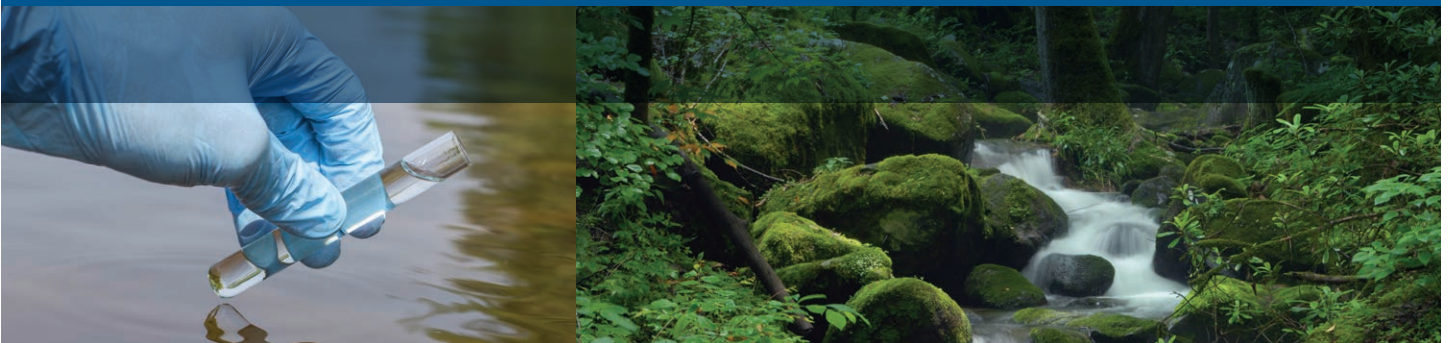


# 규제받는 PFAS 환경의 과제 해결을 위한 준비





# 수십 년 동안 형성된 공중 보건 위기

PFAS(Per/polyfluoroalkyl substances)는 고유한 성질로 인해 산업과 제조 현장에서 널리 사용되는 인공물질입니다. 비접착성 조리기구, 의류 얼룩 제거제, 식품 포장 재료, 세제, 청소용품, 화재진압용 거품과 같은 다양한 응용 분야에서 수십 년 동안 사용되어 온 화합물입니다. PFAS가 광범위하게 사용되면서 환경 어디에서나 검출되는 상황에 이르렀습니다. 연구에 따르면 PFAS는 대부분의 사람 체내에도 존재합니다. PFAS 화합물에 대한 연구를 통해 이러한 화합물(특히, 탄소 사슬 길이가  $C_7$  이상인 PFAS)의 잔류성과 생물축적성이 확인되었습니다. 일부 PFAS 화합물은 또한 종양 및 갑상선 교란과 같은 독성 효과를 일으키기도 합니다.<sup>1</sup> 이로 인해 수질 및 토양에 대한 규제 지침뿐만 아니라 이러한 화합물에 대한 모니터링 및 식별이 가속화되었습니다.

<sup>1</sup>US EPA. 2020. *Basic Information On PFAS* | US EPA.



화재진압용 거품에는 불길을 잡는 데 도움이 되는 PFAS가 포함되어 있는 경우가 많습니다.

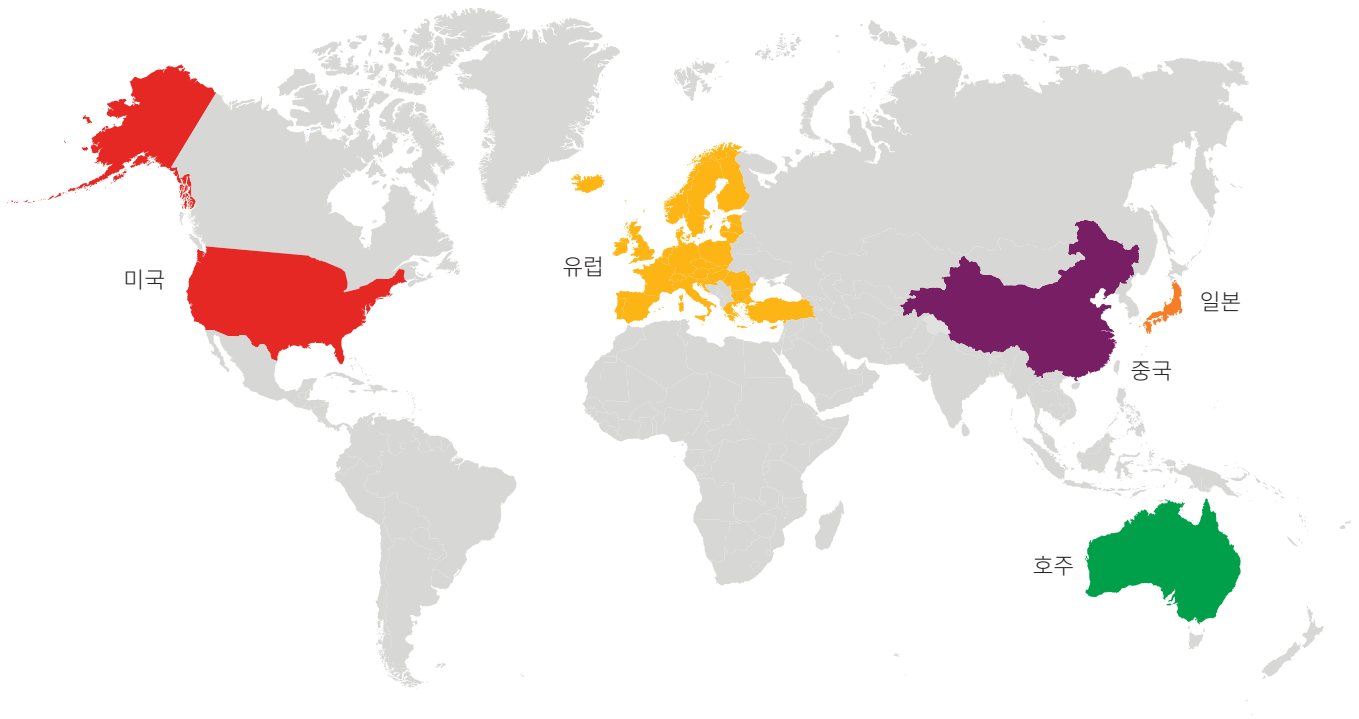
# 규제 개요



상업용으로 제조되어 알려진 PFAS 화합물은 4,000가지가 넘습니다. 이 중 극히 일부에 대해서만 규제 지침과 제한이 적용되기 때문에 나머지 화합물은 규제를 받지 않고 사용되고 있습니다.

- 2009년 **스톡홀름 협약**에서 PFOS(perfluorooctanesulfonic acid) 및 그 염이 잔류성 유기 오염물질(POP)로 지정되었습니다. 모든 당사국은 해당 화합물의 환경으로의 방출을 근절해야 할 의무가 있습니다
- **유럽연합(EU)의 물관리지침**은 PFOS를 "수생태계에 심각한 위험"을 야기하는 우선관리대상 유해 물질로 규정하고 있습니다. Directive 2013/39/EU에 따르면, 내륙 지표수의 경우에는 연간 평균 환경 품질 표준(AA-EQS)이 0.65ng/L, 기타 지표수의 경우에는 AA-EQS가 0.13ng/L로 규정되어 있습니다. EU 먹는 물 지침은 2021년부터 먹는 물에서 최대 20가지의 PFAS 화합물에 대한 일상적인 모니터링하는 것을 목표로 합니다
- **UK 화학물질 조사 프로그램**은 PFOS 및 PFOA(perfluorooctanoic acid)의 측정치를 0.09ng/L까지 낮출 것을 요구하고 있습니다. 이와 마찬가지로, 2018년 10월 유럽연합 의회는 먹는 물 내 PFOS 및 PFOA 모니터링에 대한 한계를 변경하는 방식으로 먹는 물 지침을 개정하기 위한 제안을 승인했습니다. 새로운 한계는 100ng/L로 규정했으며, PFAS를 합한 농도는 500ng/L(COM (2017) 753 1.2.2018) 미만으로 제한했습니다
- **북유럽 지역**의 국가를 포함한 여러 유럽 국가에는 먹는 물 및 지표수의 PFAS에 대한 농도 지침이 마련되어 있습니다. **스웨덴**의 경우 먹는 물에 함유된 총 11가지 PFAS 총 농도에 대한 권장값을 90ng/L로 제한하고 있습니다
- **미국의 경우** US EPA는 먹는 물 내 PFOS 및 PFOA의 총 권장 농도를 70ppt(ng/L)로 정해 놓았습니다. 여러 국가에는 PFOA, PFOS, 기타 PFAS(예: PFNA(perfluorononanoic acid) 및 GenX)에 대한 자체 권고 농도를 낮은 ppt 범위로 정해 놓고 있습니다. 다른 계획들도 진행되고 있습니다. 여기에는 **PFAS 조치 법(2019년 1월)**, **US EPA의 PFAS 조치 계획(2019년 2월)**, **PFAS 먹는 물 표준에 대한 US EPA 협약(2019 2월)**이 포함됩니다
- **호주, 중국, 기타 국가들**은 낮은 ng/L~pg/L 수준에서 검출되는 PFOA, PFOS, 신종 PFAS에 대한 먹는 물 및 방류수 (receiving water) 규정과 관련한 제한을 실행하거나 최대량을 정하고 있습니다

새로운 PFAS가 환경에서 검출되고 더 많은 독성학 정보를 확인할 수 있게 되면서 더 많은 지침과 규정이 생성될 것이라는 점은 의심할 여지가 없습니다.



엄격한 PFAS 모니터링 규정이 제정되고 있는 글로벌 지역.

