

애질런트 흐름 조절 방식 GC×GC-FID를 사용한 제트 연료의 그룹 유형 분석

저자

Wan Li
Agilent Technologies
(Shanghai) Co. Ltd.

개요

기존의 크로마토그래피와 분광 기술은 제트 연료의 조성을 완전히 분석하기에 충분하지 않습니다. 그러나 안전하고 효율적인 연료를 개발하고 생산하려면 제트 연료 화합물을 완전히 분석하는 것이 필수적입니다. 이 응용 자료는 불꽃 이온화 검출기가 장착된 Agilent 8890 역방향 충전/세척 흐름 조절 방식 2차원 가스 크로마토그래피 시스템(GC×GC-FID)을 사용한 중국의 규제 표준 NB/SH/T 6078-2023¹에 따른 제트 연료의 그룹 유형 분석을 위한 분석법을 설명합니다. 제트 연료에 존재하는 단일방향족 및 이방향족 종의 상대 존재비와 부분 탄소수 분포는 뛰어난 반복성, 직선성, 감도 및 정량 정밀도를 통해 확인되었습니다. 이 시스템은 10회 반복 분석에서 모든 비추적 화합물에 대해 두 차원 모두에서 탁월한 머무름 시간(RT) 반복성(¹RT의 %RSD부터 0, ²RT의 %RSD ≤ 0.27)과 정량 정밀도(< 2.0% RSD)를 보여주었습니다. 8가지 농도 수준에 걸쳐 12가지 개별 방향족 화합물과 6가지 방향족 응집체 그룹의 직선성으로 인해 선형 계수(R²)가 0.999를 초과했습니다. 이러한 성능 특성은 GC×GC 분석법 개발 및 유지보수에 대한 전문 지식이 부족한 실험실에서 일상적인 제트 연료 분석을 수행하는 데 필요한 기반을 제공합니다.

소개

제트 연료는 항공 등유, 항공 터빈 연료라고도 불리며, 주로 항공기 터빈 엔진의 연료로 사용되는 석유 제품입니다. 제트 연료의 조성의 특성을 규명하는 것은 안전하고 효율적인 항공기 운항을 보장하고 항공 산업에 필요한 높은 성능과 신뢰성 표준을 유지하는 데 필수적입니다. 이러한 유형의 분석은 연료 생산 과정을 이해하고 촉매 성능과 수명을 평가하는 데 있어서도 상당한 실질적 중요성을 갖습니다. 제트 연료의 방향족 탄화수소 함량은 중요한 품질 지표이며 국제적인 규정을 따릅니다.

그러나 제트 연료에 존재하는 독특한 탄화수소 구조 이성질체의 수는 기존의 1차원 크로마토그래피 및 분광학적 분석법의 선택성을 넘어서기 때문에 필요한 탄화수소 조성 및 탄소 수 분포 정보를 제공할 수 없습니다. 포괄적인 GC×GC는 기존 크로마토그래피 기술에 비해 향상된 분리능, 피크 용량, 감도, 고도로 정렬되고 구조화된 분리 패턴 등 여러 장점을 가지고 있습니다. GC×GC는 시료 전처리 없이 직접 주입이 가능하므로 이러한 석유 제품의 분석 절차가 크게 단순화될 수 있습니다. 또한, GC×GC를 이용한 이러한 석유 제품 분석에는 시료 준비나 전처리가 필요하지 않아 품질 관리 실험실에 있어서 매력적인 분석법입니다.

이 응용 자료는 Agilent 8890 역방향 충전/세척 흐름 조절 GC×GC-FID 시스템을 사용한 중국의 NB/SH/T 6078-2023 표준²⁻⁴에 따른 제트 연료에 대한 그룹 유형 정량 분석법을 수립합니다.²⁻⁴ 애질런트 역방향 흐름 조절기(RFM)는 차등 흐름 조절기입니다. 이 기술은 애질런트 캐필러리 흐름 기술(CFT)을

기반으로 하며, 간단히 운반 가스 흐름을 지시하여 운반 가스를 분별합니다. 이 시스템은 (변조기가 GC 오븐 내부에 설치되므로) 추가적인 설치 공간이 필요 없고, 움직이는 부품이 없으며, 비용 효율적이고, 견고하며, 재현성이 높은 결과를 제공합니다. 이 시스템은 제트 연료와 같은 중간 석유 증류물을 분석하는 데 특히 적합합니다. 이러한 혼합물은 일반적으로 GC 분리에서 용출의 시작과 끝이 명확하게 정의되어 있기 때문입니다. 이 응용 자료는 실제 제트 연료 시료에서 탄소 수에 따른 1고리 방향족 화합물, 2고리 방향족 화합물 및 동종 방향족 계열의 상대 존재비를 확인했습니다. 또한 시스템의 반복성, 직선성 및 정량 정밀도도 평가되었습니다.

실험

시료

제트 연료는 중국의 두 정유 회사에서 구입했습니다. 다양한 농도 수준의 화학 표준물질의 중량 혼합물은 자체적으로 전처리하였습니다. 화학 표준물질은 ANPEL Laboratory Technologies (Shanghai) Inc.에서 구입했습니다.

제트 연료는 시료를 전처리하지 않고 직접 주입되었습니다.

