

반도체 제조용 플루오로카본 가스: 시장 분석 및 미래 전망

by songpd (2025.04.28)

1. 소개

현대 전자 산업의 기반인 반도체 산업은 나노 스케일의 정밀도와 극도의 순도 요구 사항을 특징으로 하는 복잡한 제조 공정 순서에 의존합니다. 이러한 공정을 가능하게 하는 중요한 재료 중에는 고순도 플루오로카본 가스(탄소-불소, C-F 결합 함유) 및 질소 삼불화물(NF₃), 육불화황(SF₆)과 같은 관련 불소 함유 화합물이 있습니다. 이 가스들은 8 가지 주요 반도체 공정 중 세 가지 핵심 단계인 플라즈마 식각, 감광액(PR) 스트리핑 잔류물 제거, 화학 기상 증착(CVD) 챔버 세정에서 필수적인 역할을 합니다. 이들의 독특한 화학적 특성은 재료의 선택적 제거, 복잡한 회로 패턴 생성, 높은 소자 수율과 성능에 필수적인 청정 공정 환경 유지를 가능하게 합니다.

본 보고서는 이러한 중요한 반도체 응용 분야에 사용되는 플루오로카본(C-F) 계열 제품 및 관련 불소계 가스(NF₃, SF₆) 시장에 대한 전문가 분석을 제공합니다. 이 가스들의 화학적 특성과 특정 기능, 글로벌 공급업체 현황, 주요 고객 및 소비 동인, 현재 시장 동향(규모, 추세, 과제 포함) 분석, 그리고 2030 년 이후 시장 발전에 대한 미래 전망을 상세히 다룹니다. 이 분석은 반도체 제조 기술 발전(예: EUV 리소그래피, 3D NAND 스케일링, Gate-All-Around 트랜지스터), 환경 지속 가능성에 대한 압력 증가(특히 높은 지구 온난화 지수 가스 및 PFAS 규제 관련), 그리고 진화하는 공급망 전략 간의 상호 작용을 고려합니다.

2. 반도체 공정에서의 플루오로카본 화학 및 기능성

플루오로카본 및 관련 불소계 가스는 플라즈마 조건 하에서 반응성이 높은 불소 함유 종(이온 및 라디칼)을 생성하는 능력 때문에 반도체 제조에 사용되며, 정밀한 재료 제거 및 표면 개질을 가능하게 합니다. 이들의 특정 기능은 식각, 챔버 세정, 감광액 스트리핑 잔류물 제거에 따라 다릅니다.

2.1 플라즈마 식각

플라즈마 식각은 반도체 웨이퍼에 패턴을 정의하는 핵심 공정으로, 재료를 선택적으로 제거하여 트랜지스터와 상호 연결의 복잡한 구조를 만듭니다.¹ 플루오로카본 기반 플라즈마는 특히 이산화규소(SiO_2) 및 질화규소(Si_3N_4)와 같은 유전체 재료 식각에 광범위하게 사용되며, 높은 식각 속도와 하부 실리콘 또는 마스크 층에 대한 중요한 선택성을 달성할 수 있기 때문입니다.¹

이 공정은 일반적으로 사불화탄소(CF_4), 육불화에탄(C_2F_6), 옥타플루오로사이클로부탄(C_4F_8), 삼불화메탄(CHF_3), 옥타플루오로프로판(C_3F_8), 또는 헥사플루오로부타디엔(C_4F_6)과 같은 가스를 플라즈마 반응기로 도입하는 것을 포함합니다.¹ 플라즈마 내에서 전자 충돌은 이러한 전구체 가스를 해리시켜 CF_x 라디칼(예: CF_3 , CF_2 , CF) 및 불소 원자(F)를 포함한 다양한 반응성 종을 생성합니다.²

플루오로카본 플라즈마 식각의 핵심 측면은 웨이퍼를 포함한 반응기 내부 표면에 얇은 플루오로카본 폴리머 필름이 형성되는 것입니다.¹ 이 패시베이션 층은 중요한 역할을 합니다:

- **비등방성:** 플라즈마로부터의 고에너지 이온 충격에 노출된 수평 표면(트렌치 바닥)에서는 폴리머 필름이 지속적으로 제거되어 식각이 수직으로 진행될 수 있습니다. 그러나 직접적인 이온 충격을 덜 받는 수직 측벽에서는 폴리머 필름이 축적되어 측면 식각으로부터 보호합니다. 이 메커니즘은 고밀도 소자 구조에 필요한 비등방성(수직) 식각 프로파일을 달성하는 데 중요합니다.¹ 증착(CF_x 라디칼, 특히 $x \leq 2$ 에 의해 구동)과 제거(이온 에너지/플럭스에 의해 구동) 사이의 균형이 최종 프로파일을 결정합니다. 불충분한 패시베이션은 구부러진 프로파일을 유발할 수 있으며, 과도한 패시베이션은 테이퍼진 프로파일을 유발할 수 있습니다.²
- **선택성:** 플루오로카본 필름은 이산화규소에 비해 실리콘에 우선적으로 증착되어 실리콘의 식각 속도를 늦추므로, 하부 실리콘 층까지 SiO_2 를 식각할 때 필수적인 식각 선택성을 제공합니다.²

식각 메커니즘 자체는 표면에 식각 종이 흡착되고, 기판 재료와 반응하며(예: 실리콘 또는 SiO_2 식각 시 휘발성 SiF_x 화합물 형성), 반응 생성물이 탈착되는 과정을 포함합니다.² 이온 충격은 바닥 표면에서 패시베이션 층을 제거하는 것뿐만 아니라 표면 반응을 활성화하고 식각 생성물의 제거를 향상시키는 데 중요합니다.¹ 정상 상태 플루오로카본 필름의 두께가 식각 속도의 주요 제어 요인으로 여겨졌지만, 연구에 따르면 이 필름의 이온 유도 탈불소화가 기판 계면에서 반응성 불소를 방출하여 주요 역할을 한다는 것이 밝혀졌습니다.³ 특정 가스 화학 조성(C_xF_y 비율, CHF_3 와 같은 HFC 내 수소 존재 여부)은 식각과 증착의 균형에 영향을 미쳐 식각 속도, 선택성 및 프로파일 제어에 영향을 미칩니다.¹ 예를 들어, C_4F_8 와 같이 F/C 비율이 낮은 가스는 더 중합되는 경향이 있습니다.¹

2.2 챔버 세정

화학 기상 증착(CVD) 및 플라즈마 강화 CVD(PECVD) 공정은 웨이퍼 위에 박막을 증착하는 데 사용됩니다. 그러나 증착 중에 재료가 필연적으로 공정 챔버의 내부 표면을 코팅합니다.⁹ 이러한 원치 않는 침전물은 벗겨져 후속 웨이퍼를 오염시켜 소자 수율을 감소시킬 수 있습니다. 따라서 주기적인 현장 플라즈마 세정은 챔버 벽에서 이러한 잔류물을 제거하는 데 필수적입니다.⁹

불소계 가스는 특히 실리콘 기반 침전물(Si , SiO_2 , Si_3N_4)을 제거하기 위한 플라즈마 세정의 주요 약제입니다. 일반적으로 사용되는 가스에는 질소 삼불화물(NF_3), 육불화황(SF_6), CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , C_4F_8 등이 있습니다.⁷ 플라즈마에 도입되면 이러한 가스는 해리되어 반응성이 높은 불소 원자(F)를 생성합니다.⁹ 이러한 불소 라디칼은 챔버 벽의 실리콘 함유 침전물과 반응하여 휘발성 사불화규소(SiF_4)를 형성하며, 이는 챔버 밖으로 펌핑됩니다.¹³

NF_3 는 F 라디칼 생성 효율이 비교적 높고 세정 효과가 뛰어나 널리 사용됩니다.¹¹ SF_6 도 사용되지만 극도로 높은 지구 온난화 지수(GWP)로 인해 환경적 감시가 강화되고 있습니다.⁹ CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 과 같은 과불화탄소(PFC)도 사용되며, 때로는 산소나 다른

가스와 혼합하여 사용됩니다.⁷ c-C₄F₈ 는 특정 세정 응용 분야에서 NF₃ 에 대한 잠재적으로 비용 효율적이고 배출량이 적은 대안으로 강조되었습니다.¹¹

세정 공정의 효율성은 가스 선택, 플라즈마 전력, 압력, 유량과 같은 요인에 따라 달라집니다. 그러나 중요한 과제는 많은 전통적인 세정 가스(NF₃, SF₆, PFC)의 높은 GWP 입니다.¹¹ 세정 중 불완전한 해리 또는 활용은 이러한 강력한 온실가스 배출로 이어집니다.¹⁰ 이로 인해 다음과 같은 노력이 촉진되었습니다:

- 가스 소비를 줄이기 위한 세정 공정 최적화(예: 짧은 세정 시간, 낮은 유량).¹³
- F₂/N₂ 혼합물(예: Solvaclean®), COF₂, 플루오로케톤(C₃F₆O) 또는 특정 잔류물에 대한 H₂ 또는 O₂/N₂ 플라즈마와 같은 비불소 옵션과 같이 GWP 가 낮은 대체 세정 화학 물질 개발.¹⁴
- 공정 후 배출 가스를 파괴하기 위한 저감 시스템 구현.¹¹

2.3 감광액 스트리핑 (잔류물 제거)

감광액(PR)은 포토리소그래피에서 회로 패턴을 웨이퍼로 전사하는 데 사용되는 감광성 재료입니다. 식각 또는 이온 주입 후, 남은 PR 은 하부 층을 손상시키지 않고 완전히 제거(스트리핑)되어야 합니다.²²

감광액 스트리핑의 주요 방법은 용매 기반 또는 화학 반응성 스트리퍼를 사용하는 습식 화학 공정을 포함합니다.²² 일반적인 화학 물질은 다음과 같습니다:

- N-메틸-2-피롤리돈(NMP): 경화된 레지스트를 용해하는 데 효과적인 다용도 유기 용매.²²
- 테트라메틸암모늄 하이드록사이드(TMAH): 양성 및 음성 레지스트 스트리핑 모두에 사용되는 알칼리성 화학 물질로, 기판을 손상시키지 않고 재료를 빠르게 용해하는 것으로 알려져 있습니다.²²
- 테트라부틸암모늄 하이드록사이드(TBAH): 신중한 재료 처리가 필요한 민감한 응용 분야에 사용됩니다.²²
- 디메틸 설펝사이드(DMSO): 일부 제형에 사용됩니다.²⁴

- 프로필렌 글리콜(PG) 및 2-(2-아미노에톡시)에탄올과 같은 기타 첨가제는 특정 레지스트 유형 또는 잔류물에 대한 성능을 향상시킵니다.²²

주로 산소(O₂) 플라즈마("애싱")를 사용하는 건식 스트리핑 방법도 일반적입니다.²³

플라즈마에서 생성된 원자 산소는 유기 레지스트 재료와 반응하여 CO, CO₂, H₂O 와 같은 휘발성 부산물을 형성합니다.²⁶

용매와 산소 플라즈마가 주류이지만, **플루오로카본은 특정 PR 스트리핑 시나리오에서 틈새 시장이지만 중요한 역할을 합니다:**

- **경화된 레지스트 제거:** CF₄ 또는 C₂F₆ 과 같은 소량의 플루오로카본이 때때로 산소 플라즈마에 첨가되어 스트립 속도를 높이거나 O₂ 만으로는 제거하기 어려운 특히 경화되거나 가교된 레지스트 층을 제거합니다 [²⁴ (가교된 PR 용 Microstrip 6800)].
- **식각 후 잔류물 제거:** 플라즈마 식각 공정(특히 플루오로카본 사용) 후, 복잡한 잔류물(때로는 "베일" 또는 플루오로카본 잔류물이라고 함)이 웨이퍼 피쳐, 특히 측벽에 남을 수 있습니다.¹⁹ 습식 세정이 종종 사용되지만, 플루오로카본을 포함하는 건식 플라즈마 방법도 사용될 수 있습니다. 특허받은 공정은 H₂O 증기와 플루오로카본(예: CF₄ 또는 C₂F₆)을 플라즈마에 직접(하류 아님) 도입하여 생성된 플라즈마를 사용하여 이러한 잔류물을 제거하기 위해 현장에서 HF 증기를 생성합니다.²⁶ 저전력 전자 사이클로트론 공명(ECR) 수소 플라즈마도 이온 보조 화학 반응을 통해 플루오로카본 잔류물을 효과적으로 제거하는 것으로 나타났으며, 산소 플라즈마/HF 습식 세정 시퀀스에 대한 대안을 제공합니다.¹⁹

따라서 벌크 감광액의 주요 스트리핑제는 아니지만, 특정 플루오로카본(CF₄, C₂F₆)은 건식 스트리핑 플라즈마의 첨가제로 사용되거나 식각 단계 후 남은 어려운 레지스트 또는 불소화 잔류물을 처리하기 위한 특수 플라즈마 공정(예: H₂O 또는 H₂ 사용)에 사용됩니다.