환경에서 PFAS 분석을 위한 현재의 표준 및 합의 분석법.

분석법	테스트된 매트릭스	분석물질 수	시료 전처리 절차	정량 기법
EPA 533	먹는 물	25	고체상 추출	등위 원소 희석
EPA 537	먹는 물	14	고체상 추출	내부 표준물질 보정
EPA 537.1	먹는 물	18	고체상 추출	내부 표준물질 보정
EPA 8327(초안)	지표수, 지하수, 유입 폐수 및 유출 폐수	24	시료 희석 주입(Dilute and shoot) 분석법	외부 검량(등위 원소 희석 또한 허용됨)
ASTM 7979	지표수, 지하수, 유입 폐수 및 유출 폐수	21	시료 희석 주입(Dilute and shoot) 분석법	외부 검량(등위 원소 희석 또한 허용됨)
ASTM 7968	토양 및 고체	21	MeOH를 사용한 유기 물질 추출	외부 검량
ISO/DIS 21675	먹는 물, 바닷물, 담수, 폐수 (<0.2% 고형물)	30	고체상 추출	내부 표준물질 보정

# PFAS 회수율 극대화과 오염 최소화를 위한 시료 전처리 기법

PFAS는 의류, 보호 장비, 소비재에 광범위하게 사용되기 때문에 전 세계 모든 지역의 환경 시료와 인간에게서 확인되고 있습니다. 수집 및 보관 과정에서 시료가 PFAS에 의해 오염되는 것을 예방하기 위해 다음 모범 수행 방법을 사용하십시오.



### 해야 할 일:

- 깨끗하게 세척한 실험실 가운과 니트릴 장갑을 착용하십시오
- US EPA 및 ASTM 분석법에서 권장하는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 또는 폴리프로필렌(PP) 용기와 캡을 사용하십시오
- 시료를 보관할 때는 6°C 미만의 온도에서 냉장 보관하십시오

### 하면 안되는 일:

- 샘플링 중에는 선크림 및 핸드크림 등 개인 위생용품을 사용하지 마십시오
- PFAS 또는 얼룩 방지 물질을 사용했을 수 있는 방수 의류 또는 신발을 착용하지 마십시오
- PTFE(polytetrafluoroethylene) 또는 기타 PFAS 포함 플라스틱을 함유할 수 있는 시료 수집 기구를 사용하지 마십시오
- 시료 용기의 입구를 알루미늄 호일로 덮지 마십시오. 호일에서 PFAS가 이전될 수 있습니다

적절한 시료 정제 및 농축은 견고하고 정확하며 신뢰할 수 있는 분석에 매우 중요합니다. 세계 크로마토그래피 선두 기업인 애질런트는 까다로운 사양에 맞춰 생산되는 혁신적인 LC 컬럼, 고체상 추출 (SPE) 카트리지, 바이알, 필터를 통해 고객의 노력을 지원합니다. 모든 제품은 신뢰성 있는 PFAS 분석을 위해 엄격한 조건에서 테스트를 거칩니다.



## 물에서 PFAS 추출

EPA 537 및 533을 포함하는 여러 규제 분석법은 SPE 카트리지를 사용하여 먹는 물에서 PFAS를 추출한 후 LC/TQ 분석을 할 것을 요구합니다. 일반적으로 약 음이온 교환(WAX) 카트리는 EPA 533 및 ISO 분석법에서와 같이 우수한 회수율로 더 짧거나 더 긴 사슬 PFAS를 추출할 수 있기 때문에 권장합니다. EPA 537은 중간 사슬 및 긴 사슬 PFAS에 대해 높은 회수율을 제공하는 Agilent Bond Elut LMS 카트리를 사용합니다.

기기, 컬럼, 소모품부터 전 세계 범위의 신속한 배송 및 수십 년의 분석법 개발 전문 지식까지, 애질런트는 PFAS 테스트를 위한 모든 워크플로를 지원합니다.

- 40%~70%의 평균 회수율
- 19%보다 높은 RSD

30개의 PFAS가 모두 회수되었으며, US EPA 537 화합물의 회수율은 70%~130%이고, 두 가지 물 품질에 대한 RSD는 모두 15% 이하입니다. 이러한 결과는 US EPA 분석법 QA/QC 요구사항을 준수합니다. 또한 30개 화합물 중 4개만 회수율이 70% 미만이었지만, 4개 화합물 모두 40% 이상이었습니다. US EPA 분석법의 14개 화합물은 Agilent WAX SPE 카트리를 사용하여 허용 가능한 수준의 회수율을 나타냈습니다. ASTM 목록의 화합물을 포함한 16개 다른 화합물의 PFAS 회수율도 높았으며, 이 분석법을 사용해 분석할 수 있습니다.

이름	LC 등급 물 평균 회수율	LC 등급 물 RSD(%)	수돗물 평균 회수율	수돗물 RSD(%)
<b>EPA 537 화합물</b>				
PFBS	85	14	99	1
PFDA	101	5	95	6
PFDoA	86	3	88	2
PFHpA	105	10	101	3
PFHxS	97	15	102	1
PFHxA	104	8	107	2
PFNA	100	5	104	3
PFOS	92	13	94	3
PFOA	102	10	106	2
PFTrDA	91	3	103	15
PFUdA	100	6	102	3
PFTTrDA	91	3	103	15
N-MeFOSAA	84	11	79	10
N-EtFOSAA	84	9	89	3
<b>추가 화합물</b>				
PFDoA	86	3	88	2
PFTeDA	96	10	86	8
FOSA	57	14	67	20
FHEA	107	6	90	8
FOEA	61	13	52	14
FDEA	56	21	58	15
PFHpPA	47	27	46	14
4-2 FTS	91	10	91	13
6-2 FTS	87	16	100	6
8-2 FTS	104	10	101	10
6-2 FTUA	118	8	106	3
8-2 FTUA	96	11	78	13
PFPeS	97	15	104	2
PFHpS	83	11	83	3
PFNS	93	12	91	8
PFDS	85	4	81	6

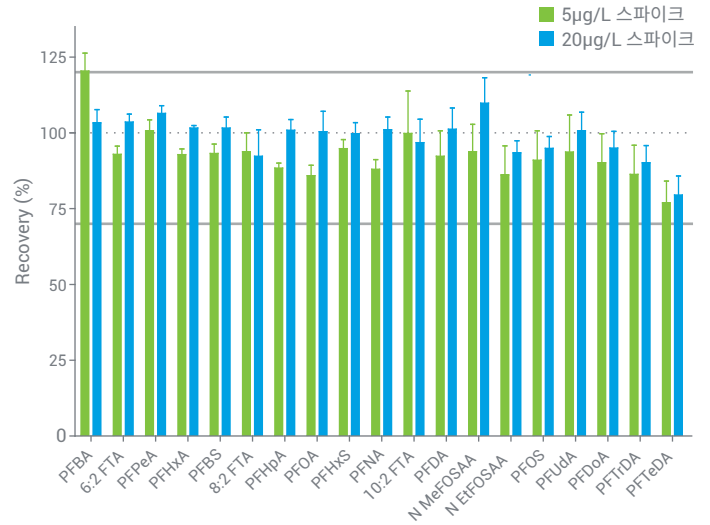
### 자세한 정보를 원하십니까?

응용 자료 '애질런트 오프라인 고체상 추출을 사용한 물 중 PFAS 추출(5994-0250EN)'을 읽어보세요.

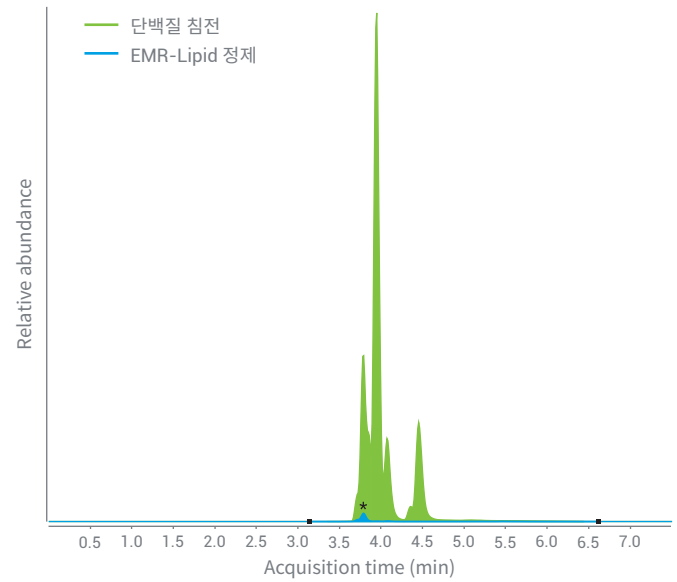
## 생물군에서 PFAS 추출

PFAS 화합물은 동물과 인체 조직에 즉시 흡수됩니다. 이러한 물질이 수년 동안 산업에서 사용되어 왔기 때문에 어류, 연어, 기타 야생동물에서와 마찬가지로 인간의 혈액과 혈청에도 만연합니다. 연구에 따르면, 더 긴 사슬 PFAS(>C7)는 생체 내에 축적될 가능성이 있어 생물군 및 생물학적 유체 내 PFAS 농도를 테스트하고 분석해야 할 필요성과 긴급성이 높아지고 있습니다.

SPE 및 SLE(Supported Liquid Extraction)는 생물학적 시료에서 수행하기에 시간이 오래 걸리고 복잡합니다. Agilent Captiva EMR-Lipid를 사용하면 PFAS 손실 없이 몇 분 만에 간섭물질, 특히, 인지질을 쉽게 제거할 수 있습니다. Pass-through 형식은 빠르고 반복 가능할 뿐만 아니라 이온 억제가 최소화되며 컬럼 수명을 연장하고 MS 세척 빈도를 줄이는 깨끗한 추출액을 제공합니다.



