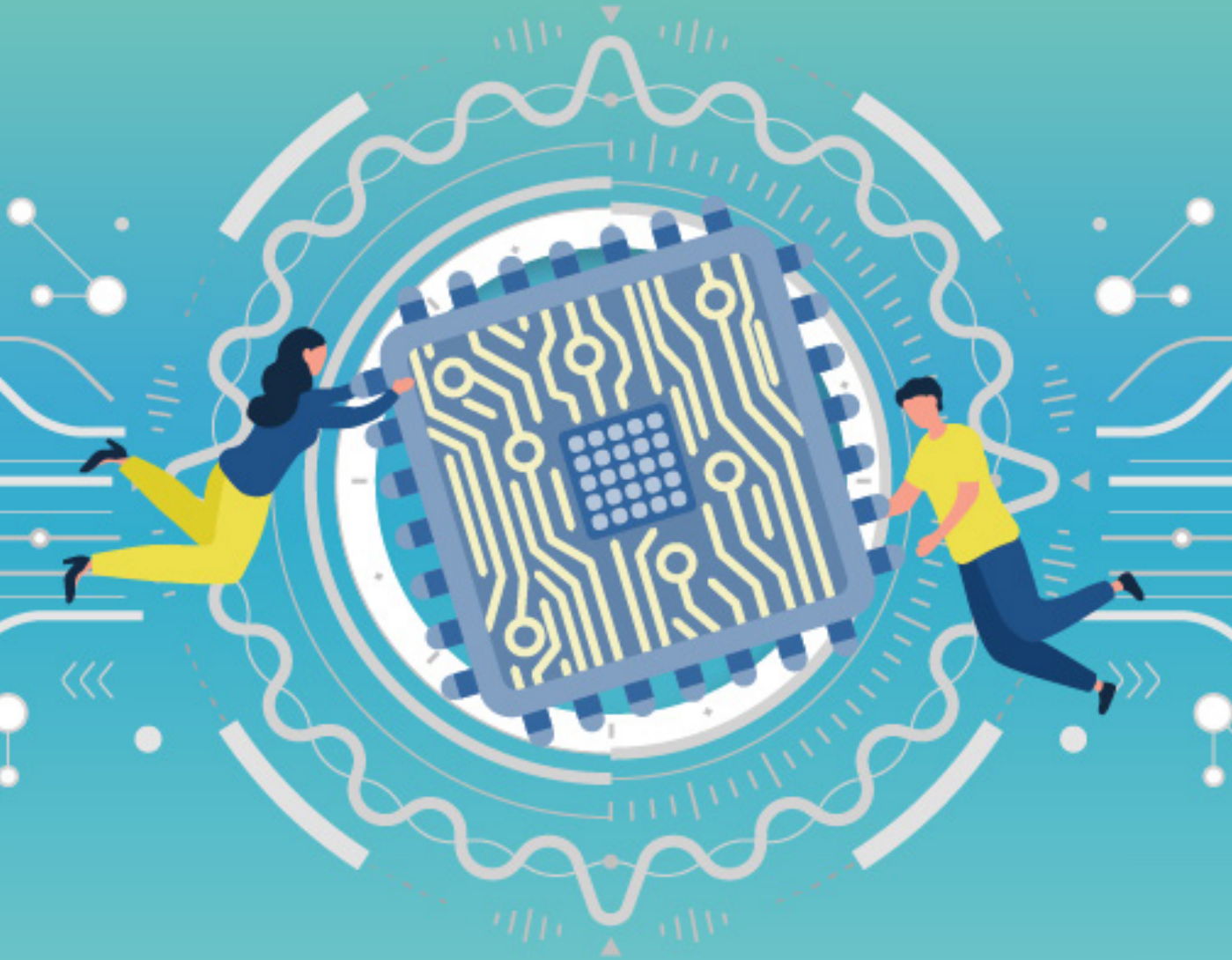


Deloitte.