기기

표 1에 나열된 구성으로 분할/비분할 주입구와 역방향 충전/세척 역방향 흐름 조절기(RFM)를 갖춘 8890 GC×GC-FID 시스템이 사용되었습니다. 세 개의 서로 다른 컬럼 세트가 평가되었습니다.

분석법 설정

표 1. GC×GC-FID 실험 조건.

Agilent 8890 GC 파라미터				
주입구	분할/비분할 주입구, 280°C, 주입량 0.5µL, 분할 비율 500:1			
검출기		분석 FID	모니터 FID(옵션)	
	온도	300°C	300°C	
	H ₂ 유속	35mL/분	35mL/분	
	공기 유속	350mL/분	350mL/분	
	보조가스(N ₂) 유속	30mL/분	30mL/분	
	수집 속도	200Hz	5Hz	
컬럼 세트		컬럼 세트 1	컬럼 세트 2	컬럼 세트 3
	1차 컬럼	Agilent DB-1, 20m × 0.18mm, 0.4µm, (p/n 121-1023) 유속: 0.5mL/분	Agilent DB-1, 40m × 0.18mm, 0.4µm, (p/n 121-1043), 유속: 0.5mL/분	Agilent DB-1, 20m × 0.1mm, 0.4µm, (p/n 127-1023), 유속: 0.35mL/분
	2차 컬럼	Agilent DB-HeavyWAX, 5m × 0.32mm, 0.2µm, (p/n 123-7157), 유속: 25mL/분	Agilent DB-HeavyWAX, 5m × 0.32mm, 0.2µm, (p/n 123-7157), 유속: 25mL/분	Agilent DB-17ht, 5m × 0.25mm, 0.15µm, (p/n 122-1811), 유속: 14mL/분
	모니터 컬럼	Deactivated fused silica, 1.9m × 0.1mm, (p/n 160-2635-10), 유속: 0.63mL/분	Deactivated fused silica, 1.9m × 0.1mm, (p/n 160-2635-10), 유속: 0.63mL/분	Deactivated fused silica, 4.2m × 0.1mm, (p/n 160-2635-10), 유속: 0.43mL/분
운반 가스	He	He	H ₂	
오븐	초기 50°C(유지하지 않음), 260°C까지 4°C/분, 총 52.5분		초기 50°C(유지하지 않음), 250°C까지 2.5°C/분, 총 80분	초기 40°C(유지하지 않음), 250°C까지 3°C/분, 총 70분
조절기	변조 지연	2분	2분	2분
	변조 기간	4초	3초	3초
	주입 시간	0.12초	0.1초	0.12초
소프트웨어	데이터 수집: Agilent OpenLab CDS, 버전 3.7.189, 펌웨어 개정판 2.1.0.626, 드라이버 버전: DSA GC7.7[189]. 2D-GC 데이터 분석: GC Image GC×GC Edition 소프트웨어, 버전 2021r2. (GC Image, LLC., 미국 네브래스카주 링컨)			

²D 크로마토그램(그림 1) 플로팅, 피크 식별 템플릿 생성, GC 시퀀스 처리 및 데이터 분석을 위해 GC Image 소프트웨어를 사용하였습니다.

결과 및 토의

컬럼 선택

GC×GC 분리의 성공은 GC 컬럼의 올바른 선택과 조절기의 작동 메커니즘에 크게 좌우됩니다.^{5,6} 애질런트 역방향 흐름 조절기 (RFM)는 상대적으로 작은 1차(¹D) 컬럼 유속과 훨씬 큰 2차(²D) 컬럼 유속을 사용하여 1차 컬럼 용출물을 쉽게 수집하고 2차 컬럼에 재주입하는 차등 흐름 조절기입니다. 자세한 작동 메커니즘은 참고문헌에서 확인할 수 있습니다.²⁻⁴ 작동 메커니즘에 따라 적절한 컬럼 크기를 선택하는 일반적인 규칙은 다음과 같습니다.

- 내경이 좁은 ¹D 컬럼 (내경 = 0.1-0.25mm)
- ¹D 컬럼이 짧을수록 분석이 더 빨라지고, 컬럼이 길어질수록 분리능과 피크 용량이 향상됩니다.
- 내경이 넓은 ²D 컬럼 (내경 = 0.25-0.32mm)

- ²D 컬럼 길이는 다양한 분리능 요구 사항을 충족하도록 최적화될 수 있으며, 일반적인 길이는 2-5m입니다.
- 필름 두께가 얇은 ²D 컬럼($d_f = 0.1-0.25\mu\text{m}$)

