 및 운할유



〈그림 4〉 대형 플랜트에서의 DME, 경유, 가솔린의 세전가격 비교
(Year 2000 : US Gulf Coast)



〈그림 5〉 NKK사의 DME 파일럿플랜트(북해도)

4. DME의 엔진 적용기술

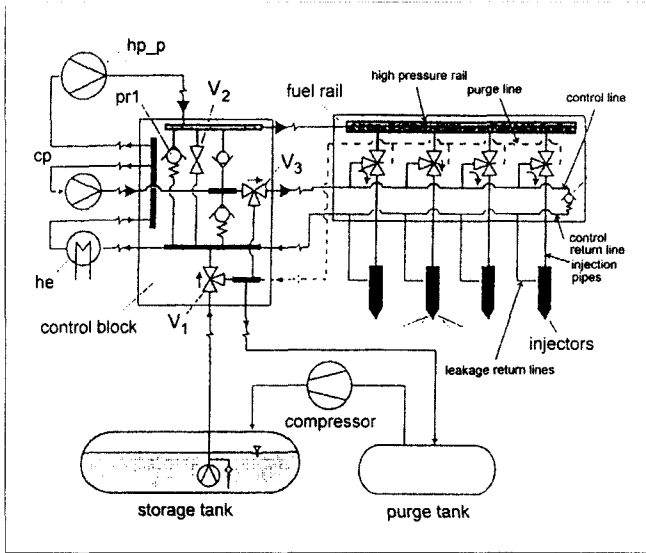
오스트리아의 AVL사에서는 덴마크의 Haldor Topsoe사의 연구위탁을 계기로 1993년부터 DME 엔진에 대한 연구를 추진하고 있다. 그간 분배형 및 열형 분사펌프, 유닛 인젝터 등 여러 디젤연료분사시스템을 사용하여 연구하여 왔으나 플런저 배럴로부터의 누설을 비롯한 여러 문제가 발생하였기 때문에

최종적으로 아래와 같은 여러 장점이 있는 콰터레일 방식의 전자제어분사시스템을 사용하여 연구를 추진하고 있다(그림 6).

- ① 연료유량 제어에 대한 체적변화의 영향이 작다.
- ② 최적 분사압력 및 분사율을 얻는 데에 적합하다.
- ③ 요구분사압력이 낮기 때문에 분사계의 강화가 불필요하다.
- ④ 통상의 분사노즐을 사용할 수 있다(실린더헤드 변경이 불필요).
- ⑤ 가격상승을 최소로 억제할 수 있다.

한편, 동사의 자회사인 미국 AVL사에서는 미국 DOE의 의뢰를 받아 1996년 가을부터 Navistar 트럭엔진을 사용하여 주로 중부하 디젤엔진용 DME 콰터레일시스템의 개발을 대상으로 연구를 추진하고 있다.

네덜란드의 TNO사에서는 NOVEM사로부터 위탁받아 DME의 대체연료로서의 가능성을 조사하고 있다. 분사펌프의 누설에 대한 연구를 주로 추진하여 왔으나 최근에는 엔진 실험연구를 실시하고 있으며 IEA 관련연구로서 AKZO NOBEL사와 공동으로



〈그림 6〉 오스트리아 AVL사의 DME 컴먼레일시스템

DME의 안전성에 대한 이론해석도 실시하고 있다.

덴마크에는 합성가스로부터 DME를 직접 제조하는 기술을 보유하고 있는 Haldor Topsøe사가 있어서 DME자동차의 실용화를 각국에 적극 추천하고 있음과 동시에 자국내에서도 운수환경성, 연구기관, 버스회사, 스웨덴의 자동차회사인 Volvo(그림 7), 노르웨이의 석유회사 등이 참여하여, 1997년부터 DME자동차의 플릿테스트를 실시하고 있다.

