



Avantor PFAS Analysis Solution



PFAS 분석의 든든한 파트너: 샘플 준비부터 분리까지

PFAS 화합물은 신경 독성을 유발하고, 생식과 발달에 부정적인 영향을 주어 인체와 야생 생물 모두에 위험을 끼칠 수 있습니다. PFAS는 음용수와 토양, 폐수는 물론 식품과 포장재, 퍼스널 케어 제품, 바이오슬러지 등 우리 생활과 환경 전반에서 발견됩니다. 그렇기 때문에 PFAS를 정확히 검출하고 정량화하는 일은 연구뿐만 아니라 공중 보건과 환경 안전을 위해 반드시 필요합니다.

아반토는 연구원들이 신뢰할 수 있는 데이터를 확보할 수 있도록 완성도 높은 PFAS 분석 솔루션을 제공합니다. 특히 LC-MS 장비 분석에 적합하게 철저히 특성화된 PFAS 용매를 비롯해, 정밀하고 일관된 결과를 뒷받침하는 포트폴리오를 갖추고 있습니다. 아반토의 솔루션과 함께라면 연구 효율을 높이고, 데이터의 신뢰성을 한층 강화할 수 있습니다





과불화 및 폴리플루오로알킬 (PER- AND POLYFLUORALKYL SUBSTANCES, PFAS) 물질

과불화 및 폴리플루오로알킬 물질(PFAS)은 인공적으로 제조된 화학물질군으로, 1940년대부터 그 특유의 유용한 성질 때문에 산업과 소비재 제품에 폭넓게 사용되어 왔습니다. PFAS에는 수천 종의 화합물이 존재하며, 그중 일부는 다른 물질보다 더 광범위하게 사용되고 연구되어 왔습니다.

대표적인 예로는 과불화옥탄산(PFOA)과 과불화옥탄설폰산(PFOS)이 있으며, 두 물질은 PFAS 군에서 가장 널리 사용되고

연구된 화합물입니다. 최근 몇 년간 미국에서는 PFOA와 PFOS가 다른 PFAS로 대체되었지만, 이 화합물군의 주요 우려

사항은 여전히 존재합니다. 특히 많은 PFAS가 분해 속도가 매우 느려 인체, 동물, 그리고 환경에 장기간 축적될 수 있다는 특성이 문제로 지적됩니다

이러한 난분해성과 축적성은 PFAS가 공중 보건 및 환경 안전 측면에서 중요한 연구와 관리의 대상으로 자리 잡게 된 이유이기도 합니다.

PFAS는 어디에 존재할까요?

PFAS는 우리의 물, 토양, 공기, 식품은 물론 가정이나 직장에서 사용하는 다양한 자재 속에서도 발견될 수 있습니다. 대표적인 예시로는 다음과 같습니다:

- 음용수 - 공공 상수도 시스템과 개인 지하수에서 검출 가능
- 토양 및 수계: 매립지, 폐기물 처리장, 유해 폐기물 부지(미국 연방 슈퍼펀드 및 자원보존복구법 관리 대상 부지 포함) 주변에서 발견
- 소화용 폼: 가연성 액체 화재 진압에 사용되는 수성막포 소화약제(AFFF). 공항, 조전소, 군 기지, 소방 훈련 시설, 화학 공장, 정유소 등에서 훈련 및 비상 대응 시 사용됨
- 제조 및 화학 생산 시설: PFAS를 생산하거나 사용하는 도금, 전자제품, 섬유 및 제지 산업 등
- 식품: PFAS에 오염된 수역에서 잡힌 어류, PFAS에 노출된 가축에서 생산된 유제품 등
- 식품 포장재: 기름 방지 종이, 패스트푸드 포장지, 전자레인지용 팝콘 봉지, 피자 박스, 캔디 포장지 등
- 가정용 제품 및 먼지: 카펫·가구·의류 등 섬유 제품의 발수·발유 코팅제, 세제, 논스틱 조리기구, 페인트, 바니시, 실란트 등
- 퍼스널 케어 제품: 일부 샴푸, 치실, 화장품

- 바이오슬러지: 하수 처리장에서 발생하는 슬러지를 비료로 사용할 경우, 농경지의 지하수·지표수 오염 및 방목 가축에 영향을 미칠 수 있음

사람들은 PFAS에 어떻게 노출될까요?

PFAS는 널리 생산·사용되고 환경에서 잘 분해되지 않아 이동성과 잔존성이 높습니다. 미국 질병통제예방센터(CDC)가 실시한 조사에서도 대부분의 미국인이 어느 정도 PFAS에 노출된 것으로 나타났습니다. 일반적으로 노출 수준은 낮지만, 고농도의 오염원에 장기간 노출될 경우 체내 축적이 발생할 수 있습니다. 일부 PFAS는 시간이 지남에 따라 인체에 쌓일 수 있다는 점이 특히 우려됩니다.

현재까지의 연구에 따르면 사람들은 다음과 같은 경로를 통해 PFAS에 노출될 수 있습니다:

- 직업적 노출: 소방관, 화학 제조 및 가공업 종사자
- 음용수: PFAS로 오염된 물을 마실 때
- 식품 섭취: 특히 PFAS에 오염된 어류 등 특정 식품
- 토양·먼지 섭취: 오염된 토양이나 먼지를 삼키는 경우
- 대기 흡입: PFAS가 포함된 공기를 마실 때
- 제품 사용: PFAS가 포함된 제품을 사용하거나 PFAS 함유 자재로 포장된 제품을 사용할 때

PFAS 노출은 인체 건강에 해로울 수 있습니다.

최신 과학 연구에 따르면, 특정 PFAS에 고농도로 노출될 경우 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있습니다. 다만 PFAS의 종류, 노출 수준, 노출 기간에 따라 어떤 건강 문제가 나타나는지는 여전히 연구가 진행 중입니다. 특히 저농도라도 장기간 노출될 경우의 영향, 그리고 어린이에게 미치는 효과에 대해서는 심층적인 연구가 이어지고 있습니다.

지금까지 알려진 건강 영향

검증된 과학 연구 결과에 따르면 PFAS 노출은 다음과 같은 건강 문제와 연관될 수 있습니다:

- 생식 건강 문제: 가임력 저하, 임신부 고혈압 위험 증가
- 발달 지연: 저체중 출생, 사춘기 조기 발현, 골격 이상, 행동 변화 등
- 암 발생 위험 증가: 전립선암, 신장암, 고환암 등
- 면역력 저하: 감염 방어력 감소, 백신 반응 약화
- 호르몬 교란: 인체 내 호르몬 시스템에 간섭
- 대사 이상: 콜레스테롤 증가, 비만 위험 상승

EPA(미국 환경보호청), 다른 연방 기관, 학계 및 산업계의 과학자들은 PFAS(과불화화합물)에 대한 연구가 계속 증가함에 따라 이를 지속적으로 수행하고 검토하고 있습니다. 그러나 PFAS 노출과 관련된 건강 영향은 다음과 같은 여러 이유로 인해 명확히 규정하기 어렵습니다:

- PFAS는 수천 종에 이르며 독성 수준과 영향이 각각 다를 수 있음에도, 현재 연구는 일부 대표 물질에 집중되어 있음
- 사람마다 노출 경로와 시기가 다름
- 시간이 지남에 따라 PFAS의 종류와 사용 방식이 바뀌어 추적·평가가 복잡해짐

특정 성인과 아동은 PFAS 노출 위험이 더 높습니다

성인

일부 성인은 직업적 요인이나 생활 환경 때문에 PFAS에 더 많이 노출될 수 있습니다.

- PFAS 또는 PFAS 함유 물질의 생산·가공 산업 종사자 또는 PFAS 생산 시설 주변에 거주하거나 활동하는 사람
- 임신부·수유부: 체중 대비 물 섭취량이 평균보다 많아 상대적으로 노출이 높을 수 있음

아동

아동은 성장·발달 단계에 있기 때문에 화학물질의 해로운 영향을 더 크게 받을 수 있으며, 성인보다 노출 위험도 높습니다.

- 체중 대비 더 많은 물·음식·공기 섭취로 인해 상대적 노출 증가
- 바닥에서 기어 다니거나 물건을 입에 넣는 습관으로 인한 카펫, 먼지, 장난감, 세제 등에서 PFAS에 노출 가능성

영아의 경우, PFAS가 검출된 모유나 PFAS에 오염된 물로 제조된 분유를 통해 노출될 수 있으며, 임신 중 태아에게 전달될 가능성도 있습니다. 현재 연구에 따르면, 모유 수유는 PFAS 노출 위험이 있더라도 그 이점을 고려할 때 여전히 권장됩니다. 다만 위험과 이점을 균형 있게 판단하기 위해서는 전문가와 상의하는 것이 필요합니다.