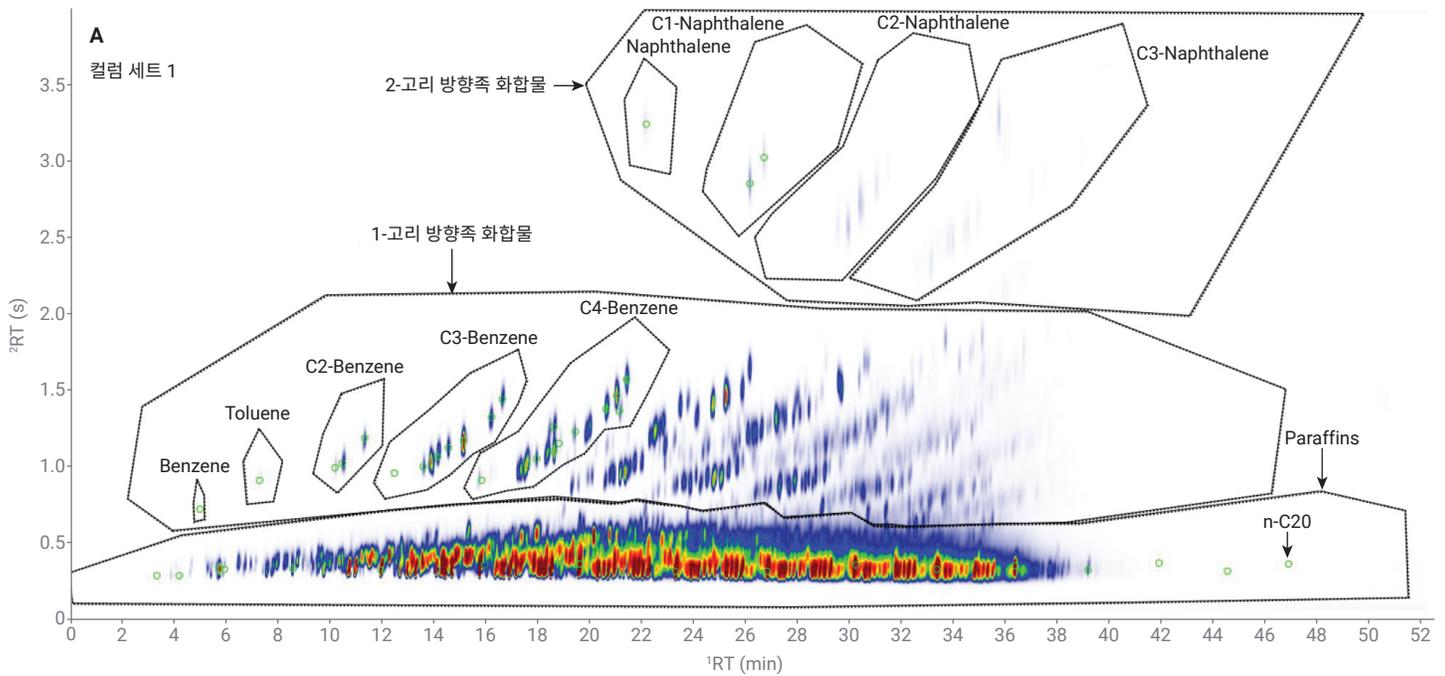
본 연구에서 방향족 화합물을 표적으로 하는 맥락에서, 비극성 컬럼을 1차 컬럼으로, 중간 극성 또는 극성 컬럼을 2차 컬럼으로 하는 순상 구성이 선택되었습니다. 두 가지 인기 있는 선택 사항인 Agilent J&W DB-HeavyWAX(폴리에틸렌 글리콜, 최대 온도 280°C)와 Agilent J&W DB-17ht((50%-phenyl)-methylpolysiloxane, 최대 온도 365°C)가 잠재적인 2차 컬럼으로 평가되었습니다. DB-HeavyWAX 컬럼은 향상된 직교성을 제공하는 반면, DB-17ht 컬럼은 극성 특성이 낮은 더 광범위한 화합물에 더 적합할 수 있습니다. 그룹 유형 분석에서는 1차원에서의 분리보다 2차원에서의 분리가 더 까다롭기 때문에 비교적 긴 2차 컬럼(5m)을 사용하였습니다.

전반적인 분석 시간을 단축하려면 짧은 1차 컬럼과 비교적 빠른 온도 프로그래밍 속도를 사용할 수 있습니다. 첫 번째 방법은 20m × 0.18mm 1차 컬럼과 4°C/분의 승온 속도를 사용했습니다. 그림 1A에 표시된 것처럼, 포화 화합물(파라핀, 이소파라핀, 시클로파라핀), 1고리 방향족 화합물, 2고리 방향족 화합물은 서로 잘 분리되어 있으며 3개의 수평 밴드로 그룹화됩니다. 각 밴드(분자 분류) 내에서 주어진 수의 탄소 원자를 갖는 개별 화합물은 "루프타일(roof-tile)" 분리 패턴을 보입니다. 분리를 더욱 향상시키려면 더 긴 1차 컬럼과 더 느린 오븐 램프를 결합할 것을 권장합니다.

두 번째 방법에서는 40m × 0.18mm 1차 컬럼과 2.5°C/분의 승온 속도가 사용되었습니다. 전체 분석 시간이 더 길었음에도 불구하고, 두 번째 방법은 분리 효율이 상당히 향상된 것으로 나타났습니다.

이는 포화 화합물 영역의 향상된 분리능과 1-고리 방향족 화합물 영역의 밀집 지역에서 확인할 수 있으며, 더 자세한 "루프타일 (roof-tile)" 효과를 보여줍니다(그림 1B). 승온 속도를 더욱 낮추고 변조 기간을 늘리면 분리 성능이 더욱 향상될 수 있지만, 분석 시간은 늘어납니다.

