

## Multi-dimensional GC-MS를 이용한 항공터빈유의 첨가제 분석

<sup>1,2</sup>연주민 · <sup>1</sup>장윤미 · <sup>1</sup>임의순 · <sup>3</sup>김성룡 · <sup>2</sup>강 용<sup>†</sup>

<sup>1</sup>한국석유관리원 석유기술연구소

<sup>2</sup>충남대학교 응용화학공학과

<sup>3</sup>한국항공우주연구원 추진시험평가팀

(2018년 10월 23일 접수: 2018년 12월 21일 수정: 2018년 12월 24일 채택)

### Determination of Additives Content in Aviation Turbine Fuel Using Multi-dimensional GC-MS

<sup>1,2</sup>Ju Min Youn · <sup>1</sup>Yoon Mi Jang · <sup>1</sup>Eui Soon Yim · <sup>3</sup>Seong Lyong Kim · <sup>2</sup>Yong Kang<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Chungnam National University

<sup>3</sup>Propulsion Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute

(Received October 23, 2018; Revised December 21, 2018; Accepted December 24, 2018)

**요 약** : 항공터빈유는 등유 기반의 석유제품에 산화 방지제(Antioxidant), 빙결 방지제(Fuel system icing inhibitor, FSII), 전기전도도 향상제(Electrical conductivity improver) 등의 첨가제를 첨가하여 항공기 연료로서 필요한 성능 향상 및 보관이나 이송 등에 관한 특정한 능력을 부여시키고 있다. 이들 첨가제는 항공터빈유의 품질에 이상이 발생하거나 다른 석유제품과 구별하기 위하여 그 첨가량을 정성 및 정량적으로 분석할 수 있어야 한다. 항공터빈유는 수많은 탄화수소 화합물로 구성된 복잡한 화합물이기 때문에 미량으로 첨가된 산화 방지제와 빙결 방지제를 분석하기 위하여 Multi-dimensional GC-MS (MDGC-MS)의 Deans switching 기술을 적용하였다. 2.5 - 20 mg/L 농도 범위의 산화 방지제와 빙결 방지제를 MDGC-MS로 정량 및 정성적으로 분석할 수 있었으며, 검출 한계는 1-dimensional GC-MS의 분석 결과와 비교하여 약 2배 정도 낮았다. 본 연구에서 개발된 시험 방법은 기존의 GC-MS보다 첨가제 피크의 분리능이 더 우수하였으며, 시료의 전처리가 필요없이 두 가지 첨가제를 동시에 분석할 수 있었다.

**주제어** : 항공터빈유, 가스크로마토그래피-질량분석기, 첨가제, 산화 방지제, 빙결 방지제

**Abstract** : To improve fuel performance and specific characteristics of long storage and moving through fuel systems additives should be added in kerosene type aviation turbine fuel (AVTUR) such as antioxidant, fuel system icing inhibitor (FSII), electric conductivity improvers and so on. The dosage of additives has to be analyzed qualitatively and quantitatively due to inspect the quality of abnormal

<sup>†</sup>Corresponding author

(E-mail: kangyong@cnu.ac.kr)

fuel and distinguish other petroleum products. Multi-dimensional GC-MS (MDGC-MS) with Deans switching technique are applied the determination of antioxidant and FSII, which are added with AVTUR containing complex mixture of hydrocarbons. Antioxidant and FSII in the range of 2.5-20 mg/L was quantitatively and qualitatively analyzed using MDGC-MS and the detection limit was about twice as low as that of the 1-dimensional GC-MS results. The method in this study has been higher peak resolution compared with GC-MS and could be simultaneously analyzed different two additives without sample pre-treatment.

*Keywords : Aviation turbine fuel, Multi-dimensional GC-MS, Additives, Antioxidants, Fuel system icing inhibitor*

## 1. 서론

국제적으로 제트 엔진이나 항공 터빈 엔진을 장착한 항공기의 연료로 사용되는 항공터빈유(Aviation turbine fuel, AVTUR)는 항공기의 종류, 사용 지역, 용도 및 특성에 따라 여러 규격의 연료를 사용하고 있다. 민간 항공기에는 대부분 Jet A-1 규격의 연료를 사용하고 있으며, 군용 수송기 및 전투기에는 JP-4, JP-5, JP-7, JP-8, JP-TS 등의 연료를 사용하고 있다[1]. 국내에서도 민간 및 군용 항공기에 Jet A-1과 JP-8이 대표적으로 사용된다. 이들 항공터빈유는 C<sub>8</sub>-C<sub>18</sub>의 탄화수소 화합물로 구성되어 있으며, 주요 물질이 가정·산업용 연료로 사용되는 등유와 거의 유사하다. 그러나 항공터빈유는 등유 기반의 석유제품에 산화 방지제(Antioxidant), 빙결방지제(Fuel system icing inhibitor, FSII), 전기전도도 향상제(Electrical conductivity improver) 등의 첨가제를 첨가하여 항공기 연료로서 필요한 성능 향상 및 보관이나 이송 등에 관한 특정한 능력을 부여시키고 있다[2].