PFAS 회수율은 70%~130%이고 대부분 화합물의 추출 회수율은 90% 이상입니다. Agilent Captiva EMR-Lipid를 사용한 전체 추출 절차는 응용 자료 [5991-8656EN](#)에서 자세하게 설명합니다. 그리고 이 간단한 기법을 몇 분 만에 수행할 수 있는 방법을 보여줍니다.



단백질 침전과 비교한 EMR-Lipid 인지질 정제의 크로마토그래피 베이스라인. 애질런트는 PFAS 회수율에 영향을 미치지 않고 MS 세척 빈도를 줄이고 컬럼 수명을 연장했습니다.

### 자세한 정보를 원하십니까?

응용 자료 '새로운 지질 제거 흡착제와 LC/TQ를 이용한 생물학적 유체 내의 PFAS 분석(5991-8656EN)'을 읽어보세요.

# 성공을 위한 LC 구성: PFAS 제거

불소 중합체는 분석, 추출, 정제를 위해 실험실에서 사용되는 공산품을 포함하여 많은 공산품에서 일반적으로 발견됩니다. 용매, 시린지, 피펫, SPE 장치와 같은 실험실 소모품에는 시료를 오염시키고 결과를 간섭할 수 있는 극미량의 PFAS가 포함되어 있을 수 있습니다. 일부 LC 기기 부품도 극미량 수준의 오염에 기여할 수 있습니다.



## InfinityLab LC 기기: 모든 응용 분야와 예산에 맞는 효율성 제공

Agilent InfinityLab HPLC 및 UHPLC 시스템은 기존 LC 장비와 완벽한 호환성을 유지하면서 최신 기술을 제공합니다.

- Agilent 1260 Infinity II LC는 운영상의 효율성을 위해 유연하게 선택할 수 있습니다
- Agilent 1290 Infinity II LC는 차세대 액체 크로마토그래피로 우수한 분석 결과를 위한 최고의 성능을 제공합니다

## PFAS 분석에서 PFC 백그라운드 노이즈가 부정적인 영향을 미칩니까?

Agilent 1290 Infinity II LC용 InfinityLab PFC-free HPLC 전환 키트는 과불화 화합물이 없는 유동 경로를 유지할 수 있으므로 PFAS 백그라운드 노이즈를 최소화하고 엄격한 규정을 충족할 수 있습니다.

키트를 요청하려면 애질런트 온라인 스토어에서 미리 품목이 추가된 장바구니로 연결되는 간편한 [주문 가이드](#)를 사용하십시오.

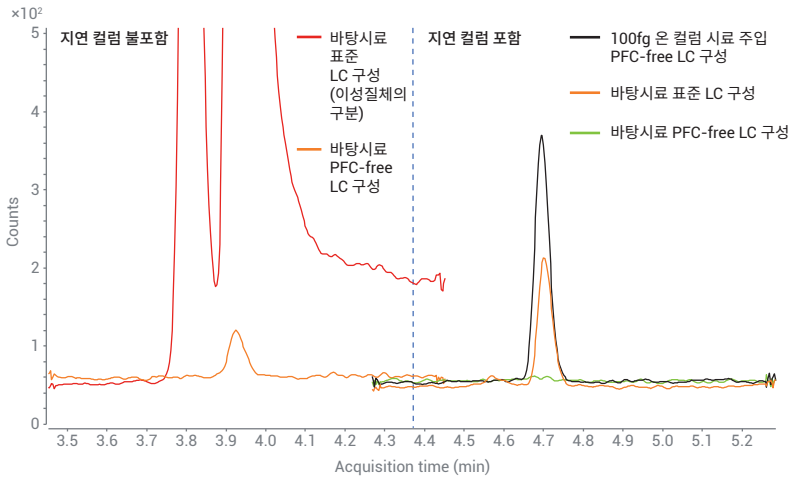


## 극미량 PFAS를 확실하게 분석하기 위한 소모품 솔루션

애질런트의 새로운 InfinityLab PFC-free HPLC 전환 키트에는 1290 Infinity II HPLC 시스템 및 고속 펌프를 PFAS 오염으로부터 보호하는 데 필요한 모든 것이 포함되어 있습니다. 여기에는 다양한 교체 부품, 튜브, 인라인 필터, 용매 용기 어셈블리, InfinityLab 지연 컬럼과 Quick Connect HPLC 피팅이 포함되어 있습니다.

EPA 537 및 533을 포함하는 여러 규제 분석법은 SPE 카트리지를 사용하여 먹는 물에서 PFAS를 추출한 후 LC/MS/MS 분석할 것을 요구합니다. 애질런트의 SPE 카트리지는 포트폴리오에는 EPA 537용 초정정 다이비닐벤젠 흡착제뿐만 아니라 더 짧은 사슬 및 신종 PFAS 화합물을 분석하는 데 필요한 약 음이온 교환 또는 WAX 카트리지가 포함되어 있습니다. 재생 셀룰로오스(RC) 멤브레인을 사용하는 Captiva 시린지 필터는 비음용수에 대한 EPA 8327 및 ASTM D7979 분석법에 설명된 PFAS 분석에 적합합니다.

완전 다공성 입자를 기반으로 하는 Agilent ZORBAX RRHD 컬럼은 강한 시료 주입 용매에 대한 내성을 높이고 고용량 주입을 가능하게 하므로 물에 함유된 PFAS 화합물 분석에 적합합니다.



### 다른 LC 시스템 구성에서의 PFHpA 바탕시료 및 시료 크로마토그램.

US EPA 533, 537.1, 8327, ISO 21675를 포함하는 규제 분석법과 38개 분석물질로 대표되는 표준물질로 Agilent PFC-free 전환 키트를 테스트했습니다. 38개 분석물질 중 36개에서 백그라운드가 검출되지 않았습니다.

### 자세한 정보를 원하십니까?

다음의 응용 자료를 읽어보세요.

[5994-2291KO](#): Agilent PFC-Free HPLC 변환 키트에 의한 PFAS 바탕값 저감

[5994-2151EN](#): 환경 추출액 내 PFAS 분석을 위한 여과

[5994-0250EN](#): 애질런트 오프라인 고체상 추출을 사용한 물 중 PFAS 추출

# 견고한 결과로 규제 지침 수준을 충족

## PFOS 및 PFOA에 대한 국제 규정

PFOS 및 PFOA는 가장 일반적으로 측정되는 두 가지 PFAS로 중국, 유럽, 미국, 일본, 호주를 포함한 여러 지역에서 규제 지침을 통해 그 농도를 제한하고 있습니다.

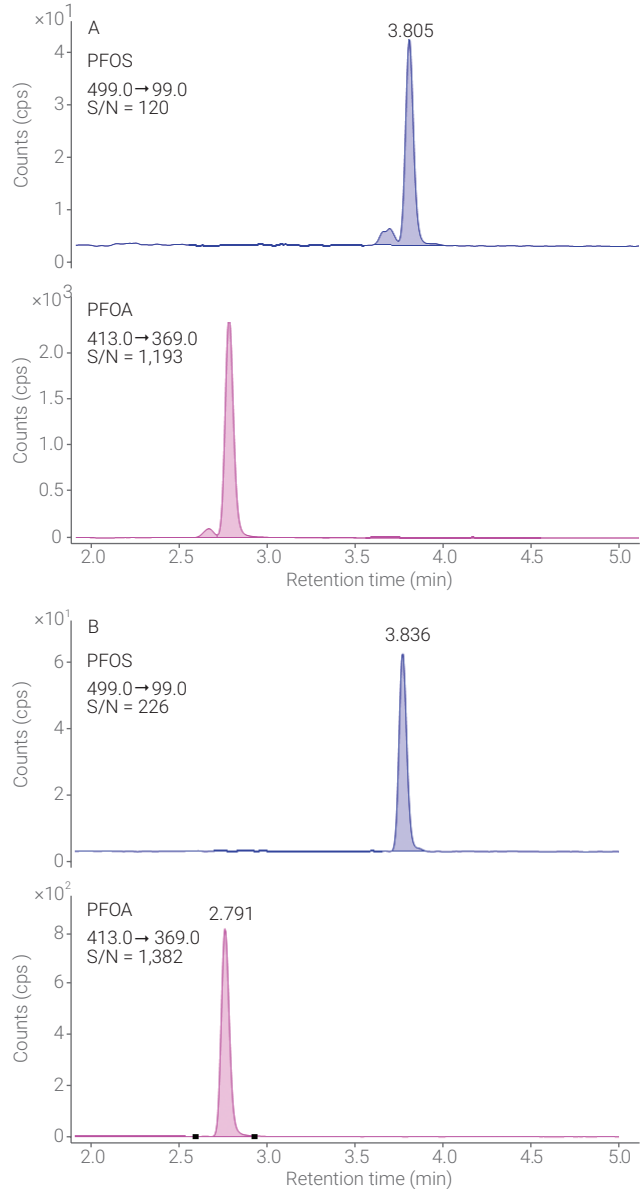
PFOS 및 그 제형은 스톡홀름 협약에서 우선관리대상 물질로 지정되었습니다. EPA의 안전 식수 지침은 PFOS 및 PFOA 농도가 70ng/L을 초과하지 않아야 한다고 규정하고 있습니다. 그러나 여러 규제기관과 지방 자치 단체에서는 물과 토양에서 낮은 한 자릿 수의 ng/L 수준의 PFAS를 모니터링하고 검출할 것을 요구합니다.