VWR® Chemicals BDH®

PFAS(과불화 및 폴리플루오로알킬 물질) 오염에 대한 우려가 커지면서, 분석 시험 연구실은 정확한 검출과 정량화라는 중요한 과제에 직면하고 있습니다.

VWR® BDH® PFAS 전용 용매로 정확한 분석의 기준을 높이세요.

위와 같은 과제를 해결을 위해 아반토는 VWR® BDH® PFAS 등급 LC-MS 용매를 제공합니다. 엄격한 사용 적합성 테스트를 거쳐 PFAS 분석에 최적화되었으며, 극도로 낮은 PFAS 백그라운드를 구현합니다. 또한, LC-MS 기반 보완적 분석법을 통해 광범위한 PFAS 분석 대상 물질을 검출 한계까지 정량화할 수 있습니다.

- PFAS 함량 철저 검증
- LC-MS 분석용 초저(低) 백그라운드 제공



Description	Pk	Cat. No.
Acetonitrile HiPerSolv CHROMANORM® for LC-MS, PFAS grade	2.5 L	VWRC92497.320
Methanol HiPerSolv CHROMANORM® for LC-MS, PFAS grade	2.5 L	VWRC92498.320
Water HiPerSolv CHROMANORM® for LC-MS, PFAS grade	2.5 L	VWRC92499.320
Ammonium acetate 5mM in water, eluant HiPerSolv CHROMANORM® for LC-MS, PFAS grade	1 L	VWRC92500.290
Methanol >99.9% HiPerSolv CHROMANORM® for LC-MS	1 L	VWRC83638.320
Water, HiPerSolv CHROMANORM® for LC-MS	1 L	VWRC83645.320
Ammonium acetate ≥99%, HiPerSolv CHROMANORM® for LC-MS	1 L	VWRC84885.180

Avantor® ACE® PFAS Delay Column



LC-MS는 PFAS 분석의 업계 표준으로, LC 시스템에서 발생할 수 있는 PFAS 백그라운드의 영향을 줄이기 위해 딜레이 컬럼 사용은 필수적입니다. ACE 고정상은 PFAS 화합물의 최대 보류력을 제공하도록 선택되었습니다.

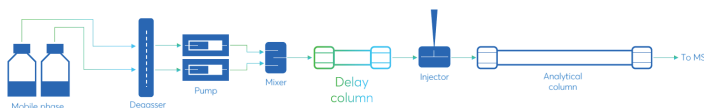
Avantor® ACE® PFAS 딜레이 컬럼은 주요 경쟁사 제품보다 더 높은 압력에서도 안정적으로 작동합니다. PFAS 분석에 흔히 사용되는 UHPLC 시스템은 최대 1000 bar까지 운용할 수 있으며, 당사의 딜레이 컬럼 역시 1000 bar까지 사용할 수 있어 다양한 HPLC 및 UHPLC 장비에서 더 넓은 실험적 유연성을 제공합니다.

Avantor® ACE® PFAS 딜레이 컬럼은 LC 시스템에서 발생하는 PFAS 백그라운드를 차단하는 간단하고 신뢰할 수 있는 솔루션입니다. 시스템 간 차이와 다양한 외부 요인으로 인해 발생할 수 있는 간섭을 줄여, 정확하고 재현성 높은 PFAS 분석을 지원합니다.

LC 장비와 이동상에서 발생하는 백그라운드 PFAS(과불화알킬물질, Perfluorinated Alkyl Substances)는 샘플 내 PFAS 검출을 방해할 수 있습니다. LC 시스템에서 오토샘플러 앞에 설치하는 딜레이 컬럼은 이러한 백그라운드 PFAS를 지연시켜, LC-MS를 통한 PFAS 분석의 정확도를 높여줍니다.

- 실리카 기반 완전 다공성 입자 딜레이 컬럼
- 범용성: 어떤 형식·규격의 분석 컬럼과도 함께 워크플로우에 적용 가능
- PFAS 분석 최적화: 시료에서 기인한 PFAS만을 정확하게 분석할 수 있도록 지원하며, 장비에서 유입되는 간섭성 PFAS의 영향을 최소화

또한, 데이터 출력 및 크로마토그램 상에서 시료 내 PFAS 피크와 백그라운드 PFAS 피크가 분리·지연되어 나타나, 보다 명확하고 신뢰성 높은 결과를 제공합니다.



Description	Cat. No.
ACE® PFAS DELAY 50 X 2.1MM	ACETACE-PFASD-0502
ACE® EXCEL 3 C18, 100 X 2.1 MM	ACETEXL-111-1002U
ACE® EXCEL 3 SUPER C18, 100 X 2.1 MM	ACETEXL-1111-1002U

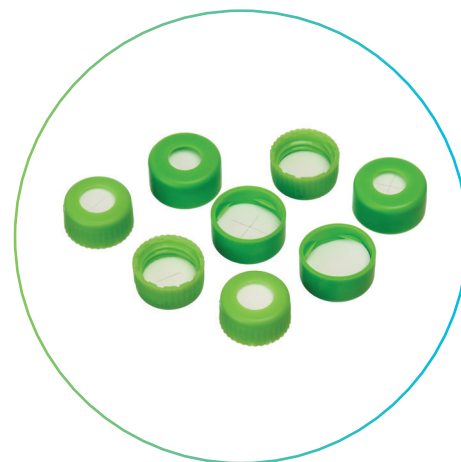
VWR® PFAS

Vials and Closures

VWR® 샘플 분석용 캡은 PFAS-FREE 결과를 보장합니다

PFAS 샘플 분석 과정에서는 PFAS가 없는 바이알과 캡을 사용하는 것이 필수적입니다. 새로운 VWR® PFAS 바이알과 캡은 수집된 데이터의 무결성을 보장하고, 모든 필수 수집 기준을 충족합니다. 아반토는 모든 일반적인 오토샘플러와 호환 가능한 다양한 바이알과 캡을 제공합니다. 이 제품들은 환경 모니터링, 식품 및 수질 검사, 제품 테스트, 산업 품질 관리, 생활용품 평가, 식품 포장재 및 샘플 분석에 권장됩니다.

밝은 연두색의 VWR® PFAS 캡은 안전하고 재현성 높은 PFAS 분석을 보장하여, 깨끗한 환경을 위한 현명한 선택입니다.



VWR® PFAS 2-IN-1 KITS SHORT THREAD VIALS AND CLOSURES

Description	Packaging	Cat. No.
PFAS KIT: 1.5 ml PP short thread vial, 32 x 11.6 mm, transparent, with filling lines; 9 mm PFAS PP short thread Cap ND9, light-green, with hole; silicone white/polypropylene transparent, for PFAS analysis	10 Kits per outer box (1 Kit = 100 PP vials and 100 caps)	VWRI548-7000A
	1 Kit = 100 PP vials and 100 caps	VWRI548-7001A
PFAS KIT: 1.5 ml PP short thread vial, 32 x 11.6 mm, transparent, with filling lines; 9 mm PFAS PP short thread Cap ND9, light-green, with hole; silicone white/polypropylene transparent, for PFAS analysis	10 Kits per outer box (1 Kit = 100 PP vials and 100 caps)	VWRI548-7005A
	1 Kit = 100 PP vials and 100 caps	VWRI548-7009A
1.5 ml PFAS vial with write on patch, borosilicate glass 5.1, clear, 9 mm PFAS PP Short Thread Cap ND9, light-green, with hole silicone white/polypropylene transparent, SLIT, for PFAS analysis	1 Kit = 1000 vials and 10x100 caps	VWRI548-7014A
1.5 ml PFAS vial with write on patch, borosilicate glass 5.1, clear, 9 mm PFAS PP short thread cap ND9, light-green, with hole silicone white/polypropylene transparent, for PFAS analysis	1 Kit = 1000 vials and 10x100 caps	VWRI548-7015A

VWR® PFAS SHORT THREAD VIALS AND CLOSURES OVERVIEW ABOUT THE SINGLE ITEMS

Description	Packaging	Cat. No.
1.5 ml PFAS PP short thread vial, 32 x 11.6 mm, transparent, with filling lines	100 PP vials per PP-box	VWRI548-7002A
9 mm PFAS PP short thread cap ND9, light-green, with hole; silicone white/polypropylene transparent, for PFAS analysis	100 caps per PE-bag	VWRI548-7003A
9 mm PFAS PP short thread cap ND9, light-green, with hole; silicone white/polypropylene transparent, slit, for PFAS analysis	100 caps per PE-bag	VWRI548-7012A
1.5 ml PFAS vial with write on patch, borosilicate glass 5.1, clear	1000	VWRI548-0029A



제품 특징

- PFAS는 분해가 거의 불가능한 영구 화학물질로 알려져 있으며, 독성이 있어 인체 건강에 해롭습니다. 현재 1,000종 이상의 화학물질이 해당 그룹에 속합니다.
- 많은 일상용품에 이러한 문제가 되는 물질이 포함되어 있으며, 직접적으로 또는 환경을 통해 인체에 흡수될 수 있습니다.
- 음식 또한 주요 노출 경로가 될 수 있으며, 오늘날 거의 모든 사람들의 혈액에서 PFAS가 검출되고 있습니다.
- 불소 화합물은 분해가 거의 불가능해 환경에 남아 있으며, 인체 내에서도 장기간 축적될 수 있습니다. 연구에 따르면 이러한 화학물질은 암 발병 위험을 증가시킬 수 있습니다.
- 2023년 2월부터 이 화학물질에 대한 사용 금지에 대한 초기 제안이 논의되고 있습니다.