항공기는 높은 고도에서 비행하며 영하의 낮은 온도에 노출되므로 저온 특성이 우수하고 어는점이 낮은 연료를 필요로 한다. 항공터빈유는 이러한 요구를 만족하는 연료이지만 저장, 운송, 보관 등의 과정을 거치면서 유리 수분(free water)이나 용해 수분(dissolved water) 형태의 수분이 미량으로 존재한다. 이러한 수분이 비행 도중 얼어 결정으로 생성되면 항공기 연료 계통 시스템에 문제를 야기할 수 있기 때문에 빙결 방지제를 첨가하고 있으며, 항공터빈유에는 diethylene glycol monomethyl ether (DiEGME)가 대표적으로 사

용된다[2,3].

연료가 열화 및 산화되면 과산화물이 생성되고 이것이 항공기 연료시스템의 실재질, 다이어프램 및 고분자 재질에 영향을 미친다. 항공유의 보관 장소, 환경 변화, 보관 기간 등은 연료의 산화 정도에 영향을 미치며 안정성 확보를 위한 조치가 필요하게 된다. 산화 방지제는 연료의 저장 안정성 향상을 위한 첨가제로서 연료의 안정성을 높이기 위해 폐놀계 화합물이 주로 사용된다. Table 1에 국제적인 표준으로 규정하고 있는 민간 및 군용 항공터빈유에 첨가되는 산화 방지제와 빙결 방지제의 종류와 첨가량을 나타내었다[3-5].

과거 국내 주둔 미군기지에서 유류 유출로 인한 토양오염의 원인을 규명하기 위해 토양에 흡수된 유류를 전처리를 통해 추출 후 빙결 방지제나 산화 방지제와 같은 첨가제를 분석하여 항공터빈유와 등유를 구별하였다[6-8]. 또한 항공터빈유가 비정상적인 경로로 가정·산업용 연료인 등유로 유통되거나 등유와 혼합될 경우 항공터빈유에만 첨가되는 첨가제의 유무로 이를 구별할 수 있다[9].

빙결 방지제로 사용되는 DiEGME는 굴절계나 HPLC로 분석하는 표준 시험법이 있으나 0.01 Vol % 이상의 농도에서 적용 가능하고[10,11], Bernabei 등[12]이 GC-MS로 연구한 결과에서도 수백 ppm 수준에서 빙결 방지제를 분석하였다. 산화 방지제는 현재까지 국제적으로 적용되는 표준 시험법이 없으나 Bernabei 등[13]이 GC-MS와 HPLC로 분석하는 방법을 연구하였다. Rawson 등[14]은 산화 방지제를 첨가한 항공유의 산화 정도를 평가하기 위하여 GC-MS와

Table 1. Detailed information of additives for AVTUR

Additive	Dosage
Antioxidants, One of the following: 2,6 ditertiary-butyl phenol 2,6 ditertiary-butyl-4-methyl phenol 2,4 dimethyl-6-tertiary-butyl-phenol 75% min., 2,6 ditertiary-butyl phenol + 25% max. mixed tertiary and tritertiary butyl-phenols 55% min., 2,4 dimethyl-6-tertiary-butyl phenol + 15% min. 2,6 ditertiary-butyl-4-methyl-phenol, remainder as monomethyl and dimethyl tertiary-butyl phenols 72% min., 2,4 dimethyl-6-tertiary-butyl phenol + 28% max. monomethyl and dimethyl-tertiary-butyl-phenols	24.0 mg/L max
FSII Diethylene glycol monomethyl ether	0.07-0.15 vol%

Multi-dimensional GC-MS(MDGC-MS)를 사용하였으나, 정량적인 분석은 GC-MS를 이용하였고 MDGC-MS는 정성적인 분석만 시도하였다.

