

# DME와 메탄의 GE7EA 모사가스터빈 연소성능시험

이민철<sup>†</sup> · 서석빈\* · 정재화\* · 주용진\* · 안달홍\*

## GE7EA Gas Turbine Combustion Performance Test of DME and Methane

Min Chul Lee, Seok Bin Seo, Jae Hwa Chung, Youg Jin Joo, Dal Hong Ahn

**Key Words:** DiMethyl Ether(디메틸 에테르), alternative fuel(대체연료), gas turbine combustion(가스터빈 연소), combustion performance test(연소성능시험)

### Abstract

DME (Dimethyl Ether,  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ) has highly attracted attention as an alternative fuel for transportation, power generation and LPG substitute owing to its easy transportation and cleanliness. This study was conducted to verify the combustion performance and to identify potential problems when DME is fuelled to a gas turbine. GE7EA gas turbine of Pyong-Tak power plant was selected as a target to apply the DME. Combustion tests were conducted by comparing DME with methane, which is a major component of natural gas, in terms of combustion instability,  $\text{NO}_x$  and CO emissions, and the outlet temperature of the combustion chamber. The results of the performance tests show that DME is very clean but has a low combustion efficiency in low load condition. From the results of the fuel nozzle temperature we have ascertained that DME is easy to flash back, and this property should be considered when operating a gas turbine and retrofitting a burner.

#### 기호설명

$T_{nozzle}$  : 연료노즐의 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{dump}$  : 연소실 덤프면의 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{ex}$  : 연소실 출구 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$P'_{rms}$  : 연소실 내 동압의 Root Mean Square값

## 1. 서론

### 1.1 연구배경

화석연료의 고갈과 환경문제가 심각해짐에 따라 해결방안의 하나로써 대두된 청정 신연료 DME는 현재 제조 및 이용분야에서 활발하게 연구가 진행 중이다. 비점에 LNG에 비해 높아 저장·이송이 쉽고, 유해배기가스가 적게 발생하는 특징뿐만 아니라 LPG와 비슷한 물리 화학적 특

성을 가지고 있어 기존의 LPG인프라를 이용할 수 있다는 점에서 수 년 안에 실용화 가능성을 가지고 있다. 이러한 DME의 대량생산을 위해서는 대형 화력발전소와 같은 대량 소비처의 사용이 우선시 된다. 본 연구는 이러한 필요와 함께 발전용 연료의 다변화, 발전원가의 절감 및 유해배기가스저감을 궁극적 목표로 두고 진행되었고, 실질적인 DME연료 적용의 대상지로 평택복합화력발전소를 선정하였다. 본 연구에서는 가스터빈 연소시험설비(Fig. 1)를 이용하여 GE7EA가스터빈 연소기를 대상으로 상압연소시험을 수행하였고, 그 해석 결과를 소개하고자 한다.

### 1.2 DME의 연료특성

DME는 천연가스, 석탄, 탄층 메탄 등 다양한 원료로 제조가 가능하고, LPG와 같이 수송의 편리성이 뛰어난 청정연료이다. 현재 가스터빈 발전소의 연료인 천연가스보다 저장과 수송이 매우 간편하고, 수용기지의 건설비용도 현격히 낮다.

<sup>†</sup> 이민철, 회원, 한국전력공사 전력연구원

E-mail : lmc@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5488 FAX : (042)865-5489

\* 한국전력공사 전력연구원

아래 Table 1은 DME와 다른 연료와 물리, 화학적 특성에 있어서 비교하였다. 폭발한계의 하한가가 높으며, 포화증기압, 비점, 가스비중이 프로판 및 부탄과 유사하다. 이는 수송 및 저장측면에서 이 두 연료를 혼합한 액화석유가스(LPG)와 매우 유사하게 이용될 수 있음을 보여준다. 또한 DME는 다른 연료에 비해 중량당 발열량이 작고, 연소속도가 빠르며, 자발화온도가 낮다. 이는 DME가 건식저질소산화물 가스터빈 연소기(Dry Low NOx Gas Turbine Combustor)에 적용시 빠른 연소속도 및 낮은 자발화 온도로 인한 화염의 역화, 연소진동, 연소불안정 등이 문제시 될 수 있다. 이러한 특성을 미리 파악하고, 문제점을 해결하기 위해 연구가 진행 중이다.