VWR® PFAS 2-IN-1 KITS SNAP RING VIALS AND CLOSURES

Description	Packaging	Cat. No.
PFAS KIT: 0.7 ml PP snap ring micro-vial, 32 x 11.6 mm, transparent; 11 mm PFAS PE snap ring cap, light-green, with hole; silicon white/transparent polypropylene, for PFAS analysis	10 Kits per outer box (1 Kit = 100 PP vials and 100 caps)	VWRI548-7004A
	1 Kit = 100 PP vials and 100 caps	VWRI548-7011A
PFAS KIT: 0.7 ml PP snap ring micro-vial, 32 x 11.6 mm, transparent; 11 mm PFAS PE snap ring cap, light-green, with hole; silicon white/transparent polypropylene, SLIT, for PFAS analysis	10 Kits per outer box (1 Kit = 100 PP vials and 100 caps)	VWRI548-7007A
	1 Kit = 100 PP vials and 100 caps	VWRI548-7008A
PFAS KIT: 1.5 ml Snap ring vial, ND11, 32 x 11.6 mm, clear glass, 1st hydrolytic calss, wide opening; 11 mm PFAS PE snap ring cap. light-green, with hole, silicon white/transparent polypropylene, slit	1 Kit = 1000 vials and 10x100 caps	VWRI548-7016A
	1 Kit = 1000 vials and 10x100 caps	VWRI548-7017A
PFAS KIT: 1.5 ml Snap ring vial, ND11, 32 x 11.6 mm, clear glass, 1st hydrolytic calss, wide opening; 11 mm PFAS PE snap ring cap. light-green, with hole, silicon white/transparent polypropylene		

VWR® PFAS SNAP RING VIALS AND CLOSURES - OVERVIEW ABOUT THE SINGLE ITEMS

Description	Packaging	Cat. No.
0.7 ml PP snap ring micro-vial, 32 x 11.6 mm, transparent	100 PP vials per PE-bag	VWRI548-7013A
11 mm PFAS PE snap ring cap, light-green, with hole; silicon white/transparent polypropylene, for PFAS analysis	100 caps per PE-bag	VWRI548-7010A
11 mm PFAS PE snap ring cap, light-green, with hole; silicon white/transparent polypropylene, SLIT, for PFAS analysis	100 caps per PE-bag	VWRI548-7006A
1.5 ml Snap ring vial, ND11 32 x 11.6 mm, clear glass, 1st hydrolytic class wide opening	1000	VWRI548-0011A

검증된 전문성 으로 PFAS 워크플로우를 완성하다.

아반토는 PFAS 분석의 신뢰도를 높이기 위해 엄선된 Technical Notes 및 Application Notes를 제공합니다. 해당 자료에는 검증된 분석 메소드, 문제 해결을 위한 인사이트 및 실험실 실제 적용 사례가 포함되어 있어 다양한 샘플 분석시 PFAS 인증 제품의 우수한 성능을 확인할 수 있습니다.

음용수, 토양, 식품 포장재 등 어떤 대상이든 분석이 가능하며, 이러한 자료는 워크플로우 최적화는 물론, 관련 규제 요건을 충족하는 데에도 효과적으로 활용될 수 있습니다.



자세히 알아보기

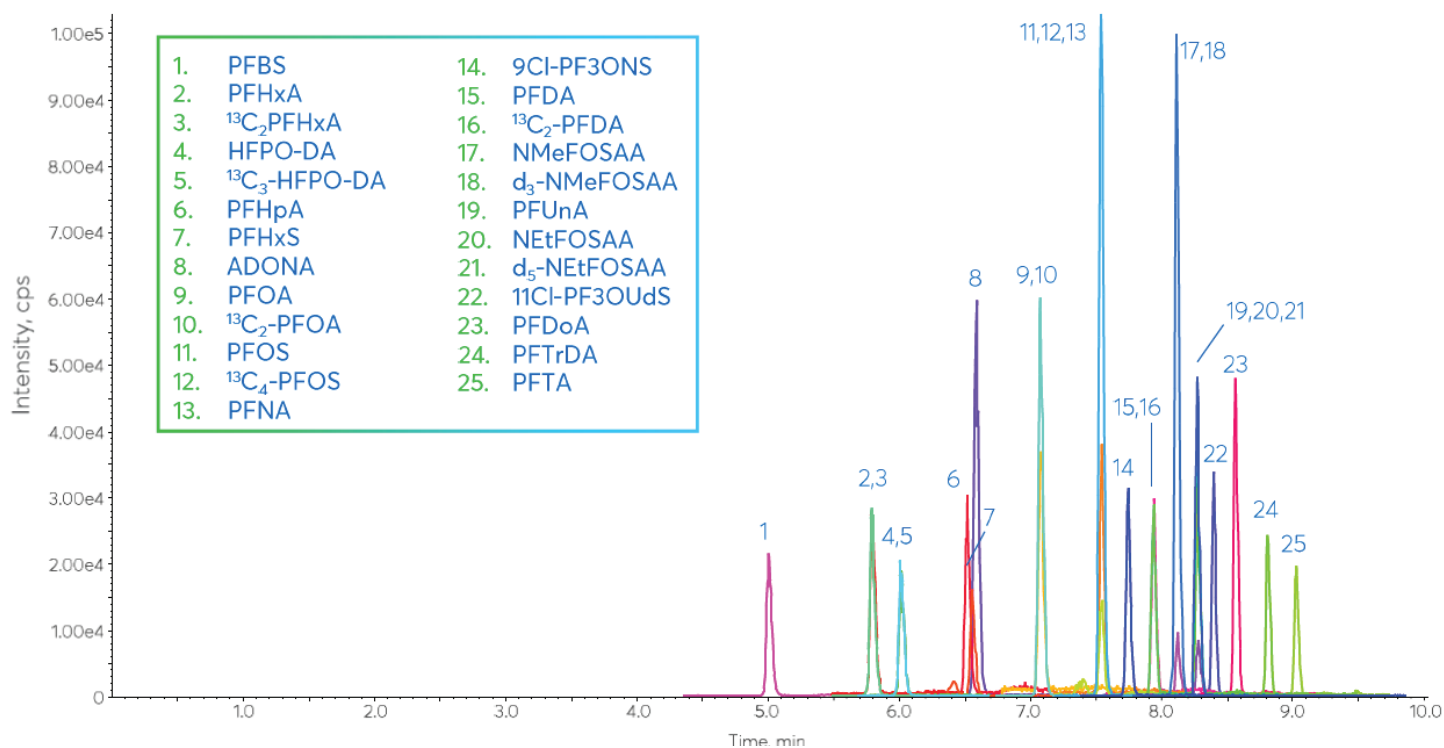
QR 코드를 스캔하면 기술 노트, 응용 가이드, 그리고 귀하의 연구에 맞춘 크로마토그래피 솔루션을 확인하실 수 있습니다.