따라서 본 연구에서는 항공터빈유의 대표적인 첨가제인 산화 방지제와 빙결 방지제를 MDGC-MS/SIM (Selected ion monitoring) mode를 적용하여 전처리 없이 한번의 분석으로 정성 및 정량 분석이 가능한 방법을 개발하였다. 또한 기존 연구자들이 사용한 1-dimensional GC-MS 분석법과 비교하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 첨가제 표준 물질

항공터빈유의 첨가제로 사용되는 빙결 방지제는 시약급의 diethylene glycol monomethyl ether (DiEGME)를 사용하였고, 산화 방지제 또한 시약급의 2,6 ditertiary-butyl phenol (DTBP), 2,6 ditertiary-butyl-4-methyl phenol (DTBMP), 2,4 dimethyl-6-tertiary-butyl-phenol (DMTBP)을 사용하였다. 각각의 제품은 Sigma-Aldrich의 시약을 사용하였다. 또한 표준 시료 조제 시 희석 용매로 사용한 에탄올도 Sigma-Aldrich 시약을 사용하였다. 산화 방지제와 빙결 방지제 표준 시료는 각각의 첨가제를 에탄올에 희석하여 10,000 mg/L 농도의 stock solution을 조제한 후 다시 단계적으로 Jet A-1에 희석하여 2.5, 5.0, 10, 20

mg/L 농도의 표준시료를 조제하였다. Jet A-1은 첨가제가 첨가되지 않은 항공터빈유로 국내 SK에너지(주)에서 생산된 제품을 사용하였다. 표준 시료는 냉장 보관하면서 사용하였다.

### 2.2. 가스크로마토그래피-질량분석기(GC-MS)

본 연구에서 MDGC-MS의 분석 결과와 비교하기 위하여 사용한 GC-MS는 자동 시료주입장치, 분할/비분할 주입기, 오픈, single quadrupole/electron ionization (EI) source 질량분석기 (MSD)로 구성된 Agilent Technologies 7890A GC-5975C MSD(Agilent Technologies, USA)를 사용하였다. 분석용 GC 컬럼은 첨가제 성분 분석을 위한 극성의 모세관 컬럼인 polyethylene glycol 컬럼(Stabilwax-MS, Restek, USA)을 사용하였다. 운반 기체(carrier gas)는 고순도 (99.999%) 헬륨을 사용하였다. Agilent ChemStation software를 이용하여 GC 조작과 데이터 수집 및 해석을 수행하였다. 분석 시료는 전처리 없이 GC에 1 mL를 주입하였으며, Table 2에 GC-MS 분석 조건을 나타내었다.

### 2.3. Multi-dimensional GC-MS

본 연구에서 사용한 MDGC-MS는 자동 시료주입장치, 분할/비분할 주입기, 2개의 오픈, 2개의 검출기, Deans switching 시스템으로 구성된 Shimadzu MDGC/GCMS-2010 Series (Shimadzu, Japan)를 사용하였으며, Fig. 1에 실험에 사용된 MDGC-MS의 개략도를 나타내었다

Table 2. Operating conditions of GC-MS

GC conditions	
Column	polyethylene glycol (30 m × 0.32 mm × 0.25 mm)
Injection volume	1 $\mu$ L
Inlet	
Temp.	260 $^{\circ}$ C
Mode	Split (ratio 25:1)
Column flow	1 mL/min (constant flow)
Oven	
Program rate	60 $^{\circ}$ C (1 min) $\rightarrow$ 10 $^{\circ}$ C/min $\rightarrow$ 250 $^{\circ}$ C (5 min)
Run time	25 min
MS transfer line temp.	260 $^{\circ}$ C
MS conditions	
Ionization source	70 eV electron ionization
Source temp.	230 $^{\circ}$ C
Quadrupole temp.	150 $^{\circ}$ C
Data acquisition delay	5 min

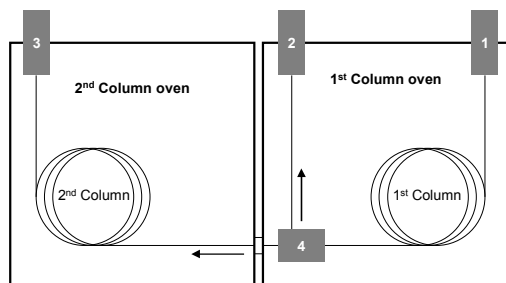


Fig. 1. Configuration of a MDGC-MS system.