### 1.3 DME관련 선행연구

DME에 관련한 연구는 크게 제조, 수송 및 저장, 이용의 분야로 나누어 진행 중이고, 이용분야는 자동차용, 가정용, 발전용 연료로서 경제성, 기술성을 두고 평가하고, DME 연료 적용시 문제점을 해결하기 위해 연구 중이다. DME를 발전소에 적용하기 위해서는 연료공급시스템과 연소기의 개조가 필요하다. 이에 일본의 Hitachi사는 25 MW급 DME용 연소기를 개발하여 다중 클러스터버너의 여러 연소기 형상 설계변수들을 대상으로 연소진동, 연소배기가스, 연소효율의 측면에서 실험하고, 그 결과를 Signal/Noise비 분석방법을 통하여 최적화 형상을 얻는 연구를 수행하였다. 또한 Mitsubishi Heavy Industries사에서는 G-type 연소기를 대상으로 연소배기가스측정 시험을 수행하여 천연가스와 동등의 수준의 배기 특성을 가진다고 보고하였다. 한편 General Electric사에서는 하나의 벤치스케일(Bench-scale) 연소기를 이용하여 DME와 메탄올, 물의 혼합용액을 연료로 연소시험을 수행하고, GE의 상용 연소기에 적용이 가능하다고 보고하였고, 그 혼합용액의 농도나 사용범위에 대해 특허권을 보유하고 있다. 그러나 GE사의 연구는 액상DME 연소방법을 취하였으나 이는 NOx저감을 위한 예혼합 연소방법이 아니므로 실제 저NOx연소기의 형태가 아니다. 그리하여 본 연구에서는 기존의 연구를 참고로 하고, DME를 예열시켜 기상에서 공기와 예혼합하여 연소하는 실험을 수행하고, 기존연구의 결과를 비교검토한 후, 추가적인 실

험을 통해 DME를 건식저질소산화물 연소(Dry Low NOx Combustion)방식을 채택한 복합화력 발전소에 적용하기 위한 DME연소특성분석 및 DME연소기개발 등의 기술개발을 계획하고 있다.

**Table 1** Combustion Properties of DME, Methane, Propane, and Butane.

	DME	메탄	프로판	부탄
Chemical Formula	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Boiling (°C)	-25.1	-161.5	-42	-0.5
Liquid Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.67	0.42	0.49	0.57
Specific Gravity (vs. air)	1.59	0.55	1.52	2.01
Vapor Pressure (atm @0°C)	6.1	246	9.3	2.4
Flammable Limits in Air (%)	3.4~17	5~15	2.1~9.4	1.9~8.4
Ignition Temperature (°C)	235	650	470	365
Max. Burning Vel. (cm/s)	50	37	43	43
Equivalent A/F Ratio (kg/kg)	9.0	16.9	15.7	15.5
Low heating Value (kcal/kg)	6,900	12,000	11,100	10,930

## 2. 연소시험설비 소개

### 2.1 가스터빈 연소시험설비 소개

가스터빈 연소시험설비는 Fig. 1과 같이 공기 압축기, 공기저장탱크, 공기에열기, 냉각 및 연소용 공기공급라인이 설치되어 있으며, 그 외 DME 저장탱크, DME 기화기, DME 예열라인, 연료공급라인, 유량계측 및 제어기, 배기가스냉각용 살수장치, 상압연소기, 제어시스템, 외부의 스택(Stack)으로 구성되어 있다. 본 설비 용량은 100kW급 가스터빈과 동급이고, 공급공기는 0.2 kg/s, 500°C까지 공급가능하다.

### 2.2 GE7EA 모사연소기

GE사의 MS7001EA가스터빈은 10개의 연소실이 환형으로 구성되어 있는 멀티캔환형(Multi-Can Annular Type) 연소시스템을 취하고 있다. 본 실험에서는 이 10개의 연소기 중 하나의 연소기를 대상으로 시험에 적합하게 축소상사(Scale-down)시켜 설계·제작하였다(GE7EA\_LPM 연소기). 또한 연소성능을 진단하기 위해 연료 노즐 및 연소실 후단에 온도 및 동압을 측

정용 센서를 부착하고, 후단의 농도를 측정하기 위한 배기가스 추출관을 장착하였다. 표2에서는 GE7EA 연소기와 이를 상사시킨 GE7EA\_LPM 연소기의 주요부품 치수를 기입하였는데 GE7EA 연소기 대비 GE7EA\_LPM 연소기의 상사율은 약 0.5이고, 소형화할 때 제작상황을 고려하여, 약간의 차이를 허용하여 제작하였다.

