

Multi-dimensional GC-MS를 이용한 항공터빈유의 FAME 함량 분석

연주민^{*,**} · 도진우^{*} · 황인하^{*} · 김성룡^{***} · 강 용^{**,†}

^{*}한국석유관리원 석유기술연구소, 28115 충북 청주시 청원구 오창읍 양청3길 33

^{**}충남대학교 응용화학공학과, 34134 대전 유성구 대학로 99

^{***}한국항공우주연구원 추진시험평가팀, 34133 대전 유성구 과학로 169-84

(2017년 9월 15일 접수: 2017년 9월 29일 수정: 2017년 10월 3일 채택)

Determination of fatty acid methyl esters (FAME) content in aviation turbine fuel using multi-dimensional GC-MS

Ju Min Youn^{*,**} · Jin Woo Doh^{*} · In Ha Hwang^{*} · Seong Lyong Kim^{***} · Yong Kang^{**,†}

^{*}Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority,
33, Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungbuk, 28115, Korea

^{**}Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, 99, Daehak-ro,
Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

^{***}Propulsion Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute, 169-84,
Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34133, Korea

(Received September 15, 2017; Revised September 29, 2017; Accepted October 3, 2017)

요약 : 항공유에 fatty acid methyl esters (FAME)가 혼합될 경우 연료 공급시스템과 항공기 엔진에 치명적인 고장의 원인이 될 수 있기 때문에 항공유 품질규격에서 FAME 함량을 50 mg/kg 이하로 규정하고 있다. 무수히 많은 탄화수소로 구성된 항공유 중의 FAME 성분을 선택적으로 분석하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 MDGC-MS를 사용한 새로운 시험방법을 개발하였다. Deans switching 시스템이 설치된 MDGC-MS를 이용하면 코코넛 오일이나 팜유 유래의 저분자량 FAME 성분도 분석이 가능함을 확인하였다. 개발된 시험방법은 FAME 피크의 머무름 시간을 약간 뒤로 이동시키는 매트릭스 효과(matrix effect)를 현행의 기준 시험방법(IP 585)보다 약 20배 이하로 감소시킬 수 있었다. MDGC-MS는 항공유에 미량의 FAME가 오염되었는지 여부를 정성 및 정량적으로 확인할 수 있는 시험방법으로 적합하였다.

주제어 : 항공터빈유, 가스크로마토그래피-질량분석기, 지방산메틸에스테르, Deans 스위칭, 매트릭스효과

[†]Corresponding author
(E-mail: kangyong@cnu.ac.kr)

Abstract : The current allowable cross-contamination level of fatty acid methyl esters (FAME) in aviation turbine fuel (AVTUR) is 50 mg/kg, due to that the presence of FAME in AVTUR can significantly impact the fuel supply system and jet engine. It has been difficult to analyze the level of FAME in AVTUR, since it is consisted of a lot of hydrocarbons. In this study, thus, a new method using multi-dimensional GC-MS (MDGC-MS) was proposed in order to determine the FAME level in AVTUR effectively. Applying to MDGC-MS with Deans switching system enabled us to detect and quantify the FAME with low carbon numbers such as those derived from coconut oil and palm kernel oil. The matrix effect of MDGC-MS method, which could shift the FAME peaks to slightly longer retention times, was reduced by 20 times compared with that of 1-dimensional GC-MS reference method. This developed method could be suitable for qualitative and quantitative analyses to determine the contamination level of trace FAME in AVTUR.

Keywords : Aviation turbine fuel, Multi-dimensional GC-MS, Fatty acid methyl ester (FAME), Deans switching, Matrix effect

1. 서 론

항공기는 비행 중 연료에 의한 문제가 발생할 경우 즉각적인 대처가 어렵고 대형 사고로 이어지기 때문에 항공유의 품질은 수송용 연료보다 더 엄격히 관리되고 있다. 국제적으로 제트 엔진이나 항공 터빈엔진을 장착한 민간 항공기의 연료로 사용되는 항공터빈유(Aviation turbine fuel, AVTUR)는 특정 지역을 제외하고는 대부분 Jet A-1 규격의 연료를 사용하고 있다. Jet A-1은 등유 기반의 항공유로 높은 고도에서 고속으로 장거리 비행하는 항공기와 함께 열악한 외부 환경에 지속적으로 노출되기 때문에 다른 연료유 대비 더 많은 품질관리 기준이 있다. 특히 항공유를 대량으로 사용하는 공항은 항공유의 운송, 보관, 취급 및 급유시 외부로부터 수분이나 이물질의 혼입 방지와 처리에 많은 시설 투자와 노력을 기울이고 있다.