일본에서는 NKK, 히노자동차, 기계기술연구원, 교통안전공해연구소, 이바라키대학 등에서 기존 분배형 및 열형 분사펌프 디젤엔진에 대한 DME 적용 연구에서부터 컴먼레일 방식의 DME엔진에 대한 연구까지 활발한 연구를 추진하고 있다. 작년 3월에는 경제산업성(구 통상산업성) 자원에너지청 석탄국 산하에 DME전략연구회를 구성하여 자동차용에서부터 발전용에 이르기까지 차세대 클린에너지로서의 DME의 폭넓은 적용을 위하여 각종 조사 및 검토를 실시하고 있다. 동 위원회에서는 2010년까지 일본 내의 탄층 메탄가스, 석탄 및 제철가스 등을 이용하여 효율적인 DME제조공정기술을 개발하고 100톤/

일 규모 이상의 파이롯트플랜트를 건설하여 주로 화력발전소의 실증시험용과 자동차 주행시험용으로서 활용하고 2010년 이후에는 DME의 실용화 단계로서 아시아, 태평양지역의 중소규모 천연가스전, 탄층메탄, 갈탄 등 저품위탄을 활용하여 해외에서 생산한 후 LPG 전용탱커를 통해 해상 수송하여 화력발전소, DME 디젤 자동차, 연료전지용으로 사용하자는 프로그램을 제안하고 있다. 한편, 작년 6월의 운수정책심의회 총합부회 환경소위원회에서는 DME디젤자동차를 차세대 클린자동차로서 위치를 부여하고 대형트럭, 노선버스, 관광·고속버스분야에서의 보급을 기대하고 있다.



〈그림 7〉 스웨덴 Volvo의 DME버스

그밖에 미국의 PNGV프로젝트에서는 차세대 차량에 탑재할 엔진으로서 DME를 사용하는 CIDI엔진기술을 검토하고 있으며(Ford, GM, Chrysler), 중국, 스웨덴, 노르웨이, 캐나다, 인도 등지에서도 DME 연료제조 및 엔진 적용기술에 대한 연구개발이 활발히 추진중에 있다.

(1) 연료분사계의 개발

특집 자동차 연료 및 윤활유

DME는 점도가 낮기 때문에 플런저 등의 극간에서 연료가 누설되기 쉽고, 압력 및 온도 변화에 따라 탄성계수와 밀도가 크게 변화하는 특징이 있어서 온도나 압력이 크게 변화하면 엔진의 요구분사량을 확보하기 어려운 문제가 예상된다(압력 300bar에서 온도가 50℃에서 80℃까지 30℃ 상승하면 밀도는 5.5% 저하하고 탄성계수는 35% 저하함). 따라서, 온도가 상승하기 쉬운 종래의 분배형 연료펌프는 사용하기가 어려우며 열형 연료펌프의 경우에도 DME의 압축성을 고려하여 연료쿨러의 장착, 연료갤러리 등 저압부의 내압성 향상, 딜리버리 밸브의 최적화, 진각타이머의 대응량화, 연료온도·압력에 맞춘 분사량·분사개시시기 제어 등 대폭적인 개선이 요구된다.

DME에 최적인 연료분사계는 종래의 플런저 방식보다는 컴먼레일방식이라고 인식되고 있으며 이 경우에도 대략 아래와 같은 대책이 필요한 것으로 알려져 있다.

- ① 연료분사노즐 이전에 열교환기를 설치하여 연료를 냉각해서 일정 온도로 유지한다.
- ② 점도가 낮음에 따른 연료누설을 방지하기 위하여, 낮은 분사압력의 연료분사계를 사용하거나 점도향상제를 첨가한다.
- ③ 연료의 압축성에 따른 분사량 변화를 해결하기 위하여 연료온도 보정기능을 갖춘 연료분사시스템을 사용한다.
- ④ 고무와 같은 탄성부품과 화학반응을 일으키므로 DME와 접하는 실링부품의 재질선정에 주의를 요한다.
- ⑤ 엔진 정지시에 분사노즐의 기밀불량에 의해 가스가 누설되기 쉬우므로 이에 대한 대책이 요망된다.

(2) 배출가스 저감기술의 개발

DME를 디젤엔진에 그대로 적용하면 PM은 크게

저하하나 NO_x는 비슷한 수준으로 배출된다. 따라서, EGR 등을 적용하여 NO_x를 저감해야 한다. 촉매컨버터의 적용을 고려하는 경우에는 DME엔진의 배출가스에 다량의 산소가 포함되기 때문에 가솔린엔진에 사용되는 촉매는 사용이 어려우므로 적합한 촉매의 개발도 요망된다.