3. 화학 분석 및 제품 사양

반도체 제조 공정의 성능, 신뢰성 및 수율은 사용되는 가스의 순도에 크게 좌우됩니다. 백만분율(ppm) 또는 십억분율(ppb) 수준의 불순물조차도 결함을 유발하고, 식각 속도 및 선택성을 변경하며, 필름 특성에 영향을 미치고, 민감한 소자 층을 오염시킬 수 있습니다. 결과적으로 반도체 산업에 공급되는 플루오로카본 및 관련 가스는 엄격한 초고순도(UHP) 사양을 충족해야 하며, 중요한 응용 분야의 경우 일반적으로 99.999%(5N) 이상의 순도가 요구됩니다.⁵

공급업체는 증류, 흡착, 화학 흡착과 같은 고급 정제 기술과 가스 크로마토그래피(GC), 질량 분석(MS), 푸리에 변환 적외선 분광법(FTIR), 미량 금속 분석을 위한 유도 결합 플라즈마 질량 분석(ICP-MS)과 같은 방법을 사용한 엄격한 품질 관리를 사용합니다.²⁹ 표면 처리 및 부동태화를 포함한 특수 실린더 준비 또한 순도를 유지하고 용기 자체로부터의 오염을 방지하는 데 중요합니다.²⁹

다음은 식각 및 세정에 사용되는 주요 플루오로카본 및 관련 가스에 대한 세부 정보입니다.

3.1 사불화탄소 (CF₄)

- **화학식:** CF₄
- **특성:** 무색, 무취, 불연성, 정상 조건에서 화학적으로 불활성. 끓는점: -127.8 °C. 대기 수명이 약 50,000 년으로 비교적 안정적이며 상당한 GWP(6,630, AR5)를 가지지만 오존 파괴 지수(ODP)는 0 입니다.⁵ 분자량: 88.01 g/mol.²⁷
- **응용 분야:** 실리콘, SiO₂, Si₃N₄, 폴리실리콘, 인규산염 유리, 텅스텐 식각을 위해 종종 O₂ 또는 다른 가스와 혼합하여 사용되는 널리 사용되는 플라즈마 식각 가스.⁵ 전자 장치, 태양 전지의 표면 세정에도 사용되며 때로는 감광액 스트리핑/잔류물 제거를 위해 O₂ 플라즈마에 첨가됩니다.⁵ 챔버 세정에도 사용할 수 있습니다.²⁷ 높은 F:C 비율(4:1)은 공격적인 불소 라디칼 생성을 제공하지만 폴리머 증착은 최소화합니다.²⁷
- **순도 등급 및 사양 (예시 - 공급업체 데이터 기반):**

○ 전자 등급 (5N - 99.999%):

- O₂+Ar: $\leq 1 \text{ ppm}^5$ (또는 O₂ $\leq 1 \text{ ppm}^{27}$)
- N₂: $\leq 2\text{-}5 \text{ ppm}^5$
- H₂O (수분): $\leq 1 \text{ ppm}^5$
- CO: $\leq 0.3\text{-}0.5 \text{ ppm}^5$
- CO₂: $\leq 0.3\text{-}2 \text{ ppm}^5$
- SF₆: $\leq 0.3\text{-}1 \text{ ppm}^5$
- 기타 할로카본 (C₂F₆, OFC, TFC): $\leq 1 \text{ ppm}^5$
- 총 탄화수소 (THC): $\leq 0.3\text{-}1 \text{ ppm}^5$
- 산도 (HF 기준): $\leq 0.1 \text{ ppmw}^{27}$

- 기타 등급 사용 가능 (예: 4N5 - 99.995%, 4N - 99.99%) 불순물 허용량이 더 높음.²⁷

3.2 육불화에탄 (C₂F₆)

- 화학식: C₂F₆ (PFC-116, R116 으로도 알려짐)
- 특성: 무색, 무취, 불연성, 비교적 불활성 가스. 끓는점: -78.2 °C. 대기 수명이 매우 길고 GWP 가 높지만(11,100 AR5 / 12,200) ODP 는 0 입니다.³⁰ 분자량: 138.01 g/mol.³⁰
- 응용 분야: 반응성 이온 식각 가스로, 종종 실리콘보다 산화물 및 질화물의 선택적 식각에 사용됩니다 [2 (연구에 사용됨), 4]. 수소 없이 CF₃ 라디칼 공급원을 제공합니다.³³ 챔버 세정에도 사용되며 ¹¹ 때로는 레지스트 스트리핑을 위해 O₂ 플라즈마에 첨가됩니다.²⁶ 냉매 및 기타 산업 응용 분야에 사용됩니다.³³
- 순도 등급 및 사양 (예시):
 - 전자 등급 (5N - 99.999%):
 - O₂+Ar: (O₂ $\leq 1 \text{ ppm}$) ³³
 - N₂: $\leq 5 \text{ ppm}^{33}$
 - H₂O (수분): $\leq 1\text{-}2 \text{ ppm}^{33}$

- CO: ≤ 1 ppm³³
- CO₂: ≤ 1 ppm³³
- 기타 유기물/플루오로카본: ≤ 1 ppm³³
- 산도 (HF 기준): ≤ 0.1 ppmw³³
- 기타 등급 사용 가능 (예: 4N5 - 99.995%).³³ Daikin 은 5N 이상의 순도를 명시합니다.³⁴

3.3 옥타플루오로프로판 (C₃F₈)

- **화학식:** C₃F₈ (과불화프로판, R-218 으로도 알려짐)
- **특성:** 무색 가스, 에테르 냄새, 불연성, 무독성. 끓는점: -36.7 °C. 높은 GWP. 분자량: 188.02 g/mol. 비교적 높은 증기압.⁴
- **응용 분야:** 유전체(SiO₂, Si₃N₄, 유리)의 플라즈마 식각.⁴ 반응성 이온 식각(RIE) 및 잠재적으로 원자층 식각(ALE)에 사용됩니다.⁴ 비교적 높은 F:C 비율(8:3)로 인해 진공 챔버의 플라즈마 세정에도 사용됩니다.⁴ 냉매로 사용됩니다.⁷
- **순도 등급 및 사양:** 반도체 사용에는 고순도 등급(예: 5N)이 필요합니다. 특정 불순물 데이터는 스펙트럼에서 덜 사용 가능하지만, UHP 등급의 경우 CF₄ 및 C₂F₆ 와 유사한 패턴을 따를 것입니다. Messer 는 5.0 (99.999%) 등급을 나열합니다.⁷

3.4 헥사플루오로부타디엔 (C₄F₆)

- **화학식:** C₄F₆ (구체적으로 1,1,2,3,4,4-헥사플루오로-1,3-부타디엔)
- **특성:** 액화 가스, 무색, 무취, 유독성, 가연성. 끓는점: 5.5 °C. 포화 PFC 에 비해 GWP 가 낮아 환경 친화적으로 간주됩니다. 분자량: 162.03 g/mol.⁸
- **응용 분야:** 특히 고급 로직 및 메모리(DRAM, 3D NAND) 제조에서 고종횡비(HAR) 유전체 식각에 중요한 식각 가스.⁸ RIE, DRIE, PECVD 공정에 사용됩니다.⁸ 높은 식각 속도와 선택성으로 평가받습니다.³⁷
- **순도 등급 및 사양 (예시):**
 - 등급 4 (99.99%):

- 기타 플루오로카본: < 200 ppmv ³⁷
- 이소프로필 알코올: < 20 ppmv ³⁷
- 기타 탄화수소: < 250 ppmv ³⁷
- HF: < 10 ppmv ³⁷
- 등급 3 (99.9%)도 사용 가능.³⁷

3.5 옥타플루오로사이클로부탄 (c-C4F8)

- **화학식:** c-C4F8 (고리 구조, Halocarbon C318, R-C318 으로도 알려짐)
- **특성:** 무색, 무취, 불연성 액화 가스. 끓는점: -5.8 °C. 높은 GWP (9,540).¹ 분자량: 200.03 g/mol.⁴⁰
- **응용 분야:** SiO2 및 기타 유전체 식각에 널리 사용되며, 비등방성 식각을 돕는 중합 특성으로 평가받습니다.¹ 특히 3D NAND 의 HAR 식각에 중요합니다.³⁹ NF3 에 대한 저비용, 저배출 챔버 세정 가스 대안으로도 연구되었습니다.¹¹
- **순도 등급 및 사양 (예시):**
 - **전자/반도체 등급 (5N - 99.999% 또는 4N5 - 99.995%):**
 - O2+Ar: ≤ 1 ppm ⁴⁰ (또는 O2 ≤ 1 ppm ⁴², 4 ppm ⁴³)
 - N2: ≤ 2 ppm ⁴⁰ (또는 ≤ 3 ppm ⁴², 16 ppm ⁴³)
 - H2O (수분): ≤ 1-3 ppm ⁴⁰ (또는 ≤ 10 ppm ⁴³)
 - CO: ≤ 0.5 ppm ⁴⁰
 - CO2: ≤ 0.5 ppm ⁴⁰
 - 기타 플루오로카본/유기물: ≤ 2-4 ppm ⁴⁰ (또는 ≤ 20 ppm ⁴³)
 - 산도 (HF 기준): ≤ 0.1 ppmw ⁴⁰
 - 낮은 등급 (예: 3N, 3N8)도 사용 가능.⁴²

3.6 삼불화메탄 (CHF3)

- **화학식:** CHF3 (HFC-23, R23 으로도 알려짐)
- **특성:** 무색 가스, 약간의 에테르 냄새, 불연성. 끓는점: -82.1 °C.

수소불화탄소(HFC)로 분류됩니다. 높은 GWP (12,400).¹ 분자량: 70.01 g/mol.⁴⁵

- **응용 분야:** 특히 SiO₂ 및 Si₃N₄ 식각에 널리 사용되는 플라즈마 식각제이며, 종종 혼합물로 사용됩니다.¹ 수소의 존재는 PFC 에 비해 폴리머 형성 및 식각 특성에 영향을 미칩니다.³ 3D NAND 및 DRAM 식각에 사용됩니다.³⁹ 저온 냉매 및 소화제로도 사용됩니다.⁴⁵
- **순도 등급 및 사양 (예시):**
 - **전자 등급 (5N - 99.999%):**
 - 공기 (N₂+O₂+CO+CO₂): ≤ 5 ppmv ⁴⁶ (또는 N₂ ≤ 4 ppm, O₂ ≤ 1 ppm, CO ≤ 0.5 ppm, CO₂ ≤ 0.5 ppm ⁴⁸)
 - H₂O (수분): ≤ 2 ppmv ⁴⁶ (또는 ≤ 10 ppm ⁴⁸)
 - 기타 유기물: ≤ 3 ppmv ⁴⁶ (또는 ≤ 1 ppm ⁴⁸)
 - 산도 (HF 기준): ≤ 0.1 ppmw ⁴⁶
 - 기타 등급 사용 가능 (예: 3N, 3N5, 4N5).⁴⁶

3.7 질소 삼불화물 (NF₃)

- **화학식:** NF₃
- **특성:** 무색, 무취 가스. 강한 산화제. 끓는점: -129.0 °C. 높은 GWP (16,100 / 17,200 / 17,200).¹⁴ 분자량: 71.00 g/mol.¹²
- **응용 분야:** 주로 실리콘 기반 침전물 제거를 위한 CVD/PECVD 시스템의 고효율 챔버 세정 가스로 사용됩니다.¹¹ 일부 플라즈마 식각 공정 및 평판 디스플레이, 태양 전지 제조에도 사용됩니다.⁴ 플라즈마에서 높은 해리율로 풍부한 F 라디칼을 생성합니다.¹³
- **순도 등급 및 사양 (예시):**
 - **전자 등급 (4N6 - 99.996% 또는 5N - 99.999%):**
 - O₂+Ar: ≤ 0.3-3 ppm ¹²
 - N₂: ≤ 1.5-5 ppm ¹²
 - H₂O (수분): ≤ 0.1-1 ppm ¹²

- CO: ≤ 1 ppm¹²
- CO₂: $\leq 0.5-3$ ppm¹²
- CF₄: $\leq 3-20$ ppm¹²
- SF₆: $\leq 2-3$ ppm¹²
- N₂O: $\leq 1-3$ ppm¹²
- C₂F₆: ≤ 0.1 ppm⁴⁹
- 산도 (HF 기준): $\leq 0.1-1$ ppm¹²
- 낮은 등급 (예: 4N - 99.99%)도 사용 가능.¹²

3.8 육불화황 (SF₆)

- **화학식:** SF₆
- **특성:** 무색, 무취, 불연성, 화학적으로 불활성, 우수한 유전 특성. 끓는점: -63.7 °C (승화). 극도로 높은 GWP (22,800 / 23,500) 및 매우 긴 대기 수명 (~3200 년).¹⁶
분자량: 146.06 g/mol.⁵³
- **응용 분야:** 주로 전기 산업에서 고전압 개폐 장치 및 회로 차단기의 유전 절연체 및 아크 소호제로 사용됩니다.¹⁶ 반도체에서는 플라즈마 식각(특히 실리콘) 및 챔버 세정에 사용되지만, 높은 GWP 로 인해 사용이 감소하고 있습니다.⁴ 마그네슘 생산 및 추적 가스로도 사용됩니다.¹⁰
- **순도 등급 및 사양 (예시):**
 - **초고순도 등급 (5N - 99.999%):**
 - 공기 (O₂+N₂): < 4 ppmw⁵³
 - H₂O (수분): < 2 ppmv⁵³
 - CF₄: < 0.5 ppmw⁵³
 - 산도 (HF 기준): < 0.05 ppmw⁵³
 - 가수분해성 불화물: < 0.2 ppmw⁵³
 - CO: < 0.5 ppmw⁵³
 - CO₂: < 0.5 ppmw⁵³

- 표준 등급 (예: 4N - 99.99%)도 사용 가능.⁵³ Solvay 에서도 전자 등급을 제공합니다.⁵⁴

다음 표는 검토된 공급업체 데이터를 기반으로 이러한 가스의 주요 불순물에 대한 일반적인 UHP(5N 또는 유사) 사양을 요약한 것입니다. 사양은 공급업체 및 특정 등급에 따라 약간 다를 수 있습니다.