국내뿐만 아니라 유럽 등 해외에서도 CO₂ 감축과 석유대체연료의 보급활성화를 위해 정유사에서는 자동차용 경유에 바이오디젤을 2~5 vol% 첨가하여 유통시키고 있다. 바이오디젤은 식물성 유지 또는 동물성 지방이 전이에스테르화반응으로 얻어진 지방산메틸에스테르(Fatty acid methyl ester, FAME)를 의미한다. FAME는 높은 세탄가와 연소특성 및 친환경성 등으로 경유 대체연료로 널리 사용되고 있다[1]. 그러나 FAME는 산화안정성이 떨어져서 분해되면 검, 산화물 및 불용해물 등으로 변환되어 연료특성을 변화시킨다

[1,2]. Jet A-1은 저장, 운송 등의 과정에서 FAME가 첨가된 자동차용 경유와 정유공정 인프라를 공유할 수 있고, FAME의 극성으로 인하여 배관과 저장탱크 등의 표면에 흡착되어 Jet A-1을 오염시킬 가능성이 있다. FAME가 Jet A-1에 다량 혼합될 경우 연료의 열안정성 저하, coke 침적물, 겔화 발생으로 항공엔진의 연료시스템에 위험이 발생한다. 또한 바이오디젤은 저온에서의 유동성이 석유기반의 탄화수소보다 나쁠 때 때문에 높은 고도에서 저온에 노출될 경우 연료의 어는점에 영향을 주어 바이오디젤로 인한 항공기 연료공급시스템의 고장을 유발할 수 있다[3,4].

민간 항공터빈유 Jet A-1의 대표적인 품질규격인 미국재료시험협회의 ASTM D1665[5]와 영국 국방부 규격 Defence Standard 91-91 Issue 7[6]에서는 FAME의 함량을 50 mg/kg 이하로 규정하고 있다. 항공터빈유에 존재하는 미량의 FAME 함량을 분석하는 표준 시험방법은 Table 1에 나타낸 바와 같이 영국에너지협회(Energy Institute)의 IP 표준이 적용된다. IP 583[7]은 적외선분광광도계(FT-IR)를 사용하여 1749 cm⁻¹에서의 IR 흡광도로 전체 FAME 함량을 분석하는 빠른 스크린 시험방법이다. IP 585[8]는 가스크로마토그래피-질량분석기(GC-MS)의 SIM(selected ion monitoring) mode 분석법을 적용하여 C16-C18의 개별 FAME 함량을 분석할 수 있으며, 여러 시험방법 중 기준 시험법(referee method)으로 사용된다[5]. IP 590[9]은 액체크로마토그래피(HPLC)와 ELSD(Evaporative light

scattering detector) 검출기를 사용하는 방법으로 C16-C18의 개별 FAME 함량을 분석할 수 있다. IP 599[10]는 Deans switching 시스템이 설치된 Multi-dimensional 가스크로마토그래피-불꽃이온화검출기(MDGC-FID)를 사용하여 C14-C18의 개별 FAME 함량을 분석하는 방법이다. Lissitsyna[4] 등은 GC×GC-FID를 사용하여 GC-MS 분석법과 비교하는 연구를 수행하였다. 기존 분석법은 바이오디젤 원료의 90% 이상을 차지하는 대두유(soybean oil)나 유채유(rape seed oil) 기반의 FAME(C16, C18)를 대상으로 개발되었고, 상대적으로 탄소수가 적은 코코넛유(coconut oil)나 팜유(palm kernel oil) 기반의 FAME(C12, C14)은 항공터빈유의 매질과 중첩되어 분석이 어렵다. Methyl myristate(C14:0)를 분석할 수 있는 IP 599 시험법은 C16~C18 분석 시 적용된 분석조건과는 다른 별도의 조건을 설정해야 하는 번거로움이 발생한다. 또한 GC×GC 분석법은 1-dimensional GC 보다 피크 해석과 데이터 분석에 많은 시간이 소요되며 분석자의 숙련된 기술이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 항공터빈유 중 미량의 FAME 함량을 분석하는 기존 시험법의 단점을 보완하고자 MDGC-MS/SIM mode를 적용하여 모든 바이오디젤 원료로부터 생산되는 주요 FAME 성분(C12, C14, C16, C17, C18)을 정성 및 정량분석하였다. 또한 기존 시험법인 IP 585의 1-dimensional GC-MS 분석법과 비교하였다.