1. Sampling injection port
2. 1<sup>st</sup> detector (FID)
3. 2<sup>nd</sup> detector (MSD)
4. Switching element

[15,16]. Figure 1에 나타낸 바와 같이 MDGC-MS는 1차 오븐과 2차 오븐이 직렬로 연결되어 있으며 그 사이에 Deans switching system이 설치되어 있다. 1차 오븐에는 자동 시료주입장치와 불꽃이온화 검출기(Flame ionization detector, FID)가 설치되어 있고, 2차 오븐에는 질량분석기(Mass selective detector, MSD)가 연결되어 있다. 분석용 GC 컬럼은 모세관 컬럼을 사용하였는데, 1차 오븐에는 중간 극성의 cyanopropylphenyl methylpolysiloxane 컬럼(Rxi-624Sil MS, Restek, USA)을 연결하였고 2차 오븐에는 2.2의 GC-MS에서 사용한 것과

동일한 polyethylene glycol 컬럼(Stabilwax-MS, Restek, USA)을 사용하였다.

운반 기체는 고순도(99.999%) 헬륨을 사용하였고, Shimadzu MDGCsolution software를 이용하여 GC 조작과 데이터 수집 및 해석을 수행하였다. Table 3에 MDGC-MS 분석조건을 나타내었고, 총 분석시간(run time)은 25 min 이었다. 첨가제 각각의 피크 확인과 정량을 위한 SIM ion(m/z)은 Table 4와 같이 선정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. MDGC-MS를 이용한 항공터빈유 첨가제 분석

Deans switching 시스템이 설치된 MDGC-MS의 원리를 Fig. 2에 나타내었다[15,16]. MDGC-MS의 Standby mode에서는 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 압력 조절기가 1차 컬럼의 말단 압력( $P_1$ )보다 2차 컬럼의 주입구 압력( $P_2$ )을 더 높게 유지시켜 1차 컬럼에서 용출된 시료는 FID로 이동하여 검출되고, cut mode에서는 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 압력 조절기가 2차 컬럼의 말단 압력( $P_2$ )보다 1차 컬럼의 주입구 압력( $P_1$ )을 더 높게 유지시켜 1차 컬럼에서 용출된 시료는 2차 컬럼을 거쳐 MSD에서 검출된다. Table 3의 분석 조건으로 ethanol에 희석한 100

Table 3. Operating conditions of MDGC-MS

GC conditions	
Column	
1 <sup>st</sup> Column	Cyanopropylphenyl methylsiloxane (30 m × 0.32 mm × 1.8 mm)
2 <sup>nd</sup> Column	polyethylene glycol (30 m × 0.32 mm × 0.25 mm)
Injection volume	1 $\mu$ L
Inlet	
Temp.	300 $^{\circ}$ C
Mode	Split (ratio 25:1)
Linear velocity	25 cm/s
Oven program rate	
1 <sup>st</sup> oven	100 $^{\circ}$ C (1 min) $\rightarrow$ 10 $^{\circ}$ C/min $\rightarrow$ 260 $^{\circ}$ C (8 min)
2 <sup>nd</sup> oven	100 $^{\circ}$ C (7 min) $\rightarrow$ 5 $^{\circ}$ C/min $\rightarrow$ 190 $^{\circ}$ C (0 min)
Run time	25 min
FID	
Temp.	350 $^{\circ}$ C
Air	400 mL/min
H <sub>2</sub>	40 mL/min
Makeup gas	20 mL/min (He)
MS transfer line temp.	260 $^{\circ}$ C
MS conditions	
Ionization source	70 eV electron ionization
Source temp.	250 $^{\circ}$ C
Switching conditions	
Switching pressure	85 kPa
Switching time	
DiEGME	7.95–8.35 min
DMTBP	15.60–16.00 min
DTBP	16.25–16.65 min
DTBMP	17.15–17.55 min

Table 4. SIM group of targeted compounds and start time in GC-MS and MDGC-MS

Additive	SIM ions for Quantification (m/z)	SIM group start time (min)	
		GC-MS	MDGC-MS
DiEGME	45, 59	9.0	12.0
DTBP	191, 206	12.0	19.5
DTBMP	205, 220	12.9	20.6
DMTBP	135, 163	14.0	21.6