표 1: UHP (≥99.999%) 플루오로카본 가스의 일반적인 불순물 사양 (ppm)

불순물	CF ₄ (5N)	C ₂ F ₆ (5N)	c-C ₄ F ₈ (5N)	CHF ₃ (5N)	NF ₃ (4N6/5N)	SF ₆ (5N)
O ₂ +Ar	≤ 1	≤ 1 (O ₂)	≤ 1 (O ₂)	≤ 5 (공기)	≤ 0.3 - 3	≤ 4 (공기)
N ₂	≤ 2 - 5	≤ 5	≤ 2 - 3	≤ 4	≤ 1.5 - 5	(공기 내)
H ₂ O	≤ 1	≤ 1 - 2	≤ 1 - 3	≤ 2	≤ 0.1 - 1	≤ 2 (ppmv)
CO	≤ 0.3 - 0.5	≤ 1	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 1	≤ 0.5
CO ₂	≤ 0.3 - 2	≤ 1	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5 - 3	≤ 0.5
기타 FC	≤ 1	≤ 1	≤ 2 - 4	≤ 1 - 3 (유기물)	CF ₄ ≤ 3-20	CF ₄ ≤ 0.5
산도 (HF)	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1 - 1	≤ 0.05

참고: 사양은 예시이며 ⁵의 데이터를 기반으로 합니다. 단위는 ppmw(중량)로 지정되지

않은 경우 ppmv 입니다. "공기"는 일반적으로 N_2, O_2, Ar, CO, CO_2 를 포함합니다. "기타 FC/유기물"은 다른 플루오로카본 또는 유기 불순물을 의미합니다.

이러한 불순물에 대한 엄격한 통제는 매우 중요합니다. 예를 들어, 수분(H_2O)은 입자 형성과 원치 않는 산화를 유발할 수 있습니다. 산소(O_2)는 식각 선택성 및 폴리머 형성에 영향을 미칠 수 있습니다. 금속 불순물은 실리콘으로 확산되어 전기적 특성을 변경할 수 있습니다. 다른 플루오로카본은 플라즈마 화학 및 식각 특성을 변경할 수 있습니다. 생산에서 사용 지점까지 순도를 유지하는 것은 가스 공급망의 중요한 기능입니다.²⁹

4. 글로벌 공급업체 현황

반도체 제조에 사용되는 고순도 플루오로카본 가스 시장은 소수의 대규모 다국적 산업 가스 회사들이 지배하고 있으며, 특수 화학 제조업체와 특히 아시아 지역의 중요한 지역 업체들이 보완하는 형태로 고도로 집중되어 있습니다.²⁸ 이 회사들은 가스 생산, 정제, 분석, 포장 및 물류 분야의 전문 지식을 활용하여 반도체 산업의 까다로운 요구 사항을 충족합니다.

주요 글로벌 공급업체:

- **Linde plc (구 Praxair 포함):** 산업용, 특수 및 전자 가스의 선도적인 글로벌 공급업체.²⁸ 반도체 시장을 위한 광범위한 UHP 공정 가스, 전구체 및 서비스를 제공하며, 광범위한 경험과 글로벌 시설(북미, 유럽, 아시아)을 보유하고 있습니다.⁵⁸ 벌크 가스($N_2, O_2, Ar, H_2, He, CO_2$) 및 $CF_4, C_2F_6, C_4F_8, CHF_3, NF_3, SF_6$ 와 같은 불소 화합물을 포함한 전자 특수 가스를 공급합니다(단, 특정 목록은 출처/지역에 따라 다름) [6 (Linde Gas), ⁵⁸]. 신뢰성, 품질 관리 및 안전 시스템을 강조합니다.⁵⁸ 현장 UHP 가스 생산을 위한 SPECTRA™ 플랜트를 운영합니다.⁵⁹
 - 웹사이트: <https://www.linde.com/>, <https://www.linde-gas.com/> ⁶²
 - 연락처: 웹사이트 통해 ⁶²
- **Air Liquide S.A.:** 산업 및 전자 가스 분야의 또 다른 주요 글로벌 리더.²⁸ 벌크,

파이프라인 또는 현장 플랜트를 통해 UHP 캐리어 가스(N₂, O₂, Ar, H₂, He, CO₂)를 공급합니다.⁶⁴ ALOHA™ 및 Voltaix™ 브랜드로 고급 재료(전구체)를 제공하고, 할로겐 가스를 포함한 전자 특수 재료를 제공합니다.⁶⁴ 혁신(예: enScribe™ 저 GWP 식각 재료), 신뢰성, 품질 및 지속 가능성을 강조합니다.⁶⁵ 장비, 설치, 분석 서비스 및 가스/화학 물질 관리를 제공합니다.⁶⁶ 전자 재료를 위한 전용 R&D 및 생산 현장을 포함하여 전 세계적으로 광범위한 시설을 보유하고 있습니다.⁶⁷ 개요 스니펫에는 공급되는 특정 플루오로카본이 자세히 설명되어 있지 않습니다.⁶⁷

○ 웹사이트: <https://www.airliquide.com/>, <https://electronics.airliquide.com/> ⁶⁷

○ 연락처: 웹사이트 또는 특정 지역 연락처 통해 ⁶⁷

- **Merck KGaA (북미 EMD Electronics):** 반도체 산업을 위한 선도적인 통합 재료 솔루션 제공업체로, 가치 사슬의 여러 단계에서 활동합니다.²⁸ 증착, 식각, 세정 및 도핑용 특수 가스를 제공합니다.⁷⁰ 로직 및 메모리용 유전체 식각을 위한 C₄F₆ (Hexafluorobutadiene VLSI 등급)를 공급합니다.³⁸ Micron 과 같은 고객과 협력하여 GWP 가 낮은 식각 가스를 개발하고 NMP, TMAH, DMSO 와 같은 우려 화학 물질을 제거하기 위해 제품을 재구성하는 등 친환경 대안을 적극적으로 개발하고 있습니다.²⁵ 수많은 제조 현장과 R&D 투자를 통해 글로벌 입지를 확보하고 있습니다.⁷⁰ 개요 스니펫에는 C₄F₆ 외의 특정 플루오로카본이 자세히 설명되어 있지 않습니다.⁶⁹

○ 웹사이트: <https://www.merckgroup.com/> ⁶⁸

○ 연락처: 웹사이트 통해 ⁶⁹

- **SK Materials (SK Inc. 계열사):** 전자 재료, 특히 특수 가스 분야에 강점을 가진 한국 기업.¹⁵ NF₃ 생산 분야의 글로벌 리더(시장 점유율 40% 이상) 및 WF₆(#1), SiH₄(#2)의 주요 생산 업체.¹⁵ 한국 최초로 NF₃ 및 CH₃F 생산을 국산화했습니다.¹⁵ C₂F₆, CF₄, C₄F₈, C₂H₅F, CH₃F, C₄F₆, CH₂F₂, CHF₃, HBr 등 다양한 식각 가스를 생산합니다.³⁹ Resonac 과 식각 가스 합작 회사(SK Resonac)를 운영하고 있습니다.⁷² 3D NAND 와 같은 고급 공정을 위한 고정밀 가스에 중점을 둡니다.¹⁵

대만, 일본, 중국(진장에 1,500 톤 NF3 공장 포함)에 판매 법인을 설립하여 전 세계적으로 확장하고 있습니다.¹⁵

○ 웹사이트: <https://www.sk-materials.com/new/eng/> ³⁹

○ 연락처: <https://www.sk-materials.com/new/eng/html/customer/contact.asp> ³⁹

- **Daikin Industries, Ltd.:** 핵심 불소 화학 전문 지식을 활용하는 일본 다국적 기업.⁴⁴ 반도체 제조용으로 CF₄, CHF₃, CH₂F₂, C₃F₆, C₄F₈, C₂F₆(PFC-116, 5N 순도)를 포함한 고순도(>99.999%) 식각 가스를 공급합니다.³⁴ 원자재부터 정제까지 생산을 통합합니다.⁴⁴ 습식 식각제(HF, BHF) 및 장비용 불소 중합체/탄성체도 제공합니다.⁴⁴ Daikin America, Inc.를 포함한 글로벌 입지를 갖추고 있습니다.⁷³

○ 웹사이트: <https://www.daikinchemicals.com/> ⁷³

○ 연락처: <https://www.daikinchemicals.com/contact.html> ⁷³

- **Solvay S.A.:** 벨기에 다국적 화학 회사.²¹ 전자 등급 SF₆ 및 높은 GWP 가스(C₂F₆, CF₄, NF₃)의 대안으로 혁신적인 제로 GWP 세정 가스 Solvacean®(F₂/N₂ 혼합물)을 공급합니다.²¹ 지속 가능한 솔루션에 중점을 둡니다.²¹ 습식 식각/세정을 위한 Interlox® 과산화수소와 같은 고순도 습식 화학 물질도 제공합니다.²¹

○ 웹사이트: <https://www.solvay.com/> ²¹

○ 연락처: 웹사이트 통해 ²¹

- **Resonac Holdings Corporation (구 Showa Denko K.K.):** 주요 일본 화학 회사로, 고순도 플루오로카본 가스 분야의 선두 주자로 등재되어 있습니다.²⁸ SK Materials 와 식각 가스에 중점을 둔 합작 회사(SK Resonac)를 운영하고 있습니다.⁷² 특정 제품 세부 정보는 접근할 수 없었습니다.⁷⁷

- **Taiyo Nippon Sanso Corporation (TNSC, Mitsubishi Chemical Group 계열사):** 주요 일본 산업 가스 공급업체로, 선두 주자로 등재되어 있습니다.²⁸ 미국 Matheson Tri-Gas, Inc.를 포함하여 전 세계적으로 운영됩니다.⁵⁷ 특정 제품 세부 정보는 접근할 수 없었습니다.⁷⁸

- **Kanto Denka Kogyo Co., Ltd. (KDK):** 일본 화학 제조업체로, 선두 주자로 등재되어 있습니다.²⁸ 불소 화합물을 전문으로 합니다. 특정 제품 세부 정보는