2. 실험

2.1. 분석용 표준물질

Table 2에 나타난 FAME 각 성분의 정성 및 정량분석을 위하여 Sigma-Aldrich의 시약을 사용하였다. 또한 표준시료 조제시 희석 용매로 사용한 dodecane도 Sigma-Aldrich 시약을 사용하였다. FAME 표준시료는 각각의 FAME 시약을 dodecane에 희석하여 1000 mg/kg의 농도로 조제한 후 다시 단계적으로 희석하여 2, 4, 6, 8, 10 mg/kg 농도의 FAME 표준시료를 조제하였다. 표준시료는 냉장보관하면서 사용하였다. 항공터빈유는 국내 SK에너지(주)에서 생산된 Jet A-1 제품을 사용하였다.

2.2. 가스크로마토그래피-질량분석기 (GC-MS)

본 연구에서 MDGC-MS의 분석 결과와 비교하기 위하여 사용한 GC-MS는 자동시료주입장치, 분할/비분할 주입기, 오븐, single quadrupole/electron ionization (EI) source 질량분석기(MSD)로 구성된 Agilent Technologies 7890A GC-5975C MSD(Agilent Technologies, USA)를 사용하였다. 분석용 GC 컬럼은 FAME 성분 분석을 위한 극성의 모세관 컬럼인 polyethylene glycol 컬럼(HP-INNOWax, Agilent Technologies, USA)을 사용하였다. 운반기체(carrier gas)는 고순도(99.999%) 헬륨을 사용하였다. 전체 시험조건과 절차는 IP 585에 규정되어 있는 시험방법을 따랐으며, Table 3에 GC-MS 분석조건을 나타내었다. Agilent ChemStation software를 이용하여 GC 조작과 데이터 수집 및 해석을 수행하였다.

2.3. Multi-dimensional GC-MS

본 연구에서 사용한 MDGC-MS는 자동시료주입장치, 분할/비분할 주입기, 2개의 오븐, 2개의 검출기, Deans switching 시스템으로 구성된 Shimadzu MDGC/GCMS-2010 Series (Shimadzu, Japan)를 사용하였으며, Fig. 1에 실험에 사용된 MDGC-MS의 개략도를 나타내었다 [11]. Figure 1에 나타난 바와 같이 MDGC-MS는 1차 오븐과 2차 오븐이 직렬로 연결되어 있으며 그 사이에 Deans switching system이 설치되어 있다. 1차 오븐에는 자동시료주입장치와 불꽃이온화검출기(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 비극성의 dimethylpolysiloxane 컬럼(DB-1, Agilent Technologies, USA)을 연결하였고 2차 오븐에는 2-2절의 GC-MS에서 사용한 것과 동일한 polyethylene glycol 컬럼(HP-INNOWax, Agilent Technologies, USA)을 사용하였다.

운반기체는 고순도(99.999%) 헬륨을 사용하였고, Shimadzu MDGC solution software를 이용하여 GC 조작과 데이터 수집 및 해석을 수행하였다. Table 4에 MDGC-MS 분석조건을 나타내었고, 총 분석시간(run time)은 50 min 이었다.

Table 1. FAME test methods in AVTUR

Test Method	Instrument	FAME species determined	Reference
IP 583	FT-IR	C8-C22 FAME	[7]
IP 585	GC-MS	C16:0, C17:0, C18:0, C18:1, C18:2, C18:3	[8]
IP 590	HPLC	C16:0, C18:0, C18:1, C18:2, C18:3	[9]
IP 599	MDGC-FID	C14:0, C16:0, C18:0, C18:1, C18:2, C18:3	[10]
Lissitsyna et al.	GC×GC-FID	C16:0, C17:0, C18:0, C18:1, C18:2, C18:3	[4]

Table 2. FAME components

Chemical name	Common name	Symbol	Molecular formula	Molecular weight
Methyl dodecanoate	methyl laurate	C12:0	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	214.34
Methyl tetradecanoate	methyl myristate	C14:0	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	242.40
Methyl hexadecanoate	methyl palmitate	C16:0	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	270.45
Methyl heptadecanoate	methyl margarate	C17:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	284.45
Methyl octadecanoate	methyl stearate	C18:0	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	298.50
Methyl octadecenoate	methyl oleate	C18:1	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	296.49
Methyl octadecadienoate	methyl linoleate	C18:2	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	294.47
Methyl octadecatrienoate	methyl linolenate	C18:3	C ₁₉ H ₃₂ O ₂	292.45