딜로이트 2024 첨단기술, 미디어 및 통신 산업(TMT) 전망 급변하는 기술 및 환경... 반도체 산업의 새로운 과제와 기회

Download on the
App Store

GET IT ON
Google Play

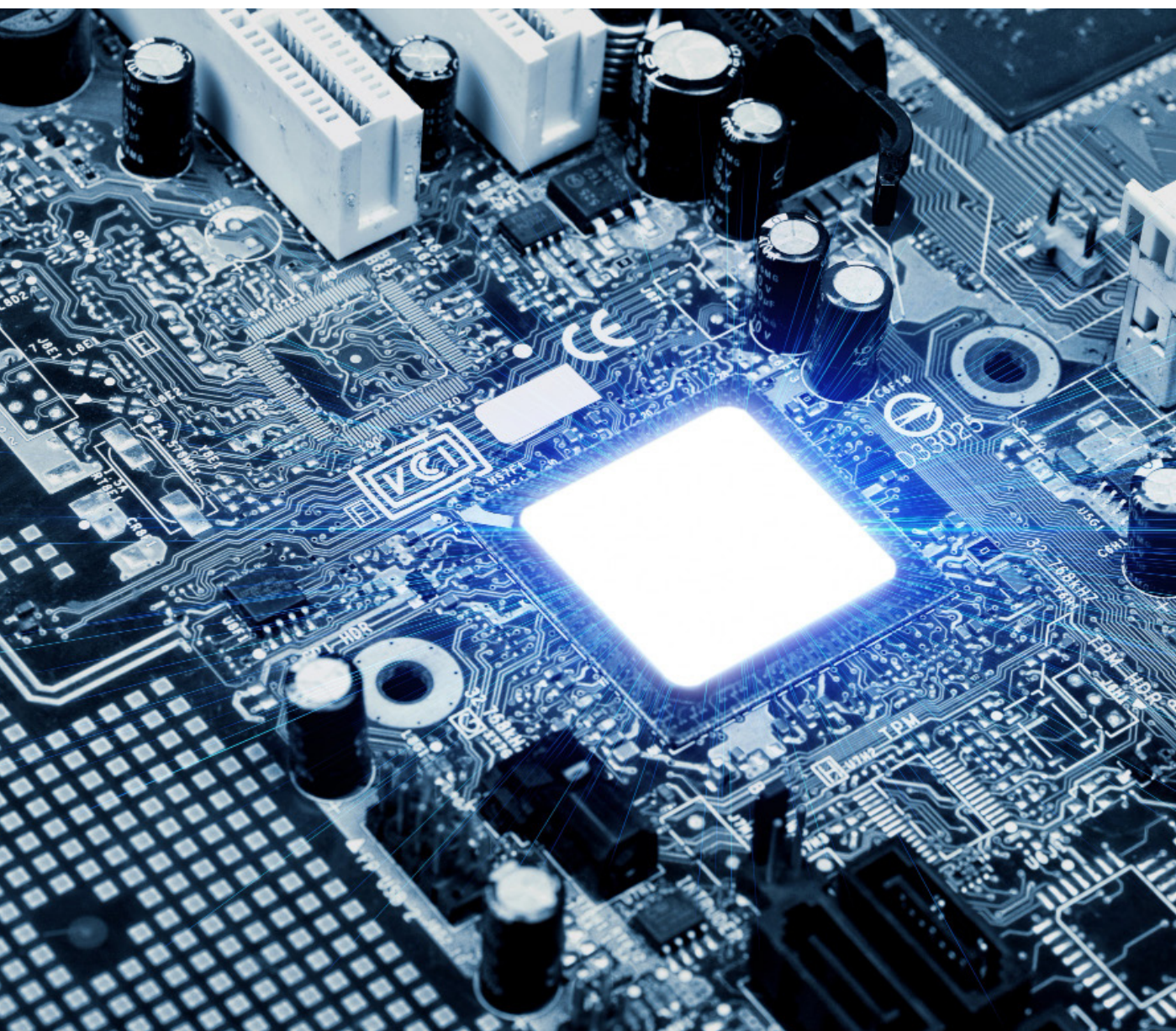


2024년 3월
Deloitte Insights

'딜로이트 인사이트' 앱에서
경영·산업 트렌드를 만나보세요!

목차

| | |
|--|----|
| 생성형AI 열풍, 반도체 업계에 순풍...거품으로 끝나지 않으려면? | 03 |
| 반도체 산업의 지속가능성, 생존과 공급망 회복력 위한 필수 요인으로 부상 | 09 |
| 첨단산업 원자재 공급망이 위태롭다...다각도의 과감한 투자 필요 | 20 |



생성형 AI 열풍, 반도체 업계에 순풍... 거품으로 끝나지 않으려면?