DB-17ht 컬럼은 극성이 낮기 때문에 DB-HeavyWAX만큼 파라핀과 방향족 화합물을 뚜렷하게 분리할 수 없습니다. 20m × 0.1mm 1차 컬럼을 선택하고 느린 승온 속도를 사용하면 그림 1C에 나타난 바와 같이 효과적인 2D 분리가 가능합니다. 더 좁은 내경의 컬럼은 더 낮은 유속에서 더 높은 선형 속도를 가능하게 하고, 분리 효율을 개선하며, 분리능을 향상시킵니다. 더불어, 세 번째 방법에서는 헬륨 대신 수소를 사용하면 분리 효율과 분리능이 향상됩니다.



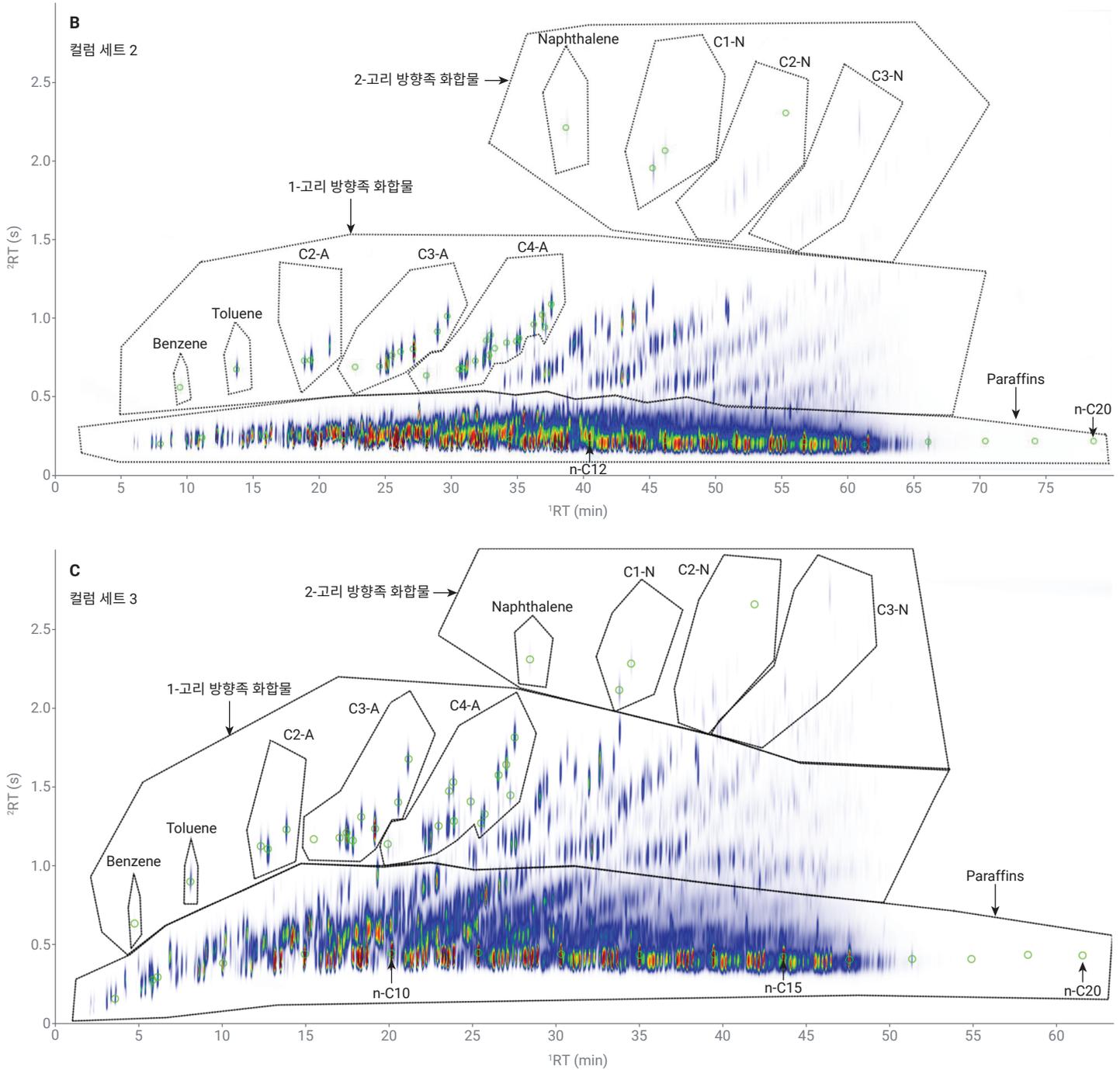


그림 1. 다양한 컬럼 세트를 사용한 GCxGC 분리. 해당 방법에 대한 자세한 내용은 표 1을 참조하세요.