접근할 수 없었습니다.⁷⁹

- **Foosung Co., Ltd.:** 한국 회사로, 선두 주자로 등재되어 있습니다.²⁸ 불소 화학에 중점을 둡니다. 특정 제품 세부 정보는 접근할 수 없었습니다.⁸⁰
- **Air Products and Chemicals, Inc.:** 주요 미국 기반 글로벌 산업 및 특수 가스 공급업체.⁵⁷ 전자 산업에 고순도 공정 가스를 제공합니다.⁸² 차세대 가스 공급 시스템을 도입하고 특수 가스 포트폴리오를 확장했습니다.⁸¹ 제공된 스니펫에는 특정 플루오로카본 가스 제공 내용이 자세히 설명되어 있지 않습니다.⁸²
 - 웹사이트: <https://www.airproducts.com/> ⁸²
 - 연락처: 웹사이트 통해 ⁸²
- **Messer Group GmbH:** 독일 기반 글로벌 산업 가스 회사.⁵⁷ 고순도 CF₄(최대 5.0 등급) 및 C₃F₈ 를 포함한 광범위한 전자 특수 가스(ESG)를 제공합니다.⁷ 전문성, 신뢰할 수 있는 공급 및 유연한 배송 옵션(실린더에서 현장까지)을 강조합니다.⁸³
 - 웹사이트: <https://www.messergroup.com/> ⁷
 - 연락처: 웹사이트 통해
- **EFC Gases & Advanced Materials:** UHP 전자 가스를 전문으로 하는 미국 기반 공급업체로, 할로카본(CF₄, C₂F₆, C₄F₈, CHF₃, C₄F₆) 및 탄화수소를 포함합니다.²⁷ 3N 에서 최대 5N(99.999%)까지의 등급을 제공합니다. 맞춤형 가스/혼합물을 제공합니다. 정제 능력, ISO 9001 인증, 고급 분석 기술(GC, MS, ICP-MS) 및 특수 실린더 준비를 강조합니다.²⁹ 높은 GWP 분자를 추적하기 위한 소프트웨어를 개발했습니다.²⁹
 - 웹사이트: <https://www.efcgases.com/> ²⁷
 - 연락처: 웹사이트 양식 통해 ²⁷

주요 지역 공급업체 (특히 중국):

중국 시장은 해당 지역의 반도체 제조 급증에 힘입어 두각을 나타내는 여러 국내 공급업체를 특징으로 합니다.¹⁵ 주요 업체는 다음과 같습니다:

- **Huate Gas Co., Ltd.** ²⁸
- **Kemeite (Yoke Technology 계열사)** ²⁸

- **Haohua Chemical Science & Technology Co., Ltd. (ChemChina 계열사):** 전자 등급 CF₄(최대 5N8), NF₃, SF₆ 및 기타 불소 화학 물질을 공급합니다.²⁸
 - 웹사이트: <http://en.haohua-gas.com/>⁸⁴
- **Jinhong Gas Co., Ltd.:** CHF₃ 를 공급하며 ⁴⁵, 주요 업체로 등재되어 있습니다.²⁸
- **Chengdu Taiyu Industrial Gases Co., Ltd.:** 전자 등급 CF₄(5N), C₄F₈(5N), NF₃ (4N6), CHF₃(5N)를 공급합니다.⁵
 - 웹사이트: <https://taiyugas.en.made-in-china.com/>⁵
- **기타 중국 공급업체:** Linggas, Juhua Group, PERIC Special Gases, Yongjing Technology, GrandiT Co., Ltd..²⁸ Nanjing Special Gas, Shougang Oxygen.⁵⁶

표 2: 반도체 산업용 주요 플루오로카본 가스 공급업체 개요

공급업체명	본사 지역	주요 플루오로카본 제품 제공	일반적인 순도 초점	주요 서비스 지역	웹사이트/연락처
Linde plc	유럽 (글로벌)	CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₄ F ₈ , CHF ₃ , NF ₃ , SF ₆ (세부 사항 상이)	UHP	글로벌	linde.com , linde-gas.com ⁶²
Air Liquide S.A.	유럽 (글로벌)	특수 재료 (ALOHA™, Voltaix™), 할로젠, 저 GWP 옵션	UHP	글로벌	airliquide.com , electronics.airliquide.com ⁶⁷
Merck KGaA	유럽 / 미국	C ₄ F ₆ , 특수	UHP	글로벌	merckgroup.

/ EMD Electronics		가스, 저 GWP 식각 가스			com ⁶⁹
SK Materials	대한민국	NF3,C2F6 ,CF4,C4F8,C2 HF5,CH3F,C4 F6,CH2F2 ,CHF3	UHP	글로벌 (아시아 중심)	sk- materials.co m ³⁹
Daikin Industries, Ltd.	일본	CF4,CHF3 ,CH2F2,C3F6 ,C4F8,C2F6 (5N+)	UHP (5N+)	글로벌	daikinchemic als.com ⁷³
Solvay S.A.	유럽	SF6, Solvaclean® (F2/N2 혼합물, 저 GWP)	전자 등급	글로벌	solvay.com 21
Resonac Holdings Corp.	일본	식각 가스 (SK 와 합작)	UHP	글로벌 (아시아 중심)	데이터 접근 불가 ⁷⁷
Taiyo Nippon Sanso Corp. (TNSC)	일본	특수 가스 (미국 Matheson 통해)	UHP	글로벌 (아시아 중심)	데이터 접근 불가 ⁷⁸

Kanto Denka Kogyo (KDK)	일본	불소 화합물	UHP	글로벌 (아시아 중심)	데이터 접근 불가 ⁷⁹
Foosung Co., Ltd.	대한민국	특수 가스	UHP	글로벌 (아시아 중심)	데이터 접근 불가 ⁸⁰
Air Products & Chemicals, Inc.	미국	고순도 공정 가스	UHP	글로벌	airproducts.c om ⁸²
Messer Group GmbH	유럽	CF4 (5N), C3 F8 (고순도), ESG	UHP	글로벌	messergroup .com
EFC Gases & Advanced Materials	미국	CF4, C2F6, C4 F8, CHF3, C4 F6	UHP (3N ~ 5N)	글로벌 (미국 중심)	efcgases.co m
Haohua Chemical Sci. & Tech.	중국	CF4 (5N+), NF3, SF6	UHP	중국, 아시아	en.haohua- gas.com ⁸⁴
Chengdu Taiyu Industrial Gases	중국	CF4 (5N), C4 F8 (5N), NF3 (4N6), CHF3 (5N)	UHP (4N6 ~ 5N)	중국, 아시아	taiyugas.en. made-in- china.com

참고: 제품 목록은 사용 가능한 스니펫을 기반으로 하며 완전하지 않을 수 있습니다.

UHP = 초고순도.

공급업체 전략 및 시장 포지셔닝:

이 시장의 치열한 경쟁 특성으로 인해 공급업체는 다각적인 전략을 채택하게 됩니다. Linde 및 Air Liquide 와 같은 대규모 다국적 기업은 가스뿐만 아니라 공급 시스템, 현장 생산(ASU, SPECTRA™ 플랜트), 장비 및 가스 관리 서비스를 포괄하는 통합 솔루션을 제공하여 엔드투엔드 지원을 제공하고 장기적인 고객 관계를 확보하는 것을 목표로 합니다.⁵⁸

혁신은 특히 환경 문제 해결에 중점을 둔 주요 경쟁 분야입니다. Solvay(Solvaclean®), Air Liquide(enScribe™), Merck 와 같은 회사는 전통적인 고 GWP 플루오로카본 및 세정 가스에 대한 저 GWP 대안을 적극적으로 개발하고 홍보하고 있습니다.²¹ 이는 지속 가능한 제조 관행에 대한 고객 수요 증가와 일치하며 강화되는 규제를 예상합니다.¹³

지리적 위치는 매우 중요합니다. 공급업체는 특히 대만, 한국, 중국, 일본의 주요 반도체 제조 허브에 가까이 있기 위해 아시아 태평양 지역에서 입지를 확장하고 있습니다.¹⁵ 동시에 미국 CHIPS 및 과학법과 유사한 유럽의 노력과 같은 정부 이니셔티브는 국내 반도체 생산에 상당한 투자를 촉진하고 있습니다.⁸⁷ 이러한 추세는 글로벌 가스 공급업체가 복원력을 강화하고 새로운 수요를 확보하기 위해 북미 및 유럽의 현지 생산 및 공급망 역량에 투자하도록 유도하고 있습니다.⁵⁹

아시아, 특히 중국과 한국(SK Materials, Haohua, Taiyu 등) 내 유능한 공급업체의 부상은 경쟁 환경의 변화를 의미합니다. 이러한 회사들은 종종 주요 고객과의 근접성 및 정부 지원의 혜택을 받아 지역 공급 옵션을 늘리고 잠재적으로 가격 경쟁을 심화시킵니다.¹⁵ SK Materials 의 NF3 지배력과 CH3F 와 같은 고급 식각 가스 국산화는 이러한 추세를 보여줍니다.¹⁵ EFC Gases 와 같은 전문 업체는 UHP 정제 및 고급 분석과 같은 틈새 강점에 집중하여 특정 고객 요구 사항을 충족합니다.²⁹

5. 주요 고객 및 소비 동향

고순도 플루오로카본 가스 수요는 복잡한 제조 시설(팹)을 운영하는 소수의 대형

반도체 제조업체 그룹에 의해 주도됩니다. 이러한 고객과 그들의 기술 궤적을 이해하는 것이 시장 동향을 파악하는 데 중요합니다.

주요 고객 부문:

- **종합 반도체 기업 (IDM):** 자체 반도체 소자를 설계, 제조, 판매하는 회사입니다. 대규모 팹을 운영하며 로직, 메모리 및 기타 칩 유형에 걸쳐 다양한 공정 요구 사항을 갖는 경우가 많습니다. 예로는 Intel, Samsung Electronics, SK Hynix, Micron Technology, Texas Instruments, STMicroelectronics 등이 있습니다.⁹¹
- **파운드리:** 다른 회사(Nvidia, Qualcomm, AMD, Broadcom 과 같은 팹리스 반도체 회사)가 설계한 칩 제조를 전문으로 하는 회사입니다. 특히 최첨단 기술 노드에서 운영되는 파운드리는 식각 및 세정 가스의 막대한 소비자입니다. 주요 업체는 TSMC, Samsung Foundry, GlobalFoundries, UMC, SMIC 입니다.⁹¹
- **메모리 제조업체:** DRAM 및 NAND 플래시 메모리 칩 생산에 특화된 회사입니다. 매우 깊고 좁은 구멍(고종횡비 피쳐)을 식각하는 것을 포함하는 3D NAND의 끊임없는 스케일링은 이 부문을 특정 플루오로카본 식각 가스의 특히 집중적인 사용자로 만듭니다.⁸ 주요 업체는 IDM 과 중복됩니다: Samsung, SK Hynix, Micron.⁹¹
- **디스플레이 패널 제조업체:** LCD 및 OLED 디스플레이 생산 업체도 박막 트랜지스터(TFT) 식각 및 증착 공정 중 챔버 세정을 위해 플루오로카본을 사용합니다.¹⁰ 주요 수요 중심지는 한국, 중국, 대만, 일본에 집중되어 있습니다.²⁸
- **기타 부문:** 태양광/광전지(PV) 셀 제조 및 발광 다이오드(LED) 생산과 같은 산업도 이러한 가스를 사용하지만, 일반적으로 집적 회로 및 디스플레이에 비해 전체 수요에서 차지하는 비중은 작습니다.⁵

주요 최종 사용자 프로파일 (예시적 소비 동인):

- **TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company):** 세계 최대 파운드리로서 압도적인 시장 점유율(~60%+)과 첨단 로직 노드(5nm, 3nm, 2nm 로

이동)의 선두 주자⁹¹로서, TSMC는 틀림없이 첨단 전자 가스의 단일 최대 소비자입니다. EUV 리소그래피 채택과 GAA 트랜지스터로의 전환은 HAR 피처를 위한 C₄F₆와 같은 첨단 플루오로카본을 포함할 가능성이 있는 호환 가능하고 고정밀 식각 및 세정 공정에 대한 수요를 견인합니다.⁸ 거대한 글로벌 팹 설치 공간(대만, 미국-애리조나, 일본, 잠재적으로 유럽)은 다양한 가스를 대량으로 필요로 합니다.⁹¹

- **삼성전자:** 세계 최대 메모리 제조업체(DRAM 및 NAND)이자 선도적인 IDM/파운드리로서 독특한 위치를 차지하고 있습니다.⁹¹ 이러한 이중 역할은 삼성을 전반적으로 막대한 소비자로 만듭니다. 3D NAND 스케일링에서의 리더십은 HAR 식각 가스의 대량 수요를 필요로 합니다.⁹⁸ TSMC의 파운드리 경쟁자로서 첨단 로직 공정 가스 수요도 견인합니다. 삼성은 지속 가능성에 대한 강한 집중과 기술 리더십을 보여주며 저 GWP 공정 가스를 적극적으로 개발하고 구현하고 있습니다.²⁵ 전 세계 팹(한국, 미국-텍사스)에 대한 대규모 투자가 가스 수요를 촉진합니다.⁹⁶
- **Intel Corporation:** 역사적으로 CPU에 집중했던 선도적인 IDM으로, 현재 파운드리 서비스(IFS)로 공격적으로 확장하고 공정 기술 리더십을 되찾기 위해 막대한 투자를 하고 있습니다.⁹¹ CHIPS 법 인센티브 하에 미국(애리조나, 오하이오) 및 유럽(아일랜드, 독일)의 신규 팹에 대한 상당한 투자는 가스 소비를 크게 증가시킬 것입니다.⁸⁹ 첨단 로직 노드(GAA로 이동)에 대한 집중은 정밀한 식각 및 세정 솔루션에 대한 수요를 견인합니다.⁹⁶
- **SK 하이닉스:** DRAM 및 NAND 플래시를 전문으로 하는 최고 수준의 메모리 제조업체.⁹¹ 삼성과 마찬가지로, 적층 수가 증가하는 고밀도 3D NAND에 대한 추진은 HAR 식각 가스(C₄F₈, C₄F₆ 등) 및 관련 세정 공정에 대한 상당한 수요를 견인합니다.³⁹
- **Micron Technology:** 또 다른 주요 글로벌 메모리 제조업체(DRAM, NAND).⁹¹ 3D NAND용 HAR 식각에도 크게 의존합니다. COF₂를 조사하고 Merck와 같은 공급업체와 협력하여 친환경 식각 가스를 개발하는 등 지속 가능한 가스 솔루션을

탐색하고 협력하는 데 특히 적극적이며, 이는 환경 영향 감소에 대한 업계 압력을 반영합니다.²⁰

Nvidia, AMD, Qualcomm, Broadcom 과 같은 팹리스 회사는 가장 진보된 칩을 설계하여 반도체 수요를 견인하지만 *간접적인* 소비자라는 점에 유의하는 것이 중요합니다.⁹¹ 이들의 수요는 플루오로카본 가스의 직접적인 구매자이자 사용자인 파운드리(주로 TSMC 및 삼성)에 발주되는 주문으로 전환됩니다.