Duncan Stewart 딜로이트 캐나다 TMT Research Director 외 3인



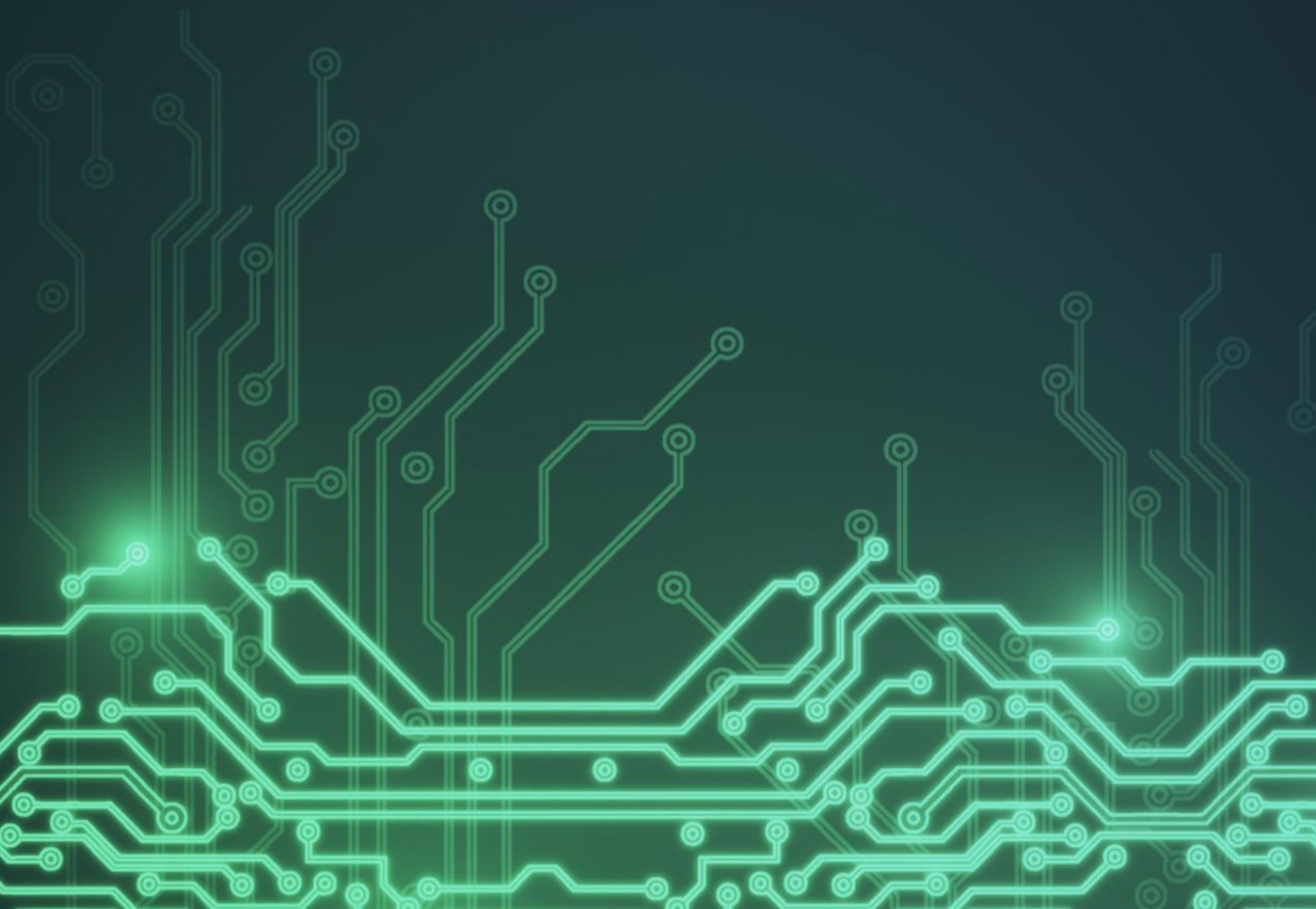
“

생성형AI(generative AI) 반도체칩 시장이
빠르게 성장하며, 2027년에는 생성형AI
칩을 포함한 AI 칩이 반도체 전체 매출의
절반을 차지할 것으로 전망된다.

딜로이트는 2024년 생성형AI 전용 반도체칩 시장 규모가 500억 달러를 넘을 것으로 전망한다. 2022년 0달러에 가까웠던 시장이 무섭게 성장해, 2024년 AI 칩 총매출의 2/3를 차지하는 것이다. 이에 따라 2024년에는 글로벌 칩 매출액 5,760억 달러(전망치)에서 AI 칩 총매출이 11%를 차지할 것으로 전망된다.¹ 참고로 최근 제시되는 2027년 AI 칩 시장 규모 전망치는 낮게는 1,100억 달러부터 4,000억 달러까지 범위가 넓다. 물론 보수적인 전망일수록 현실화될 가능성이 크다.²

한편으로는 생성형AI 칩 시장의 거품에 대한 우려도 있다. 2023~2024년 막대한 매출이 기대되지만, 기업용 생성형AI 활용사례가 실현되지 않아 2025년 AI 칩 수요가 급감할 수 있다. 2018년과 2021년 암호화폐 채굴 칩 시장의 거품 붕괴와 같은 일이 반복될 수 있는 것이다.³

하지만 거품이 붕괴하지 않는다면 보수적인 전망이라 할지라도 AI 칩은 반도체 시장에서 큰 비중을 차지할 것이다. 또한 스마트폰⁴ 및 PC⁵ 뿐 아니라 AI 칩 시장보다 성숙한 데이터센터 칩 시장의 수요가 부진할 것으로 예상되는 만큼, 반도체 시장 성장에 지금 당장 필요한 순풍 역할을 것이다.



AI 칩 수요 동향

생성형AI는 딥러닝에 신경망을 결합한 머신러닝의 일종으로, 최근 수년간 등장한 여타 AI와 비슷한 기제로 운영된다. 하지만 구세대 AI 칩으로는 생성형AI를 운영하기가 힘들다. 너무 느리고 비효율적이며, 설계 방식과 메모리도 적합하지 않기 때문이다.⁶ 따라서 주요 반도체 회사들은 생성형AI에 최적화된 칩을 만들고 있다.

2023년 봄 기준 생성형AI에 특화된 첨단 칩 가격은 개당 약 4만 달러에 달했다.⁷ 수요량은 백만 개가 넘는 정도였는데, 생산량이 부족해 공급이 부족했다. 첨단 패키징 병목현상이 주요 원인이었다. 이에 따라 수천 개 기업이 생성형AI 서비스 및 소프트웨어를 출시하는데 애를 먹었다.⁸ 생성형AI 칩을 생산할 수 있는 기업들 대다수는 여전히 수주 물량을 맞추지 못해 허덕이고 있고, 이러한 수급난은 2024년까지 지속될 것으로 전망된다.⁹ 이처럼 수요는 높는데 공급이 달리면 가격이 높아질 수밖에 없다.

