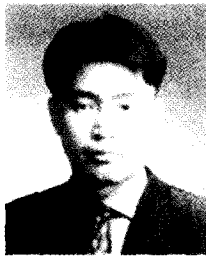


DME의 연소 및 배출가스 특성

Combustion and Emission Characteristics of DME



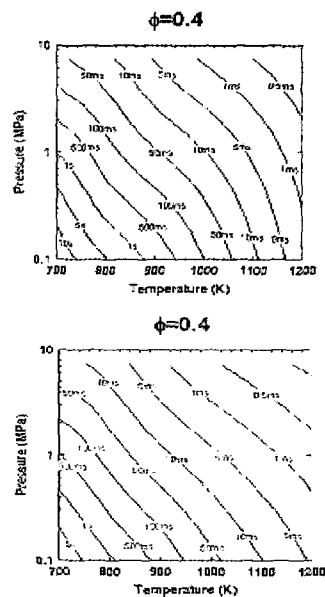
이 대 업 / Dae up Lee
인하대학교 교수 / Inha University

머리말

자동차용 엔진, 가스 터빈 그리고 보일러와 같은 다양한 연소장치에 향후 DME 연료를 본격적으로 사용하기 위해서는 DME의 기본적인 연소특성, 물성, 연소 과정 등에 대한 이해가 필요하게 된다. 현재 이에 관한 연구가 국내·외적으로 많이 수행되고 있기 때문에, 연구결과와 보고가 앞으로 더욱 많이 이루어질 것으로 판단된다. 이하에서는 DME의 연소특성, 물성 그리고 엔진 배출가스 특성에 대하여 살펴보고자 한다.

DME의 연소 특성

DME의 화학반응기구는 비교적 상세히 알려져 있으나(Inter.J.Chem.Kinet.30229-241 (1998), SAE 971596, SAE 971677 등) 엔진에서 DME의 분무 혼합 및 연소 과정을 해석하기 위해서는 CFD 코드와



〈그림 1〉 DME의 착화지연의 계산 (a) Curran et al. (1998)
(b) Golovitchev (1997)의 화학동력학식 사용
(일본 산업기술총합연구소 2000)

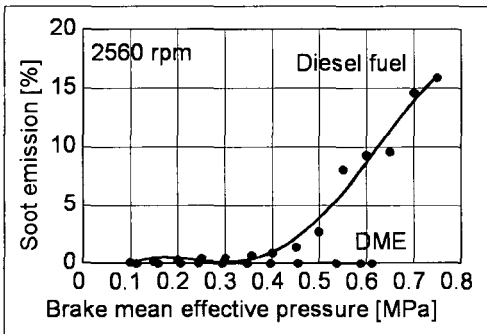
결합하여 향후 지속적인 연구의 진행이 필요한 상태이다. <그림 1>에는 Curran(1998) 및 Golovitshev(1997) 그룹이 보고한 화학동력학식을 이용하여 압력 1-100bar 및 온도 700K -1200K 범위에서 계산한 DME의 착화지연을 나타내었고, 약 3~5배 정도의 착화지연 값에 차이가 있음을 알 수 있기 때문에, 향후 착화지연의 측정 실험을 통하여 중요 반응계수를 보정하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

DME는 <그림 2>에 나타낸바와 같이 엔진 연소 조건하에서 Soot가 발생하지 않는 것으로 잘 알려져 있고, C-C 결합을 갖고 있지 않은 점, 분자구조에 산소를 포함하고 있는 점, 고온 고압 분사 환경에서 증발이

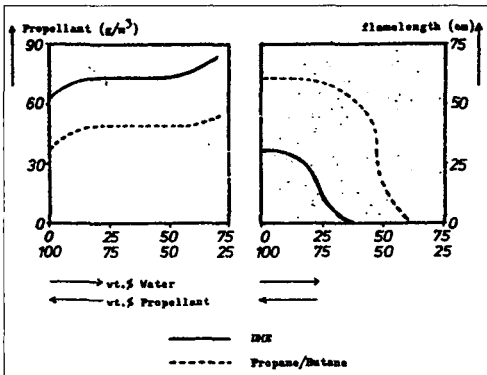
용이한 점 등으로 인하여 Soot가 형성되지 않는 것으로 이해되고 있지만, 이에 대한 이론적 배경은 아직 보고되고 있지 않다.

DME의 자착화 온도는 235℃로서 LPG의 365℃-470℃에 비하여 낮다. 그러나 희박폭발 한계는 3.4 vol%로서 LPG(1.7-2.0 vol%)의 2배에 달하기 때문에 안전성이 높다고 할 수 있다(그림 3). DME의 낮은 자착화 온도로 인하여 DME-공기 혼합기가 차량의 엔진룸 내부로 새어나올 경우에 대비하여 연료 파이프 등 필요한 부품의 고온 내구성을 고려한 설계의 필요성이 제기되고 있기도 하다.