VWR® HiPerSolv CHROMANORM®

PFAS 등급 용매를 활용한 EPA

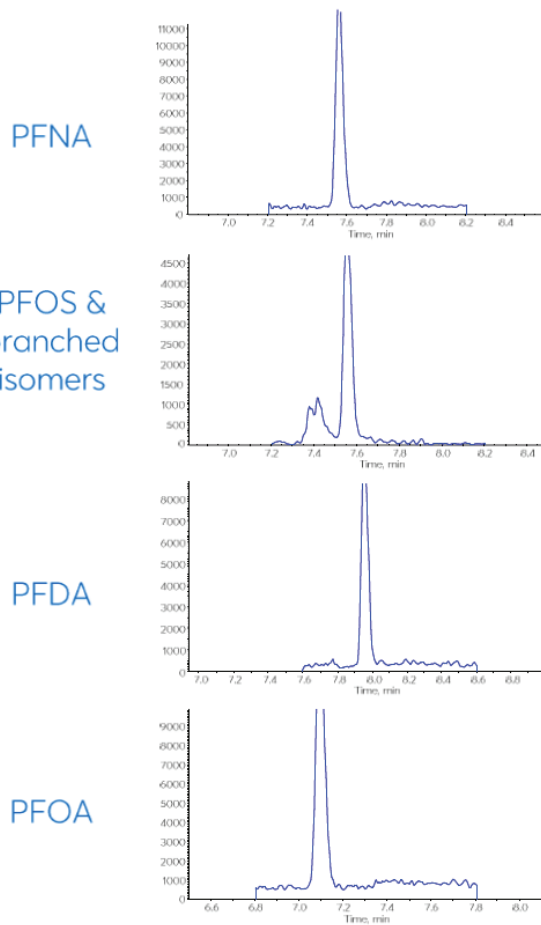
537.1 방법 기반 PFAS 분석



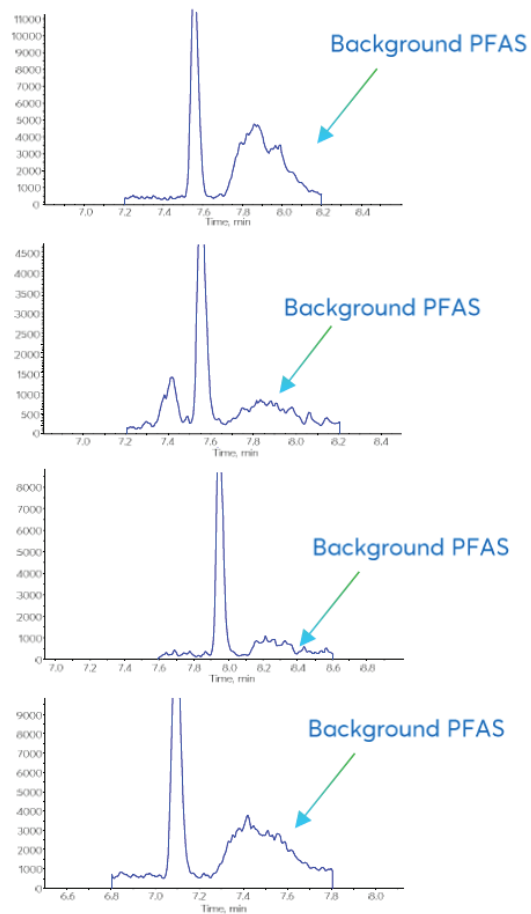
Avantor® ACE®

5mM 아세트산암모늄 CHROMANORM® PFAS grade vs. LC-MS grade

A. HiPerSolv
CHROMANORM®, PFAS grade
buffer & solvents in mobile phase



B. LC-MS grade buffer & solvents in mobile phase



이동상에 존재하는 백그라운드 PFAS는 딜레이 컬럼에 의해 포집되며, 시료 내 PFAS 피크 이후에 용리됩니다. HiPerSolv CHROMANORM® PFAS 등급의 프리믹스 5mM 아세트산암모늄을 이동상에

사용했을 때, LC-MS 등급 용매 및 완충액을 사용한 경우보다 낮은 수준의 백그라운드 PFAS가 관찰되었습니다. 이동상 조건: A) HiPerSolv CHROMANORM PFAS 등급 5mM 아세트산암모늄(프리믹스)

- Line A / HiPerSolv CHROMANORM® PFAS 등급 MeOH – Line B B) LC-MS 등급 아세트산암모늄(5mM)
- LC-MS 등급 H₂O(Line A) / LC-MS 등급 MeOH(Line B)

실험 조건

CONDITIONS

Column: Avantor® ACE® Excel® C18

Particle Size: 3 µm

Dimensions: 100 × 2.1 mm

Delay Column: Avantor® ACE® PFAS Delay Column

Dimensions: 50 × 2.1 mm

Mobile Phases: A: 5 mM ammonium acetate in HO (HiPerSolv CHROMANORM®, PFAS grade)

B: MeOH (HiPerSolv CHROMANORM®, PFAS grade)

Time (mins)	% B
0	5
0.1	20
8.5	95
10.5	95
10.6	5
13.2	5

Flow Rate: 0.4 mL/min

Temperature: 40 °C

Injection volume: 1 pL

Detection: Sciex QTRAP® 6500+ LC-MS/MS system.

Ionisation mode: ESI, negative mode; Source temperature: 450 °C; Curtain gas: 30 psig; Ionspray™ source voltage: -4500 V; Ion source gas: 60 psig

Sample: Calibration standard with PFAS standards, internal standards and surrogate standards at 500 ng/L (corresponding to an in sample concentration of 2 ng/L, taking into account 250x sample pre-concentration during sample preparation specified in EPA method)

MRM TRANSITIONS

Analyte	MRM	Optimized MS Parameters		
		Declustering potential (V)	Collision energy (V)	Cell exit potential (V)
1. PFBS (Perfluorobutanesulfonic acid)	-298.8 → -79.9	-60	-66	-13
2. PFHxA (Perfluorohexanoic acid)	-312.8 → -268.8	-5	-12	-29
3. °C2PFHxA (Surrogate standard)	-314.8 → -269.9	-5	-12	-17
4. HFPO-DA (Hexafluoropropylene oxide dimer acid)	-285.0 → -169.0	-5	-10	-35
5. C-HFPO-DA (Surrogate standard)	-286.8 → -168.9	-10	-10	-15
6. PFHpA (Perfluoroheptanoic acid)	-362.8 → -318.8	-5	-14	-25
7. PFHxS (Perfluorohexanesulfonic acid)	-398.8 → -79.9	-5	-86	-9
8. ADONA (4,8-Dioxa-3H- perfluorononanoic acid)	-376.8 → -250.8	-15	-16	-23
9. PFOA (Perfluorooctanoic acid)	-412.8 → -368.9	-10	-14	-23
10. '3C2-PFOA (Internal standard)	-414.8 + -369.8	-10	-14	-19
11. PFOS (Perfluorooctanesulfonic acid)	-498.8 → -79.9	-5	-102	-9
12. Ca-PFOS (Internal standard)	-502.8 → -79.9	-5	-104	-9
13. PFNA (Perfluorononanoic acid)	-462.8 → -418.8	-5	-16	-23
14. 9Cl-PF3ONS (9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanone-1-sulfonic acid)	-530.7 → -350.81	-20	-36	-29
15. PFDA (Perfluorodecanoic acid)	-512.8 → -468.81	-25	-16	-45
16. 13C2-PFDA (Surrogate standard)	-514.8 → -469.81	-5	-16	-25
17. NMeFOSAA (N-methyl perfluorooctanesulfonamidoacetic acid)	-569.8 → -418.8	-5	-30	-29
18. da-NMeFOSAA (Internal standard)	-572.8 → -418.9	-5	-30	-29
19. PFUnA (Perfluoroundecanoic acid)	-562.8 → -518.7	-5	-18	-33
20. NEtFOSAA (N-ethyl perfluorooctanesulfonamidoacetic acid)	-583.8 → -418.9	-30	-28	-19
21. ds-NEtFOSAA (Surrogate standard)	-588.8 → -418.9	-25	-28	-21
22. 11Cl-PF3OUdS (11-Chloroeicosafluoro-3-oxaundecane-1-sulfonic acid)	-630.7 → -450.81	-5	-42	-23
23. PFDoA (Perfluorododecanoic acid)	-612.7 → -568.8	-10	-18	-35
24. PFTrDA (Perfluorotridecanoic acid)	-662.7 → -618.7	-15	-20	-35
25. PFTA (Perfluorotetradecanoic acid)	-712.7 → -668.6	-5	-20	-41

정확성 및 정밀성

PFAS 표준물질과 동위원소 표지 내부 표준을 사용하여 0.01–2.0 ng/mL 범위에서 검량 곡선을 작성하였습니다(Figure 1). Table 1에는 검량 표준물질을 3회 반복 주입한 결과로 계산된 정확성 값이 제시되어 있습니다. 또한 중간 수준 QC 샘플(n=7)에서 양호한 정밀성이 확인되었습니다(Table 2).

Table 1: ADONA 검량 곡선의 예시 정확성 데이터 (내부 표준: ¹³C--PFOA) * 해당 시료 내 농도는 EPA 방법 537.1에서 규정한 시료 전처리 과정의 250배 농축 단계를 반영한 값입니다.