## SPE 정제를 사용하는 일반 PFAS 분석

Agilent QQQ LC/MS 시스템(LC/TQ)은 감도, 견고성, 신뢰성이 뛰어나기 때문에 일반 및 규제 대상 PFAS 대상 분석에 적합한 제품입니다. Agilent Ultivo는 WAX SPE 카트리지의 농축 및 정제 기능을 사용해 물 및 토양에 함유된 낮은 농도(ppb)의 PFOA와 PFAS를 정량화할 수 있습니다.

여기서는 Agilent WAX SPE 카트리지를 사용해 물과 토양에서 PFOA 및 PFOS를 추출했습니다.

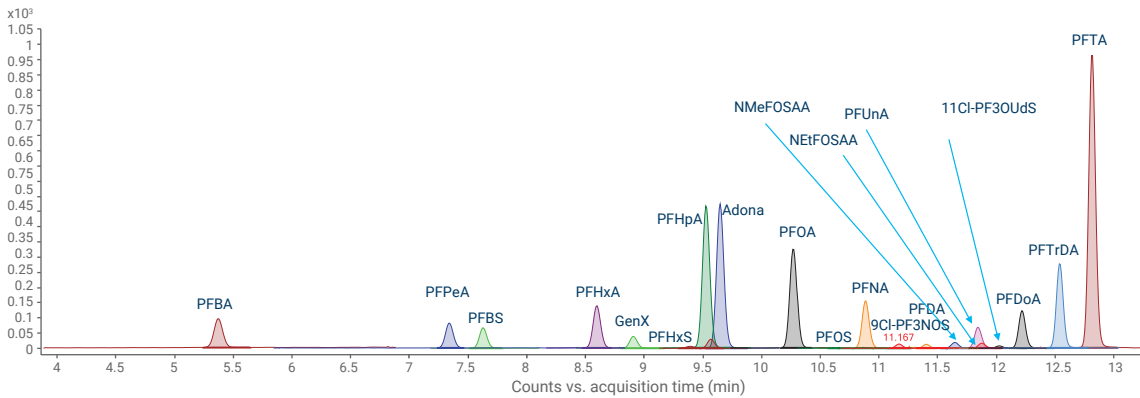
Agilent InfinityLab Poroshell 120 EC-C18 (2.1 x 100mm, 2.7µm) 컬럼을 사용해 PFOA의 선형 및 가지형 이성질체를 효과적으로 분리할 수 있습니다. 지표수, 폐수(2.5, 40, 200ng/L), 토양 및 퇴적물(0.5, 5, 20ng/g)에 함유된 두 가지 화합물은 서로 다른 스파이킹 농도에서 80~120%의 회수율을 얻었습니다.



물에 2.5ng/L 농도로 스파이크되고(A) 토양에 0.5µg/kg의 농도로 스파이크된 (B) PFOA 및 PFOS에 대한 크로마토그램. 주의: 각 화합물에 대한 정량 이온 크로마토그램만 표시되어 있습니다.

## US EPA 먹는 물 분석법

US EPA 분석법 537.1은 SPE 후 LC/TQ 분석을 사용하여 먹는 물에서 PFOS 및 PFOA를 포함한 18개의 PFAS를 분석합니다. EPA 537은 Agilent Bond Elut LMS 고체상 추출 카트리지(p/n 12255021)를 사용해 먹는 물 500mL를 추출합니다. 그 다음에는 증발시킨 후 약 96% 메탄올의 최종 추출액을 얻습니다. 다음 크로마토그램은 Agilent ZORBAX Eclipse Plus C18, 3.0 × 50mm, 1.8µm 컬럼(p/n 959757-302)을 사용한 PFAS 분리 및 검출을 보여줍니다. 시료는 Agilent Ultivo QQQ LC/MS에서 분석했습니다.

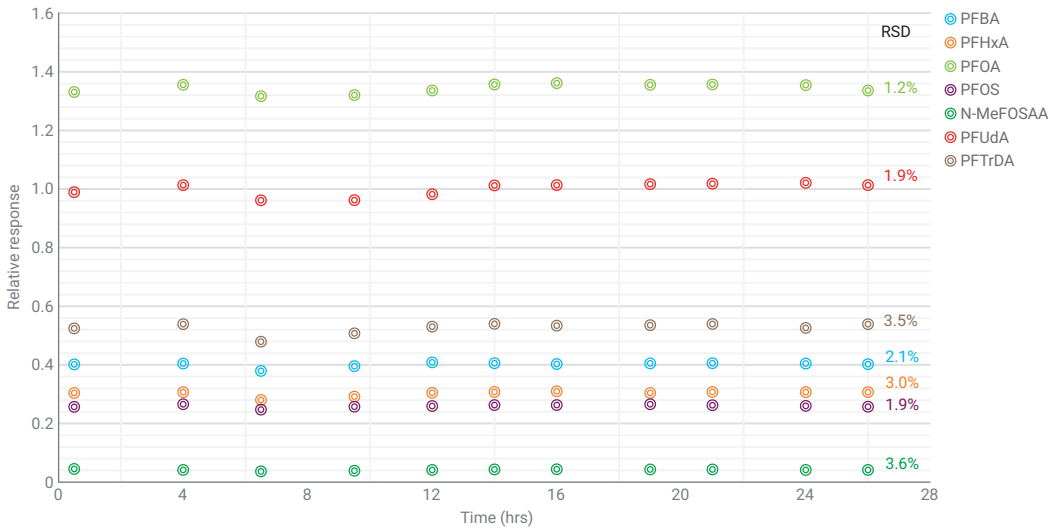


### 자세한 정보를 원하십니까?

응용 자료 '물 및 토양 매트릭스 내 PFOS 및 PFOA의 LC/TQ 측정(5994-0437EN)'을 읽어보세요.

US EPA 분석법에서 요구하는 보고 농도를 충족하고 초과하는 것 외에도, 실제 물 시료 배치 전반에서 신뢰성이 보장되어야 합니다. 여기에서는 EPA 537과 관련해 26시간의 배치에 걸쳐 11개 연속 검량 물 시료에 대한 면적 카운트에서의 상대적 반응을 보여줍니다.

Ultivo LC/TQ 시스템을 사용해 원하는 감도 및 재현성으로 PFAS에 대해 일상적인 EPA 분석법을 계속해서 실행할 수 있습니다. 필요한 공간이 작아 기존의 LC/TQ 기기 한 대를 놓는 공간에 약 3대의 Ultivo 시스템을 배치할 수 있습니다.



### 자세한 정보를 원하십니까?

응용 자료 'Agilent Ultivo QQQ LC/MS를 이용한 먹는 물 내 PFAS(Per/PolyfluoroalkylSubstances) 분석 (5991-8969EN)'을 읽어보세요.

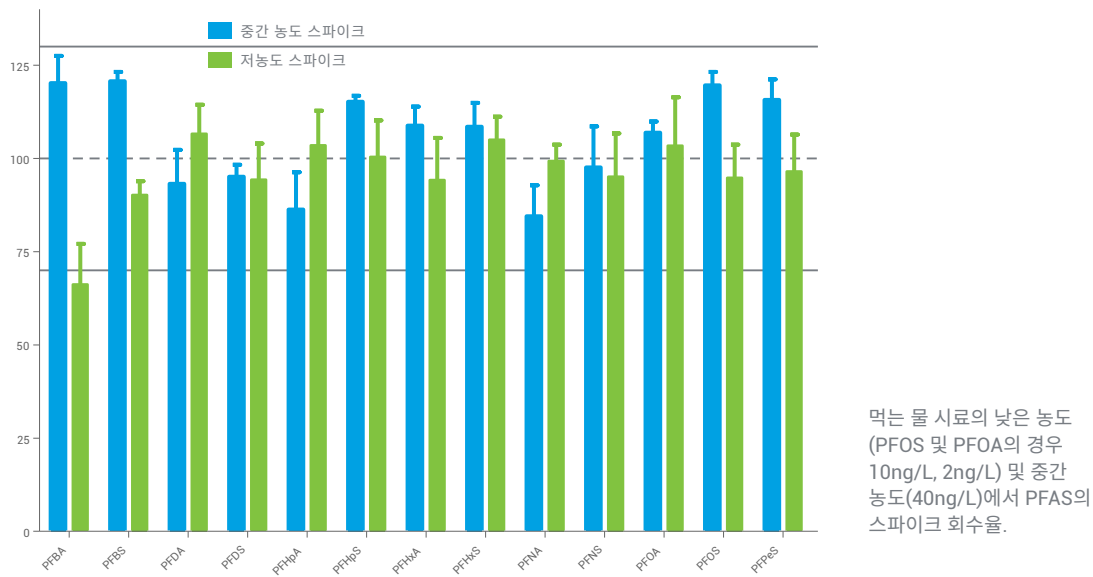
## US EPA 537 분석법을 위한 시료 전처리 제거

SPE 시료 전처리 및 추출은 정제 및 간섭 제거에서 매우 중요한 단계입니다. 하지만 시간이 오래 걸리는 지루한 작업으로 시료가 PFAS에 의해 오염될 위험이 있습니다.

EPA 분석법 537에 나열된 PFAS를 모니터링하고자 하는 실험실에는 Agilent 6495 LC/TQ 시스템이 적절한 선택안입니다. 깨끗한 물 시료에 대한 시료 전처리 과정을 없애고, 시료 수집부터 데이터 보고를 신속하게 처리할 수 있도록 합니다. 6495는 분석법 보고 수준(Method Reporting Level)을 충족하면서 뛰어난 감도와 확장된 처리량을 제공합니다.

6495 LC/TQ에서 개발된 분석법으로 EPA 537에 나열된 14개 PFAS를 정량화했습니다. 분석은 6분이 채 걸리지 않았으며, 메탄올로 약간 희석한 시료 80 $\mu$ L를 직접 주입해 0.83~3.3ng/L의 검출 수준을 달성했습니다.

다음 그래프는 두 가지 스파이킹 농도에서 이러한 PFAS의 회수율을 보여줍니다.