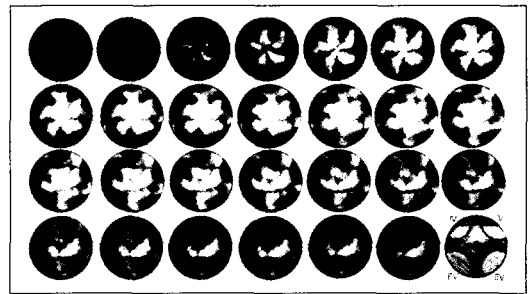
<그림 4>에는 가시화 엔진을 사용하여 관측한 경유



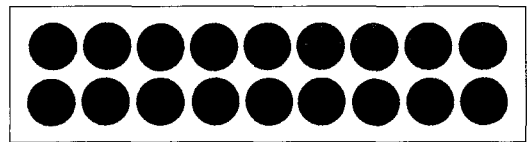
<그림 2> DME엔진에서의 soot배출 특성(일본 산업기술종합연구소(2003))



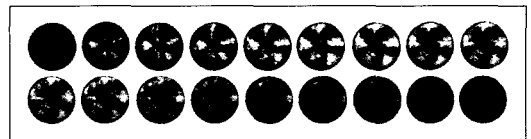
<그림 3> 스프레이 조건하에서 화염길이와 희박 폭발 한계 (TNO, 1985)



(a) 경유의 연소과정



(b) DME의 연소과정 (화상처리 전)



(c) DME의 연소과정 (화상처리 후)

<그림 4> 단기통 가시화 엔진을 사용하여 촬영한 경유 및 DME의 연소과정(일본 산업기술종합연구소(2000))

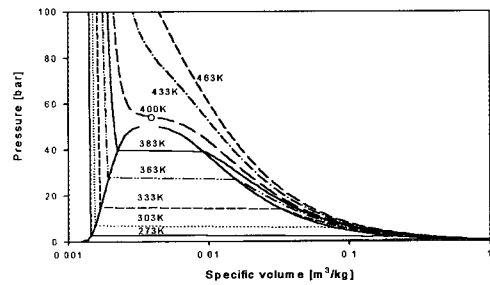
및 DME의 연소과정을 나타내었다. 실험에 사용된 엔진은 보어 130mm, 행정 140mm, 압축비 17, 노즐경 0.3mmX5의 미쓰비시 DT-30형 단기통엔진이고, 분사개시 10° bTDC, 분사압 180bar, 엔진부하 10%, 1,200rpm의 운전조건하에서 1/4,500sec의 고속카메라를 이용하여 연소과정을 관측하였다. 각 연소과정을 비교하여 보면, 경유의 경우에는 C-C 결합의 연소로 인하여 휘도가 높은 빛의 방출을 관찰할 수 있고, 연료의 증발지연 및 이에 따른 공기와 혼합 지연으로 인하여 국부적인 착화 및 확산연소가 이루어지고, 연소과정이 DME에 비하여 긴 것을 알 수 있다. DME의 경우에는 C-C 결합이 없기 때문에 화상처리 없이 화염의 관측이 곤란할 정도로 연소과정에서 화염의 휘도가 매우 낮았고, 경유 연소에 비하여 연료 분사 후 공기와 혼합이 잘 이루어지고, 연소과정이 상대적으로 짧은 점 등을 알 수 있다. 이와같은 DME의 증발 및 연소 특성으로 인하여, 분무 및 연소과정을 최적화할 경우에 DME 연소시 연소실내 혼합기의 당량비가 균일(경유에 비하여)하기 때문에 NOx 배출을 연소과정에서 저감하는 것이 가능할 것으로 예측된다.

일반적으로 압축착화 엔진에서 연료를 고압으로 가압하기 위해서 약 10%의 연비증가를 초래하게 된다. 그러나 DME의 경우에는 경유보다 저압에서 분사하여 최적 연소를 시키는 것이 가능하기 때문에 DME 연료 사용 차량의 가격을 낮출 수 있는 중요한 요인이 될 것이다. 그러나 이를 위해서는 저압 분사 그리고 경유에 비하여 낮은 발열량으로 인하여 분사시간의 증가 및 분사 관통길이의 확보가 중요한 요소기술이 될 것으로 판단된다.