Concentration (in vial) ng/L	Concentration (in sample ng/L*	% Accuracy
10	0.04	110.3
15	0.06	103.5
20	0.08	110.0
50	0.2	96.8
100	0.4	107.3
200	0.8	104.9
500	2.0	106.2
1000	4.0	106.7
2000	8.0	94.1

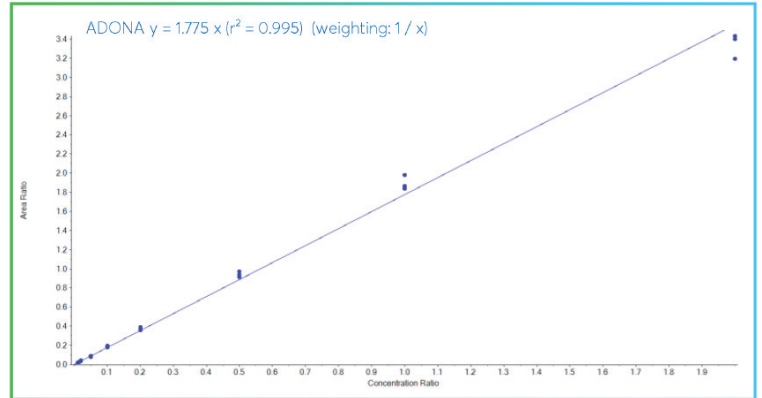


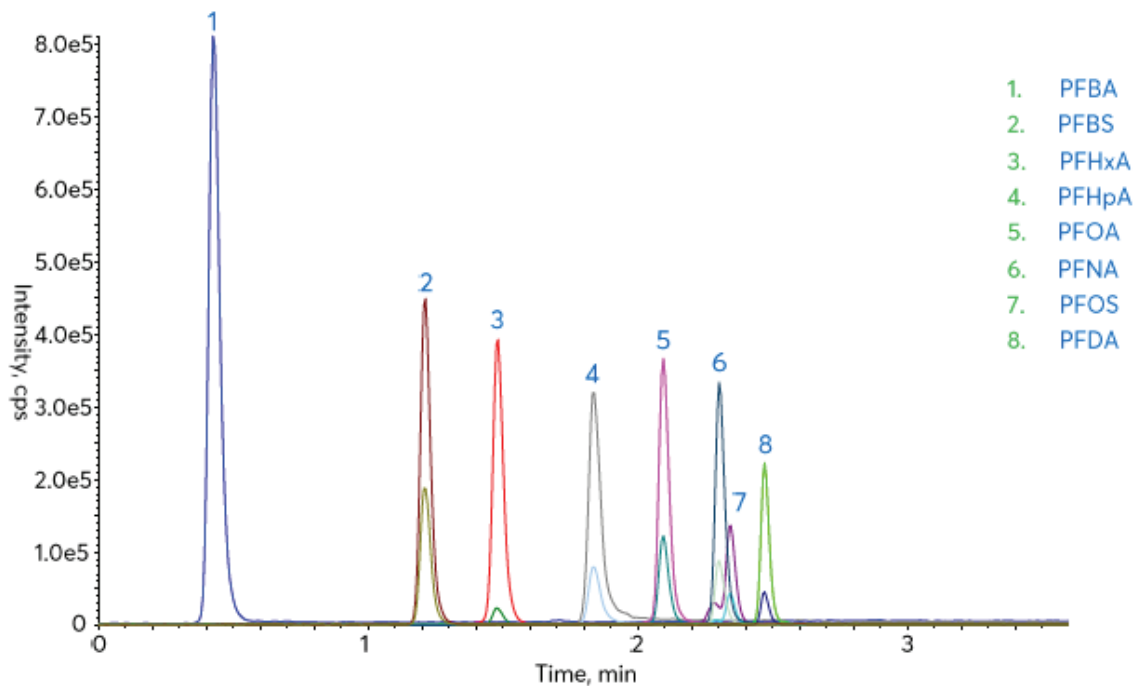
Figure 1: ADONA에 대한 예시 검량선 제로(0)를 기준으로 강제로 통과시키는 선형 검량선에 맞춰 작성됨 (가중치 1/x 적용)

Table 2: 품질관리(QC) 샘플에 대한 정확도 및 정밀도 데이터 (7회 반복 주입 결과)

Analyte	Concentration (in vial)	Mean calculated ng/L	% Precision	% Accuracy
9CI-PF3ONS	200	198.4	5.3	99.2
11CI-PF3OUdS	200	189	5.4	94.5
ADONA	200	186.4	1.5	93.2
NEtFOSAA	200	200.9	5.5	100.4
NMeFOSAA	200	193.9	6.4	96.9
PFBS	200	184.1	3.5	92
PFDA	200	191.6	5.3	95.8
PFDoA	200	193.1	4.6	96.6
PFHpA	200	189.3	4.8	94.6
PFHxA	200	195.4	3.2	97.7
PFHxS	200	189	2.9	94.5
PFNA	200	193.9	3.6	96.9

Analyte	Concentration (in vial)	Mean calculated ng/L	% Precision	% Accuracy
PFOA	200	187.6	3.6	93.8
PFOS	200	213.3	2.8	106.6
PFTA	200	186.3	4.4	93.1
PFT-DA	200	193	4.8	96.5
PFUnA	200	185.9	4.4	93
HFPO-DA	200	188.7	3.1	94.3
13C, -PFDA (Surrogate)	200	203.5	2.2	101.7
13C, PFHxA (Surrogate)	200	199.8	3.1	99.9
13C3-HFPO-DA(Surrogate)	200	205	3.7	102.5
ds -NEtFOSAA (Surrogate)	800	825.9	4.8	103.2

Avantor® ACE® HTP-MS 컬럼을 활용한 과불화알킬물질의 빠른 LC-MS/MS 분석



Avantor® ACE®

실험 조건

CONDITIONS

Column: Avantor® ACE® HTP-MS

Particle Size: 2 µm

Dimensions: 10 x 2.1 mm

Mobile Phase: A: 20 mM ammonium acetate in H₂O

B: 20 mM ammonium acetate in MeOH/H₂O (90:10)

Gradient:

Time (mins)	% B
0	0
0.1	25
2.1	75
2.2	100

Flow Rate: 0.5 mL/min

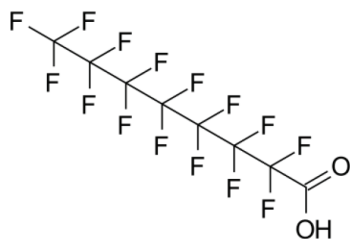
Injection: 0.5 µL

Temperature: 22 °C

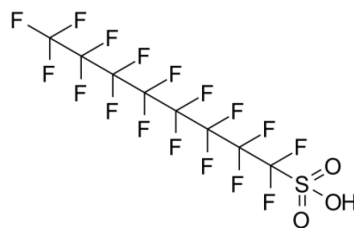
Detection: Sciex QTRAP® 6500+ LC-MS/MS system.

Ionisation mode: ESI, negative mode; Source temperature: 450 °C; Curtain gas: 38 psig; lonspray™ source voltage: -3500 V; lon source gas 1: 40 psig; lon source gas 2: 70

Sample: 12 ng/mL for each analyte



Perfluorooctanoic acid (PFOA)



Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)

MRM TRANSITIONS

Analyte	MRM	Optimized MS Parameters		
		Declustering potential (V)	Collision energy (V)	Cell exit potential (V)
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	-212.9 amu → -168.9 amu	-5	-12	-19
Perfluorobutane sulfonic acid (PFBS)	-298.8 amu → -79.8 amu	-20	-68	-13
	-298.8 amu → -98.9 amu	-20	-36	-9
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	-312.7 amu → -268.9 amu	-25	-14	-21
	-312.7 amu → -119.0 amu	-25	-30	-15
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	-362.8 amu → -319.0 amu	-25	-14	-21
	-362.8 amu → -168.9 amu	-25	-24	-3
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	-412.9 amu → -368.9 amu	-10	-14	-23
	-412.9 amu → -168.9 amu	-10	-24	-3
Perfluorononanoic acid (PFNA)	-462.9 amu → -418.9 amu	-25	-14	-35
	-462.9 amu → -218.8 amu	-25	-22	-11
Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)	-498.8 amu → -79.9 amu	-5	-96	-23
	-498.8 amu → -98.8 amu	-5	-88	-11
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	-512.9 amu → -468.9 amu	-40	-14	-31
	-512.9 amu → -219.1 amu	-40	-26	-25

LC-MS/MS 기반 PFAS 분석에서 시스템 백그라운드 간섭을 해결하기 위한 Avantor® ACE® PFAS 지연 컬럼의 활용

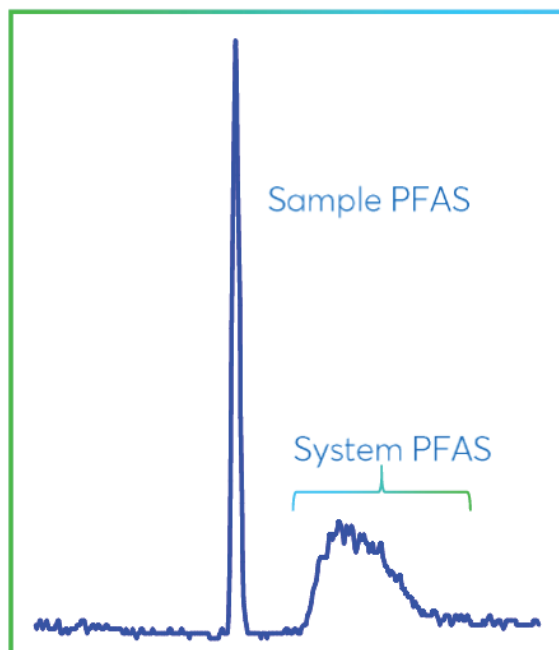
PFAS는 다양한 산업·상업·소비재 제품에서 광범위하게 사용되어 왔으며, 화학적 비활성과 장기적 잔존성 때문에 현재 전 세계적으로 환경 내 PFAS 오염이 확산된 상황입니다. 이러한 물질이 인체 건강과

환경에 미치는 영향에 대한 우려가 커짐에 따라, 자연 환경과 인체 내 PFAS 농도를 모니터링하는 것은 점점 더 중요한 과제가 되고 있습니다.