물에 함유된 PFAS 검출과 관련된 문제와 완화 전략에 대해 자세히 알아보려면 Arjun Venkatesan 박사 (스토니브룩 대학교(Stony Brook University))의 [주문형 웨비나](#)를 시청하세요.

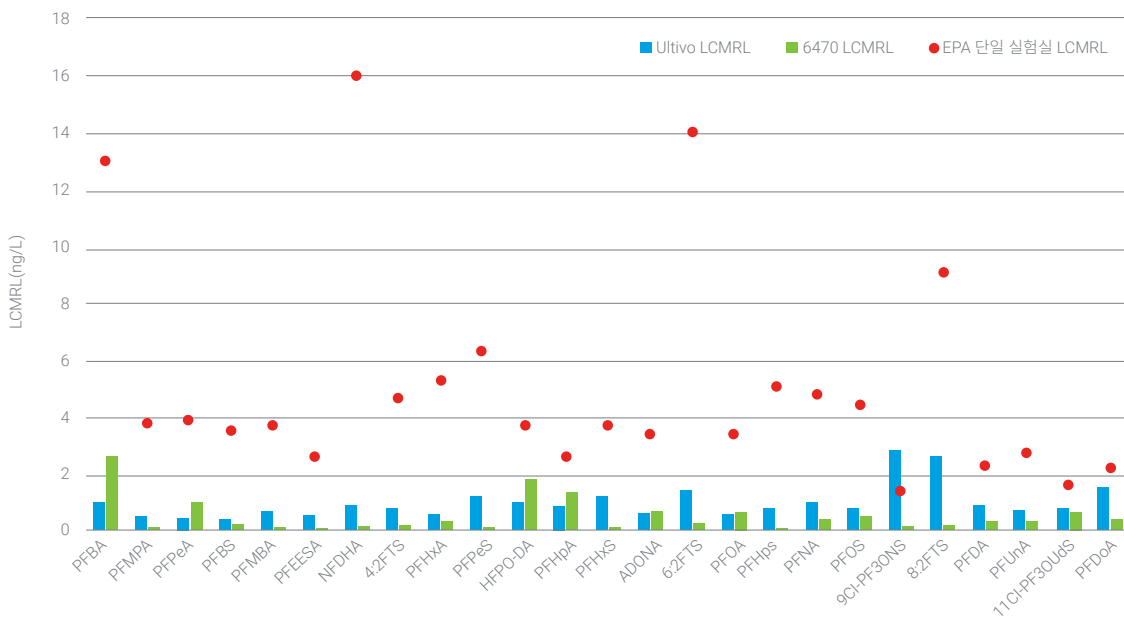
## EPA 533을 이용한 까다로운 화합물 분석

EPA 분석법 533은 C<sub>4</sub> 및 C<sub>5</sub> 산과 설폰아미드에 대한 EPA 분석법 537 및 537.1의 까다로운 화합물 일부를 다룹니다. 사슬 길이를 C<sub>12</sub> 산으로 제한하고 몇 가지 신종 PFAS를 추가했습니다.

애질런트의 시료 전처리, 소모품, Ultivo LC/TQ는 EPA 533에서 요구하는 검출 한계를 달성하는 데 필요한 도구를 제공할 뿐만 아니라 질량 분석 신규 사용자들을 위해 뛰어난 견고성과 유지보수가 편리한 기능을 제공합니다.

Agilent 6470 LC/TQ 및 Agilent Jet Stream ESI 소스는 EPA 요구사항을 뛰어넘는 감도, 정밀성, 정확성을 제공하므로 더욱 엄격해질 것으로 기대되는 규제 제한에 대비해 실험실의 미래를 준비할 수 있습니다. 시약 및 수돗물에 함유된 PFAS의 회수율은 모두 87%~103% 범위에 있었습니다.

Ultivo 및 6470 LC/MS를 사용해 EPA 533의 모든 분석물질을 대상으로 EPA에 따라 계산된 LCMRL을 EPA 단일 실험실 LCMRL과 비교했습니다.



### 자세한 정보를 원하십니까?

다음의 응용 자료를 읽어보세요.

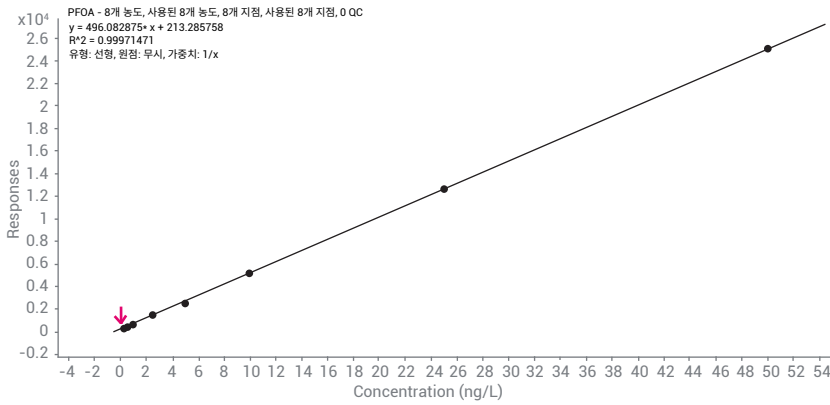
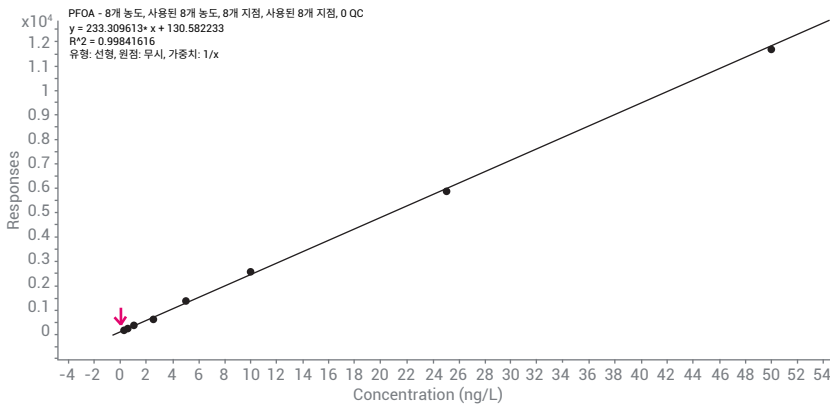
[5994-1628EN](#): Agilent 6470 LC/TQ를 사용하여 먹는 물의 PFAS(Per/Polyfluoroalkyl Substances) 분석을 위한 EPA 분석법 533

[5994-1920](#): Agilent Ultivo QQQ LC/MS를 이용한 EPA 537.1 및 EPA 533에 따른 먹는 물 중 PFAS (Per/Polyfluoroalkyl Substances) 분석

## EU 규정

EU는 수역에서 PFOS에 대한 환경 표준을 0.65ng/L로 규정하고 있으며, 연구자들은 물 중 PFOA의 보고 농도도 낮을 것으로 예상합니다. Agilent 6495 QQQ LC/TQ의 높은 감도는 직접 수용액 주입으로 이렇게 낮은 농도를 달성할 수 있게 하며, 시료 희석 주입(Dilute and shoot) 방식으로 분석을 할 수 있어 힘들고 시간 소모가 많은 시료 농축 작업을 건너뛸 수 있습니다.

6495 LC/TQ에서 직접 수용액 주입을 사용해  $R^2 > 0.99$ 로 PFOS 및 PFOA 표준물질(0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 25, 50ng/L)에 대한 이러한 선형 검량선을 생성했습니다.



0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 25, 50ng/L의 PFOS 및 PFOA 표준물질에 대한 검량선.

화합물	0.5ng/L 표준물질		1.0ng/L 표준물질	
	평균 면적	RSD(%)	평균 면적	RSD(%)
PFOS	423.3	5.3	668.3	4.9
PFOA	280.1	5.0	387.7	4.4

감도가 향상되어 재현성 또는 견고성의 저하 없이도 매우 낮은 농도에서 PFAS를 측정할 수 있습니다. 0.5ng/L 농도에서 PFOS 및 PFOA 모두에 대한 RSD는 6% 미만이었습니다.

## ASTM 및 EPA 8327 분석법

ASTM 분석법 7979-17은 지표수, 지하수, 폐수를 포함한 비음용수에서 21개 PFAS를 분석합니다. 간소화된 메탄올 희석 및 LC/TQ의 대용량(30 $\mu$ L) 주입을 사용합니다. EPA 8327은 동일한 시료 전처리 및 분석 프로토콜을 따릅니다.

간단히 말해, 이 분석법은 5mL의 시료를 5mL의 메탄올로 희석하고, 산성화 및 여과를 거쳐 LC/TQ에 주입할 것을 요구합니다. 이 시료 전처리 기법은 처리량을 높이는 동시에 오염원을 줄입니다. 이 분석법에서 대부분의 화합물에 대한 보고 농도는 10ng/L이고, 예상되는 검량 범위는 최대 400ng/L입니다. 낮은 ng/L 농도에서의 분석에는 다양한 물 매트릭스를 처리하기 위해 신뢰성과 감도가 뛰어난 질량 분석기가 필요합니다. 이 뿐만 아니라 유리 용기 및 소모품에 존재하는 모든 PFAS 오염을 제거하기 위한 전략도 필요합니다.

## 백그라운드 제거 또는 백그라운드 지연을 위한 간단한 기법

ASTM 7979를 효율적으로 수행하기 위해 애질런트 지연 컬럼을 사용하고 PTFE 함유 튜브를 PEEK로 교체해 신속하고 편리하게 PFAS 오염을 제거했습니다. Agilent 6470 LC/TQ는 ASTM 7979의 21개 PFAS 모두에 필요한 검출 한계를 달성했습니다. 신종 PFAS로 모니터링되는 ADONA 및 9CI-PF3ONS(F53-B의 성분)를 포함해 7개의 다른 PFAS도 검출했습니다.