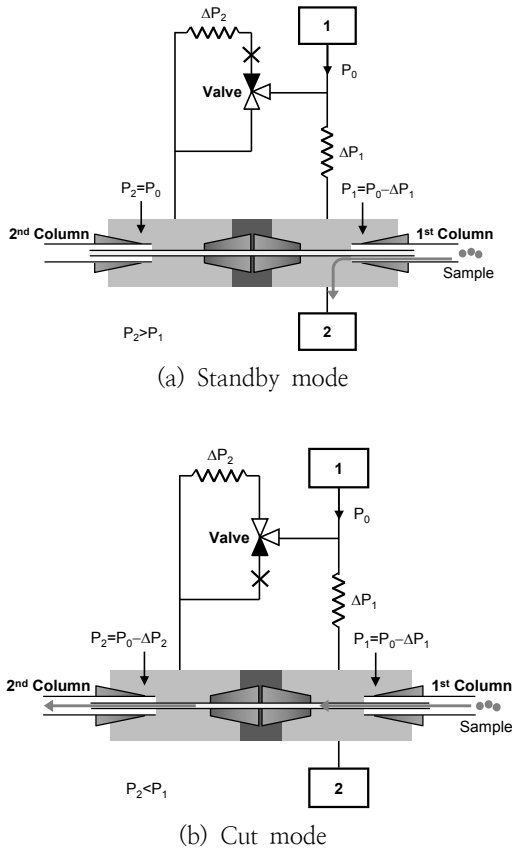


Fig. 2. Deans switching system in GC.  
1. Pressure controller  
2. 1<sup>st</sup> Detector (FID)

mg/L 농도의 첨가제를 MDGC-MS로 분석한 크로마토그램을 Fig. 3과 4에 나타내었다. Figure 3은 MDGC-MS의 standby mode로 분석한 첨가제가 FID에서 검출된 크로마토그램이며, 여기서 확인된 각 첨가제의 머무름 시간을 이용하여 heart-cut 시간을 결정하고 MDGC-MS의 cut mode로 분석하면 Fig. 4와 같은 MSD/Scan mode 크로마토그램이 얻어진다. 1차 컬럼에서 분리되어 FID에서 검출된 산화 방지제 각각의 피크와 2차 컬럼에서 재분리되어 MSD에서 검출된 피크의 용출 순서가 다른 이유는 1차와 2차 컬럼의 극성도에 기인한다.

Figure 3과 4로부터 ethanol에 희석한 첨가제가 정상적으로 switching되어 검출된 것을 확인한 이후 실제 분석 환경에 적용하기 위하여 첨가

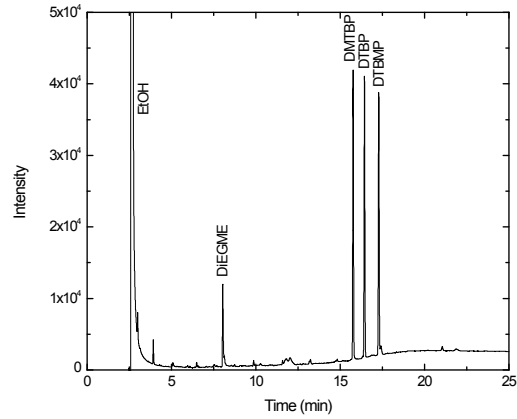


Fig. 3. FID chromatograms of DiEGME and antioxidants in ethanol with Deans switching in standby mode.

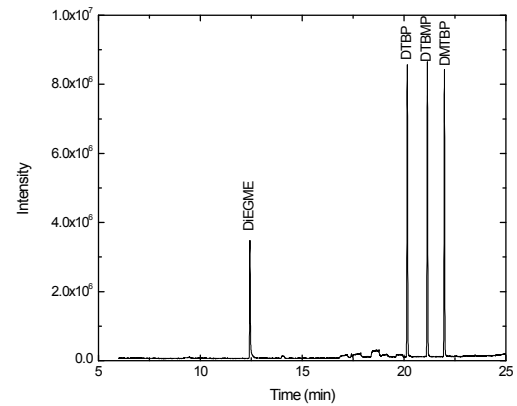


Fig. 4. A SCAN result obtained from each 100 mg/L DiEGME and antioxidants in ethanol with Deans switching in cut mode.

제를 Jet A-1 규격의 항공터빈유에 희석하여 분석하였다. Jet A-1에 100 mg/L 농도로 희석한 첨가제를 MDGC-MS의 cut mode로 분석한 크로마토그램을 Fig. 5에 나타내었다. Jet A-1은 약 150–270 °C의 비점 범위로 증류된 석유제품이며, Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 C<sub>8</sub>-C<sub>18</sub>상당의 탄화수소 화합물로 이루어졌기 때문에 수천~수만 개의 피크가 중첩되어 검출된다. 첨가제도 이러한 복잡한 매트릭스 중에 Jet A-1 피크와 중첩되어 있다. Figure 5(a)에서 점선으로 나타낸 부분은 Fig. 3에서 확인된 첨가제의 머무름 시간을 이용하여

각각의 첨가제 성분들을 heart-cut시킨 시간대로 이 부분의 탄화수소 화합물 성분들은 2차 컬럼으로 이동하여 1차 검출기(FID)에서는 피크가 검출되지 않는다. 2차 컬럼으로 용출된 첨가제와 일부의 Jet A-1 성분들은 2차 컬럼과 2차 오븐의 승온 조건에서 다시 분리되어 2차 검출기(MSD)로 이동한다. 2차 컬럼에서 분리된 첨가제가 MSD/SIM mode로 검출된 크로마토그램을 Fig. 5(b)에 나타내었다.