### 3. 시험 방법 및 결과

본 실험은 기존의 천연가스를 주연료로 발전하는 GE7EA 가스터빈 연소기에 DME를 적용시 연소현상을 예측하기 위하여, 상압 및 400℃ 공기공급 조건에서 모사연소실험을 수행하였다. 자세한 실험조건은 Table 3과 같다. 일정공기조건에서 입열량(Heat Input) 및 파일롯 연료량을 변화시키며 연소진동으로 인한 동압, NO<sub>x</sub>, CO 및 연소기 각부분에서의 온도특성을 관찰하였다. 연소진동으로 인한 동압을 초당 50000개의 속도로 측정하여 그 rms(root mean square)값을 구하여  $P'_{rms}$ 로 진동특성을 알아보았고, NO<sub>x</sub>, CO 및 온도는 정상상태조건에서 10개 이상의 데이터를 취득하여 평균하였다.

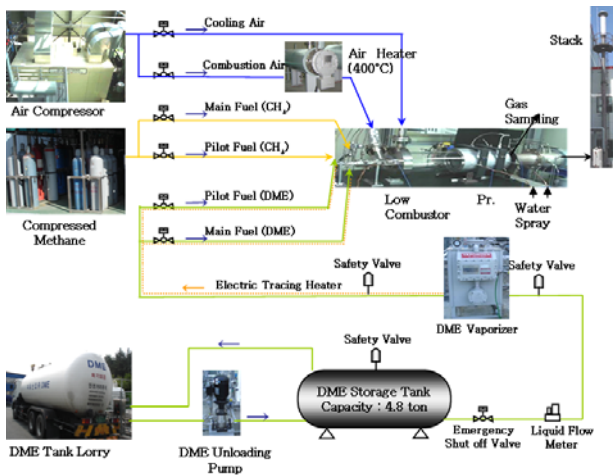


Fig. 1 Gas turbine combustion test facilities

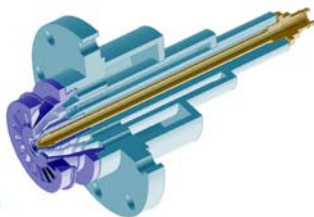


Fig. 2 3-dimensional drawing of GE7EA gas turbine fuel nozzle



Fig. 3 GE7EA gas turbine fuel nozzle(right) and model fuel nozzle for ambient pressure experiment(left)

Table 2 Combustor geometry of GE7EA and GE7EA\_LPM

연소기 주요부품 치수	GE7EA	GE7EA_LPM	상사율
Diameter of D.O Fuel Hole	7.5	2.97	0.40
Inner Diameter of Atomizing Air Hole	5.5	3.2	0.58
Outer Diameter of Atomizing Air Hole	11	5.5	0.50
Inner Diameter of DeNOx Water Hole	17.8	8.9	0.50
Outer Diameter of DeNOx Water Hole	22.8	11.4	0.50
Inner Diameter of Combustion Air Hole	58.85	30	0.51
Outer Diameter of Combustion Air Hole	105	53.5	0.51
Fuel Nozzle Head Diameter	132.2	76.3	0.58
Diameter of Main Fuel Injection Hole	5	2.5	0.50
Inner Diameter of Combustion Chamber	359	190	0.53
Length of Combustion Chamber	1873	900	0.48

Table 3 Experimental conditions

항 목	조 건
연소실 압력	상압
공기온도	400 °C
공기유량	66 Nm <sup>3</sup> / hr
입열량 범위	30~65 kW
대상연료	CH <sub>4</sub> / DME
Pilot / 연료 비율	0~10 %