수요 동인:

플루오로카본 가스 소비는 여러 상호 연결된 요인과 직접적으로 관련됩니다:

- 1. 전반적인 반도체 시장 성장:** 인공 지능(AI), 5G 통신, 사물 인터넷(IoT), 자동차 전동화 및 자동화, 클라우드 컴퓨팅/데이터 센터, 소비자 가전과 같은 메가트렌드에 힘입어 디지털 경제의 끊임없는 확장은 더 많은 칩, 따라서 가스를 포함한 더 많은 제조 재료에 대한 근본적인 수요를 견인합니다.⁷¹ 2023 년 전 세계 반도체 매출은 5,270 억 달러에 달했으며 2024년에는 두 자릿수 성장이 예상됩니다.⁸⁹
- 2. 기술 발전 및 복잡성:** 각 차세대 반도체 기술은 더 작은 피처 크기(7nm, 5nm, 3nm, 2nm 이하 노드 축소)와 더 복잡한 소자 아키텍처(FinFET에서 Gate-All-Around(GAA) 트랜지스터로 전환, 수직 적층 3D NAND 메모리 등)를 가져옵니다.²⁹ 이러한 복잡성 증가는 다음을 의미합니다:
 - **더 많은 공정 단계:** 고급 칩 제조는 구형 기술에 비해 수많은 식각 및 세정 주기를 포함하여 훨씬 더 많은 개별 처리 단계가 필요합니다.⁹⁷
 - **정밀도 요구:** 고종횡비의 나노 스케일 피처를 식각하려면 고도로 선택적이고 비등방성인 공정이 필요하며, 종종 특수 플루오로카본 화학 물질(예: C₄F₆, C₄F₈)과 더 엄격한 공정 제어가 필요합니다.⁸
 - **EUV 리소그래피:** 고급 노드에서 중요한 층을 패터닝하기 위한 극자외선(EUV) 리소그래피 채택은 새로운 레지스트 재료를 처리하고 더 미세한 해상도를 달성할 수 있는 호환 가능한 식각 및 세정 공정을 필요로 합니다.⁹⁶

3. **웨이퍼 투입량 증가 및 팹 용량 확장:** 글로벌 반도체 제조업체는 예상 수요를 충족하기 위해 신규 팹 건설 및 기존 팹 확장에 수천억 달러를 투자하고 있습니다.⁸⁷ 미국 CHIPS 법 도입 이후 미국에서만 90 개 이상의 프로젝트에 걸쳐 거의 4,500 억 달러의 민간 투자가 발표되었습니다.⁸⁹ 이러한 글로벌 용량 증설은 처리되는 웨이퍼 총량을 직접적으로 증가시키고 결과적으로 전자 가스의 총 소비량을 증가시킵니다.⁵⁵

소비 패턴:

특정 고객의 정확한 연간 사용량 데이터는 독점적이며 공개적으로 사용할 수 없지만, 시장 보고서 및 부문 분석은 소비 패턴에 대한 통찰력을 제공합니다:

- **집적 회로의 우위:** IC 제조는 가장 큰 최종 사용 응용 분야로, 2024 년 고순도 플루오로카본 가스 시장 수익의 약 72%를 차지하는 것으로 추정됩니다.²⁸ 이는 디스플레이나 태양 전지에 비해 칩 생산의 높은 물량과 복잡성을 반영합니다.
- **지역적 집중:** 아시아 태평양, 특히 대만, 한국, 중국, 일본은 주요 IDM, 파운드리, 메모리 및 디스플레이 팹의 집중으로 인해 지배적인 소비 지역입니다.²⁸ 북미와 유럽은 중요한 시장이며, 국내 제조업에 대한 지속적인 투자로 인해 점유율이 증가할 것으로 예상됩니다.⁸⁷
- **가스별 동향:** 특정 가스에 대한 수요는 주요 응용 분야와 관련이 있습니다. NF₃ 는 다양한 공정에서 챔버 세정에 널리 사용되어 높은 사용량을 보입니다.¹⁵ C₄F₆ 및 C₄F₈ 와 같은 가스는 HAR 식각이 필요한 3D NAND 및 고급 로직 노드의 스케일링과 직접적으로 연관되어 수요가 증가하고 있습니다.⁸ CF₄ 는 수많은 응용 분야에서 사용되는 다용도 주력 식각제로 남아 있습니다.⁵

최상위 반도체 제조업체의 구매력과 기술 로드맵은 플루오로카본 가스 시장에 큰 영향을 미칩니다. 이러한 주요 고객은 특정 가스에 대한 수요를 견인하고, 더 높은 순도 수준을 요구하며, 지속 가능한 솔루션을 점점 더 요구하여 공급업체의 R&D 우선 순위와 투자에 영향을 미칩니다. 공정 최적화 및 새로운 저 GWP 재료 개발에 대한 칩

제조업체와 가스 공급업체 간의 협력은 가스 제공의 진화에 직접적인 영향을 미치며 더욱 보편화되고 있습니다.¹³ TSMC와 같은 파운드리 회사는 고급 노드 제조 표준을 설정함으로써 서비스하는 전체 팹리스 생태계의 가스 요구 사항을 간접적으로 결정합니다.⁹¹

6. 현재 시장 분석: 규모, 동향 및 과제

반도체 제조용 플루오로카본 및 관련 가스 시장은 칩 수요에 따른 꾸준한 성장, 상당한 기술 발전, 공급업체 간의 치열한 경쟁, 그리고 증가하는 환경 압력으로 특징지어집니다.

시장 규모 및 세분화:

시장 규모 추정치는 범위(모든 전자 가스 vs. 특수 가스 vs. 플루오로카본만)와 출처에 따라 다르지만, 일반적으로 긍정적인 성장을 보이는 수십억 달러 규모의 시장을 가리킵니다:

- **전체 전자 가스 시장:** 2022-2024년에 63억 달러에서 68억 달러 사이로 평가되었으며, 2024/2025년에 5-10% 성장하여 약 63억 4천만 달러에서 65억 9천만 달러에 이를 것으로 예상됩니다.⁵⁵ 특수 가스는 주요 구성 요소이며, 2025년에 약 5% 성장할 것으로 예상됩니다.⁵⁵
- **고순도 플루오로카본 가스 시장:** 2024년에 14억 7,600만 달러로 추정됩니다.²⁸ 다른 보고서는 더 넓은 범위의 "플루오로카본 가스" 시장(비전자 용도 포함 가능성 있음)을 2024년에 83억 8천만 달러로 추정합니다.⁸⁶ 이러한 불일치는 범위 정의의 중요성을 강조합니다. 전자의 수치가 여기에 관련된 고순도 부문을 더 잘 나타낼 가능성이 높습니다.
- **반도체 특수 가스 시장:** 2024년에 25억 6천만 달러로 추정됩니다.⁸⁸ 이 부문에는 플루오로카본과 함께 실란, 암모니아 등 다른 특수 가스가 포함됩니다.
- **질소 삼불화물 (NF₃) 시장:** 2023년에 16억 8천만 달러로 평가되었으며, 주로 챔버 세정에 대한 높은 사용량을 반영합니다.⁹⁹

세분화:

- **유형별:** 주요 플루오로카본 가스에는 CF₄, C₂F₆, C₃F₈, C₄F₆, C₄F₈, CHF₃ 가 있으며, 관련 불소계 가스 NF₃ 및 SF₆ 도 포함됩니다.²⁸
- **응용 분야별:** 집적 회로(IC)가 지배적이며(약 72% 점유율), 디스플레이 패널, 태양광/PV, LED 및 기타가 그 뒤를 따릅니다.²⁸ 반도체 제조가 주요 동인입니다.¹⁰⁵
- **지역별:** 아시아 태평양 지역이 가장 큰 점유율(약 50% 이상)을 차지하며, 대만, 한국, 중국, 일본의 제조 집중도에 의해 주도됩니다. 북미와 유럽이 다음으로 큰 시장입니다.²⁸

주요 시장 동인:

이전에 논의한 바와 같이, 시장은 다음에 의해 추진됩니다:

1. **반도체 산업 확장:** AI, 5G, IoT, 자동차, 데이터 센터 및 소비자 가전 수요에 의해 주도됩니다.⁷¹
2. **기술 발전:** 칩 복잡성 증가(고급 노드, 3D NAND 와 같은 3D 구조, GAA 트랜지스터, EUV 리소그래피)는 특수 고순도 가스를 사용하는 더 정교하고 수많은 식각/세정 단계를 필요로 합니다.⁸
3. **글로벌 팹 용량 증가:** 전 세계적으로 신규 및 확장된 반도체 팹에 대한 막대한 투자는 공정 가스의 소비량을 직접적으로 증가시킵니다.⁸⁷

경쟁 역학 및 시장 점유율:

시장은 여전히 고도로 집중되어 있으며, 상위 5 개 글로벌 공급업체(Linde, Air Liquide, Merck, SK Materials, Resonac, TNSC 그룹)가 시장 점유율의 75% 이상을 차지합니다.²⁸ 경쟁은 다음과 같은 요소를 중심으로 이루어집니다:

- **순도 및 품질:** 엄격한 UHP 사양 충족은 필수적입니다.²⁹
- **공급 신뢰성:** 24/7 운영되는 팹에 대한 일관되고 중단 없는 공급 보장이 중요합니다.⁵⁹

- **글로벌 입지 및 물류:** 주요 제조 지역 전반에 걸쳐 고객에게 서비스를 제공할 수 있는 능력.⁵⁸
- **기술 지원 및 서비스:** 가스 취급, 안전 및 공정 최적화에 대한 전문 지식 제공.⁶⁶
- **혁신:** 차세대 가스, 특히 저 GWP 대안 개발.²¹
- **가격:** 비용은 여전히 요인이지만, 중요한 가스의 경우 신뢰성과 순도보다 부차적인 경우가 많습니다. 특히 중국과 한국에서 강력한 지역 업체의 등장은 경쟁을 심화시키고 현지화된 공급 옵션을 제공하고 있습니다.¹⁵

공급망 분석:

반도체 플루오로카본 가스 공급망은 독특한 과제에 직면해 있으며 신중한 관리가 필요합니다:

- **중요성 및 순도:** 이 가스들은 필수 불가결한 원자재이며, 초고순도($\geq 5N$)는 소자 수율에 필수적입니다. 이는 오염 방지를 위해 특수 생산, 정제, 고급 분석 검증(ppm/ppb 수준 불순물 검출) 및 세심한 포장(특수 처리된 실린더, 밸브)을 요구합니다.⁵
- **취약성:** 고순도 요구 사항, 제한된 수의 대형 공급업체에 대한 의존, 가스 생산 시설과 반도체 팹(특히 동아시아)의 지리적 집종의 조합은 내재된 취약성을 야기합니다.²⁸ 지정학적 사건(예: 무역 긴장, 관련 재료에 대한 수출 통제), 자연 재해 또는 물류 문제로 인한 중단은 칩 생산에 심각한 결과를 초래할 수 있습니다.⁹⁰ 형식과 같은 원자재 조달도 지리적으로 집중될 수 있습니다.
- **물류:** 고압 또는 액화 가스의 안전하고 신뢰할 수 있는 운송에는 특수 인프라, 컨테이너 및 엄격한 안전 규약 준수가 필요합니다.¹²
- **잠재적 병목 현상:** 기술 변화로 인한 특정 가스(예: NF₃, WF₆, 잠재적으로 HAR 용 C₄F₆)에 대한 급격한 수요 증가는 공급 용량 확장을 앞질러 잠재적인 부족 또는 가격 상승으로 이어질 수 있습니다.¹⁰⁷
- **복원력 전략:** 이러한 취약성에 대응하여 공급망 복원력을 향한 강력한 추진력이 있습니다. 여기에는 정부 이니셔티브(미국 CHIPS 법과 같은 국내 생산 촉진) 및