Table 3. Operating conditions of GC-MS

GC conditions	
Column	polyethylene glycol (60 m×0.25 mm×0.5 mm)
Injection volume	1 μL
Inlet	
Temp.	260 °C
Mode	splitless
Column flow	1 mL/min (constant flow)
Oven	
Initial temp.	150 °C for 5 min
Ramp #1	12 °C/min to 200 °C for 17 min
Ramp #2	3 °C/min to 252 °C for 6.5 min
Run time	50 min
MS transfer line temp.	260 °C
MS conditions	
Ionization source	70 eV electron ionization
Source temp.	230 °C
Quadrupole temp.	150 °C
Data acquisition delay	20 min

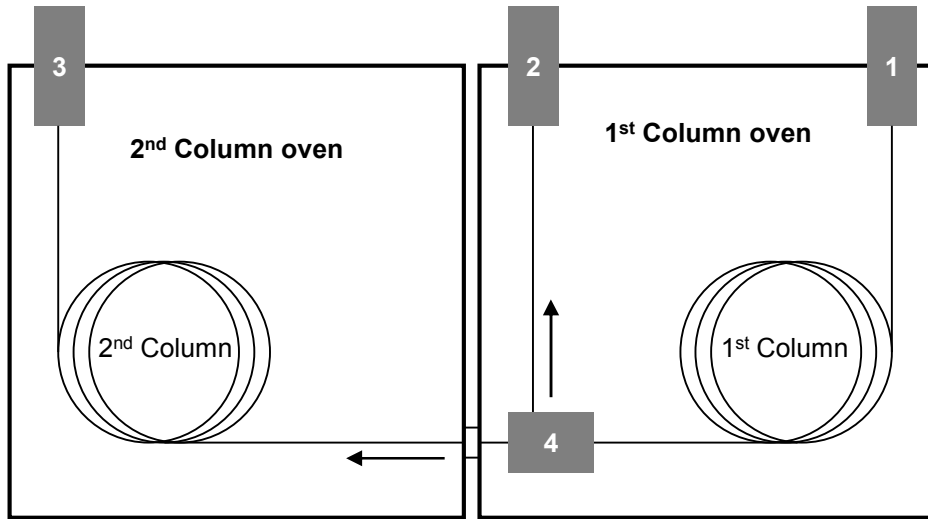


Fig. 1. Configuration of a MDGC-MS system.

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

3. 결과 및 고찰

3.1. MDGC-MS를 이용한 FAME 분석

Deans switching 시스템이 설치된 MDGC-MS의 원리를 Fig. 2에 나타내었다 [12,13]. MDGC-MS의 Standby mode에서는 Fig 2(a)에서 보는 바와 같이 압력조절기가 1차 컬럼의 말단 압력(P_1)보다 2차 컬럼의 주입구 압력(P_2)을 더 높게 유지시켜 1차 컬럼에서 용출된 시료는 FID로 이동하여 검출된다. Fig. 3은 Table 4의 분석조건으로 dodecane에 희석한 500 mg/kg 농도의 FAME 표준시료를 standby mode로 분석한 크로마토그램이다. MDGC-MS의 cut mode에서는 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 압력조절기가 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. Fig. 4은 Table 4의 분석조건으로 dodecane에 희석한 FAME 표준시료를 cut mode로 분석한 크로마토그램이다. Fig. 3에서 각각의 FAME 피크가 검출되는 시간대(switching time)만 cut mode로 전환시켜 2차 컬럼으로 보내면

모든 피크가 완전하게 분리되어 검출되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)는 정성적인 분석을 위하여 dodecane에 희석한 FAME 표준시료를 MSD/Scan mode로 분석한 크로마토그램이고, Fig 4(b)는 정량분석을 위하여 MSD/SIM mode로 분석한 크로마토그램이다.