지정학적 요인이 생성형AI 칩 수급에 더욱 큰 영향을 미칠 수도 있다. 생성형AI 특화 칩을 생산하려면 전 세계의 첨단 기술이 집약돼야 하는데, 현재로서는 대부분 공정이 아시아에 집중돼 있고 앞으로도 이러한 상황은 지속될 가능성이 크다. 더군다나 이러한 첨단 칩은 미국과 유럽뿐 아니라 여타 아시아 동맹국들의 대중-대러 무역제한 조치에 포함되는 경우가 많아지고 있다.¹⁰ 중국은 생성형AI 데이터세트와 소프트웨어를 자체 개발할 수 있지만, 향후 5년간은 최첨단 AI 프로세싱에 필요한 첨단 칩을 수입 또는 생산하기가 한층 어려워질 것이다. 여러 제재를 뚫고 중국이 칩 생산 능력을 얼마나 첨단화 시켰는지도 불확실하다. 2023년 9월에 중국 반도체회사가 7나노미터(nm) 프로세스 노드를 기반으로 만들어 내놓은 스마트폰용 칩은 첨단 생성형AI 칩에 사용되는 칩보다 용량이 적고 2~3세대 뒤쳐졌지만, 여러 무역제한 상황을 반영한다면 의외로 선전했다는 서방 전문가들의 평가를 받았다.¹¹

생성형AI 칩 관련 핵심 기술 이슈 세 가지

1. 최첨단 생성형AI 하드웨어의 핵심은 다양한 칩과 연결망으로 이뤄진 랙스케일 보드(rack-scale board)라 할 수 있다. 랙스케일 보드는 중앙처리장치(CPU)와 최첨단 프로세스 노드 기반의 대규모 그래픽처리장치(GPU)를 결합한 것인데, 이러한 GPU는 특수 고속 메모리로 특수 패키징 프로세스를 거쳐 양산된다.¹² 예를 들어, 칩으로는 대규모에 해당하는 800mm² 이상의 실리콘 칩에 800억 개의 트랜지스터를 탑재하고 2.5D 첨단 패키징이라 불리는 고대역폭메모리(HBM)3 패키징 프로세스를 거쳐 생성형AI를 운영할 수 있는 GPU가 만들어진다.¹³ 이 공정은 파운드리에서의 마지막 프로세스 또는 아웃소싱 업체가 실행하는 백엔드(back-end) 공정의 첫 프로세스로 작업할 수 있다.¹⁴
2. 이러한 생성형AI 가속기 대부분이 배치되는 데이터센터에서는 대량의 데이터를 가능한 한 빠른 속도로 단거리 이동시켜야 하는 경우가 있는데, 이 때 특수 네트워킹 칩이 필요하다.¹⁵ 네트워킹 칩은 생성형AI 애플리케이션에만 사용되는 것은 아니지만, 현재로서는 생성형AI에 가장 많이 사용되며 2024년 수십억 달러의 매출이 기대되는 분야다.¹⁶
3. 마지막으로, 생성형AI 칩은 보드당 약 10KW가 필요할 정도로 양산 시 에너지 소비량이 막대하다. 또한 여러 개의 칩으로 이뤄져 있어 냉각기가 감당할 수 있는 것보다 많은 열을 낸다. 따라서 데이터센터 액체냉각(liquid cooling) 시장이 2024년 연간 약 25% 성장해 20억~30억 달러 규모에 달할 것으로 전망된다.¹⁷ 이처럼 대용량 전력을 충당하려면 에너지 효율성이 높은 고압 전력 시설의 신설이 필요하다.¹⁸ 이로 인해 소형 업체들을 중심으로 연간 수억 달러 규모의 고압 전력 시장도 형성될 것으로 전망된다.¹⁹

결론: 생성형AI, 반도체 시장에 순풍 불어주겠지만 여러 변수 가능성

딜로이트는 2024년 반도체 시장에서 생성형AI로 창출되는 매출이 약 500억 달러에 달할 것으로 거의 확신한다. 하지만 현재의 높은 수요와 칩 가격이 공급 증대와 새로운 공급업체의 등장으로 해소된다면 전망은 불확실해진다.