다중 소싱(여러 공급업체 인증)과 공급망의 지역화/현지화에 중점을 둔 기업 전략이 포함됩니다.⁸⁷

규제 환경:

환경 규제는 주요 형성 요인입니다:

- **온실가스 배출 (GWP):** 전통적인 플루오로카본(CF₄, C₂F₆, C₃F₈, CHF₃) 및 관련 가스(NF₃, SF₆)는 CO₂ 보다 수천 배 더 큰 높은 지구 온난화 지수를 가지고 있습니다.¹ 이는 산업의 환경 발자국에 대한 주요 우려 사항입니다. 자발적 감축 목표(예: 세계 반도체 협의회¹⁰) 및 이해 관계자 압력 증가는 다음과 같은 R&D 를 크게 촉진합니다:
 - **저 GWP 대안:** GWP 가 100 미만이거나 이상적으로는 0 에 가까운 새로운 식각 및 세정 가스 개발(예: 불포화 플루오로카본 C₄F₆, C₆F₆; 산소화 화합물 COF₂, C₃F₆O; 불소 혼합물 F₂/N₂).¹
 - **공정 최적화:** 개선된 공정 레시피 및 효율성을 통해 고 GWP 가스 소비 감소.¹³
 - **저감 및 재활용:** 배출 가스를 포집 및 파괴하거나 사용된 가스를 회수 및 재활용/재생하는 기술 구현.⁹
- **PFAS 규제:** 종종 "영원한 화학 물질"이라고 불리는 과불화화합물 및 폴리플루오로알킬 물질(PFAS)은 지속성 및 잠재적 건강 위험으로 인해 전 세계적으로 강력한 규제 감시를 받고 있습니다.¹¹⁰ 이 그룹에는 반도체에 사용되는 많은 플루오로카본이 포함됩니다. 반도체 산업은 종종 규제에서 특정 면제 또는 "현재 불가피한 사용" 지정(예: 메인, 뉴멕시코¹¹¹)의 혜택을 받지만, 장기적인 추세는 더 엄격한 통제를 향하고 있습니다. 미국 EPA 의 TSCA 섹션 8(a)(7) 규칙과 같이 과거 PFAS 사용에 대한 보고를 의무화하는 보고 요구 사항은 규정 준수 부담을 증가시키고 있습니다.¹¹¹ 3M 의 Novec 유체(HFE 화학 기반, 때때로 PFAS 로 간주됨)와 같은 관련 화학 물질의 단계적 폐지는 가능한 경우 지속성 불소 화학 물질에서 벗어나는 광범위한 시장 변화를 시사합니다.¹¹³ 이러한 규제 압력은 상당한 장기적 위험을 나타내며 비 PFAS 대안 검색을 동기 부여하지만, 중요한

반도체 식각/세정 단계를 위한 실행 가능한 대체품은 현재 매우 제한적입니다.²⁵

- **안전:** 이러한 가스의 안전한 취급, 보관 및 운송을 규제하는 엄격한 규정이 있으며, 이들 중 다수는 위험할 수 있습니다(예: C4F6 와 같이 독성, NF3 와 같이 산화성 또는 질식성).⁸

따라서 반도체 산업은 어려운 역학 관계에 놓여 있습니다. 첨단 칩 제조를 가능하게 하는 가장 확립되고 종종 가장 효과적인 플루오로카본(CF4, C2F6, C4F8, CHF3, NF3)은 종종 가장 큰 환경 부담(높은 GWP, PFAS 분류)을 수반합니다. 대체 저 GWP 가스를 개발, 인증 및 확장하는 것은 기술적으로 까다롭고 비용이 많이 들며, 확립된 공정 성능, 수율에 영향을 미치고 새로운 장비 또는 공정 조정에 상당한 투자가 필요할 수 있습니다.¹ 이는 최첨단 기술 성능 달성과 점점 더 엄격해지는 지속 가능성 기대 및 규제 충족 사이에서 지속적인 균형을 강요합니다. 저감 및 재활용은 완화 경로를 제공하지만 제조 운영에 추가 비용과 복잡성을 더합니다.⁹

7. 미래 시장 전망 (2025-2030/34)

반도체 플루오로카본 가스 시장의 미래 궤적은 기술 혁신에 의해 주도되는 반도체 산업의 지속적인 성장과 이러한 중요 재료의 환경 영향을 완화하기 위한 강화된 노력에 의해 형성될 것입니다.

시장 예측:

여러 시장 조사 기관이 꾸준한 성장을 예측하지만, 구체적인 수치는 다릅니다:

- **전체 전자 가스:** 2020 년대 후반 / 2030 년대 초반까지 연평균 성장률(CAGR)이 5%에서 7.6% 범위로 예상됩니다.⁵⁵ 예상 시장 규모는 범위와 기간에 따라 크게 다르며, 2029-2034 년까지 138 억 달러에서 228 억 달러에 이를 수 있습니다.⁷¹
- **고순도 플루오로카본 가스:** 한 예측은 7.3% CAGR(2025-2031)을 제시하며, 2031 년까지 약 24 억 5 천만 달러에 이를 것으로 예상합니다.²⁸ 다른 예측은 더 넓은 "플루오로카본 가스" 시장에 대해 더 낮은 3.3% CAGR 을 나타내며,

2034년까지 116억 4천만 달러에 이를 것으로 예상합니다.⁸⁶ 반도체 특수 가스 시장(플루오로카본 포함)은 7.63% CAGR(2025-2034)로 예측되며, 53억 4천만 달러에 이를 것으로 예상됩니다.⁸⁸

- **관련 시장:** 더 넓은 불소 화학 물질 시장은 4.4% CAGR(2024-2030)로 예측됩니다.¹⁰⁸ NF3 시장은 11.7% CAGR(2024-2032)의 강력한 성장이 예상됩니다.⁹⁹

이러한 예측은 2030년까지 1조 달러에 이를 가능성이 있는 약 8-10% CAGR로 예상되는 전체 반도체 시장 자체의 견고한 성장 전망에 의해 뒷받침됩니다.¹⁰⁰

기술 발전의 영향:

반도체 기술의 주요 변화는 가스 수요 진화의 주요 촉매제가 될 것입니다:

- **EUV 리소그래피:** EUV가 고급 로직 및 잠재적으로 DRAM의 중요 레이어에 대한 표준이 됨에 따라 관련 식각 및 세정 공정이 적응해야 합니다. 이는 새로운 레지스트 재료와 호환되고 필요한 패턴 충실도 및 라인 에지 거칠기 제어를 달성할 수 있는 특정 가스에 대한 수요에 영향을 미칩니다.⁹⁶ EUV 마스크 및 펠리클의 발전도 비용 효율적인 스케일링에 중요합니다.⁹⁶
- **Gate-All-Around (GAA) 트랜지스터:** FinFET에서 GAA 아키텍처로의 전환(2nm 노드 부근 예상)은 새로운 채널 재료(예: 실리콘 나노시트)와 복잡한 수직 적층 구조를 도입합니다.⁹⁶ 이러한 소자를 제작하려면 식각 및 증착에서 전례 없는 정밀도가 필요하며, 고도로 선택적인 식각제 및 원자 수준 제어가 가능한 잠재적으로 새로운 가스 화학 물질에 대한 수요를 견인합니다.⁹⁸
- **3D NAND 스케일링:** 더 높은 비트 밀도를 향한 끊임없는 추진은 전체 스택을 통해 식각해야 하는 채널 홀 및 슬릿의 종횡비를 극적으로 증가시키는 수백 개의 메모리 레이어(300개 레이어에 접근하거나 초과하며, 500개 이상을 목표로 하는 로드맵)를 적층하는 것을 포함합니다.⁹⁷ 이는 C4F6 및 C4F8와 같이 매우 깊고 직선적이며 균일한 식각을 가능하게 하는 가스에 대한 수요를 촉진합니다.⁸ 또한

이러한 어려운 구조에 대한 식각 속도와 프로파일을 개선하여 기존 가스 사용 방식을 변경하거나 더 깊은 식각을 가능하게 할 수 있는 극저온 식각과 같은 식각 기술 자체의 혁신을 주도합니다.⁹⁷

- **첨단 패키징:** 많은 확립된 공정에 의존하지만, 이중 통합 및 칩렛 아키텍처와 같은 기술은 새로운 재료 또는 인터페이스 세정 요구 사항을 도입하여 특정 가스 제형에 대한 틈새 수요를 창출할 수 있습니다.

이러한 기술 변곡점은 가스 시장이 진화하도록 강요합니다. 기존 주력 가스는 이러한 새롭고 복잡한 구조의 선택성, 비등방성 또는 잔류물 제거 요구 사항을 충족하는 데 한계에 직면할 수 있습니다. 이는 이러한 차세대 소자를 가능하게 하는 새로운 플루오로카본 화학 물질(불포화 또는 고리 화합물 등) 또는 새로운 공정 솔루션(최적화된 플라즈마 조건 또는 극저온 식각 등)을 개발하고 입증할 수 있는 공급업체에게 기회를 창출합니다.⁸

저 GWP 대안 및 지속 가능성 동향:

지속 가능성은 규제 압력과 기업 책임 목표 모두에 의해 주도되는 지배적인 주제로 남을 것입니다:

- **저 GWP 채택:** GWP 가 현저히 낮은(<100 또는 거의 0) 식각 및 세정 가스의 개발 및 채택이 가속화될 것입니다. 후보로는 불포화 PFC(C₄F₆, C₆F₆), 플루오로케톤(C₃F₆O), COF₂, 불소 기반 혼합물(F₂/N₂) 등이 있습니다.¹ 시장 침투는 비교 가능하거나 우수한 공정 성능, 비용 효율성 및 통합 용이성을 입증하는 데 달려 있습니다.
- **공정 효율성:** NF₃ 와 같은 고 GWP 가스 소비를 최소화하기 위해 기존 공정을 최적화하는 것은 즉각적인 배출 감소 이점을 제공하므로 계속해서 초점이 될 것입니다.¹³
- **재활용 및 저감:** 기존 고 GWP 가스 사용으로 인한 배출을 관리하는 수단으로 가스 회수, 재활용/재생 인프라 및 사용 지점 저감 시스템에 대한 투자가 증가할

가능성이 높습니다.⁹

- **PFAS 불확실성:** PFAS 규제의 장기적인 영향은 상당한 불확실성으로 남아 있습니다. 현재 반도체 제조에 대한 면제가 존재하지만, 지속적인 압력은 결국 모든 지속성 플루오로카본에서 벗어나도록 강요하여 완전히 새로운 비불소 화학 물질 또는 공정 기술로의 패러다임 전환을 필요로 할 수 있습니다. 이는 확립된 시장에 대한 주요 위험이자 파괴적인 혁신을 위한 중요한 기회를 나타냅니다.²⁵

따라서 미래 시장은 이중 과제에 의해 정의됩니다. 최첨단 반도체 제조에 필요한 점점 더 정교하고 고순도인 가스를 공급하는 동시에 이러한 재료와 관련된 환경 발자국을 대폭 줄이는 것입니다.²⁹ 성공은 가스 화학 및 공정 기술 모두에서 지속적인 혁신을 통해 이 복잡한 절충안을 탐색하는 데 달려 있습니다.

지역 시장 개발:

- **아시아 태평양:** 대만, 한국, 중국, 일본의 거대한 제조 생태계와 해당 지역에 대한 지속적인 투자에 힘입어 지배적인 시장으로 남을 것입니다.²⁸
- **북미 및 유럽:** 특히 첨단 노드를 위한 국내 반도체 생산을 촉진하고 공급망 복원력을 강화하기 위한 상당한 정부 지원 투자(예: 미국 CHIPS 법, EU 칩스 법)로 인해 가스 수요가 가속화될 것으로 예상됩니다.⁵⁹ 미국만 해도 2022 년에서 2032 년 사이에 제조 용량이 세 배로 증가하고 2024 년에서 2032 년 사이에 전 세계 반도체 자본 지출의 28%를 차지할 것으로 예상됩니다.⁸⁹

전략적 기회 및 위험:

- **기회:**
 - 고성능, 저 GWP 및 잠재적으로 비 PFAS 대체 가스 개발 및 성공적인 상용화.
 - 가스/화학 물질 관리, 현장 생산 및 재활용/저감 서비스를 포함한 통합 솔루션 제공.
 - 북미 및 유럽의 지역 팹 건설 붐 활용.
 - 차세대 소자 아키텍처(GAA, 고급 3D NAND)에 필수적인 지원 가스 공급.