다음 표는 하한 정량 한계(LLOQ)인 10 및 20ng/L 농도에서 Agilent 6470 LC/TQ를 사용하여 ASTM 7979 및 EPA 8327 분석법에 나열된 PFAS를 포함한 28개 PFAS에 대한 회수율을 보여줍니다. 모든 화합물에 대해 ASTM 분석법에 명시된 것처럼, 50%~150%의 회수율로 6회 반복 실험이 포함되어 있습니다. 대부분의 화합물 회수율은 80~120%였고 상대 표준 편차(RSD)는 모든 화합물에서 20% 미만이었습니다.

화합물	10ng/L에서 스파이크 회수율, %		20ng/L에서 스파이크 회수율, %	
	평균	RSD(%)	평균	RSD(%)
11Cl-PF3OUds	119	1.8	116	3.6
4:2 FTS	115	5.8	96	8.6
8:2 FTS	103	15.2	114	0.8
9Cl-PF3ONS	110	10.5	108	6.8
ADONA	107	11.1	102	4.6
N-EtFOSAA	122	12.3	111	2.7
N-MeFOSAA	118	16.4	117	17.1
PFBA	101	10.7	104	10.6
PFBS	108	8.4	117	3.2
PFDA	110	17.1	107	6.6
PFDoA	101	13.3	106	13.3
PFDS	65	36.0	90	16.7
PFEESA	55	2.3	125	6.1
PFHpA	125	15.4	114	13.6
PFHpS	83	15.5	129	8.7
PFHxA	104	5.0	118	11.7
PFHxS	114	12.6	100	11.3
PFMBA	141	4.2	125	4.6
PFNA	102	18.8	106	9.4
PFNS	100	19.4	106	18.2
PFOA	121	11.1	108	9.1
PFOS	97	9.9	116	16.3
PFOSA	94	11.1	94	10.0
PFPeA	105	3.9	111	2.9
PFPeS	106	9.3	99	15.6
PFTreA	100	8.0	102	8.4
PFTriA	105	10.1	106	6.6
PFUnA	116	12.4	106	1.1

10ng/L 및 20ng/L에서 ASTM 7979의 PFAS를 포함한 28개 모든 PFAS에 대한 스파이크 회수율 및 RSD(%). 전체 분석법 파라미터는 응용 자료 [5994-0678EN](#)을 참조하세요.

### 자세한 정보를 원하십니까?

응용 자료 '비음용수 내 Per/Polyfluoroalkyl Substance 분석을 위한 간소화된 빠른 분석법 (5994-0678EN)'을 읽어보세요.

# 점차 증가하는 PFAS 항목에 미리 대응할 수 있는 실험실의 미래 대비

현재 4,000종이 넘는 PFAS가 사용되는 것으로 알려져 있으며 그 종류가 계속 증가하고 있습니다.

하지만 현재 규제 모니터링 목록은 국제적으로 매우 제한된 PFAS 일부만을 대상으로 합니다. 규제 목록이 지역에 따라 다를 수 있기 때문에 얼마 지나지 않아 전 세계적으로 많은 PFAS가 추가로 모니터링 대상이 될 것으로 가정하는 것이 안전합니다.

다음 표는 물에서 분석된 16가지 종류의 기존 및 신종 PFAS를 나타내는 50개 이상의 PFAS의 분석법 검출 및 분석법 정량 농도(MDL 및 MQL)를 보여줍니다. 단일 분석법을 사용하여 diPAP, ADONA, PFESA(F-53B 성분)를 포함한 기존 및 신종 PFAS를 동시에 다룹니다. 시료는 6495 LC/TQ에서 분석했고, 향상된 감도를 활용해 검출 농도의 저하 없이 한 번의 주입으로 이러한 모든 PFAS를 분석했습니다.

결과는 아래와 같이 요약할 수 있습니다.

- 모든 화합물에 대한 장비 검출 한계(IDL)의 범위는 컬럼을 연결한 상태에서 2.5~469fg 사이였습니다
- 계산된 IDL은 PFCA, PFSA, FTS, FOSAA, CI-PFAES 종류의 22개 화합물과 FOSA, diSAmPAP, ADONA 화합물에 대해 10fg 온 컬럼 미만이었습니다
- MDL 범위는 0.28~18ng/L이었습니다 MQL범위는 0.35~26ng/L이고, 46개 PFAS의 정량 농도는 5ng/L 미만입니다
- 총 분석 시간은 12분 미만이었습니다

53개 PFAS에 대한 MDL은 US EPA 40 CFR Part 136, Appendix B, Revision 2를 바탕으로 계산했습니다. FTCA, FOSE, PFDPA는 20ng/L 농도로, 그 외의 모든 화합물은 5ng/L의 농도로 250mL의 초순수 분취물 7개에 스파이크했습니다.

SPE 추출 및 QQQ LC/MS를 사용한 PFAS 분석

화합물	MDL(ng/L)	MQL(ng/L)	추출 분석법 정확성(%)	분석법 정밀성 RSD(%)
PFBA	0.59	0.75	93	4
PFPeA	0.71	0.89	92	5
PFHxA	0.87	1.1	90	6
PFHpA	0.84	1.1	96	6
PFOA	0.28	0.35	93	2
PFNA	0.61	0.77	98	4
PFDA	0.71	0.89	98	4
PFUnA	0.80	1.0	85	6
PFDoA	1.2	1.5	93	8
PFTrA	1.4	1.8	78	12
PFTeA	0.67	0.84	93	5
PFBS	0.49	0.62	89	3
PFPeS	1.2	1.5	100	9
PFHxS	0.69	0.88	91	5
PFHpS	0.79	1.0	99	6
PFOS	0.78	1.0	95	5
PFNS	1.0	1.3	87	7
PFDS	1.1	1.3	83	8
PFDoS	1.4	1.8	72	13
ADONA	0.82	1.0	88	6
6:2 FTCA	13	17	103	16
8:2 FTCA	16	19	92	23
10:2 FTCA	17	21	67	28
6:2 FTUCA	1.7	2.1	121	9
8:2 FTUCA	1.6	2.0	111	10
10:2 FTUCA	2.8	3.6	87	19
3:3 FTCA	1.4	1.7	118	7

**자세한 정보를 원하십니까?**

응용 자료 'Agilent 6495C LC/TQ를 사용한 물 중 50종 이상의 기존 및 신종 PFAS 분석 (5994-0919EN)'을 읽어보세요.

초순수 블랭크(n=7)는 분석법 검증 시료와 함께 추출했습니다. 분석법 정확성은 예상 농도에 대한 분석법 검증 시료의 평균 회수율로서 백분율 및 상대 표준 편차로 표시했습니다.

애질런트 LC/TQ 시스템의 다목적성, 정확성, 견고성을 통해 감도 또는 처리량을 그대로 유지하면서 분석법에 여러 PFAS를 추가할 수 있습니다. 분석법에 새로운 PFAS를 추가해야 하는 경우, 애질런트 LC/MS compound optimizer가 프로세스를 자동화하고 몇 분 내에 신뢰성 있는 화합물 파라미터를 제공합니다.

또한 애질런트 컨설턴트가 PFAS를 간편하게 분석할 수 있도록 지원합니다. 수십 년 간의 경험과 MRM 및 분석법 데이터 기능을 사용해 실험실의 속도를 높이는 데 도움을 드릴 수 있습니다.

#### SPE 추출 및 QQQ LC/MS를 사용한 PFAS 분석

화합물	MDL(ng/L)	MQL(ng/L)	추출 분석법 정확성(%)	분석법 정밀성 RSD(%)
5:3 FTCA	1.8	2.3	103	11
7:3 FTCA	2.4	3.1	75	20
PFHxPA	2.9	3.4	104	17
PFOPA	4.6	5.8	100	26
PFDPA	18	26	82	10
6:2 diPAP	1.9	2.4	81	14
6:2/8:2 diPAP	1.9	2.4	123	11
8:2 diPAP	0.83	1.1	93	6
6:2 Cl-PFESA	1.3	1.7	88	9
8:2 Cl-PFESA	1.1	1.4	80	9
4:2 FTS	2.7	3.4	93	16
6:2 FTS	0.56	0.7	90	4
8:2 FTS	1.3	1.7	87	9
10:2 FTS	1.4	1.8	66	13
FOSA	0.76	1.0	70	7
MeFOSA	4.0	5.0	127	18
EtFOSA	2.1	2.7	80	19
FOSAA	3.2	4.0	91	17
MeFOSAA	1.4	1.7	106	8
EtFOSAA	1.5	1.9	93	10
MeFOSE	2.9	3.7	96	5
EtFOSE	4.9	6.2	93	9
6:6 PFPiA	1.2	1.5	74	10
6:8 PFPiA	1.8	2.3	95	12
8:8 PFPiA	3.1	4.0	138	11
diSAmPAP	3.3	3.0	76	19



정수 처리장에서 6495C LC/TQ를 사용한 PFAS의 분석, 운명 및 제거에 대한 자세한 정보는 Bradley Clarke 교수(호주 멜버른 대학교(University of Melbourne))의 [주문형 웨비나](#)를 시청하세요.