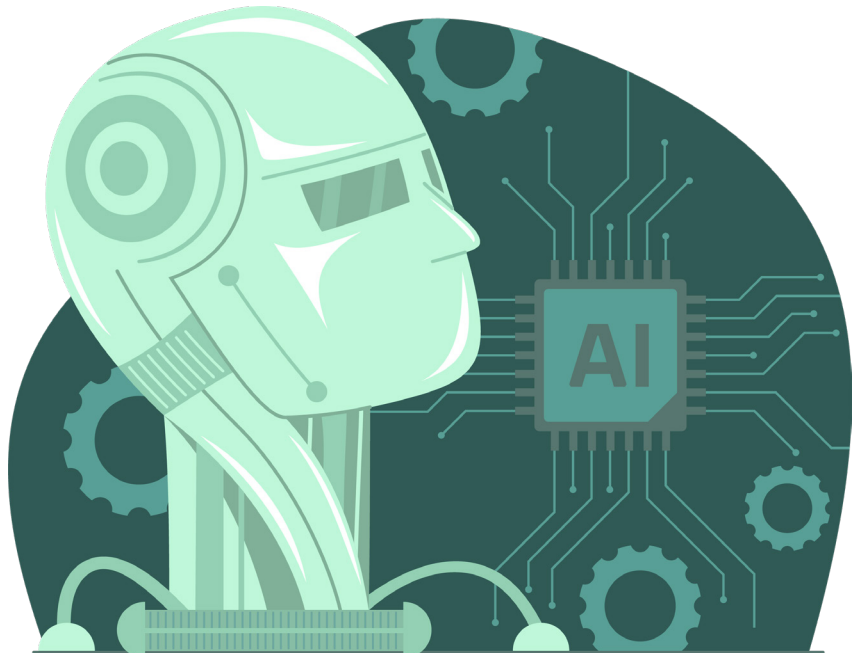
서두에 2027년에 이르면 글로벌 AI 칩 시장 규모가 최대 4,000억 달러에 달할 수 있다는 전망을 소개했다. 이는 꽤 탄탄한 근거가 있는 전망이고 전 세계 반도체 업계도 이러한 전망을 중요하게 여긴다. 하지만 4,000억 달러가 지나치게 낙관적인 전망이라는 근거도 무시할 수 없다. 첫째, 생성형AI GPU 시장은 2023년 여름 기준 단 한 개의 기업이 독점해, 공급이 부족할 수밖에 없었다.²⁰ 한편 구매자들은 소비자 및 기업용 생성형AI 학습 및 추론에 쓰일 칩이 더 많이 필요할 것이라는 전망에 되도록 많은 칩을 확보하려 사재기에 나섰다.²¹ 그 결과 칩 가격이 천정부지로 치솟았다. 하지만 현재 시장을 독점한 기업의 생산량이 늘거나 새로운 경쟁사가 등장한다면 생성형AI 칩 가격은 하락할 가능성이 크다. 그렇게 되면 이들 기업의 매출은 2025년부터 감소할 수 있다.

둘째, 칩을 구매하는 고객사들은 충분한 물량을 공급받지 못할 때 필요보다 많이 주문한다. 예를 들어, 주문한 물량의 25%밖에 공급받지 못할 것이라는 계산에 실제로 필요한 물량은 2만5,000 개인데 10만 개를 주문하는 것이다. 수요량이 7만5,000개 부풀려지는 것이다. 하지만 AI 칩 생산량이 늘어 수요-공급 균형이 회복될 경우, 구매 기업들이 이전대로 주문하면 필요 이상의 칩을 떠안게 되기 때문에 주문량을 줄일 것이다. 과거 반도체 산업의 급격한 주기 변동을 야기한 '채찍 효과'가 발생하는 것이다.²²

셋째, 현재 생성형AI 학습과 추론은 모두 데이터센터용 생성형AI 칩과 동일한 칩으로 운영된다. 하지만 앞으로 생성형AI 추론의 상당 부분이 엷지 프로세서에서 이뤄질 가능성이 크다.²³ 엷지 프로세서 생성형AI는 데이터센터용보다 성능이 낮은 GPU 및 CPU, 또는 새로운 애플리케이션 특화 집적회로(IC)로도 운영이 가능하다. 따라서 관련 시장에는 기존 생성형AI 칩 제조사뿐 아니라 기존 엷지 프로세서 칩 회사와 반도체 설계를 하지 않았던 기업들까지 새로운 경쟁사들이 진입할 수 있다.²⁴ 엷지 프로세서에서 처리되는 생성형AI의 추론이 늘어날수록, 시장 규모가 커지거나 데이터센터용 생성형AI 칩 가격이 하락할 것이다.

마지막으로, 앞서 언급했듯 생성형AI 칩 시장이 2023~2024년 폭발적으로 성장하다가 2025년 거품이 붕괴될 것이라는 우려가 있다. 이는 대세 전망은 아니지만, 반도체 시장의 난폭한 등락 가능성을 익히 알고 있다면 완전히 무시할 수 있는 견해는 아니다.

확실히 전망하기는 어렵지만 AI 칩 공급이 늘고 다각화되는 한편 수



요가 예상보다 저조하고 옛지 프로세서에서 이뤄지는 AI 추론이 늘어나 가격이 하락하면, 2027년 AI 칩 시장 규모는 앞서 언급한 1,100억~4,000억 달러의 하단에 그칠 가능성이 있다. 그렇다 하더라도 2024년 규모(전망치)에서 두 배 성장하는 수준이다.

하지만 시장 규모가 1,000억 달러든 4,000억 달러든 기업들이 AI 칩, 특히 생성형AI 칩을 필요로 할 것이라는 점은 변함이 없다. 또한 안정적이고 신뢰할 수 있는 공급망을 확보해야만 혁신, 경제적 성공, 국가 안보를 사수할 수 있다는 기업들의 인식도 변하지 않을 것이다.