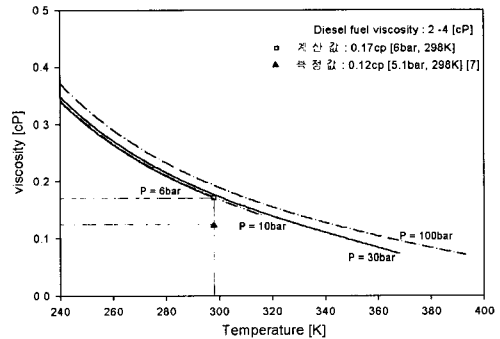
DME의 물성

DME의 실용적 이용에 대한 관심이 본격적으로 높아지고 있음에도 불구하고, DME의 물성치 및 내화학

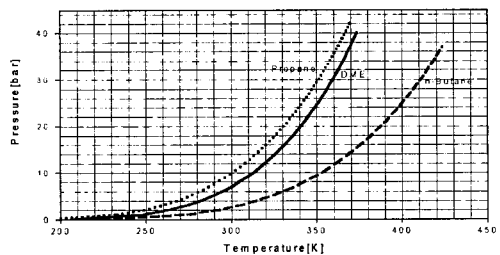
성 등에 관한 보고는 현재까지 많지 않기 때문에 DME의 주요 물성치 및 고무류 부품에 대한 내화학적 연구가 수행되었다(인하대학교(2003)). 압축액체의 상태량을 보다 정확하게 계산하기 위하여 개발된 다음과 같은 Modified Benedict-Webb-Rubin 상태방정식을 이용하여 압력-비체적 선도(그림 5), 점도(그림 6), 증기압(그림 7) 등을 계산하였다.



〈그림 5〉 DME의 압력 비체적 선도



〈그림 6〉 DME의 점도 계산 예

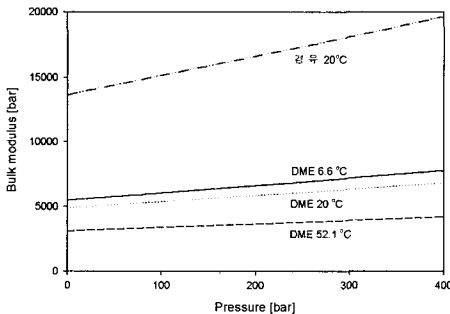


〈그림 7〉 DME의 증기압 계산 예 (Propane 및 N-Butane 과 비교)

$$P = \rho RT + (B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^8} - \frac{E_0}{T^9}) \rho^2 + (bRT - a - \frac{d}{T}) \rho^3 + a(a + \frac{d}{T}) \rho^6 + (\frac{a^2 d}{T^2})(1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2)$$

여기서 T_0 = Critical Temperature, ρ_0 Critical Density, ω = Critical Acentric Factor, R = Universal Gas Constant, A_0, B_0, C_0, D_0, E_0 = Eleven MBWR Equation of State Parameters.

이상의 계산으로부터 DME의 점도는 경유에 비하여 약 1/10이고, 증기압은 상온 상압에서 약 6bar이고, 이 값은 Propane의 증기압보다는 낮음을 알 수 있다. DME의 체적탄성계수(Bulk Modulus)는 경유에 비하여 약 1/3로 알려져 있으나 넓은 압력 및 온도 범위에서 측정치가 매우 중요하기 때문에 다음 <그림 8>와 같은 측정을 수행하였다. DME의 체적탄성계수는 특히 온도에 따라서 크게 변하고 이로 인하여 엔진에서 분사할 경우에 온도변화에 따른 요구 분사량을 확보하는 것이 어렵기 때문에 이를 해결할 수 있는 연구의 수행이 매우 중요하게 된다. 차량에서 연료의 순환에 따른 연료 온도의 상승으로 인하여 증기압이 증가하게 되면 이에 따른 연료 가압 압력의 증가가 필요하기 때문에, DME 연료의 온도 유지가 중요하고 연료 공급계통의 열 밸런스의 확보도 중요한 문제가 된다.



<그림 8> DME와 경유의 체적 탄성계수(인하대학교 (2003), 측정치)

기계식 고압펌프를 사용한 일부 차량 연구에서는 연료 냉각기를 사용하여 연료온도를 유지하도록 하거나, 커몬레일 분사 방식을 사용하여 물성치의 변화에 대응한 최적 분사가 이루어지도록 하고 있으나, 경유사용 차량에 대하여 경쟁력을 갖추어 경제적이고 실용적인 보급을 위해서는 보다 간단한 구조를 이용하여 DME연료의 온도를 유지시켜주는 기술의 연구개발이 필요할 것이다.

그리고 고무류 부품과 DME의 반응성을 측정한 내화학적 연구 결과, NBR 및 EPDM 소재의 고무류 부품은 사용이 가능할 것으로, Viton 및 CR 계통의 고무 제품은 장시간 사용에는 부적합한 것으로 연구 결과를 얻을 수 있었다. 일본의 연구에서는 H-NBR제품으로 고무류 부품을 교체하여 사용한 예가 보고 되고 있다.