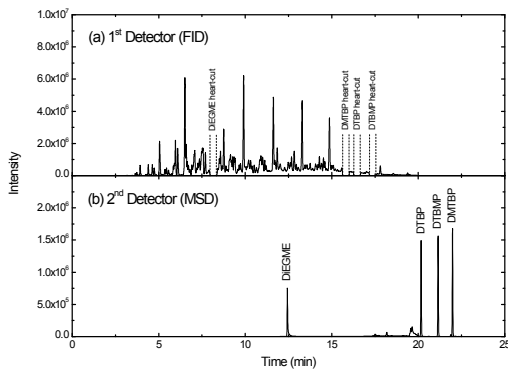


Fig. 5. 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> dimension chromatogram of each 100 mg/L DiEGME and antioxidants in Jet A-1 fuel with Deans switching in cut mode.

### 3.2. MDGC-MS와 GC-MS 비교

본 연구에서 개발한 MDGC-MS 시험 결과를 1-dimensional GC-MS와 비교하기 위하여 각각의 첨가제를 10 mg/L 농도로 Jet A-1에 첨가하여 분석한 결과를 Fig. 6-7에 나타내었다. Figure 6은 GC-MS를 이용하여 Table 2의 분석 조건으로 시험한 결과이며, Fig. 7은 동일한 시료를 MDGC-MS로 분석한 결과이다. 각각의 크로마토그램에는 첨가제가 첨가되지 않은 Jet A-1 바탕 시료를 같이 비교하여 나타내었다. GC-MS에서 첨가제 각 성분 피크의 확인과 정량을 위하여 Table 4와 같이 SIM ion(m/z)을 선정하여 MSD/SIM mode로 분석하였으나, Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 Jet A-1 자체에 수많은 탄화수소 화합물이 존재하여 blank Jet A-1 시료에서도 여러 피크가 검출되었다. 특히 DiEGME는 blank Jet A-1 시료에서도 작은 피크가 중첩되어 검출되었다. 그러나 MDGC-MS로 분석한 Fig. 7의 크로마토그램을 비교해 보면 GC-MS의 크로마

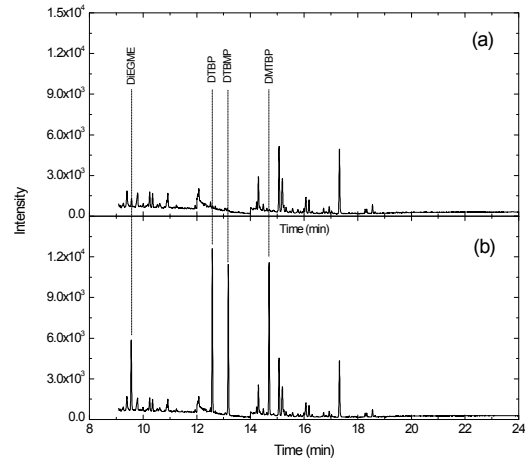


Fig. 6. Chromatogram of (a) blank Jet A-1 and (b) 10 mg/L of DiEGME and antioxidants in Jet A-1 obtained by GC-MS.

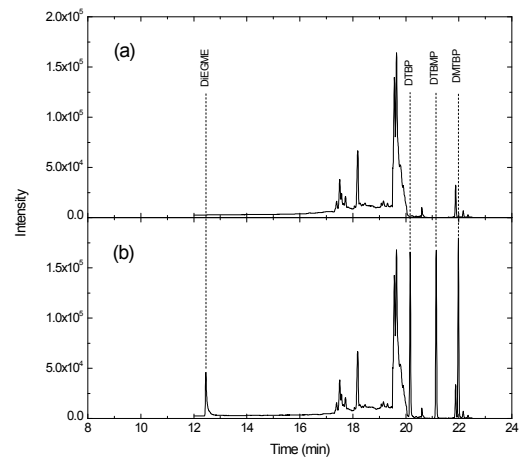


Fig. 7. Chromatogram of (a) blank Jet A-1 and (b) 10 mg/L of DiEGME and antioxidants in Jet A-1 obtained by MDGC-MS.