반복성

피크 식별은 2D 크로마토그램에서 피크의 위치에 따라 달라지므로 RT 안정성은 GC×GC-FID 분석에 매우 중요한 특성입니다. 움직이는 부품이나 저온/고온 제트가 필요 없는 흐름 조절기는 전자 압력 제어 모듈을 사용하여 수집 채널을 통해 흐름 방향을 제어하여 조절을 실현합니다. 애질런트의 6세대 전자 전자식 기체역학 제어(Electronic Pneumatics Control, EPC) 기술을 사용하여 변조 과정을 제어함으로써 매우 안정적인 RT가 달성되었습니다. 표 2는 제트 연료에서 확인된 다양한 일반 방향족 종의 1차 머무름 시간(¹RT) 및 2차 머무름 시간(²RT) 데이터를

보여줍니다(n = 10). ¹RT는 거의 일정하게 유지됩니다. ²RT의 %RSD는 모든 화합물의 경우 0.27% 미만이며, 대부분의 경우 0.0000%에 가깝습니다. 뛰어난 RT 안정성 덕분에 사용자는 데이터 템플릿을 생성하여 불일치 걱정 없이 정기적으로 피크를 식별하는 데 사용할 수 있습니다. GC×GC-FID 시스템에서의 FID 반응은 또한 매우 반복적이며, 식별된 각 블롭(blob)의 절대 면적 %RSD는 일반적으로 2% 미만이었지만, 0.0033% 질량의 벤젠과 같이 농도가 매우 낮은 경우에는 2.95%에 도달했습니다. 정규화된 영역 %RSD는 1-3% 사이의 몇 가지 예외를 제외하면 대부분 1% 미만입니다.

표 2. 제트 연료의 RT 반복성 및 반응 반복성(n = 10).

화합물 명칭	¹ RT			² RT			피크 블롭(면적)			정규화된 질량 함량%		
	평균 (분)	표준편차 (분)	%RSD	평균 (초)	표준편차 (초)	%RSD	평균	표준편차	%RSD	평균	표준편차	%RSD
Benzene	5.0001	0.0000	0.00	0.7450	0.0000	0.00	87.2299	2.5731	2.95	0.0033	0.0001	2.80
Toluene	7.3334	0.0000	0.00	0.9335	0.0024	0.26	1,087.8271	21.2996	1.96	0.0412	0.0007	1.67
Ethylbenzene	10.2667	0.0000	0.00	1.0200	0.0000	0.00	856.3498	11.7349	1.37	0.0325	0.0004	1.11
<i>p</i> -Xylene	10.5334	0.0000	0.00	1.0400	0.0000	0.00	4,036.2063	45.6758	1.13	0.1530	0.0014	0.88
<i>o</i> -Xylene	11.4001	0.0000	0.00	1.2050	0.0000	0.00	2,287.3705	24.0038	1.05	0.0867	0.0007	0.80
Cumene	12.5334	0.0000	0.00	0.9730	0.0026	0.27	49.5900	0.9225	1.86	0.0019	0.0000	1.60
Propylbenzene	13.6667	0.0000	0.00	1.0200	0.0000	0.00	1,283.0731	13.0481	1.02	0.0487	0.0004	0.82
1,3,5-Trimethylbenzene	14.2001	0.0000	0.00	1.0900	0.0000	0.00	3,624.7463	21.0544	0.58	0.1374	0.0003	0.25
1,2,4-Trimethylbenzene	15.2001	0.0000	0.00	1.1800	0.0000	0.00	13,428.6688	78.0989	0.58	0.5092	0.0015	0.30
sec-Butyl benzene	15.8001	0.0000	0.00	0.9355	0.0016	0.17	423.1998	2.1827	0.52	0.0161	0.0001	0.31
1,2,3-Trimethylbenzene	16.2667	0.0000	0.00	1.3395	0.0016	0.12	2,281.7724	12.4335	0.54	0.0865	0.0002	0.27
Indane	16.7334	0.0000	0.00	1.4950	0.0000	0.00	1,834.6467	10.6057	0.58	0.0696	0.0002	0.30
1-Methyl-2-propylbenzene	18.0001	0.0000	0.00	1.0650	0.0000	0.00	888.4991	3.8292	0.43	0.0337	0.0000	0.12
1,2-Dimethyl-4-ethylbenzene	18.6667	0.0000	0.00	1.1100	0.0000	0.00	4,160.3922	17.0717	0.41	0.1577	0.0001	0.07
2-Methylindane	18.7334	0.0000	0.00	1.3100	0.0000	0.00	2,091.4703	11.4373	0.55	0.0793	0.0003	0.39
5-Methylindane	20.7334	0.0000	0.00	1.4250	0.0000	0.00	3,509.8385	13.9533	0.40	0.1331	0.0001	0.07
Tetraline	21.4667	0.0000	0.00	1.5850	0.0000	0.00	3,057.1203	11.6302	0.38	0.1159	0.0000	0.03
Naphthalene	22.2001	0.0000	0.00	3.2915	0.0024	0.07	177.7303	1.3303	0.75	0.0067	0.0000	0.59
2-Methylnaphthalene	26.2001	0.0000	0.00	2.9040	0.0032	0.11	608.5432	2.4912	0.41	0.0231	0.0000	0.13
1-Methylnaphthalene	26.7334	0.0000	0.00	3.0715	0.0034	0.11	255.4166	1.6593	0.65	0.0097	0.0000	0.41

직선성과 회수율

다양한 농도의 일련의 방향족 표준물질을 제조하여 개별 방향족 화합물과 응집체 그룹의 직선성을 평가하였습니다(표 3). 또한 각 농도 수준에서 이러한 표준물질의 회수율도 확인되었습니다.