이 대목에서 미국과 유럽의 해결과제가 이슈로 등장한다. 미국과 유럽에서 다수의 반도체회사들이 AI 및 생성형AI 운영에 필요한 첨단 CPU와 GPU를 생산할 수 있는 노드 제조시설을 구축하고 있지만,²⁵ 프론트엔드(front-end)와 백엔드(back-end)를 통틀어 패키징 역량이 현재로서는 부족하다.²⁶ 뿐만 아니라 AI 칩 필수인 HBM이나 HBM3e 공장도 기존으로는 터무니없이 부족한데 신설 계획도 충분치 않다.²⁷ 따라서 미국과 유럽은 AI 칩을 자체 생산할 수는 있어도, 결국 HBM3 메모리 탑재와 첨단 패키징 공정을 위해 한국, 대만, 동남아시아 등 아시아에 의존할 수밖에 없는 실정이다.

유럽반도체법(European Chips Act)과 미국 반도체 및 과학법(CHIPS and Science Act) 모두 첨단 패키징 및 메모리 기술 개발과 생산능력 강화를 위한 예산을 책정했으나,²⁸ 이것만으로 생성형AI 칩 패키징의 자급자족이 가능해질지는 불확실하다.

생성형AI 칩 시장의 성장에 있어 또다른 변수는 중국이다. 현재 미국을 위시해 네덜란드와 일본 등이 대중 수출제한 조치를 발동해, 생성형 AI 칩을 포함한 모든 종류의 첨단 노드 기반 칩의 대중 수출뿐 아니라 중국에 기술 노하우를 전수하는 것까지 제한하고 있다.²⁹ 향후 미국 등의 추가 수출제한 조치로 비(非)첨단 칩까지 수입할 수 없게 될 상황에 대비해,³⁰ 주요 중국 인터넷 기업들은 2023년 8월에 50억 달러 어치의 생성형AI 칩을 주문한 바 있다.³¹

생성형AI가 2027년에도 지금처럼 혁신, 경제성장, 국가안보에 중요한 기술로 간주되고 중국이 계속 첨단 AI 칩을 수입하지도 못하고 개발에 필요한 톨도 얻지 못한다면, 중국은 AI 칩 양산에 필요한 원재료의 수출 제한이라는 강수를 둘 수 있다. 그렇게 되면 전 세계 AI 칩 생산이 큰 차질을 빚게 되고 글로벌 경제성장에도 막대한 부정적 영향을 미칠 수 있다.