토그램인 Fig. 6보다 첨가제와 Jet A-1의 분리능이 향상된 것을 볼 수 있다. 이는 1차 컬럼에서 첨가제를 포함한 일부 영역을 heart-cut시켜 2차 컬럼에서 재분리되었기 때문이다. 또한 Jet A-1은 비극성의 탄화수소 화합물이고 빙결 방지제와 산화 방지제로 사용되는 첨가제는 -OH기를 갖는 극성 화합물이기 때문에 2차 컬럼으로 사용된

Table 5. Linearity and LOD of additives in AVTUR

Additive	GC-MS				MDGC-MS			
	Linear equation		R <sup>2</sup>	LOD (mg/L)	Linear equation		R <sup>2</sup>	LOD (mg/L)
	slope	intercept			slope	intercept		
DiEGME	6,132	2,379	0.9996	1.9	14,187	-7,378	0.9998	0.9
DTBP	17,248	2,350	0.9999	1.0	32,048	-9,656	1.0000	0.4
DTBMP	15,444	3,138	0.9999	1.1	33,249	-10,680	1.0000	0.4
DMTBP	13,063	1,124	0.9999	1.1	25,159	-11,197	0.9999	0.5

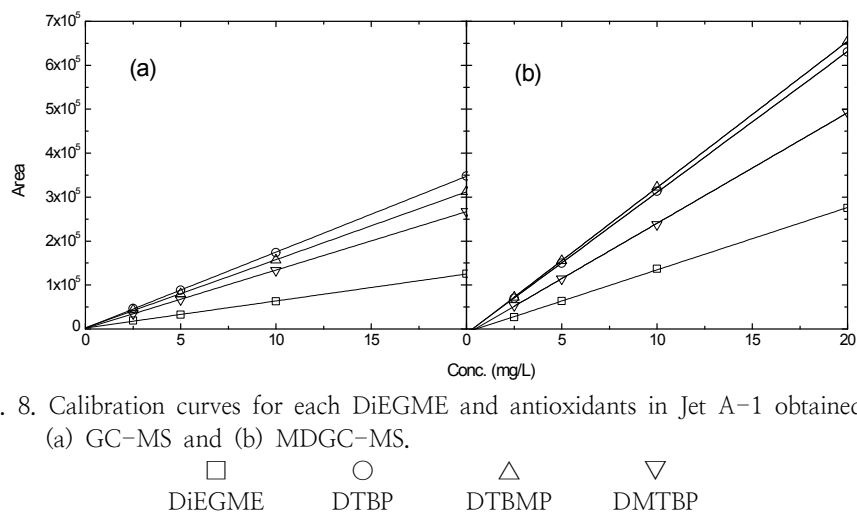


Fig. 8. Calibration curves for each DiEGME and antioxidants in Jet A-1 obtained by (a) GC-MS and (b) MDGC-MS.

극성 컬럼에서 서로간에 분리가 더 잘 이루어진 결과이다.

GC-MS와 MDGC-MS를 이용하여 2.1에서 조제한 동일한 첨가제 표준 시료로 각 성분들을 정량하기 위한 검량선을 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 각 피크의 면적을 이용하여 최소자승 선형회귀분석법으로 검량선을 작성하였으며, Table 5에 GC-MS와 MDGC-MS의 검량선을 나타내었다. 각 검량선의 상관계수(R<sup>2</sup>)값은 모두 0.999 이상이었으며, MDGC-MS로 분석한 첨가제의 검출 한계(Limit of detection, LOD)는 GC-MS로 분석한 결과보다 약 2배 정도 낮았다. Figure 8(a)와 (b)를 비교하면 첨가제 농도별 표준 시료 피크들이 MDGC-MS로 분석하였을 경우에 더 큰 면적값을 보였다. MDGC-MS와 GC-MS에서 첨가제 피크들은 Table 2와 3에서 보는 바와 같이 모두 동일한 극성 컬럼에서 분리되고 검출되었으나 MDGC-MS는 1차 컬럼에서 첨가제를

포함한 일부 성분들만 heart-cut되어 2차 극성 컬럼에서 재분리됨으로서 매질이 단순화 되어 검출 강도가 증가한 것으로 사료된다. 따라서 결과적으로 MDGC-MS가 GC-MS보다 더 우수한 정밀도로 항공터빈유 중의 첨가제를 정량 및 정성적으로 분석하는 것이 가능하였다.