표준물질에는 질량 기준으로 1-고리 방향족 화합물이 0.15-21.3%, 2-고리 방향족 화합물이 0.015-2.1% 함유되어 있습니다. 각 성분과 그룹의 R²은 0.999를 초과했습니다(그림 2). 모든 농도 수준에서 각 성분 및 그룹의 회수율은 98-114% 범위 내에 있었습니다.

표 3. 방향족 표준물질의 직선성 및 회수율.

화합물	공칭 질량 함량(%)								모든 수준의 회수율 (대략적인 %)
	수준 1	수준 2	수준 3	수준 4	수준 5	수준 6	수준 7	수준 8	
Toluene	0.022	0.044	0.087	0.175	0.350	0.708	1.400	3.066	98-101
p-Xylene	0.022	0.043	0.087	0.175	0.349	0.705	1.395	3.057	101-104
Ethylbenzene	0.023	0.046	0.092	0.186	0.371	0.749	1.482	3.247	103-107
Propylbenzene	0.021	0.043	0.086	0.172	0.344	0.694	1.374	3.009	105-110
1,3,5-Trimethyl Benzene	0.011	0.021	0.042	0.085	0.169	0.342	0.676	1.481	105-113
Indene	0.010	0.021	0.042	0.084	0.168	0.340	0.672	1.471	107-110
1,3-Diethyl Benzene	0.010	0.021	0.042	0.084	0.168	0.340	0.672	1.471	105-108
Butylbenzene	0.021	0.042	0.084	0.169	0.337	0.681	1.348	2.952	106-112
Tetralin	0.011	0.022	0.044	0.089	0.177	0.357	0.706	1.547	106-111
Naphthalene	0.008	0.015	0.030	0.061	0.122	0.246	0.487	1.067	108-112
Acenaphthylene	0.006	0.013	0.025	0.051	0.101	0.204	0.404	0.884	109-114
Acenaphthene	0.001	0.002	0.005	0.009	0.019	0.038	0.075	0.164	109-114
C2-A	0.045	0.089	0.179	0.360	0.720	1.454	2.877	6.303	102-106
C3-A	0.032	0.064	0.128	0.257	0.513	1.036	2.050	4.490	105-111
C4-A	0.042	0.085	0.170	0.341	0.682	1.378	2.725	5.971	106-110
C2-N	0.007	0.015	0.030	0.060	0.120	0.242	0.479	1.048	109-114
1-고리 방향족 화합물	0.151	0.302	0.606	1.218	2.434	4.915	9.723	21.301	104-108
2-고리 방향족 화합물	0.015	0.030	0.060	0.121	0.242	0.488	0.965	2.115	110-113