실제 정유사에서 생산되는 Jet A-1 규격의 항공터빈유에 10 mg/kg 농도의 FAME를 첨가하여 MDGC-MS의 cut mode로 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Jet A-1은 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 $C_8 \sim C_{18}$ 상당의 탄화수소화합물로 이루어졌기 때문에 수많은 피크가 중첩되어 검출된다[14]. 이러한 복잡한 매질 중에 FAME도 Jet A-1 피크와 중첩되어 있으며, FAME 피크가 검출되는 시간대의 성분들을 heart-cut시켜 2차 컬럼으로 보내면 1차 검출기(FID)에서는 이 시간대에서 피크가 검출되지 않는다. 2차 컬럼으로 용출된 FAME와 일부의 Jet A-1 성분들은 2차 컬럼과 오븐의 승온조건에서 다시 분리되며, 2차 검출기(MSD)에서 검출된다. Fig. 5(b)는 MSD/SIM mode로 FAME 피크를 확인한 결과이며, 이때 FAME와 같이 용출된 일부의 Jet A-1 성분

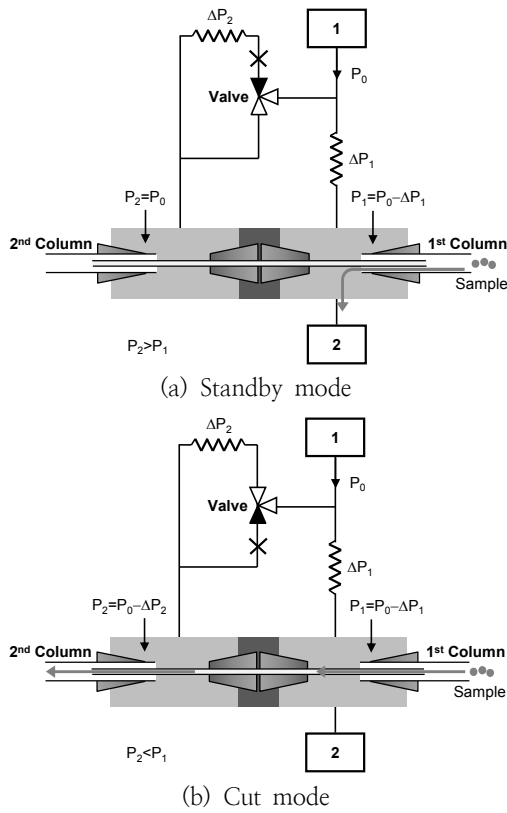


Fig. 2. Deans switching system in GC.
 1. Pressure controller
 2. 1st Detector (FID)

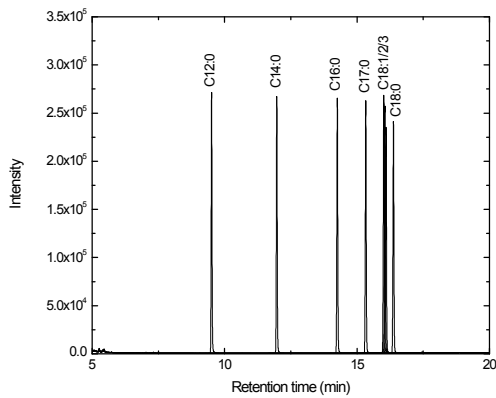


Fig. 3. FID chromatograms of each FAME in dodecane with Deans switching in standby mode.

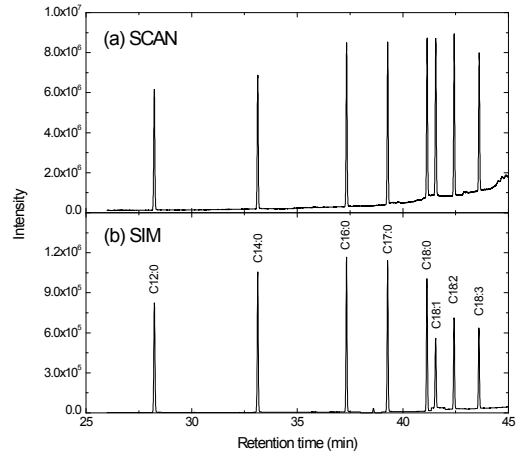


Fig. 4. A SCAN/SIM result obtained from (a) 500 mg/kg and (b) 10 mg/kg FAME sample in dodecane with Deans switching in cut mode.