DME차량의 배기가스 특성

<표 1>에는 소형차량에 대한 각 연료간의 배기가스 특성비교를 나타내었다.

DME는 AVL(SAE 950061 등)의 측정결과를 사용하였고, 나머지는 TNO에서 측정한 결과를 이용하여 비교하였다(SAE 971607 등). EGR과 산화촉매가

<표 1> 승용차에 대한 배출가스의 비교(TNO(1996), FTP75, g/mile)

구분	NOx	CO	HC	PM
DME with EGR	0.2	6.0	0.4	-
DME with EGR & Ox.Cat.	0.2	0.04	0.04	-
Disel with EGR & Ox.Cat.	0.93	0.16	0.16	0.11
Diesel	1.18	1.07	0.22	0.15
Gasoline	0.24	1.79	0.24	0.02
LPG	0.34	1.46	0.19	0.01
CNG	0.21	0.72	0.58	0.04

〈표 2〉 중대형차의 배출가스의 비교(TNO(1996), EVE R49 13-mode, g/kWh)

구분	Engine	Emission Reduction	NOx	CO	HC	PM
DME	Navistar	EGR	3.85	2.2	0.2	0.05 estim.
DME	AVL Single Cyl.	EGR	2	-	-	0.02
Disel EURO-2	DAF	-	6.92	0.68	0.23	0.11
CNG Lean-Burn	Iveco	Oxt. Cat.	2.5	0.2	1.0	<0.02
CNG Stoich.	Iveco	3-way Cat.	0.8	0.4	0.4	<0.02
LPG Lean-Burn	DAF	-	3.6	4.1	0.9	-
Bio-Ethanol	Mercedes	Oxi. Cat.	4.86	0.27	0.76	0.04

장착된 디젤 승용차는 메르세데스 250D Turbo를 사용하였고, 디젤 및 그 밖의 연료 차량은 2~5대의 값을 평균한 값을 사용하였다. 일반적으로 엔진 다이내모에서 측정된 값과 차량을 이용한 모드 시험결과에 상관관계가 있기 때문에, DME의 측정결과는 엔진 다이내모에서 측정된 값으로부터 환산한 것을 사용하였다. FTP시험 모드에는 냉시동이 포함되어 있고 저온에서 삼원촉매의 변환효율이 매우 낮기 때문에 CO와 HC의 배출량을 엔진 다이내모 결과로부터 환산한 것을 감안하여 이 비교결과를 사용하여야 한다. DME차량의 경우에는 EGR을 이용하여 NOx 배출을 대폭 저감할 수 있고, 삼원촉매를 장착할 경우에 2004년 Tier II 규제를 만족시킬 수 있는 정도의 배출가스 수준을 나타내고 있다.

〈표 2〉에는 대형차의 배출가스 비교를 나타내었다(TNO 1996). 비교에 사용된 엔진은 AVL에서는 Navistar 7.6L 터보 V8 엔진 및 2L 단기통엔진을 사용하여 측정하였고, 디젤엔진은 EURO-2를 만족하는 양산 엔진을 사용, CNG 연료 측정에는 9.5L, 270kW 터보 Iveco 엔진을 사용하였다. LPG엔진은 12L, 자연흡기 DAF엔진을 사용하였고, 바이오디젤

은 12L 자연흡기 Mercedes 엔진을 사용하여 측정하였다. DME엔진의 NOx 배출량을 보면, 양산 디젤엔진에 비하여 40%~70%의 낮고, 희박연소 가스엔진의 배출량에 필적하는 수준을 보여주고 있다.

NOx를 줄이기 위하여 EGR을 DME 엔진 및 디젤엔진에 적용할 수 있으나, 디젤엔진에서는 EGR량을 증가시켜야 하고, 배출가스에 매연이 포함되어 있기 때문에 EGR 장치가 복잡하고 내구성에 문제가 발생할 수 있다. 디젤엔진에서는 SCR 장치 등을 사용하여 NOx를 대폭 저감하는 것이 실용적으로 가능한 시점이 되고 있으나, 차량가격의 상승 및 요소 또는 암모니아의 충전이 필요한 점 등 불편한 요소를 갖고 있다.

장래 배기규제를 맞추기 위하여 배출가스 성능이 향상된 디젤 엔진과 DME엔진을 비교하여 보면, DME엔진의 경우에는 복잡한 EGR 장치가 필요 없고, 디젤엔진의 경우에는 PM 배출을 줄이기 위하여 커르레일 또는 유닛인젝터와 같은 고가의 고압분사 시스템이 필요하게 되었다. DME 엔진의 경우에는 PM 배출을 줄이기 위한 장치는 필요 없으나, 산화촉매를 사용할 필요가 있는 점 등이 비교가 된다.

(이대엽 교수 : dylee@inha.ac.kr)