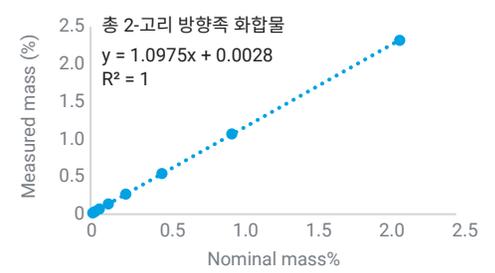
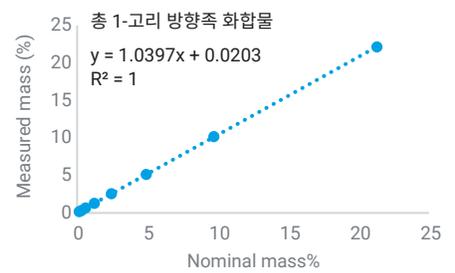
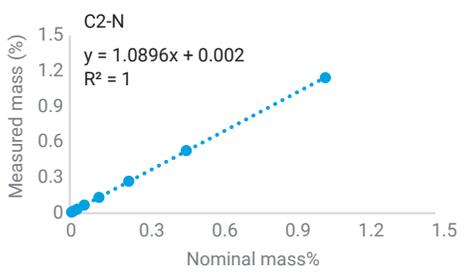
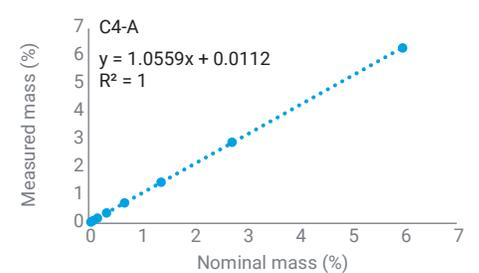
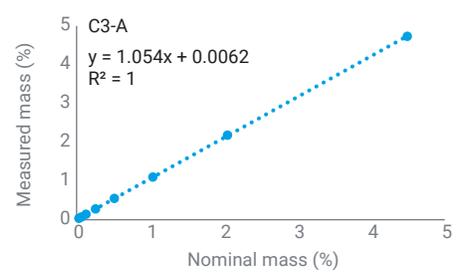
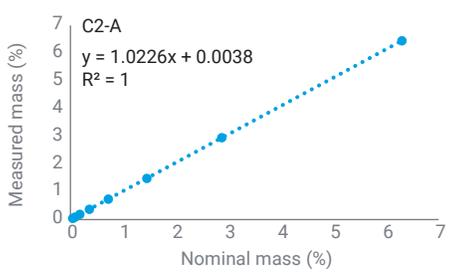
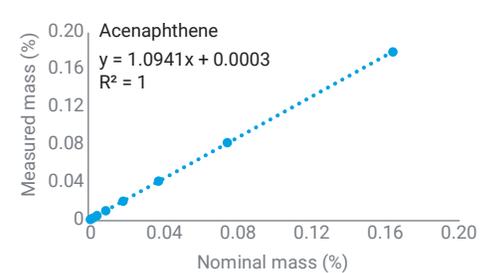
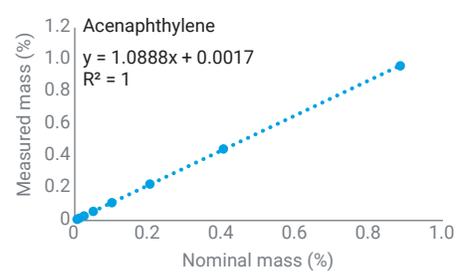
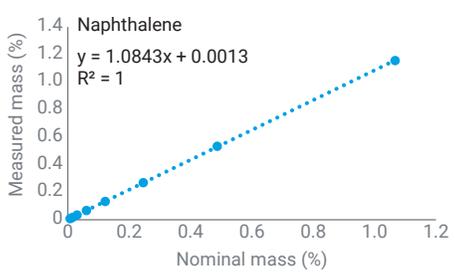
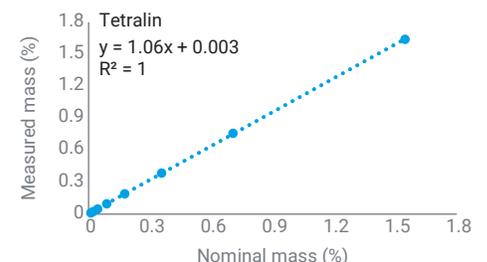
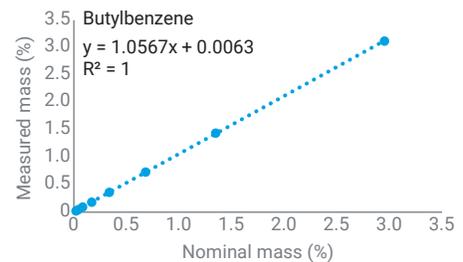
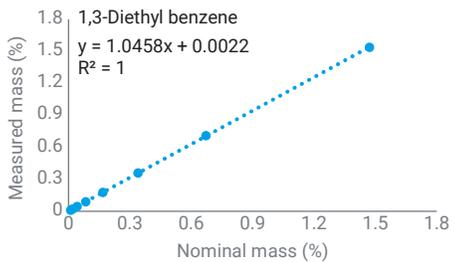
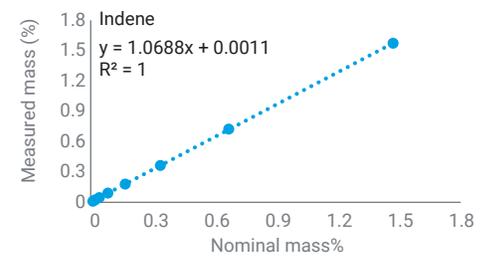
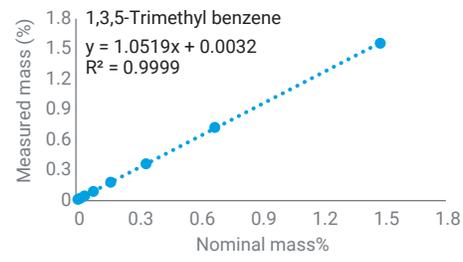
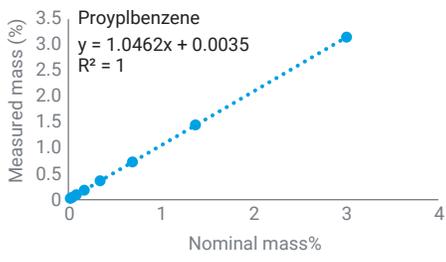
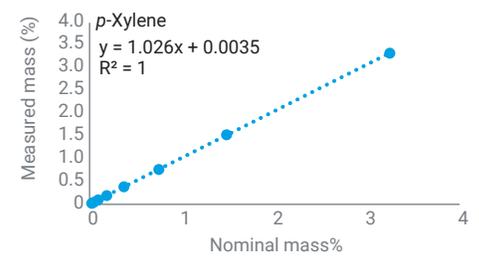
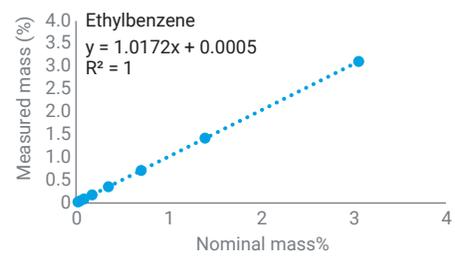
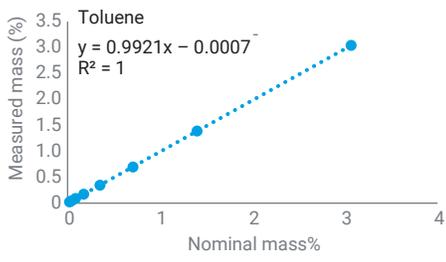


그림 2. 개별 방향족 화합물 및 그룹의 직선성.