### 3.1 메탄과 DME의 연소특성 비교시험

연소실 및 연료 노즐의 온도를 측정하기 위해 R-형 열전대(R-type thermocouple)을 이용하여, 연소기의 연료노즐, 연소실 덤프면 및 TIT온도와 유사한 계측위치인 연소실 출구에서 계측하였고, 그 결과는 Fig.4~Fig.6과 같다. Fig.4에서 연소기 노즐의 온도를 살펴보면 연료입열량(Fuel Heat Input)이 증가할수록 노즐의 온도가 떨어지는 경향을 볼 수 있는데 이는 가스터빈 출력증가시 연료유량의 증가로 인해 화염이 유동방향으로 길게 늘어나 노즐에서부터 멀어지기 때문에 나타나는 현상으로 이해할 수 있다. 또한 연소실 출구온도 및 덤프면 온도는 입열량이 증가할수록 비례하여 증가하는 경향을 확인할 수 있으며 이는 총 입열량의 증가에 따른 화염온도 및 발열량의 증가가 반영된 결과라 할 수 있다. 메탄의 경우가 DME의 경우에 비해 연료노즐 온도를 제외하고는 높게 나타나는데 이는 Fig. 7의 DME와 메탄의 화염형상의 차이로 부터 원인을 찾을 수 있다. DME의 경우 화염이 길게 형성되고, 또 화염의 역화가 일어나기 쉬운 반면 메탄의 경우 화염이 반달모양을 이루며 덤프면으로 퍼져 나타나는 현상을 이룬다. 이는 메탄이 DME보다 가벼워 유동장의 영향을 많이 받으며 공기와의 혼합도 잘 이루어지는 반면 분자량이 큰 DME는 모멘텀이 커서 화염이 덤프면에서 역류(re-circulation) 되기 보다는 길게 늘어지는 경향을 보인다. Fig.8에서는 메탄과 DME의 연소진동 특성을 비교해 볼 수 있는데 화염의 형상이 길게 늘어선 형태를 보이는 DME가 메탄에 비해 작은 연소진동을 보인다. 이는 Half Wave의 정재파(Standing Wave)의 압력장을 형성하는 본 연소실 조건에서는 DME 화염의 경우가 열음향 결합이 적게 나타나기 때문이다. Fig. 9와 10을 통해 CO와 NOx의 배출특성을 살펴보면 메탄의 경우 전 실험범위에 걸쳐 2ppm이하의 CO배출특성을 보이며 거의 100%에 가까운 연소효율을 보이는 반면 DME의 경우 저 부하시 약 18ppm에서부터 고부하시 약 3.5ppm까지 부하에 따라 다르게 CO배출특성을 보인다. 이에 기존에 천연가스를 연소시키던 GE7EA연소기에 DME를 바로 적용시킬 경우 유해가스배출특성이 나빠지는 것은 물론 연소효율도 나빠질 것이라는 것을 예측할 수 있으므로 연소기의 개조가 필요하다고 할 수 있

다. NOx의 배출특성은 DME와 메탄의 경우가 거의 동등수준이고, 고부하시 당량비가 높아지면서 화염의 온도상승에 따른 NOx배출이 기하급수적으로 높아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 thermal NOx 생성기구인 Zeldovich Mechanism은 공기 중 질소분자의 삼중결합을 끊기 위해서는 온도에 많은 영향을 받기 때문이고, 이는 식(1)의 반응속도가 온도의 지수함수임을 나타내는 Arrhenious 법칙에서도 설명가능하다.

$$\text{Rate coefficient, } k = A' \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

where,  $A'$  = pre-exponential factor

$E_a$  = activation energy

T = Temperature

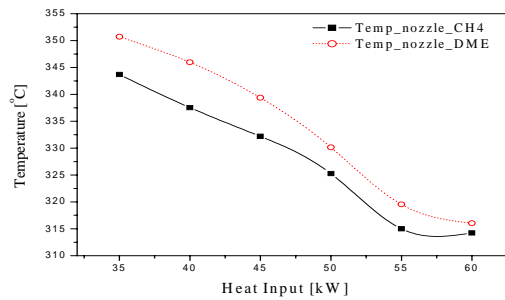


Fig. 4 Fuel Nozzle Temperature Characteristics for DME and Methane

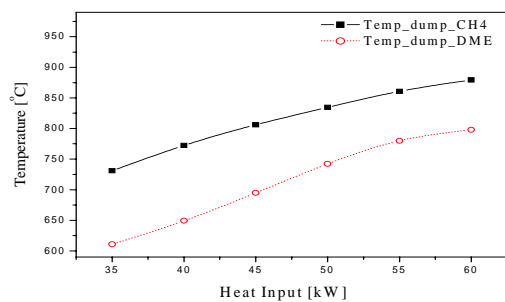
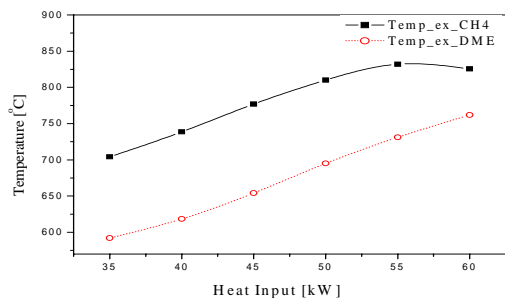