- 위험:

- 강화되는 규제 압력(GWP 제한, PFAS 제한/금지).
- 공급망 중단에 대한 지속적인 취약성(지정학적 불안정, 물류 병목 현상, 원자재 부족).
- 반도체 시장에 내재된 주기적 변동성.
- 신소재 및 공정에 대한 높은 R&D 비용 및 긴 인증 시간.
- 특히 민첩한 지역 공급업체로부터의 경쟁 심화.

8. 결론

플루오로카본 가스 및 관련 화합물(NF₃, SF₆)은 현대 반도체 제조를 근본적으로 가능하게 하는 재료로서, 플라즈마 식각 및 챔버 세정 공정에서 중요한 역할을 하며, 레지스트 스트리핑 잔류물 제거에 틈새 응용 분야를 가지고 있습니다. 이러한 고순도 가스 시장은 연간 수십억 달러 규모로 상당하며, 소수의 대형 글로벌 공급업체가 지배하고 있지만, 특히 아시아의 지역 업체들이 중요성을 더해가고 있습니다. 수요는 주로 아시아 태평양 지역에 위치한 선도적인 IDM, 파운드리 및 메모리 제조업체에 집중되어 있지만, 국내 칩 생산에 대한 전략적 투자로 인해 북미와 유럽에서도 상당한 성장이 예상됩니다.

시장의 현재 상태와 미래 전망은 강력하고 상호 연결된 힘에 의해 형성됩니다. 반도체 기술의 끊임없는 발전 – 3nm 이하 노드로의 추진, GAA 트랜지스터로의 전환, 3D NAND 메모리의 수직 스케일링 – 은 식각 및 세정 공정에 대한 요구 사항을 지속적으로 높여 더 높은 정밀도, 선택성, 그리고 점점 더 복잡해지는 구조와 새로운 재료를 처리할 수 있는 능력을 요구합니다. 이러한 기술적 요구는 플루오로카본 가스 화학 및 관련 공정 기술의 지속적인 혁신을 필요로 합니다.

동시에 강력한 환경 압력이 상당한 영향을 미칩니다. 전통적인 플루오로카본의 높은 지구 온난화 지수와 PFAS("영원한 화학 물질")를 둘러싼 새로운 규제 감시는 지속 가능한 대안에 대한 시급한 필요성을 야기합니다. 이러한 지속 가능성 추진은 저 GWP

가스 제형, 소비 감소를 위한 공정 최적화, 저감 및 재활용 기술 구현을 향한 R&D 를 주도합니다.

향후(2025-2034) 시장은 더 넓은 반도체 산업의 확장을 반영하여 지속적인 성장을 준비하고 있습니다. 그러나 시장 구성은 진화할 가능성이 높습니다. 규제 및 고객 지속 가능성 이니셔티브 모두에 의해 주도되는 저 GWP 대안이 주목을 받으면서 일부 응용 분야에서 확립된 고 GWP 가스에 대한 수요가 완화되거나 감소할 수 있습니다. 3D NAND 용 HAR 식각(C₄F₆, C₄F₈) 및 잠재적으로 GAA 용 새로운 화학 물질과 같은 중요한 차세대 공정을 가능하게 하는 가스는 강력한 수요 성장을 보일 것으로 예상됩니다. PFAS 에 대한 장기적인 규제 궤적은 제조에 사용되는 플루오로카본에 대한 광범위한 제한이 부과될 경우 환경을 근본적으로 재편할 수 있는 주요 불확실성으로 남아 있습니다.

궁극적으로 미래 반도체 플루오로카본 가스 시장에서의 성공은 최첨단 기술 요구 사항과 시급한 환경적 필수 사항 간의 복잡한 상호 작용을 탐색하는 공급업체를 필요로 할 것입니다. 변동성이 큰 지정학적 환경에서 공급망 복원력을 관리하면서 고성능, 신뢰성 있고 점점 더 지속 가능한 가스 솔루션을 제공하는 혁신 능력은 시장 리더십의 결정적인 특징이 될 것입니다.

참고 자료

1. Characterization of SiO₂ Plasma Etching with Perfluorocarbon (C₄F₈ and C₆F₆) and Hydrofluorocarbon (CHF₃ and C₄H₂F₆) Precursors for the Greenhouse Gas Emissions Reduction, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10456486/>
2. SURFACE AND GAS PHASE REACTIONS FOR FLUOROCARBON PLASMA ETCHING OF SiO₂ - Mark Kushner Group, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://cpseg.eecs.umich.edu/pub/presentations/dazhang_icops2000.pdf
3. (PDF) Role of Fluorocarbon Film Formation in the Etching of Silicon, Silicon Dioxide, Silicon Nitride, and Amorphous Hydrogenated Silicon Carbide -

ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스,

https://www.researchgate.net/publication/228580751_Role_of_Fluorocarbon_Film_Formation_in_the_Etching_of_Silicon_Silicon_Dioxide_Silicon_Nitride_and_Amorphous_Hydrogenated_Silicon_Carbide

4. Construction and validation of C3F8 electron impact and heavy particle reaction scheme for modeling plasma discharges - AIP Publishing, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://pubs.aip.org/aip/pop/article/31/3/033504/3278249/Construction-and-validation-of-C3F8-electron>
5. Electronic Grade 99.999% Purity Carbon Tetrafluoride CF₄ ..., 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://tyhjgas.en.made-in-china.com/product/bQGpWLoMYjhJ/China-Electronic-Grade-99-999-Purity-Carbon-Tetrafluoride-CF4-Semiconductor-Use-Gas.html>
6. Electronic Grade High Purity 5n 99.999% Tetrafluoromethane CF₄ for Semiconductor Industry, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://taiyugas.en.made-in-china.com/product/AduTKEnMOzay/China-Electronic-Grade-High-Purity-5n-99-999-Tetrafluoromethane-CF4-for-Semiconductor-Industry.html>
7. Octafluoropropane – C3F8 – Quality & Service – Messer - Specialty Gases, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://specialtygases.messergroup.com/octafluoropropane>
8. Hexafluorobutadiene (HFBD, C₄F₆) (CAS 148043-73-6) - VallisCor, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.vallisCor.com/hfbd-c4f6/>
9. Semiconductor applications - Fluorocarbons, 4 월 28, 2025 에 액세스,
https://www.fluorocarbons.org/_old/semiconductor-applications/
10. Other Applications - Fluorocarbons - EFCTC, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.fluorocarbons.org/applications/other-applications/>
11. Fluorinated gases for semiconductor manufacture: Process advances in chemical vapor deposition chamber cleaning - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스,
https://www.researchgate.net/publication/244265970_Fluorinated_gases_for_semiconductor_manufacture_Process_advances_in_chemical_vapor_deposition_chamber_cleaning

12. Nitrogen Trifluoride, NF3 Specialty Gas, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.taiyugas.com/specialty-gases/nitrogen-trifluoride-nf3.html>
13. Chamber Cleaning Optimizations Can Reduce Carbon Emissions by 32%, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://newsroom.lamresearch.com/chamber-clean-cuts-co-32-percent>
14. Low Global Warming Potential Alternative Gases for Plasma Chamber Cleaning, 4 월 28, 2025 에 액세스,
https://www.researchgate.net/publication/316521723_Low_Global_Warming_Potential_Alternative_Gases_for_Plasma_Chamber_Cleaning
15. SK materials, 4 월 28, 2025 에 액세스,
https://www.skspecialty.com/new/eng/pdf/brochure_eng.pdf
16. Sulfur Hexafluoride for Switchgear & Electric Industries - EFC Gases & Advanced Materials, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.efcgases.com/applications/electric-and-switchgear/>
17. Sulfur Hexafluoride (SF6) Basics | US EPA, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.epa.gov/eps-partnership/sulfur-hexafluoride-sf6-basics>
18. Chamber Cleaning Optimizations Can Reduce Carbon Emissions by 32%, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://newsroom.lamresearch.com/chamber-clean-cuts-co-32-percent?blog=true>
19. Dry Cleaning of Fluorocarbon Residues by Low-Power Electron Cyclotron Resonance Hydrogen Plasma - Journal of the Korean Physical Society, 4 월 28, 2025 에 액세스,
[https://www.jkps.or.kr/journal/download_pdf.php?spage=108&volume=33&number=9\(2\)](https://www.jkps.or.kr/journal/download_pdf.php?spage=108&volume=33&number=9(2))
20. Greener Options for Plasma Cleaning in Semiconductor Manufacturing | TechInsights, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.techinsights.com/blog/greener-options-plasma-cleaning-semiconductor-manufacturing>
21. Electronics | Solvay, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.solvay.com/en/our-markets/electronics>
22. Photoresist Stripping Chemicals | Electronic Chemicals Supplier Daken Chem,

- 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.dakenchem.com/photoresist-stripping-chemicals/>
23. Overview of Photoresist Stripping in Semiconductor Fabrication - Alfa Chemistry, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.alfa-chemistry.com/photoresist/overview-of-photoresist-stripping-in-semiconductor-fabrication.html>
24. Photoresist Strippers | Fujifilm [United States], 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.fujifilm.com/us/en/business/semiconductor-materials/photoresist-ancillaries/photoresist-strippers>
25. Chemical Processes Could Make Semiconductor Manufacturing More Sustainable, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://octopart.com/pulse/p/chemical-processes-sustainable-semiconductor-manufacturing>
26. US5693147A - Method for cleaning a process chamber - Google Patents, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://patents.google.com/patent/US5693147A/en>
27. Tetrafluoromethane Gas (CF₄) | EFC Gases & Advanced Materials, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.efcgases.com/product/tetrafluoromethane/>
28. High Purity Fluorocarbon Gas Market Anticipated to Reach USD - openPR.com, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.openpr.com/news/3989958/high-purity-fluorocarbon-gas-market-anticipated-to-reach-usd>
29. Semiconductor Manufacturing Solutions - EFC Gases & Advanced Materials, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.efcgases.com/applications/semiconductor-industry/>
30. Hexafluoroethane | C₂F₆ | CID 6431 - PubChem, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hexafluoroethane>
31. Tetrafluoromethane, CF₄ Specialty Gas, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://concordegas.com/tetrafluoromethane-cf4-specialty-gas/>
32. Tetrafluoromethane-CF₄ - Specialty Gases - Messer Group, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.messergroup.com/web/specialty-gases/tetrafluoromethane>
33. Hexafluoroethane Gas (C₂F₆) from EFC, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.efcgases.com/product/hexafluoroethane/>
34. daikinchemicals.co.th, 4 월 28, 2025 에 액세스,

[https://daikinchemicals.co.th/storage/pdf/tds/Semicon_Etching_Agents/TDS_PFC-116\(C2F6\).pdf](https://daikinchemicals.co.th/storage/pdf/tds/Semicon_Etching_Agents/TDS_PFC-116(C2F6).pdf)

35. Hexafluoro ethane C_2F_6 - Messer Group, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://corporate.messergroup.com/documents/921887/0/Hexafluorethan+UHP.pdf/b9cedb68-38d6-3306-b8a0-9312ee3f03f9?t=1681826869119>
36. Zero fluorine emissions plasma PCB wafer etching, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://plasma-treating.com/innovations/plasma-etching-fluorine-recovery.html>
37. Hexafluoro-1,3-butadiene Gas - EFC Gases & Advanced Materials, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.efcgases.com/product/hexafluoro-13-butadiene-2/>
38. C4F6 Hexafluorobutadiene VLSI - Merck Group, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.merckgroup.com/en/expertise/semiconductors/offering/hexafluorobutadiene-vlsi.html>
39. Etching Gases < Business < SK materials, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.sk-materials.com/new/eng/html/products/Business05.asp>
40. High Quality Electronic Grade 99.999% C4f8 Octafluorocyclobutane ..., 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://taiyugas.en.made-in-china.com/product/jZzakNAXCLGO/China-High-Quality-Electronic-Grade-99-999-C4f8-Octafluorocyclobutane-for-Semiconductor-Industry.html>
41. Electronic Grade 99.999% Octafluorocyclobutane C4f8 Gas as Etchant in Semiconductor, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://firstgas.en.made-in-china.com/product/eOBaqcWvfzTL/China-Electronic-Grade-99-999-Octafluorocyclobutane-C4f8-Gas-as-Etchant-in-Semiconductor.html>
42. www.efcgases.com, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.efcgases.com/wp-content/uploads/2021/07/Spec-Sheet_Octafluorocyclobutane.pdf?x45734
43. www.airgas.com, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.airgas.com/airgascatalog/catalog/P24_Halocarbon-C318_Halocarbon-1216_Pure_Gases.pdf
44. Semicon etching agents - Daikin Chemical Europe, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.daikinchem.de/product/semicon-etching-agents/>
45. High Purity CHF3 Gas Trifluoromethane for Semiconductor Industry Gas - CHF3, Refrigerant Gas | Made-in-China.com - Jinhong Gas Co., Ltd, 4 월 28,