PFAS를 규명하는 데 사용되는 가장 강력한 분석 기법 중 하나는 LC-MS/MS입니다. 그러나 실험실 환경 내에서 기인하는 백그라운드 PFAS 때문에, 시료의 비의도적 오염이나 크로마토그래피 시스템 오염을 방지하고 부정확한 정량 결과를 줄이기 위해서는 엄격한 실험실 관리가 필요합니다. 본 기술 노트에서는 LC-MS/MS 사용 시 반드시 준수해야 할 예방 조치 중

하나인 PFAS 딜레이 컬럼 사용을 다룹니다. 이 컬럼은 시료에서 기인한 PFAS와 LC 시스템에서 발생하는 간섭성 PFAS 피크를 크로마토그래피적으로 분리하여

신뢰성 있는 분석을 가능하게 합니다.



Avantor® ACE®

PFAS란?

폴리 및 퍼플루오로알킬물질(PFAS)은 전

세계적으로 가장 주목받는 환경 오염 물질 중 하나로 빠르게 부상하고 있습니다. PFAS는 탄소-불소 결합을 포함한 합성 화합물군으로, 1930년대 처음 개발되었으며, Figure 1에 몇 가지 대표적인 화학

구조가 제시되어 있습니다.

PFAS는 오일·물·얼룩에 대한 반발성, 마찰 감소, 높은 열적·화학적 안정성과 같은 물리적 특성 덕분에 1940년대부터 대량으로 제조·활용되어 왔습니다. 이러한 특성은 다양한 산업 분야, 소방용품, 그리고 의류, 카펫·가구용 발수제, 아웃도어 장비, 식품 포장재 등과 같은 소비재 전반에 광범위하게 사용되는 결과를 낳았습니다. 지난 80여 년간 방출된 PFAS는 본질적인 화학적 안정성 때문에 분해되지 않고 환경에 장기간 잔존하며, 이로 인해 흔히 “영원한 화학물질(never chemicals)”이라 불립니다. 그 결과, 물·공기·토양·어류 등 다양한 환경 시료에서 광범위한 오염이 보고되고 있습니다.

PFAS가 널리 사용된 만큼, 인체 노출 경로 역시 다양합니다. 오염된 수원, 특정 산업 공정, 소방용품, 식품 및 식품 포장재, 생활용품, 개인 위생 제품 등을 통해 인체에 유입될 수 있습니다. 또한, 많은 PFAS는 생체 내에 축적(bioaccumulation)되거나 먹이사슬을 따라 농축(biomagnification)되어, 시간이 지남에 따라 체내에 높은 농도로 쌓일 수 있습니다.

최근 수십 년 동안의 연구에 따르면, 특정 수준의 일부 PFAS에 노출될 경우 인체에 다양한 유해한 건강 영향이 나타날 수 있음이 보고되었습니다. 지난 20년간 일부 PFAS의 생산 및 사용이 감소하고, 대체 물질이 개발되었으며, 규제 기관의 점점 더 엄격한 제한 조치가 시행되어 이 문제를 해결하기 위한 노력이 이어지고 있습니다. 앞으로도 규제 당국의 제한은 대폭 강화될 것으로 예상됩니다. 예를 들어, PFOA와 PFHxS는 스톡홀름 협약 부속서 A에 포함되어 사용이 금지되었으며, PFOS는 부속서 B(제한)에 등재되었습니다. 또한 C9~C14 퍼플루오로카복실산은 2023년 2월부터 EU/EEA 내에서 사용이 제한되었고, 유럽화학물질청(ECHA)은 최근 REACH 규정 하에서 10,000종 이상의 PFAS를 제한하는 제안을 발표했습니다. 따라서 환경 내 PFAS 농도를 지속적으로 모니터링하는 필요성은 점점 더 커지고 있습니다.

음용수와 같은 매트릭스(matrix)에서 허용되는 PFAS 농도에 대한 규제가 강화됨에 따라, parts per trillion 이하 수준의 검출 한계를 달성할 수 있는 고감도의 분석 기술이 요구됩니다. 이 때문에 LC-MS/MS는 높은 민감도와 선택성을 바탕으로 다양한 매트릭스 내 PFAS를 규명하는데 널리 사용되고 있습니다. 또한 적절한 샘플 전처리 기법을 활용하면 샘플을 농축시켜 낮은 검출 한계에 도달할 수 있습니다.

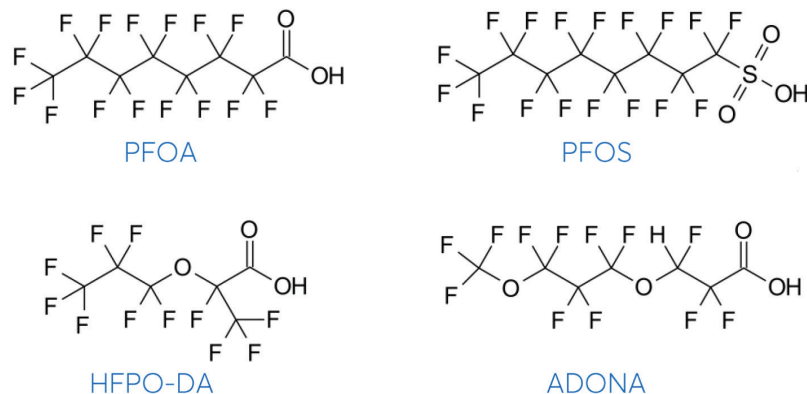


Figure 1: Example structures for some PFAS compounds.

PFAS 분석을 위한 특별 고려사항

PFAS 분석을 수행할 때는 실험실 환경, 장비, 시료 채취·처리 및 분석 과정에서 사용되는 소모품 등에서 기인할 수 있는 백그라운드 간섭 가능성을 반드시 고려해야 합니다. 적절한 소재로 제조된 소모품 선택, 장비에서 PTFE가 포함된 모든 구성 요소 제거, 적합한 실험용 용매 및 시약 선택, 워크플로우 단계별 체계적인 검증과 더불어, 백그라운드 오염을 최소화하기 위한 엄격한 실험실 관리가 무엇보다 중요합니다.

LC-MS 시스템 자체도 PFAS 오염원의 하나로 간주되어야 합니다. PFAS의 LC-MS/MS 분석은 일반적으로 그라디언트 조건에서 운용되는 역상 분석 컬럼을 사용합니다. 이 과정에서 용매 라인 튜빙, 탈기 장치, 펌프 부품, 이동상 등 유로(flow path)에 포함된 구성 요소들은 잠재적인 백그라운드 PFAS의 원인이 될 수 있으며, 이는 그라디언트 시작 전 평형 단계에서 분석 컬럼에 축적될 수 있습니다. 이후 그라디언트 분석 동안 이러한 백그라운드 성분들이 컬럼에서 용리되며, 시료 성분과 동시 용리(co-elution)되어 부정확한 정량 결과를 초래할 수 있습니다.

Figure 2a는 오염된 LC-MS 시스템에서 블랭크 그라디언트 런(blank gradient run)을 수행했을 때 검출된 PFAS 성분의 MRM 크로마토그램을 보여줍니다. 이러한 백그라운드 PFAS는 주로 PTFE 또는 FEP로 제조된 용매 라인 튜빙에서 기인하는 것으로 확인되었으나, 탈기 장치, 펌프 모듈 또는 이동상에서도 발생할 수 있습니다. 실제 시료 분석 시(Figure 2b), 시스템에서 발생한 PFAS 성분들은 시료 피크와 동일한 머무름 시간(retention time)으로 용리되어 구분할 수 없게 됩니다.

따라서, 유로 내 PTFE나 FEP 튜빙을 PEEK 튜빙으로 교체하는 것이 강력히 권장됩니다. 추가적으로, PFAS 딜레이 컬럼 또는 트랩 컬럼을 사용하는 것은 백그라운드 PFAS 간섭을 제거하는 매우 효과적인 방법으로, 일반적으로 필수적인 조치로 간주됩니다.