#### 4. 결론

MDGC-MS를 이용하여 항공터빈유의 주요 첨가제인 빙결 방지제와 산화 방지제를 동시에 분석하는 방법을 연구하였고, 그 결과를 1-dimensional GC-MS와 비교하였다. MDGC-MS는 수많은 탄화수소 화합물로 구성된 항공터빈유 중의 첨가제와 주변 성분 일부를 heart-cut하여 2차 컬럼에서 재분리함으로써 GC-MS보다 Jet A-1 성분들과의 분리능이 개선된 효과를 보



였다. 또한 복잡한 매질을 단순화함으로써 매질 효과를 줄이고 검출 강도를 높여 정밀도가 향상되었다. 항공터빈유 첨가제의 정량적인 분석을 위하여 2.5-20 mg/L 농도 범위로 작성한 검량선에서 상관 계수는 모든 성분에서 0.999 이상이었으며, MDGC-MS로 분석한 첨가제의 검출 한계가 GC-MS로 분석한 결과보다 약 2배 정도 낮았다. 따라서 본 연구에서 개발한 시험 방법은 산화 방지제의 표준 시험법으로 적용하는 것이 가능할 것으로 사료되며, 빙결 방지제는 기존 표준 시험법의 검량 한계인 0.01 Vol % 보다 더 낮은 농도 범위의 수준으로 분석이 가능하였다. 또한 항공터빈유의 첨가제 trace 분석이 가능하여 다른 석유제품에 항공터빈유가 혼합되었을 경우나 미지의 석유제품을 구별하기 위한 방법으로 사용이 가능할 것으로 판단된다

### References

1. T. Edwards, "Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion: 1903-2003", *J. of Propulsion and Power*, Vol. **19**, pp. 1089-1107 (2003).
2. CRC Report No. 663, *Handbook of aviation fuel properties*, 4<sup>th</sup> ed., pp. 36-38, Coordinating Research Council, Inc., Alpharetta, GA, USA (2014).
3. ASTM D1655, "Standard Specification for Aviation Turbine Fuels", ASTM International, PA, USA (2018).
4. Defence Standard 91-91 Issue 7 - Turbine Fuel, Kerosine Type, Jet A-1 (NATO Code: F-35 / Joint Service Designation: AVTUR), Ministry of Defence, UK (2015).
5. MIL-DTL-83133J, "Turbine fuel, Aviation, Kerosene Type, JP-8 (NATO F-34), NATO F-35, and JP-8+100 (NATO F-37), Department of Defense", USA (2015).
6. H. S. Shin, H. S. Ahn, D. G. Jung, "Determination of phenolic antioxidants in spilled aviation fuels by gas chromatography-mass spectrometry", *Chromatographia*, Vol. **58**, pp. 495-499 (2003).
7. H. S. Shin, H. S. Ahn, "Gas chromatography-mass spectrometric determination of traces of ether-type icing inhibitors in free-floating fuels", *Chromatographia*, Vol. **60**, pp. 235-239 (2004).
8. H. S. Ahn, "GC-MS determination of antioxidants in ground water contaminated with JP-8", *Chromatographia*, Vol. **66**, pp. 893-897 (2007).
9. Y. K. Lim, C. S. Jeong, K. W. Han, Y. J. Jang, "Analysis of jet fuel for the judgment of soil polluter", *Appl. Chem. Eng.*, Vol. **25**, pp. 27-33 (2014).
10. ASTM D5006, "Standard Test Method for Measurement of Fuel System Icing Inhibitors (Ether Type) in Aviation Fuels", ASTM International, PA, USA (2016).
11. IP 424, "Determination of Fuel System Icing Inhibitor Content of Aviation Turbine Kerosines by High Performance Liquid Chromatography", The Energy Institute, London, UK (2010).
12. M. Bernabei, E. Spila, G. Sechi, "Determination of anti-icing additives in jet fuels", *Analytical Letters*, vol. **30**, pp. 2085-2097 (1997).
13. M. Bernabei, G. Bocchinfuso, P. Carrozzo, C. De Angelis, "Determination of phenolic antioxidant in aviation Jet fuel", *J. Chromatogr. A*, Vol. **871**, pp. 235-241 (2000).
14. P. M. Rawson, C. A. Stansfield, R. L. Webster, D. Evans, "Re-addition of antioxidant to aged MEROX and hydroprocessed jet fuels", *Fuel*, Vol. **139**, pp. 652-658 (2015).
15. Introduction of MDGCsolution, Shimadzu Application News, No. G255, Shimadzu, Japan.
16. J. M. Youn, J. W. Doh, I. H. Hwang, S. L. Kim, Y. Kang, "Determination of fatty acid methyl ethers (FAME) content in aviation turbine fuel using multi-dimensional GC-MS", *J. Oil & Appl. Sci.*, Vol. **34**, pp. 717-726 (2017).