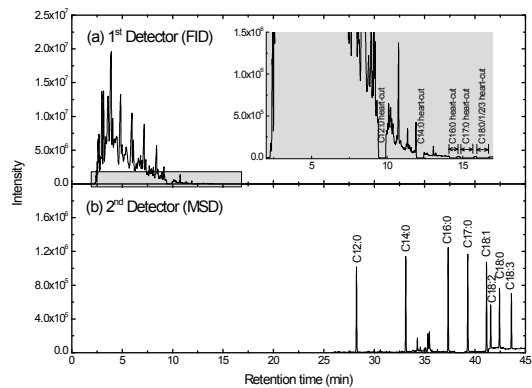


Fig. 5. 1st and 2nd dimension chromatogram of each 10 mg/kg FAME in Jet A-1 fuel with Deans switching in cut mode.

이 FAME와 중첩되지 않으면서 피크 확인과 정량을 위한 SIM ion(m/z)은 Table 5와 같이 선정하였다.

3.2. MDGC-MS와 GC-MS 비교

본 연구에서 개발한 MDGC-MS 시험법을 1-dimensional GC-MS를 이용한 IP 585 시험법과 비교하기 위하여 Jet A-1에 미량의 FAME를 첨가하고 각각의 시험방법으로 분석하여 Fig. 6~7에 나타내었다. 각각의 그림에는 FAME가 첨가되지 않은 Jet A-1 바탕시료, 2.5 mg/kg의

Table 4. Operating conditions of MDGC-MS

GC conditions	
Column	
1 st Column	dimethylpolysiloxane (30 m×0.25 mm×0.25 mm)
2 nd Column	polyethylene glycol (30 m×0.25 mm×0.5 mm)
Injection volume	1 μ L
Inlet	
Temp.	300 $^{\circ}$ C
Mode	Split (ratio 10:1)
Linear velocity	25 cm/s
Oven	
1 st oven	100 $^{\circ}$ C \rightarrow 10 $^{\circ}$ C/min \rightarrow 260 $^{\circ}$ C (20 min)
2 nd oven	100 $^{\circ}$ C (17 min) \rightarrow 5 $^{\circ}$ C/min \rightarrow 250 $^{\circ}$ C (3 min)
FID	
Temp.	350 $^{\circ}$ C
Air	400 mL/min
H ₂	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
Scan range	33 to 320 AMU
Switching conditions	
Switching pressure	210 kPa
Switching time	
C12:0	9.4–9.9 min
C14:0	11.9–12.4 min
C16:0	14.1–14.6 min
C17:0	15.2–15.7 min
C18:0/1/2/3	15.9–16.7 min

Table 5. SIM group targeted compounds and start time in GC-MS and MDGC-MS

FAME compounds	GC-MS (IP 585 method)		MDGC-MS	
	SIM ions for Quantification (m/z)	SIM group start time (min)	SIM ions for Quantification (m/z)	SIM group start time (min)
C12:0			74, 183	26.0
C14:0			74, 199, 211, 242	30.0
C16:0	227, 239, 270, 271	20.0	74, 227, 239, 270	35.0
C17:0	241, 253, 284	30.7	74, 241, 253, 284	39.0
C18:0	255, 267, 298	34.0	74, 255, 267, 298	40.0
C18:1	264, 265, 296	36.5	74, 96, 98, 264, 265	41.4
C18:2	262, 263, 264, 294, 295	38.0	67, 95, 262, 263, 294	42.0
C18:3	236, 263, 292, 293	40.0	79, 95, 236, 263, 292	43.0

FAME가 첨가된 Jet A-1 및 dodecane으로 조제된 2.0 mg/kg 농도의 FAME 표준시료를 나타내었다.

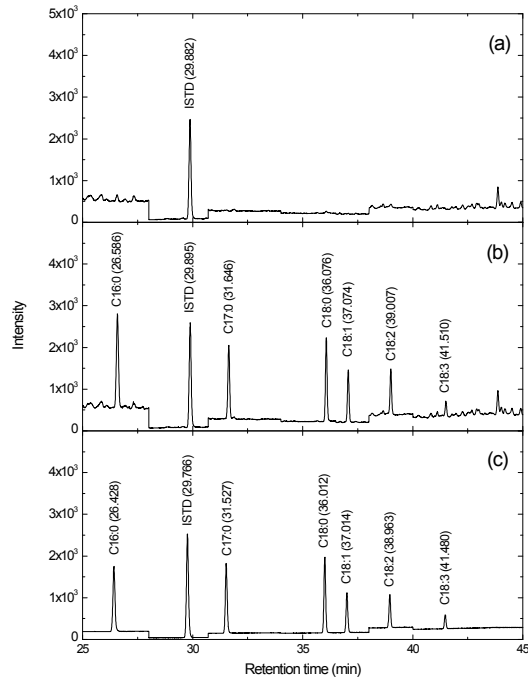


Fig. 6. Chromatogram of (a) blank Jet A-1, (b) 2.5 mg/kg of FAME in Jet A-1 and (c) a standard solution of 2.0 mg/kg FAME in dodecane obtained by GC-MS.