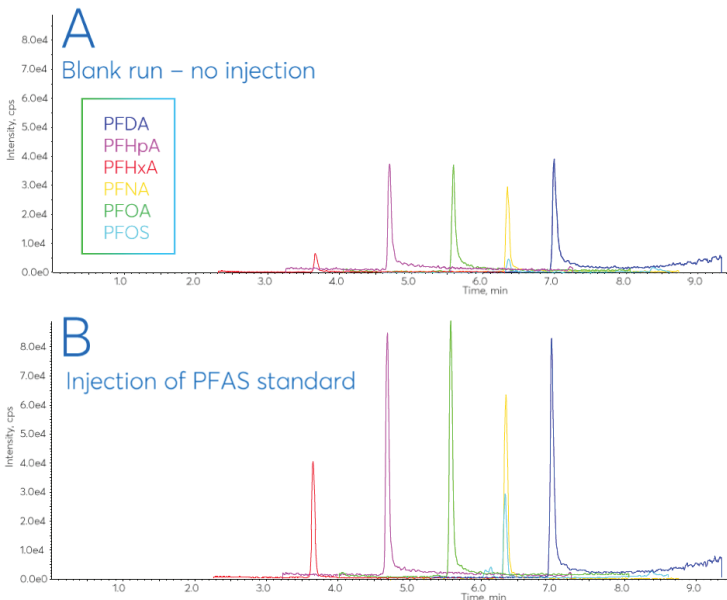


Figure 2: A: LC-MS/MS MRM 크로마토그램은 초기 기율기 조건에서 3분 동안 평형을 이루도록 허용된 컬럼에서 빈 기율기 실행을 위한 것입니다. 관찰된 PFAS 성분에 대한 MRM 전환이 표시됩니다. B: 표준 혼합물의 주입에 대한 동일한 MRM 전환으로, 샘플 및 시스템 PFAS 성분의 동일한 유지 시간을 보여줍니다. 시스템 배경 PFAS와 원래 샘플 PFAS의 공동 용출은 명백히 부정확한 정량화를 초래할 것입니다.

Column: **Avantor® ACE® UltraCore 2.5 SuperC18, 100 x 2.1 mm**

Delay Column: **No delay column used**

Mobile Phases: **A: 20 mM ammonium acetate (aq)**

B: MeOH

Time (mins)	% B
0	0
0.1	40
8.5	90
10.5	90
10.6	5

Flow Rate: **0.4 mL/min**

Temperature: **40 °C**

Detection: **Sciex QTRAP® 6500+ LC-MS/MS system. Ionisation mode: ESI, negative mode; Source temperature: 450 °C; Curtain gas: 30 psig; Ionspray™ source voltage: -4500 V; Ion source gas 60 psig**

AVANTOR® ACE® PFAS 딜레이 컬럼의 사용

Avantor® ACE® PFAS 딜레이 컬럼은 높은 보류력을 가진 역상 충전물로 설계되어, 시스템 내에서 발생하는 백그라운드 PFAS를 최대한 포집할 수 있도록 제작되었습니다. 이 컬럼은 시료 주입기와 분석 컬럼 바로 앞(Figure 3 참고)에 장착하는 것이 권장됩니다. 이 위치에 설치할 경우, 이동상, 용매 라인, 탈기 장치, 펌프 부품 등에서 발생할 수 있는 백그라운드 PFAS는 시료 분석 전에 PFAS 딜레이 컬럼에 효과적으로 포집됩니다. 시료 분석이 시작되면, 딜레이 컬럼에 축적된 백그라운드 PFAS가 그라디언트 조건에서 용리되지만, 시료 유래 PFAS 보다 더 늦게 용리됩니다.

Figure 4는 Figure 2A와 동일한 시스템에서, Avantor® ACE® PFAS 딜레이 컬럼을 장착한 상태로 블랭크 런(blank run)을 수행한 결과를 보여줍니다. 백그라운드 PFAS는 딜레이 컬럼에 보류되었으며, Figure 2A에서보다 훨씬 늦게, 넓은 피크 형태로 용리되었습니다.

참고로, 시료 PFAS의 용리 시간은 Figure 4 내 화살표로 표시되어 있습니다. Avantor® ACE® PFAS 딜레이 컬럼은 시료 고유의 PFAS 머무름 시간(retention time) 이후까지 백그라운드 PFAS를 보류시켜, 간섭 가능성을 제거합니다.

PFAS 딜레이 컬럼 사용의 중요성은 특정 PFAS 성분 데이터, 여기서는 PFOA 분석 결과를 통해 가장 잘 설명할 수 있습니다. Figure 5A는 오염된 LC-MS/MS 시스템에서 주입 없이 수행한 블랭크 런으로, 백그라운드 PFOA가 분석 컬럼에 축적되어 약 5.5 분에 용리되는 모습을 보여줍니다. 반면, PFOA를 함유한 시료를 주입했을 때(Figure 5B), 백그라운드 PFOA가 시료 PFOA와 동시 용리(co-elution)되어 구분이 불가능해지며, 이로 인해 정량이 부정확해지고 피크 모양이 넓고 비대칭(테일링) 형태로 나타납니다.

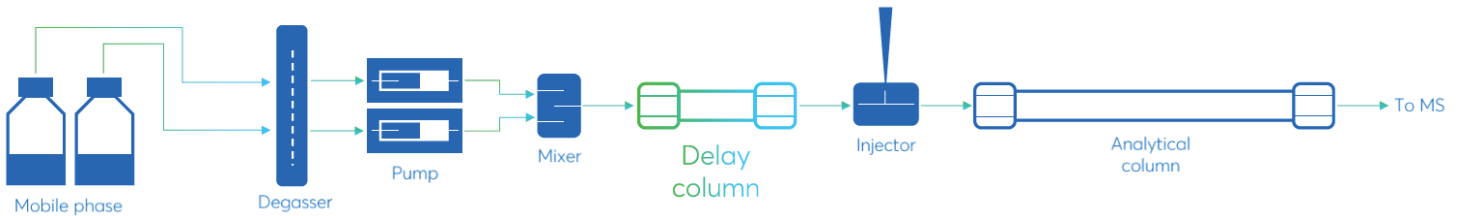


Figure3: Avantor® ACE® PFAS Delay Column은 탈기장치(degasser), 펌프, 믹서 이후, LC 시스템의 자동 샘플러/주입 포트 바로 앞에 연결되어야 합니다

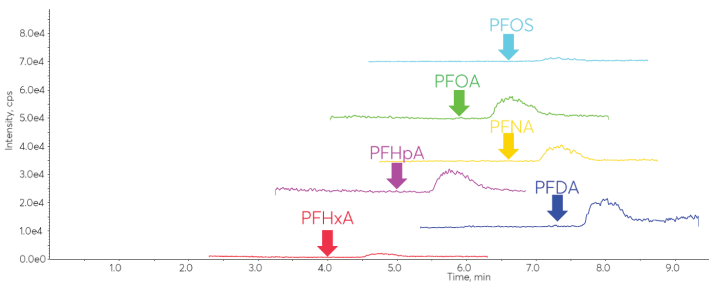


Figure 4: Avantor® ACE® PFAS 지연 컬럼이 설치된 상태에서의 블랭크 그라디언트에 대한 LC-MS/MS MRM 크로마토그램(세로 축 기준으로 오프셋 표시됨). LC-MS 시스템 및 분석 조건은 그림 2에서 사용된 것과 동일합니다. 시스템 PFAS는 지연 컬럼에 의해 지연되어 넓은 피크로 용출되며, 샘플 피크보다 더 오래 유지됩니다(샘플 피크의 예상 용출 시간은 화살표로 표시됨).

Column:	Avantor® ACE® UltraCore 2.5 SuperC18, 100 × 2.1 mm	
Delay Column:	Avantor® ACE® PFAS Delay Column, 50 × 2.1 mm	
Mobile Phases:	A: 20 mM ammonium acetate (aq)	
	B: MeOH	
	Time (mins)	% B
	0	0
	0.1	40
	8.5	90
	10.5	90
	10.6	5
Flow Rate:	0.4 mL/min	
Temperature:	40 °C	
Detection:	Sciex QTRAP® 6500+ LC-MS/MS system. Ionisation mode: ESI, negative mode; Source temperature: 450 °C; Curtain gas: 30 psig; Ionspray™ source voltage: -4500 V; Ion source gas 60 psig	

Figure 5C는 동일한 시스템에서 Avantor® ACE® PFAS 딜레이 컬럼을 장착한 상태로 수행한 블랭크 그라디언트 런 결과를 보여줍니다. 이 경우, 시스템에서 기인한 백그라운드 PFOA는 넓은 피크 형태로 훨씬 늦게 용리되었습니다. 이어서 PFAS 딜레이 컬럼을 장착한 상태에서 PFAS 표준물을 주입한 결과(Figure 5D), 시료 유래 PFOA는 백그라운드 PFOA보다 더 이른 시점에서, 깨끗한 베이스라인 구간에서 용리되어 쉽게 구분됨을 확인할 수 있었습니다. 이로써 얻어진 분석 데이터의 무결성이 보장되며, 향상된 피크 모양도 확인되었습니다. 또한, Figure 5D에서 시료 PFAS가 Figures 5A 및 5B보다 약간 더 늦게 용리된 점도 주목할 만합니다. 이는 딜레이 컬럼 장착 시 LC dwell volume이 약 100 μ L 증가했기 때문입니다.