## 온라인 SPE를 사용한 PFAS 시료 전처리 자동화

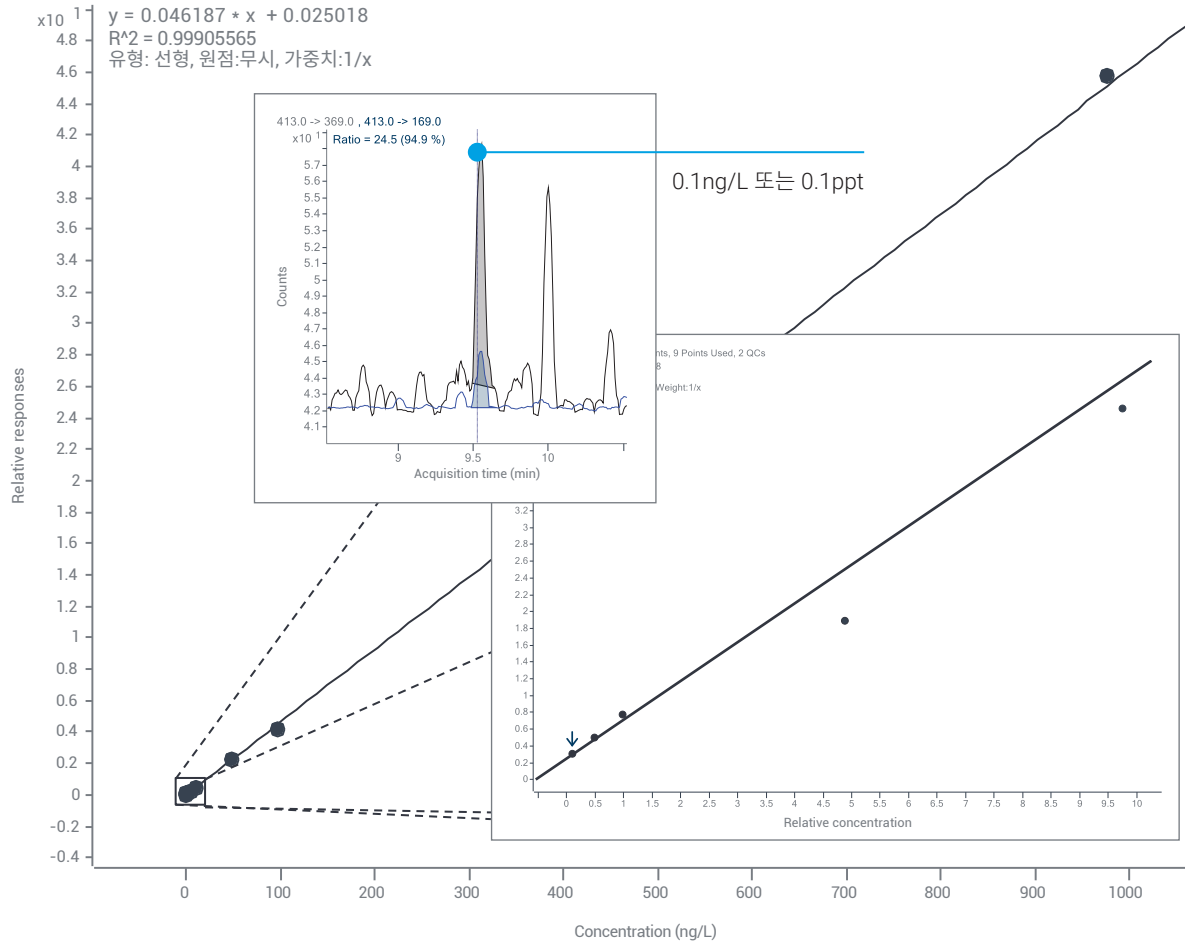
PFAS에 대한 고체상 추출은 시간이 많이 소모되는 지루한 작업일 수 있고, 전체 분석의 재현성을 낮추는 동시에 오염이 증가할 가능성이 있습니다. 자동화된 온라인 SPE는 비슷한 검출 한계를 제공하는 동시에 물 시료를 소량만 사용할 뿐만 아니라, 시료 추출과 분석을 완전히 자동화해 작업 시간을 줄이고 결과 정확성과 처리량을 크게 개선합니다. 게다가 고가의 환경친화적이지 않은 용매 사용에 따른 비용과 필요한 동위원소 표지 표준물질의 양을 줄입니다. 자동화가 복잡하게 보일 수 있지만, 가장 신뢰성이 뛰어나고 견고한 애질런트 질량분석기와 결합된 애질런트 온라인 SPE 구성은 원활한 소프트웨어 인터페이스를 제공하여 프로세스를 훨씬 간소화하고 지루한 수동형 오프라인 추출 작업의 부담을 줄여줍니다.

### 물 중 PFAS 및 신종 오염물질 분석을 위한 Agilent InfinityLab 온라인 SPE 솔루션



6470 LC/MS/MS와 함께 Agilent InfinityLab 온라인 SPE를 사용한 PFOA 분석의 직선성, 측정 범위(dynamic range)(0.1~1,000ng/L) 및 감도

PFOA - 9개 농도, 사용된 9개 농도, 9개 지점, 사용된 9개 지점, 7 QC



## 고분리능 LC/Q-TOF를 사용하여 새로운 PFAS 발견

QQQ LC/MS는 매우 낮은 농도의 알려진 PFAS를 측정하는 데 뛰어난 도구입니다. 그러나 수천 가지의 PFAS가 상업적인 목적으로 사용되고 있고, 상당수는 아직 환경에서 식별되지 않았습니다. Q-TOF 질량 분석기의 가치가 여기서 발휘됩니다.

LC/Q-TOF 기기를 사용하면 비표적 분석을 수행하여 미지 PFAS를 식별할 수 있습니다. 또한 라이브러리를 사용해 분석 참조 표준물질 없이도 PFAS를 스크리닝할 수 있습니다. LC/Q-TOF 기술을 사용하면 넓은 측정 범위(dynamic range)의 데이터를 수집할 수 있습니다. 이는 동일한 스펙트럼에서 존재량이 큰 피크 옆에 있는 극미량의 시료를 분석할 수 있다는 의미입니다. 높은 감도와 고분해능을 동시에 구현하는 애질런트 LC/Q-TOF 기기는 환경 시료에서 미지 PFAS를 식별하는 데 적합한 제품입니다.

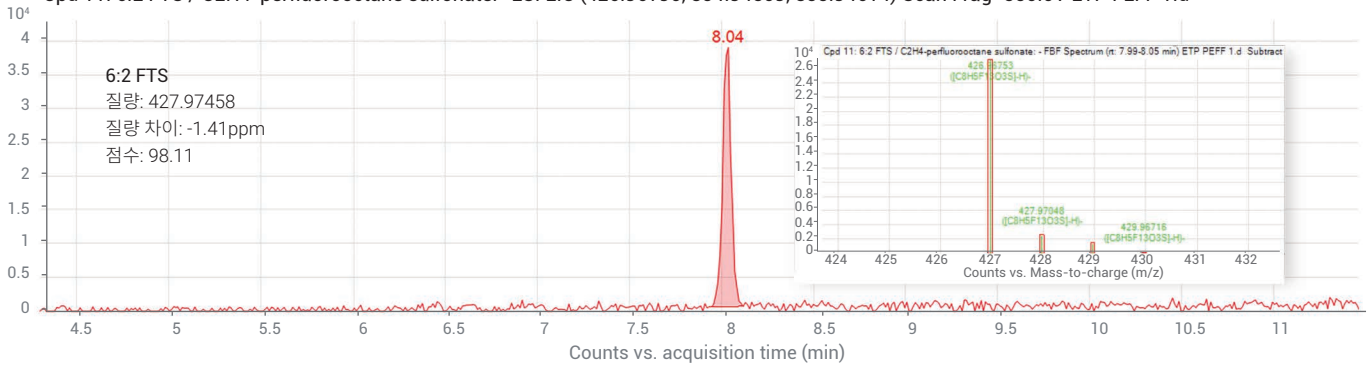


다음 스펙트럼에서는 폐수 시료에서 높은 질량 정확성과 isotopic fidelity로 6:2 FTS를 식별했습니다.  
 이후에 화합물을 참조 표준물질을 사용해 LC/Q-TOF에서의 머무름 시간과 동일함을 검증했습니다.

PFAS PCDL + Std ID 식별

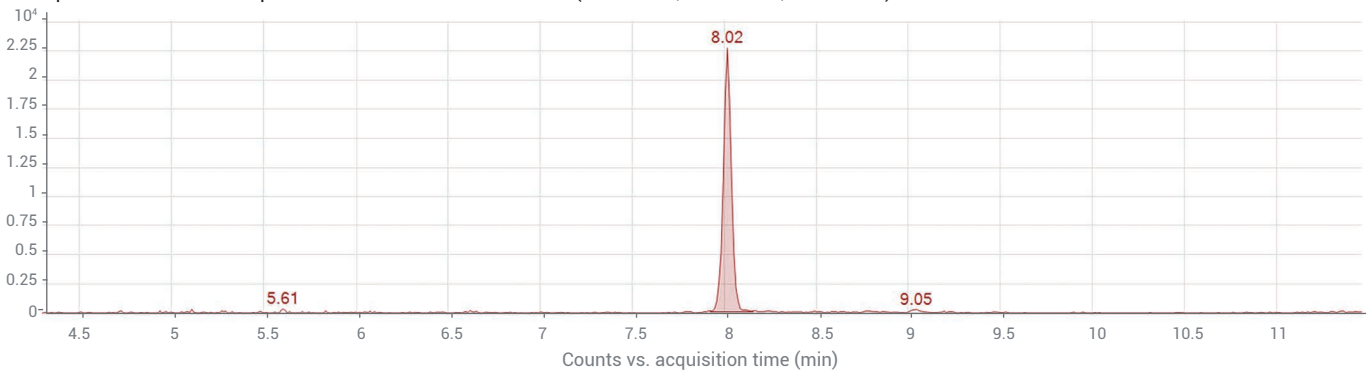
WWTP1 최종 폐수

Cpd 11: 6:2 FTS / C2H4-perfluorooctane sulfonate: -ESI EIC (426.96790, 854.94309, 855.94614) Scan Frag=350.0V ETP FEFF 1.d