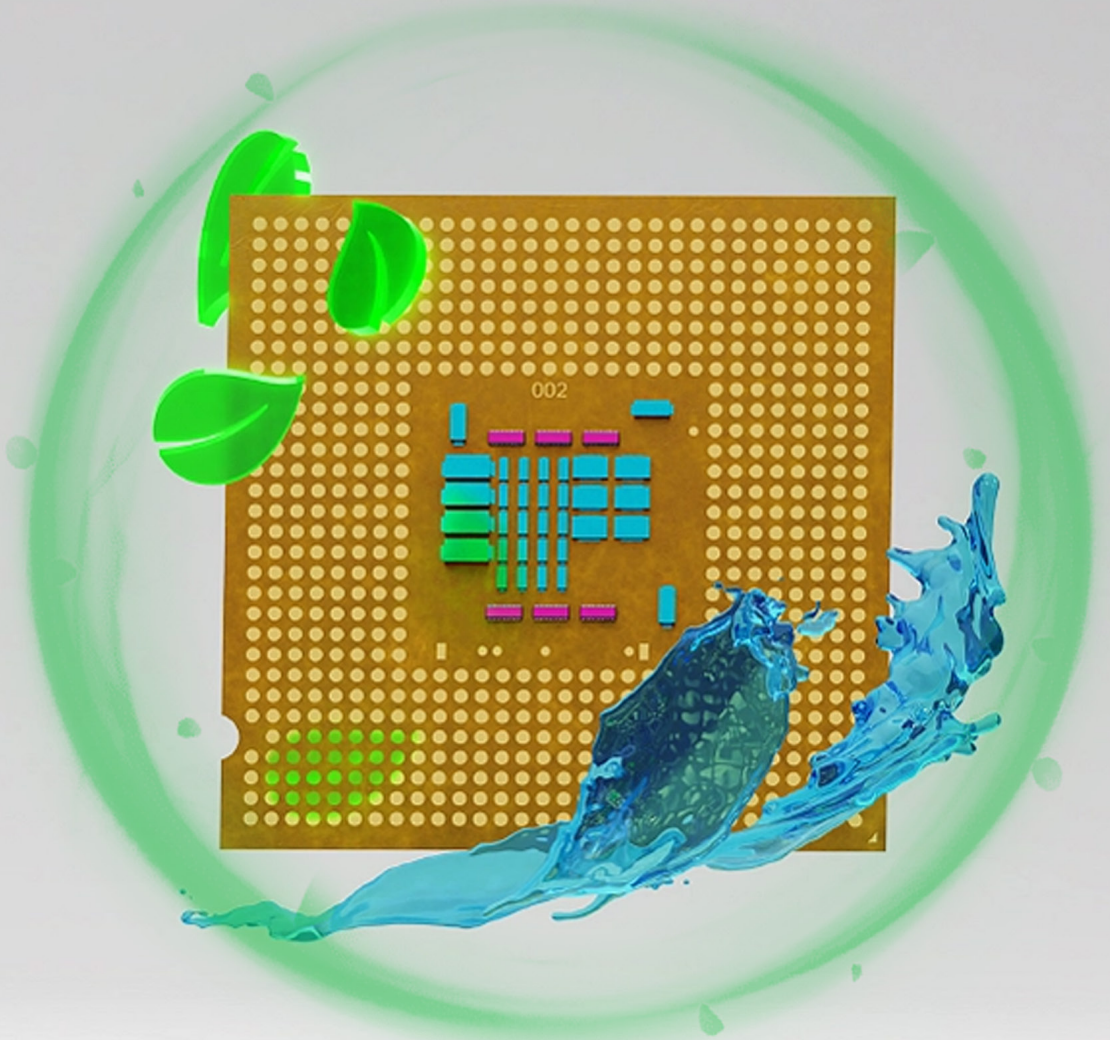


주석

1. World Semiconductor Trade Statistics, "[WSTS Semiconductor Market Forecast Spring 2023](#)," May 2023.
2. Analysis based on data sourced from multiple publicly available sources: Martin Baccardax, "[Nvidia jumps higher as Mizuho analysts see \\$300 billion AI chip potential](#)," The Street, July 24, 2023; Patrick Seitz, "[Intel on track with data center chip lineup, touts play in artificial intelligence](#)," Investor's Business Daily, March 30, 2023; World Semiconductor Trade Statistics, "[WSTS Semiconductor Market Forecast Spring 2023](#)," Deborah Yao, "[Analysts' take: Nvidia widens its total addressable market](#)," AI Business, June 1, 2023.
3. The Economist, "[Crypto-miners are probably to blame for the graphics-chip shortage](#)," June 19, 2021.
4. International Data Corporation (IDC), "[Weak consumer demand continues to delay a recovery for the smartphone market, according to IDC](#)," press release, May 31, 2023.
5. IDC, "[PC and Tablet market face further decline before a rebound in 2024, according to IDC](#)," press release, June 13, 2023.
6. Samuel K. Moore, "[Nvidia's Next GPU Shows That Transformers Are Transforming AI](#)," IEE Spectrum, April 8, 2023.
7. Kif Leswing, "[Nvidia's top A.I. chips are selling for more than \\$40,000 on eBay](#)," CNBC, April 14, 2023.
8. GPU Utils, "[Nvidia H100 GPUs: supply and demand](#)," July 2023 (updated August 2023), accessed September 15, 2023.
9. Lucas Mearian, "[Chip industry strains to meet AI-fueled demands — will smaller LLMs help?](#)," Computerworld, September 28, 2023.
10. Rita Liao, "[China's AI firms might further lose chip access in new US ban](#)," TechCrunch, June 28, 2023.
11. Jeff Pau, "[SMIC bypasses US curbs to make 7nm chips](#)," Asia Times, September 5, 2023.
12. Dylan Patel, Myron Xie, Gerald Wong, and George Cozma, "[AI Capacity Constraints - CoWoS and HBM Supply Chain](#)," Semi Analysis, July 5, 2023.
13. Ibid.
14. Semiconductor Engineering, "[Advanced Packaging](#)," accessed November 14, 2023.
15. Brian T. Horowitz, "[AI Workloads Spur Competition in Networking Chips](#)," Network Computing, July 13, 2023.
16. Deloitte analysis of AI networking chip market.
17. Deane Dray, Jonathan Atkin, et al., RBC Imagine: Datacenter Liquid Cooling Market Overview, June 21, 2023.
18. Steve Taranovich, "[Data centers feel the power density pinch](#)," Electronic Design, August 6, 2021.
19. Dylan Patel, Myron Xie, Gerald Wong, George Cozma, "[Energizing AI: Power delivery competition heats up Vicor, MPS, Delta, ADI, Renesas](#)," Semi Analysis, August 2, 2023.
20. Dylan Patel, Myron Xie, Gerald Wong, and George Cozma, "[AI Capacity Constraints - CoWoS and HBM Supply Chain](#)."
21. Ibid.
22. Chris Richard, Dan Hamling, Duncan Stewart, and Karthik Ramachandran, "[Five fixes for the semiconductor chip shortage](#)," Deloitte Insights, December 6, 2021.
23. Lucas Mearian, "[Chip industry strains to meet AI-fueled demands — will smaller LLMs help?](#)"
24. Ibid.
25. Michelle Adams, "[Where Are All the New Semiconductor Fabs in North America & Europe?](#)" Z2Data, September 12, 2023.
26. Duncan Stewart, Karthik Ramachandran and Brandon Kulik, "[Chipping in to boost production: US and Europe move toward greater self-sufficiency and resilient supply chains](#)," Deloitte Insights, April 24, 2023.
27. Anton Shilov, "[Memory makers on track to double HBM output in 2023](#)," AnandTech, August 9, 2023.
28. Sheryl Miles, "[CHIPS Act implementation requires strong focus on 'Advanced Packaging'](#)," Electronic Specifier, October 11, 2022.
29. Anirban Ghoshal, "[US wins support from Japan and Netherlands to clip China's chip industry](#)," COMPUTERWORLD, January 30, 2023.
30. Andrew Ross Sorkin, Ravi Mattu, Bernhard Warner, Sarah Kessler, Michael J. de la Merced, and Lauren Hersch, "[The A.I. chips war could heat up this summer](#)," The New York Times, June 28, 2023.
31. Kanjyik Ghosh and Stephen Nellis, "[China's internet giants order \\$5 bln of Nvidia chips to power AI ambitions -FT](#)," Reuters, August 10, 2023.