- 2025 에 액세스, <https://jinhonggas.en.made-in-china.com/product/xQJpiqEODTUm/China-High-Purity-CHF3-Gas-Trifluoromethane-for-Semiconductor-Industry-Gas.html>
46. Trifluoromethane Gas (CHF3) - EFC Gases & Advanced Materials, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.efcgases.com/product/trifluoromethane/>
47. Refrigerant Gas: High Purity Trifluoromethane CHF3 - Jiangsu Deo Gas Co., Ltd., 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://jsdo123.en.made-in-china.com/product/yabpOrREaMVn/China-Refrigerant-Gas-High-Purity-Trifluoromethane-CHF3.html>
48. Trifluoromethane Gas - Chengdu Taiyu Industrial Gases Co., Ltd., 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.taiyugas.com/refrigerant-gases/trifluoromethane-r23-chf3-refrigerant-gas.html>
49. Nitrogen Trifluoride | NF3 | Nitrogen Trifluoride for Semiconductor use, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.advancedspecialtygases.com/NF3.html>
50. High Purity NF3 Nitrogen Trifluoride Gas 99.996% Semiconductor Industry Etching Gas China Specialty Gas Price, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://taiyugas.en.made-in-china.com/product/ydMTtPLObAfi/China-High-Purity-NF3-Nitrogen-Trifluoride-Gas-99-996-Semiconductor-Industry-Etching-Gas-China-Specialty-Gas-Price.html>
51. Semiconductor Gas NF3 Nitrogen Trifluoride Gas, Electronic Grade ..., 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://tyhjgas.en.made-in-china.com/product/jwQAWLIhOzhar/China-Semiconductor-Gas-NF3-Nitrogen-Trifluoride-Gas-Electronic-Grade-99-996-.html>
52. Sulfur Hexafluoride Gas Applications at Metro Welding Supply, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.metrowelding.com/sulfur-hexafluoride>
53. concordegas.com, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://concordegas.com/wp-content/uploads/2020/02/sulfur-hexafluoride-product-specs.pdf>
54. Semiconductor Gases - Solvay, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.solvay.com/en/chemical-categories/fluorine-chemicals/semiconductor-gases>
55. TECHCET Projects Positive Forecast on Electronic Gases Despite Trade Tensions,

- 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://techcet.com/techcet-projects-positive-forecast-on-electronic-gases-despite-trade-tensions/>
56. Market-Research-Report-List-1/semiconductor-cleaning-and-etching-gas-market.md at main - GitHub, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://github.com/kavechoxo/Market-Research-Report-List-1/blob/main/semiconductor-cleaning-and-etching-gas-market.md>
57. Electronic and Semiconductor Gases Suppliers in United States - GlobalSpec, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.globalspec.com/local/4046/C_US
58. Semiconductors | Linde formerly Praxair - LindeDirect, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.lindedirect.com/industries/electronics/semiconductors>
59. Electronics Gases Keep the Chips Flowing | A Linde Company, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.linde-engineering.com/products-and-services/success-stories/2024/invisible-but-indispensable-electronics-gases-keep-the-chips-flowing>
60. Industrial Gas Solutions for the Electronics Industry - Linde Gas & Equipment Inc., 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.lindedirect.com/industries/electronics>
61. Fluorocarbon Gases Analysis Report 2025: Market to Grow by a CAGR of XX to 2033, Driven by Government Incentives, Popularity of Virtual Assistants, and Strategic Partnerships - MR Forecast, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.marketresearchforecast.com/reports/fluorocarbon-gases-102917>
62. Industry leader in gases for the electronics market | Linde, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.linde-gas.com/en/industries/electronics/index.html>
63. www.globalspec.com, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.globalspec.com/local/4046/C_US#:~:text=Advance%20Research%20Chemicals%2C%20Inc.&text=Aimtek%2C%20Inc.&text=Air%20Liquide%20USA%2C%20Inc.&text=Air%20Products%20and%20Chemicals%2C%20Inc.
64. Semiconductors - Air Liquide Electronics, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://electronics.airliquide.com/who-we-are/our-markets/semiconductors>
65. Electronics | Air Liquide, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.airliquide.com/group/activities/electronics>
66. Semiconductors | Air Liquide Electronics, 4 월 28, 2025 에 액세스,

- <https://electronics.airliquide.com/who-we-are/our-markets/semiconductors-0>
67. Air Liquide Electronics, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://electronics.airliquide.com/>
68. Semiconductor - Merck Group, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.merckgroup.com/en/expertise/semiconductors/industries-served/semiconductor.html>
69. Semiconductor Solutions - Merck Group, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.merckgroup.com/en/expertise/semiconductors.html>
70. Materials and Solutions - Merck KGaA, Darmstadt, Germany, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.emdgroup.com/en/expertise/electronics/materialsandsolutions.html>
71. Semiconductor Gases Market Trends 2025-2034: Growth, Strategic Insights, and Opportunities Ahead, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://blog.tbrc.info/2025/04/semiconductor-gases-market-segments/>
72. SK materials, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.sk-materials.com/new/eng/>
73. Semiconductor manufacturing | Fluorochemicals | Daikin Global, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.daikinchemicals.com/solutions/industries/semiconductor-manufacturing.html>
74. Electronics - Daikin America, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://daikin-america.com/electronics/>
75. Daikin Industries - PFC-116 (C2F6) - 76-16-4 - High Purity - Knowde, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.knowde.com/stores/daikin/products/daikin-industries-ltd-pfc-116-c2f6>
76. INTEROX® Electronics Grade - Solvay, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.solvay.com/en/brands/interox/interox-electronics-grade>
77. 1 월 1, 1970 에 액세스, <https://www.resonac.com/electronics/semiconductor-materials/high-purity-gas-semiconductor-manufacturing.html>
78. 1 월 1, 1970 에 액세스,
<https://www.mathesongas.com/industries/semiconductor-manufacturing>
79. 1 월 1, 1970 에 액세스, <https://www.kantodenka.co.jp/en/products/gas/>

80. 1 월 1, 1970 에 액세스, https://www.foosung.com/en/business/specialty_gas.php
81. Specialty Gases in Semiconductor Market Size, Growth, Scope & Forecast Report - 2033, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://datahorizonresearch.com/specialty-gases-in-semiconductor-market-23751>
82. Electronic Speciality Gases | Air Products, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.airproducts.com/industries/electronics>
83. Electronic Specialty Gases – Quality & Service – Messer, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://specialtygases.messergroup.com/electronic-specialty-gases>
84. CF4-Haohua Gas Co., Ltd. Electronic Special Gas/Fluorinated Fine Chemicals/Industry Gas and Calibration gas, 4 월 28, 2025 에 액세스, http://en.haohua-gas.com/business_details/978599959087964160.html
85. 1 월 1, 1970 에 액세스, <http://en.haohua-gas.com/business/1.html>
86. Fluorocarbon Gases Market Size, Share & Forecast Report 2034, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.marketresearchfuture.com/reports/fluorocarbon-gases-market-30574>
87. Creating a thriving chemical semiconductor supply chain in America - McKinsey & Company, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/creating-a-thriving-chemical-semiconductor-supply-chain-in-america>
88. Semiconductor Specialty Gas Market Size \$5.34 Bn 2034 - CMI - Custom Market Insights, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.custommarketinsights.com/press-releases/semiconductor-specialty-gas-market-size/>
89. 2024 state of the us semiconductor industry, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2024/09/SIA_State-of-Industry-Report_2024_final_091124.pdf
90. Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain: Challenges and Opportunities in 2025 - Synergy Associates, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://synergy-inc.com/strengthening-the-global-semiconductor-supply-chain-challenges-and-opportunities-in-2025/>

91. [2025] Top 10 Global Fabless Semiconductor Companies, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.blackridgeresearch.com/blog/list-of-top-global-fabless-semiconductor-companies/>
92. 10 Biggest Semiconductor Companies - Investopedia, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.investopedia.com/articles/markets/012216/worlds-top-10-semiconductor-companies-tsmintc.asp>
93. Semiconductors: A Changing of the Guard - Global Opportunities Trust plc, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://globalopportunitiestrust.com/semiconductors-a-changing-of-the-guard/>
94. Global Semiconductor Specialty Gas Market Size 2025-2034 - Custom Market Insights, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.custommarketinsights.com/report/semiconductor-specialty-gas-market/>
95. Global Semiconductor Foundry Market Share: Quarterly - Counterpoint Research, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.counterpointresearch.com/insights/global-semiconductor-foundry-market-share/>
96. EUV's Future Looks Even Brighter - Semiconductor Engineering, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://semiengineering.com/euvs-future-looks-even-brighter/>
97. Semicon WEST Fireside Chat July 11, 2023, 4 월 28, 2025 에 액세스, [https://www.tel.com/ir/policy/mplan/gtehh90000000038-att/SEMICON_West_2023_IR_Fireside_Chat_Q&A_Summary_\(English\).pdf](https://www.tel.com/ir/policy/mplan/gtehh90000000038-att/SEMICON_West_2023_IR_Fireside_Chat_Q&A_Summary_(English).pdf)
98. Exploring Plasma's Potentials In Next-Generation Semiconductor Manufacturing, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://imgroupofresearchers.com/exploring-plasmas-potentials-in-next-generation-semiconductor-manufacturing/>
99. Nitrogen Trifluoride Market Size, Share & Growth Report - 2032, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.gminsights.com/industry-analysis/nitrogen-trifluoride-nf3-market>
100. Semiconductor Device Market - Size & Trends - Mordor Intelligence, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global->

[semiconductor-device-market](#)

101. Semiconductor Industry Size, Share & Companies Analysis - Mordor Intelligence, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/semiconductor-industry-landscape>
102. [Latest] Global Semiconductor Specialty Gas Market Size/Share Worth USD 5.34 Billion by 2034 at a 7.63% CAGR: Custom Market Insights (Analysis, Outlook, Leaders, Report, Trends, Forecast, Segmentation, Growth, Growth Rate, Value) - GlobeNewswire, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.globenewswire.com/news-release/2025/04/01/3053075/0/en/Latest-Global-Semiconductor-Specialty-Gas-Market-Size-Share-Worth-USD-5-34-Billion-by-2034-at-a-7-63-CAGR-Custom-Market-Insights-Analysis-Outlook-Leaders-Report-Trends-Forecast-Seg.html>
103. Rare Gases For Semiconductor Market Size, Scope, Growth, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/rare-gases-for-semiconductor-market/>
104. Sustainable Transition of the Global Semiconductor Industry: Challenges, Strategies, and Future Directions - MDPI, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.mdpi.com/2071-1050/17/7/3160>
105. Electronic Specialty Gases Market Size, Share, Trends & Forecast Report 2034, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.marketresearchfuture.com/reports/electronic-specialty-gases-market-39391>
106. Semiconductor Gases Market Growth, And Opportunities (2023-2030) | ContriveDatumInsights, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.contrivedatuminsights.com/product-report/semiconductor-gases-market-248506>
107. Category: Gases | TechCET, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://techcet.com/category/gases/>
108. Fluorochemicals Market Size & Share | Industry Report, 2030 - Grand View Research, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fluorochemical-market>

109. Chip Challenges: Semiconductors and Supply Chain Risks - Exiger, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.exiger.com/perspectives/chip-challenges-semiconductors-and-supply-chain-risks/>
110. Overcoming PFAS Challenges in Semiconductor Manufacturing - IDE Technologies, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://ide-tech.com/en/blog/overcoming-pfas-challenges-in-semiconductor-manufacturing/>
111. PFAS Regulations - GreenSoft Technology, Inc., 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.greensofttech.com/resources/pfas-regulations/>
112. PFAS - Z2Data, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.z2data.com/content-hub/pfas>
113. 3M™ Novec™ Engineered Fluids & Solvents - Best Technology, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.besttechnologyinc.com/3m-novec-engineered-fluids-solvents/>
114. 3M Fluorinert Electronic Liquids for Immersion Cooling | 3M Novec - Best Technology, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.besttechnologyinc.com/3m-fluorinert-electronic-liquid/>
115. FKM And FFKM For Semiconductor Market Size Analysis - openPR.com, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.openpr.com/news/3927020/fkm-and-ffkm-for-semiconductor-market-size-analysis>