그룹 유형 분석

그룹 유형 분석은 각 그룹 내의 합산 면적을 정규화하여 다양한 화학 그룹의 상대 존재비를 결정합니다. 이론적 또는 실험적으로 도출된 상대 감응 계수(RRF)는 일반적으로 정확한 정량화를 달성하기 위한 정규화에 사용됩니다. 다양한 성분의 RRF를 확인하기 위해 중량 혼합물을 제조했습니다. 측정된 값과 이론적인 값 사이에 높은 수준의 일관성이 발견되었습니다. 본 연구는 NB/SH/T 6078-2023 표준을 준수합니다.¹ 1,2,4-trimethylbenzene과 나프탈렌의 에틸벤젠에 대한 RRF가 0.9-1.1 범위 내에 있음을 확인한 후, 각 시료 성분이 동일한 검출기 감응(RRF = 1)을 갖는다고 가정하고 면적 정규화 방법을 적용했습니다. 두 가지 제트 연료 시료의 정량화 결과가 표 4에 제시되어 있습니다. 두 공급원의 시료 간에는 방향족 조성 분포에 뚜렷한 차이가 관찰되었습니다. 0.001%의 질량 함량의 벤젠과 같이 매우 낮은 농도 수준에서도 뛰어난 반복성(n = 10)이 입증되었습니다.

표 4. 두 가지 유형의 제트 연료에 대한 그룹 정량화.

표적	제트 연료 1		제트 연료 2	
	그룹 함량(w%)	%RSD (n=10)	그룹 함량(w%)	%RSD (n=10)
Benzene	0.001	4.00	0.003	2.33
Toluene	0.068	1.11	0.041	1.67
C2-Benzene	0.768	0.54	0.272	0.90
C3-Benzene	3.007	0.23	1.313	0.36
C4-Benzene	4.377	0.10	1.565	0.09
Naphthalene	0.125	0.12	0.007	0.59
C1-Naphthalene	0.330	0.15	0.033	1.40
C2-Naphthalene	0.172	0.18	0.050	0.24
C3-Naphthalene	0.032	0.65	0.054	0.93
1-고리 방향족 화합물	16.214	0.11	10.22	0.06
2-고리 방향족 화합물	0.661	0.15	0.152	0.49

결론

애질런트 역방향 흐름 조절기(RFM)의 흐름 조절 방식 GC×GC-FID 시스템은 제트 연료의 그룹 유형 분석에 성공적으로 적용되었습니다. 이 시스템은 높은 반복성(머무름 시간과 반응 모두), 감도, 견고성 및 정량 정밀성을 제공할 수 있다는 것이 입증되었습니다. 뛰어난 머무름 시간 안정성과 정량 정밀도 덕분에

역방향 흐름 조절기(RFM)를 사용하면 일상적인 피크 식별과 정량화를 쉽게 수행할 수 있습니다. GC×GC-FID는 제트 연료 제품 품질을 더욱 표준화하기 위해 일상적인 성분 분석을 제공하는 강력한 도구입니다.

감사의 글

이 응용 자료에 나와 있는 모든 GC×GC 데이터는 GC Image, LLC(미국 네브래스카주 링컨)의 GC×GC Edition 소프트웨어를 사용하여 생성 또는 분석되었습니다.

참고 자료

1. China State Administration for Market Regulation. NB/SH/T 6078-2023: Determination of Benzene and Naphthalene Hydrocarbons in Jet Fuel by Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography.
2. Agilent Reversed Flow Modulator. *Agilent Technologies technical overview*, publication number 5994-0157EN, **2018**.
3. Griffith, J. F.; Winniford, W. L.; Sun, K.; Edam, R.; Luong, J. C. A Reversed-Flow Differential Flow Modulator for Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography. *Chromatogr. A* **2012**, *1226*, 116-123. DOI: 10.1016/j.chroma.2011.11.036.
4. Giardina, M.; McCurry, J. D.; Cardinael, P.; Semard-Jousset, G.; Cordero, C.; Bicchi, C. Development and Validation of a Pneumatic Model for the Reversed-Flow Differential Flow Modulator for Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography. *J. Chromatogr. A* **2018**, *1577*, 72-81. DOI: 10.1016/j.chroma.2018.09.022
5. Pollo, B. J.; Alexandrino, G. L.; Augusto, F.; Hantao, L. W. The Impact of Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography On Oil & Gas Analysis: Recent Advances and Applications in Petroleum Industry. *Trends Anal. Chem.* **2018**, *105*, 202-217. DOI: 10.1016/j.trac.2018.05.007.
6. Mommers, J.; van der Wal, S. Column Selection and Optimization for Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography: A Review. *Crit. Rev. Anal. Chem.* **2020**, *1-20*. DOI: 10.1080/10408347.2019.1707643.

www.agilent.com

이 정보는 사전 고지 없이 변경될 수 있습니다.

© Agilent Technologies, Inc. 2024
2024년 9월 11일, 한국에서 인쇄
5994-7775KO

한국애질런트테크놀로지스(주)
대한민국 서울특별시 서초구 강남대로 369,
A+ 에셋타워 9층, 06621
전화: 82-80-004-5090 (고객지원센터)
팩스: 82-2-3452-2451
이메일: korea-inquiry_lsca@agilent.com