McCurry[15]에 의하면 GC-MS로 항공유 중 미량의 FAME 함량 분석시 methyl palmitate (C:16) 피크의 머무름 시간이 dodecane으로 조제한 표준시료의 FAME와 비교하여 약 0.3 min 길어졌고, methyl linolenate (C18:3) 피크는 0.025 min 길어졌다. 이는 컬럼에 주입된 다량의 항공유에 의한 매질 효과(matrix effect) 때문이며, 머무름 시간이 짧은 피크일수록 그 효과가 더 크게 발생한다고 보고하였다. 본 연구의 비교 시험에서도 Fig. 6에서 보는 바와 같이 GC-MS로 FAME를 분석한 결과, Fig. 6(b)의 Jet A-1 매질의 C16:0과 C18:3 피크는 Fig. 6(c)의 dodecane 매질의 피크와 비교하여 각각 0.16 min과 0.03 min으로 길어졌다. 그러나, MDGC-MS로 Jet A-1 중의 FAME를 분석한

결과는 Fig. 7(b)와 (c)에서 보는 바와 같이 매질 효과가 GC-MS 결과 대비 약 20배 이하로 감소하였다. 이는 1차 컬럼에서 heart-cut된 성분들이 전체 매질 대비 매우 소량이고, 이들이 다시 2차 컬럼에서 재분리되기 때문에 매질 효과가 감소된 것으로 사료된다.

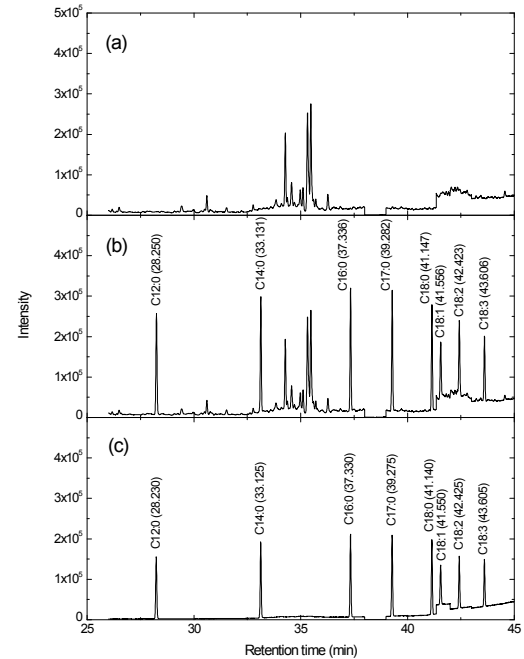


Fig. 7. Chromatogram of (a) blank Jet A-1, (b) 2.5 mg/kg of FAME in Jet A-1 and (c) a standard solution of 2.0 mg/kg FAME in dodecane obtained by MDGC-MS.

3.3. MDGC-MS를 적용한 FAME 검량

MDGC-MS를 이용하여 FAME 각 성분들을 정량하기 위한 검량선을 Fig. 8에 나타내었다. 검량은 IP 585에서 규정한 방법에 준하여 2, 4, 6, 8, 10 mg/kg 농도의 FAME 표준시료를 이용하였고, 각 피크의 면적으로 원점을 지나는 최소자승 선형회귀분석법으로 검량선을 작성하였다. 각 검량선의 상관계수(R^2) 값은 모두 0.997 이상이였다.

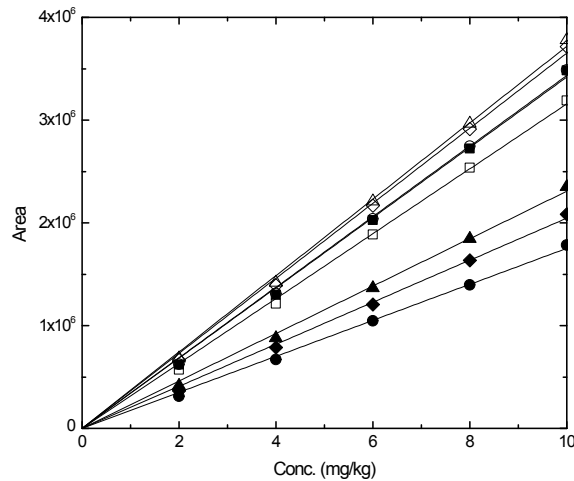


Fig. 8. Calibration curves for each FAME in dodecane obtained by MDGC-MS.