표준물질

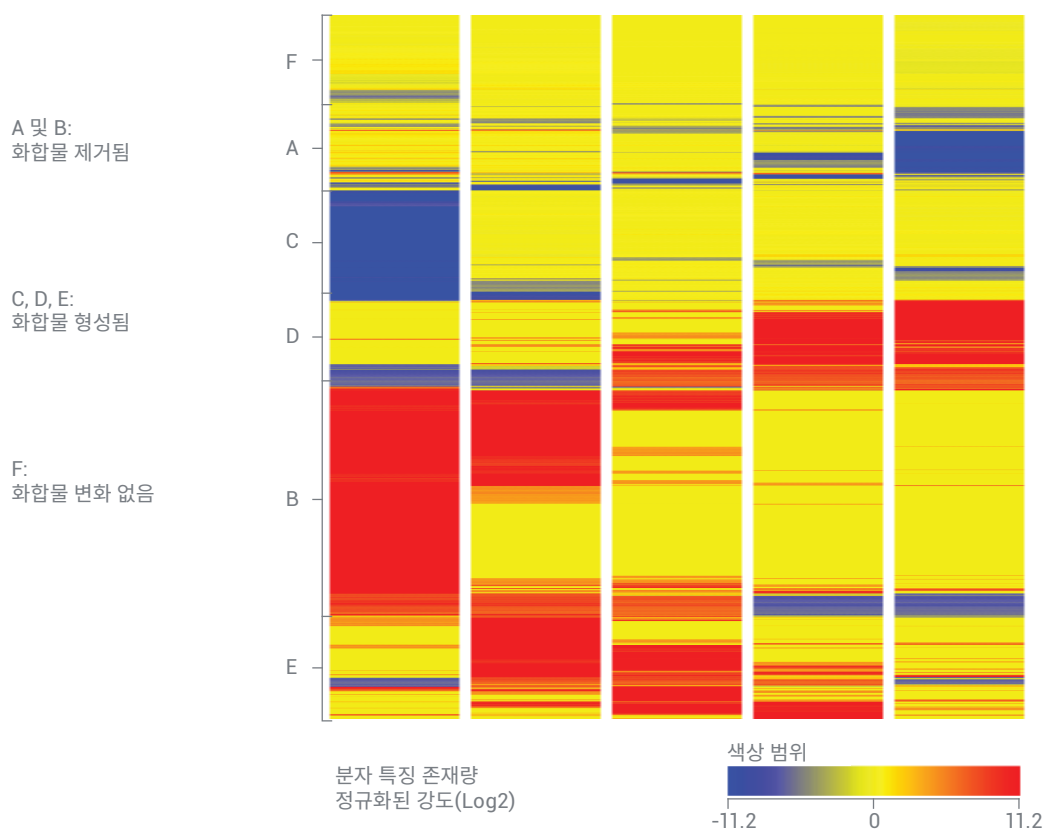
Cpd 22: 6:2 FTS / C2H4-perfluorooctane sulfonate: -ESI EIC(426.96790, 854.94309, 855.94614) Scan 6-2 FTS.d



LC/Q-TOF가 분석에서 모든 이온화 분자 종을 수집하기 때문에 회고적 데이터 마이닝을 수행해 시료 재주입 없이 화합물을 식별할 수 있습니다. 여기서는 폐수 처리장 시료의 모든 처리 단계에서 6:2 FtS 시료가 식별되었습니다. 따라서 이 화합물의 존재량을 플롯팅해 폐수 처리장의 효과를 추적할 수 있습니다.

또는 LC/Q-TOF 시스템을 사용해 PFAS 소스를 핑거프린팅하거나 수성 필름 형성 품(AFFF)에서 PFAS 조성을 연구할 수 있습니다.

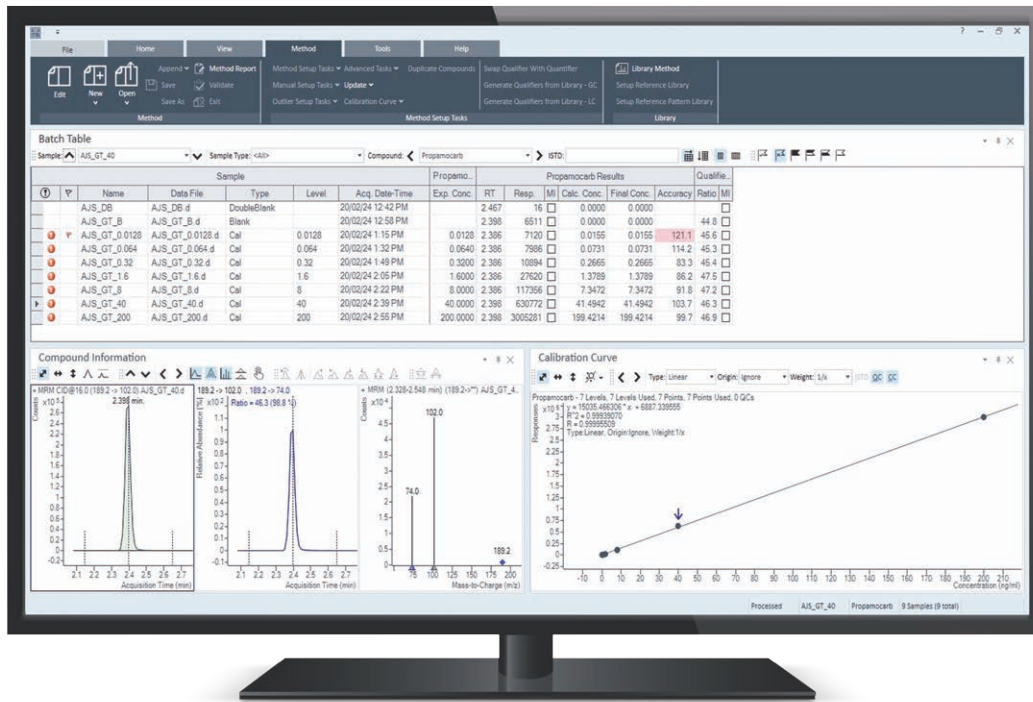
Mass Profiler Professional(MPP) 소프트웨어를 사용해 신종 PFAS를 식별하고 소스 책정 및 핑거프린팅 연구를 수행할 수 있습니다. 여기에는 주성분 분석(PCA), 계층적 클러스터링 및 Kendrick 질량 결손 플롯과 같은 통계 프로파일링 도구가 포함됩니다.



# 물 품질 데이터 수집, 분석 및 공유

Agilent MassHunter 소프트웨어 제품군의 고급 데이터 마이닝 및 처리 도구로 시료의 분석물질에서 사용 가능한 정보를 신속하고 정확하게 추출할 수 있습니다.

- 강력한 데이터 수집, 처리, 보고 도구를 활용할 수 있습니다. GC, GC/MS 및 LC/MS 기술의 포괄적인 지원으로 응용별 워크플로를 수월하게 처리합니다
- 단일 소프트웨어로 SQ, TQ, Q-TOF를 비롯한 모든 애질런트 GC, GC/MS, LC/MS 기기를 지원합니다
- Agilent MassHunter Quantitative Analysis 및 Quant-My-Way 맞춤화를 이용하여 복잡한 환경 시료 분석을 화합물 기반으로 분석하고 워크플로를 보고합니다
- 애질런트 Personal Database and Libraries를 사용하는 높은 신뢰도의 화합물 식별로 표적 및 추정 물질 스크리닝을 간소화합니다
- 소수의 PFAS 화합물에 대한 QQQ LC/MS용 Agilent PFAS MRM 데이터베이스를 사용해 표적 스크리닝 및 정량 수집 분석법을 신속하게 구축합니다



## Agilent CrossLab 서비스

CrossLab은 생산성 및 운용 효율성 향상과 같은 워크플로의 성공과 중요한 성과를 지원하기 위해 서비스와 소모품을 통합한 애질런트의 기능입니다. 애질런트는 CrossLab으로 귀하의 목표 달성을 지원하기 위해 모든 작업에 대한 가치있는 정보를 제공하려 노력합니다. CrossLab은 분석법 최적화, 유연한 서비스 계획 및 모든 기술 수준의 교육을 제공합니다. 애질런트는 최고의 성능을 위한 귀하의 기기 및 실험실 관리를 지원하는 다른 많은 제품과 서비스를 갖추고 있습니다.

[www.agilent.com/crosslab](http://www.agilent.com/crosslab)에서 Agilent CrossLab에 대해 더 자세히 알아보고, 실제 우수한 성과를 거둔 사례를 살펴보세요.



추가 정보:

[www.agilent.com/chem/environmental](http://www.agilent.com/chem/environmental)

PFAS 주문 안내 받기:

[www.agilent.com/chem/pfas](http://www.agilent.com/chem/pfas)

국가별 애질런트 고객센터 찾기

[www.agilent.com/chem/contactus](http://www.agilent.com/chem/contactus)

미국 및 캐나다

**1-800-227-9770**

[agilent\\_inquiries@agilent.com](mailto:agilent_inquiries@agilent.com)

유럽

[info\\_agilent@agilent.com](mailto:info_agilent@agilent.com)

아시아 태평양

[inquiry\\_lsca@agilent.com](mailto:inquiry_lsca@agilent.com)

RA.44141.2106018519

이 정보는 사전 고지 없이 변경될 수 있습니다.

© Agilent Technologies, Inc. 2020  
2020년 11월 24일, 한국에서 발행  
5994-1322KO

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](mailto:korea-inquiry_lsca@agilent.com)