Fig. 5 Dump Plane Temperature Characteristics for DME and Methane

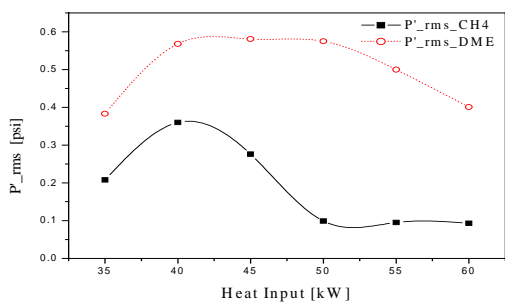


**Fig. 6** Combustion Chamber Exit Gas Temperature Characteristics for DME and Methane

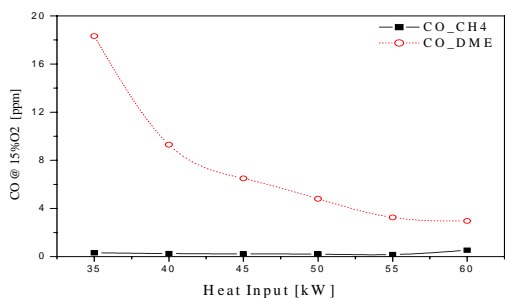


Direct Photos of DME Direct Photos of Methane

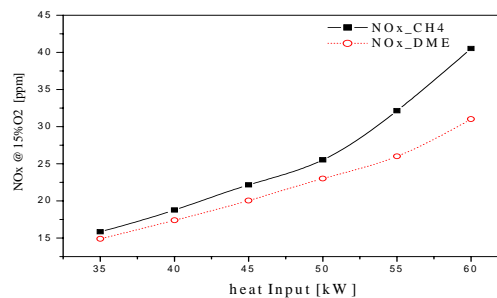
**Fig. 7** Direct Photos of DME and Methane Flame



**Fig. 8** Combustion Instability Characteristics of DME and Methane



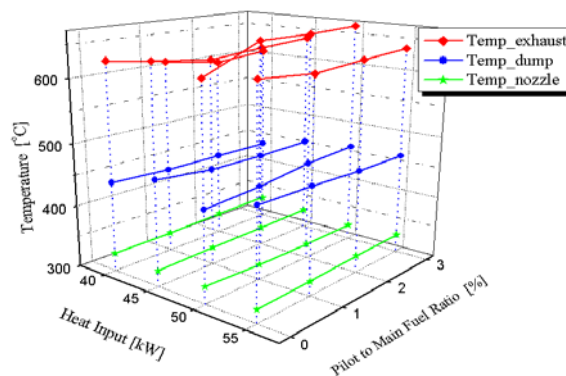
**Fig. 9** CO emission of DME and Methane



**Fig. 10** NOx Emission of DME and Methane

### 3.2 Pilot 연료량에 따른 연소특성

입열량과 파일럿연료에 대한 주연료의 비율을 바꾸어 가며 온도, NOx 및 CO배출특성, 연소진동에 의한 동압특성을 살펴보았다. 온도계측결과를 통해 살펴볼 수 있는 경향성은 파일럿량을 늘려 갈수록 연료노즐의 온도가 상승한다는 점과 50kW조건의 경우 특성이 다른 조건과 판이한 것을 주목할 수 있는데 이는 동압특성 및 배기가스배출특성과 관련하여 설명할 수 있다. 50kW인 경우는 연소진동이 높게 나타나 불안정한 연소상태임을 알 수 있고, 이는 역시 Fig. 12의 CO배출특성과도 일치하는 것을 확인할 수 있다. CO는 연소가 불안정하게 이루어질 때 발생하는 불안정 연소 후 배출물로 연소효율과 반비례의 관계에 있다. 또한 이 때 NOx의 배출특성 또한 다소 높게 배출되는 것을 볼 수 있다. 이로부터 본 연소기를 가스터빈에 적용시켜 기동할 때 50kW영역을 빠르게 지나 BASE LOAD로 운전하는 것이 가스터빈에 무리를 주지 않는다는 결론을 얻을 수 있다.