□ ○ △ ◇ ■ ● ▲ ◆
C12:0 C14:0 C16:0 C17:0 C18:0 C18:1 C18:2 C18:3

4. 결론

MDGC-MS를 이용하여 항공유 중에 미량으로 오염될 수 있는 FAME 함량을 정성 및 정량분석하는 시험방법을 연구하여 1-dimensional GC-MS를 이용한 기준 분석법인 IP 585와 비교하였다. 기존에 항공유의 매질과 중첩되어 분석이 불가능하였던 methyl laurate(C12:0)와 methyl myristate(C14:0)도 MDGC-MS를 이용한 시험방법으로 분석이 가능하였다. 또한 1-dimensional GC-MS에서 항공유 중의 FAME 피크 머무름 시간이 표준시료 대비 길어지는 매질 효과가 MDGC-MS에서는 약 20배 이하로 감소하였다. 미량의 FAME 각 성분을 정량하기 위한 저농도 검량선의 상관계수 값은 0.997 이상이었다. 따라서 본 연구에서 개발한 시험방법은 기존 시험법의 단점을 보완 및 대체할 수 있는 새로운 표준시험방법으로 적용이 가능할 것으로 사료된다.

References

1. S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Cenicerros, M. Natarajan, "Review of Biodiesel Composition, Properties, and Specifications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, pp. 143-169, (2012).
2. Y. K. Lim, S. C. Shin, E. S. Yim, H. O. Song, "The Effective Product Method of Biodiesel", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol.19, No.2, pp. 137-144, (2008).
3. Joint Inspection Group (JIG), "Preventing FAME Contamination in Jet Fuel at Airports", JIG, London, UK, Bulletin No. 26, June (2009).
4. K. Lissitsyna, S. Huertas, R. Morales, L. C. Quintero, L. M. Polo, "Determination of Trace Levels of Fatty Acid Methyl Esters in Aviation Fuel by GC×GC-FID and Comparison with the Reference GC-MS Method", *Chromatographia*, Vol.75, pp. 1319-1325, (2012).
5. ASTM D1665, "Standard Specification for Aviation Turbine Fuels", ASTM International, PA (2015).
6. 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).
7. IP 583, "Determination of the fatty acid methyl esters content of aviation turbine fuel using flow analysis by Fourier transform infrared spectroscopy - Rapid screening method", The Energy Institute, London, UK (2010).
 8. IP 585, "Determination of fatty acid methyl esters (FAME), derived from bio-diesel fuel, in aviation turbine fuel - GC-MS with selective ion monitoring/scan detection method", The Energy Institute, London, UK (2010).
 9. IP 590, "Determination of fatty acid methyl esters (FAME) in aviation turbine fuel - HPLC evaporative light scattering detector method", The Energy Institute, London, UK (2010).
 10. IP 599, "Determination of fatty acid methyl esters (FAME) in aviation turbine fuel - Gas Chromatography using heart-cut and refocusing", The Energy Institute, London, UK (2014).
 11. Introduction of MDGCsolution, Shimadzu Application News, No. G255, Shimadzu, Japan.
 12. MDGC/GCMS-2010 Series, Shimadzu Multi-Dimensional GC/GCMS System, Shimadzu, Japan.
 13. R. L. Webster, D. J. Evans, P. J. Marriott, "Detailed Chemical Analysis Using Multidimensional Gas Chromatography-Mass Spectrometry and Bulk Properties of Low-Temperature Oxidized Jet Fuels", *Energy and Fuels*, Vol.29, pp. 2059-2066, (2015).
 14. X. Hui, K. Kumar, C. Sung, T. Edwards, D. Gardner, "Experimental Studies on the Combustion Characteristics of Alternative Jet Fuels", *Fuels*, Vol.98, pp. 176-182, (2012).
 15. J. D. McCurry, "GC/MS Analysis of Trace Fatty Acid Methyl Ethers (FAME) in Jet Fuel Using Energy Institute Method IP 585", Agilent Technologies, Publication Part Number: 5990-9432EN, www.agilent.com/chem (2011).