(3) 엔진 신뢰성의 확보

DME는 점도가 낮아서 연료계 부품의 마모증가가 예상되므로 점도향상제의 첨가를 고려할 필요가 있다. 또한, 연소시에 흑연을 발생하지 않기 때문에 흡배기밸브의 마모증가가 예상되며 연소생성물에 수분의 함량이 많기 때문에 배기계의 부식도 예상된다. NO_x저감대책으로서 EGR을 사용하는 경우에는 실린더라이너나 축베어링의 부식·마모 등 엔진의 신뢰성과 관련된 문제가 예상되므로 이들에 대한 개선책을 확보할 필요가 있다.

(4) 연료품질 및 연료공급인프라

자동차용 연료로 사용하는 경우에는 에어졸에서 사용하고 있는 순도 99.9% 보다는 DME 제조과정에서 발생하는 불순물, 물, 메탄올 등을 정제하지 않고 어느 정도까지 혼입하여 사용하는 방법도 고려할 수 있다. 그러나, 메탄올과 물이 혼입되면 부식이나 배출가스에 영향을 미칠 것도 예상되므로 연료의 품질을 결정할 때에는 확인시험이 요망된다. 한편, DME는 LPG와 아주 유사한 물리화학적 특성을 갖는 액화가스로서 LPG 연료탱크나 충전인프라 등을 거의 준용할 수 있을 것으로 예상되나 이에 대한 검토도 요망된다.

5. 맺음말

DME는 현재 주로 사용되고 있는 스프레이 추진체 등의 용도뿐 아니라, 디젤기관용 청정 대체연료

나, LPG, 천연가스를 대신한 가정용 연료 또는 발전용 연료로서 주목을 받고 있다.

메탄올탈수 간접법에 의한 DME 제조기술은 이미 상용화되어 있어서 국내에서도 LG화학에서 연간 3,000톤정도가 생산·판매되고 있으나 LPG보다 수배 비싼 가격이므로 연료용으로 사용하기에는 무리가 있다.

이에 대하여 천연가스, 석탄, 바이오매스, 폐기물 등 다종다양한 원료로부터 합성이 가능한 직접합성법에 의한 DME 제조기술은 향후의 석유에너지고갈에 대비할 수 있고 경유와 비슷한 가격으로 제조할 수 있어서 금후 자동차용 등 연료용으로서의 보급확대가 예상된다.

따라서, 국내 부존자원에 의해 안정적으로 생산이 가능한 에너지원인 DME의 제조 및 활용기술을 보다 활발히 연구해야 할 것으로 생각되며, 참고로, 당 연구원 수소에너지연구센터에서는 3년전부터 합성가스로부터의 DME제조기술에 대한 연구를 추진하고 있고, 당 연구팀에서는 작년부턴 산업자원부와 에너지관리공단 R&D본부의 지원을 받아 DME의 디젤엔진 적용을 위한 연료공급계 및 연소계 기반기술 연구를 추진하고 있다.

〈참고 문헌〉

1) Theo Fleisch, et al., A New Clean Diesel Technology. Demonstration of ULEV Emissions on a Navistar Diesel Engine

Fueled with Dimethyl Ether, SAE Paper 950061, 1995

- 2) J. B. Hansen and Taiji Oishi, クリーンディーゼル燃料としてのジメチルエーテル(DME), PETROTECH, 第20巻, 第10號, pp. 31-36, 1997
- 3) Toshiyuki Seko, 自動車用燃料としてのDMEの開発動向について, 自動車研究, 第20巻 第2號, pp. 59-66, 1998
- 4) T. Shikada, et al., Direct Synthesis of Dimethyl Ether form Synthesis Gas, Studies in Surface Science and Catalysis, Vol. 119, 1998
- 5) Demis Gill, et al., The Development and Performance of a Fuel System for the Injection of DiMethyl Ether into Compression Ignition Engines, SAE Paper 9832044, 1998
- 6) Herwig Ofner and Peter Tritthart, Alternatives to Conventional Diesel Fuel - Strategies for Clean Combustion and Utilization of Resources, ISFL 2000, 2nd International Symposium on Fuels and Lubricants, 10-12, March, 2000
- 7) 김종원, 이영재, 디젤 대체연료로서의 디메틸에테르의 연구현황과 전망, 대한기계학회 열공학부문 추계학술대회 논문집, pp. 279-284, 2000
 〈이영재 편집위원 : yji@kier.re.kr〉