**Fig. 11** Temperature characteristics of combustor w.r.t. pilot to main fuel ratio



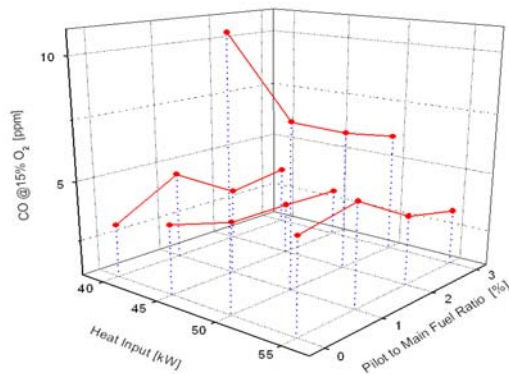


Fig. 12 CO emission of DME w.r.t. Pilot to Main Fuel Ratio

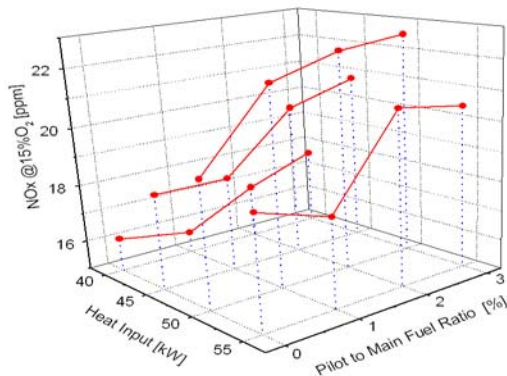


Fig. 13 NOx emission of DME w.r.t. Pilot to Main Fuel Ratio

#### 4. 결론 및 향후계획

GE7EA 가스터빈 모사연소기를 대상으로 DME와 메탄에 대한 상압연소성능시험을 성공적으로 수행하였고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 연료노즐의 온도는 동일한 연소조건에서 DME가 메탄의 경우보다 높았고, 이는 높은 연소 속도 및 낮은 자발화 특성을 가지고 있는 DME 연료특성 때문으로 설명될 수 있고, 가스터빈에 적용시 연료노즐의 과열이 우려되므로 이에 대한 적절한 설계변경 및 운전조건의 변경이 필요하다.
- (2) 천연가스용 연소기에 DME를 연소시켰을 경우 그 성능은 CO 및 온도특성에서 크게 달라졌으며, 특히 저부하에서 CO발생으로 인한 연소효율의 저하는 현저했다.
- (3) DME용 연소기를 설계시에는 본 시험의 결과를 잘 반영하여 연소효율을 향상시킬 수 있도록

그리고, 노즐의 과열을 방지할 수 있도록, 또한 공기와 연료의 충분한 혼합을 목표로 설계하여야 한다.

(5) DME는 화염의 형태상 연소진동이 크게 발생하지 않는 경향이 높고, 이는 메탄에 비해 길이 방향으로 길게 늘어선 화염의 형태에서 확인할 수 있다.

(6) 향후 GE7EA 상압연소기를 개조설계하여 제작한 후 동일한 연소성능시험을 수행하여 그 성능을 분석할 계획 중에 있다.

#### 참고문헌

- (1) Arun basu and Jogn M. Wainwright, 2001, "DME as a Power Generation Fuel : Performance in Gas Turbine", PETROTECH-2001 conference.
- (2) Takeo Saitou, et al., 2004, "Development of Multi Cluster Burner For Fuel Grade DME", *Proceedings of ASME Turbo EXPO 2004*.
- (3) Toshiaki Tsuchiya and Masanori Okamoto, 2005, "Evaluation and Demonstration of DME(DiMethyl Ether) As an Alternative Fuel for Micro Gas Turbines", *Proceedings of the Asian congress on Gas Turbines*, ACGT 2005-066,
- (4) Frank P. Incropera and David P. DeWitt. "Introduction to Heat Transfer 3rd edition", John Wiley & Sons, Inc., p.412-p.426
- (5) Bejan, "Convection Heat Transfer", John Wiley & Sons, p.93-p.107
- (6) Mathur, M. L. and Maccallum, N. R. L., 1967, "Swirling Air Jets Issuing from Vane Swirlers Part-1; Free Jets", *Journal inst. Fuel*, p.214
- (7) Catherine A. Daly, John M. Simmie and Judith Würmel, 2001, "Burning Velocities of Dimethyl Ether and Air", *Combustion and Flame*, pp.1329-1340, vol.125.