Avantor® ACE® PFAS 딜레이 컬럼은 분석물질 정량에 간섭을 일으킬 수 있는 백그라운드 PFAS를 효과적으로 차단하는 간단하면서도 확실한 솔루션을 제공합니다. 따라서 PFAS 분석을 수행하는 모든 LC-MS 시스템에 본 딜레이 컬럼을 장착하는 것이 강력히 권장됩니다. 이는 PFAS가 존재하지 않는 것으로 간주된 시스템에서도 마찬가지입니다. 그 이유는, 이동상의 배치(batch)나 공급원, 용매병 세척·교체, 실험실 내 일반적인 PFAS 백그라운드 수준 변화 등 다양한 요인으로 인해 시간이 지남에 따라 백그라운드 PFAS 농도가 달라질 수 있기 때문입니다.

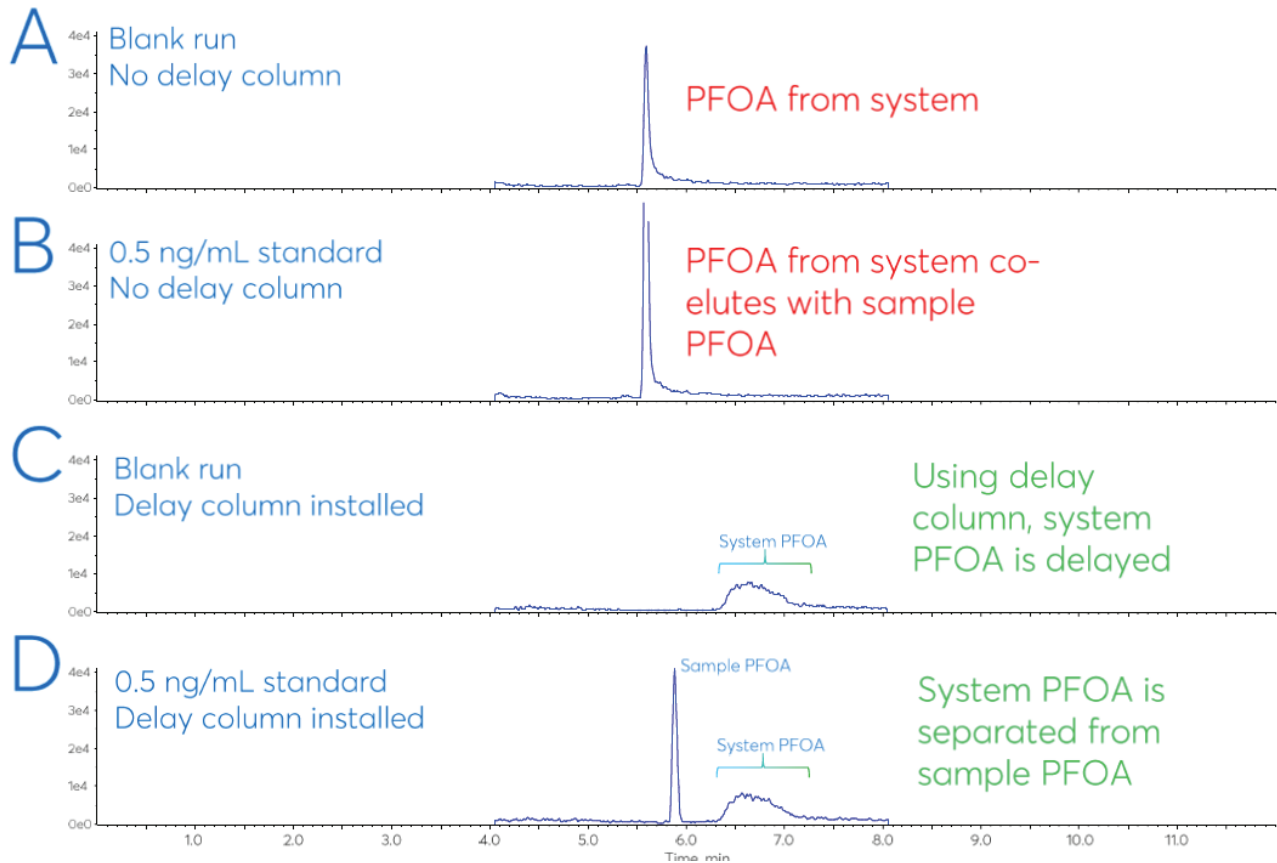


Figure 5: PFOA 분석을 위한 Avantor® ACE® PFAS 지연 컬럼의 효과를 보여주는 시연. 분석 조건: Figure 4와 동일.

결론

PFAS가 환경과 인체 건강에 미치는 부정적 영향에 대한 우려가 커짐에 따라, LC-MS/MS를 이용한 PFAS 분석에서는 점점 더 낮은 검출 한계가 요구되고 있습니다. 따라서, 간섭성 백그라운드 PFAS의 영향을 제거하여 신뢰할 수 있는 분석 데이터를 확보하는 것이 무엇보다 중요합니다.

그러나 PFAS가 광범위하게 사용되는 특성상, LC-MS/MS 시스템 자체가 분석 중 백그라운드 PFAS 오염의 주요 원인이 될 수 있습니다.

본 기술 노트에서 제시된 데이터는 Avantor® ACE® PFAS 딜레이 컬럼이 이러한 간섭을 제거하는 간단하면서도 효과적인 솔루션임을 보여줍니다. LC-MS 시스템에서 기인한 백그라운드 PFAS 오염은 시료 고유의 PFAS와 효과적으로 분리되어, 분석 데이터의 무결성과 신뢰성을 보장합니다.

참고문헌

1. Interstate Technology Regulatory Council (ITRC), "History and Use of Per and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) found in the Environment" September 2023. https://pfas-1.itrcweb.org/wp-content/uploads/2022/09/HistoryandUse_PFAS_Fact-Sheet_Sept2023_final.pdf (Accessed October 2023).
2. United States Environmental Protection Agency (EPA), "PFAS Explained", April 2023, <https://www.epa.gov/pfas/pfas-explained> (Accessed September 2023).
3. R. Trager "A persistent perfluorinated problem" ChemistryWorld 19 (9), September 2019 <https://www.chemistryworld.com/features/a-persistent-perfluorinated-problem/3010817.article#comments>. Jump" (Accessed October 2023).
4. United States Environmental Protection Agency (EPA), "Our Current Understanding of the Human Health and Environmental Risks of PFAS", June 2023. <https://www.epa.gov/pfas/our-current-understanding-human-health-and-environmental-risks-pfas> (Accessed October 2023).
5. U.S Food & Drug Administration (FDA), "Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)", May 2023. <https://www.fda.gov/food/environmental-contaminants-food-and-polyfluoroalkyl-substances-efas> (Accessed October 2023).
6. European Chemicals Agency (ECHA), "Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)", September 2023 <https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas> (Accessed October 2023).
7. Stockholm Convention, "All POPs listed in the Stockholm Convention" <https://www.pops.int/TheConvention/ThePOPs/AllPOPs/tabid/2509/Default.aspx> (Accessed October 2023).
8. "Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1608", Official Journal of the European Union 66 (2023) L198/24 http://data.europa.eu/eli/reg_del/2023/1608/oj (Accessed October 2023).
9. European Chemicals Agency (ECHA), "ECHA publishes PFAS restriction proposal", February 2023 <https://echa.europa.eu/-/echa-publishes-pfas-restriction-proposal> (Accessed October 2023).
10. United States Environmental Protection Agency (EPA), "Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Proposed PFAS National Primary Drinking Water Regulation", September 2023. <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas> (Accessed October 2023).

ORDERING TABLE

Product	Details	Size	Part Number
Avantor® ACE® PFAS Delay Column	PFAS Delay Column	50 x 2.1 mm	ACE-PFASD-0502

Avantor® ACE®

[vwr.com/ace](https://www.vwr.com/ace)
chromsupport@avantorsciences.com



[avantorsciences.com](https://www.avantorsciences.com)

Avantor® is a leading global provider of mission critical products and services to customers in the biopharma, healthcare, education & government, and advanced technologies & applied materials industries. We operate in more than 30 countries and deliver an extensive portfolio of products and services. We set science in motion to create a better world. Trademarks are owned by Avantor Inc. unless otherwise noted. © 2025 Avantor Inc.