반도체 산업의 지속가능성, 생존과 공급망 회복력 위한 필수 요인으로 부상

Duncan Stewart 딜로이트 캐나다 TMT Research Director 외 3인



“

현대식 그린필드(greenfield) 공장이 늘어나면서 반도체 산업 전반의 지속가능성이 개선될 것으로 기대된다. 하지만 생산방식 전환 노력을 강화하면 그린필드 공장뿐 아니라 기존 브라운필드(brownfield) 공장의 에너지, 물, 공정가스 소비량도 절감할 수 있다.

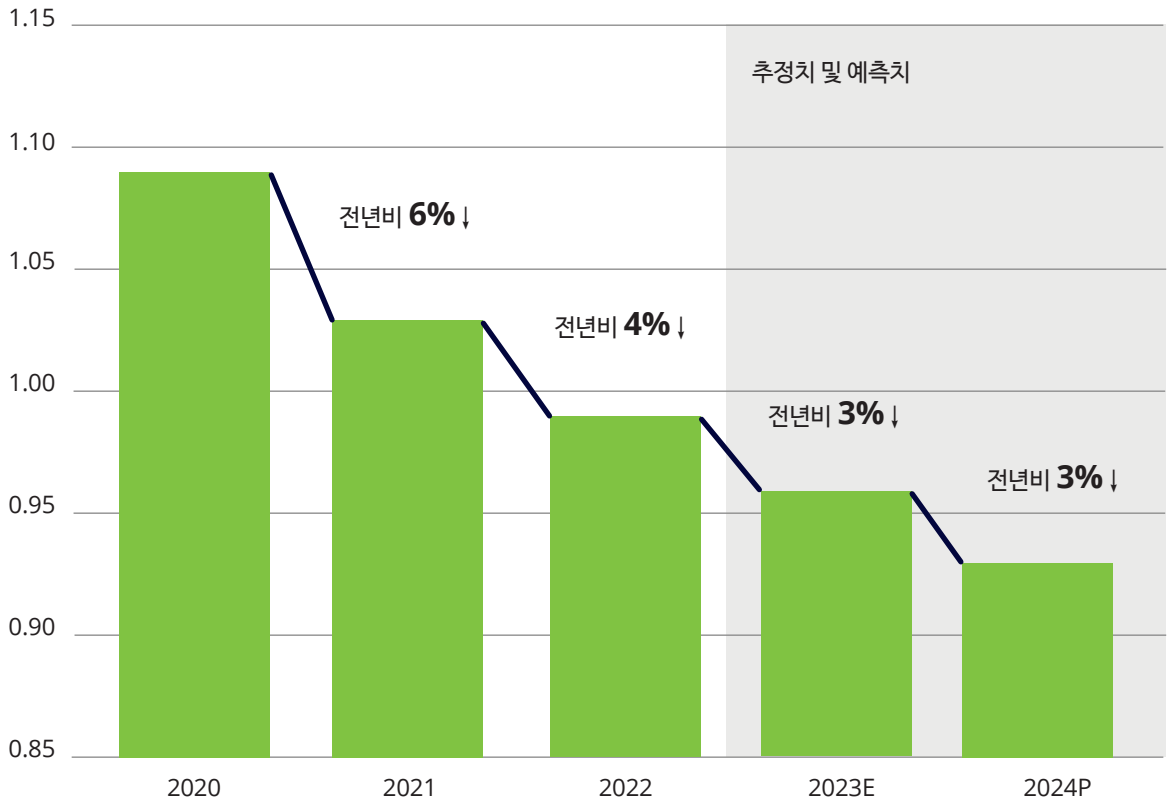
반도체 제조 산업은 변동성이 난폭하기로 악명이 높다. 2023년 가을에는 반도체 산업이 1990년 이후 7번째 경기하강을 겪었다.¹ 이에 따라 반도체 산업 매출은 미화 기준 2023년 전년비 10% 감소했다가, 2024년에 12% 반등할 것으로 예상된다.² 그리고 반도체 산업이 하강 국면을 보이면 에너지, 물, 공정가스 소비량이 줄어 지구온난화지수(global warming potential, GWP)가 하락하고, 활기를 되찾으면 GWP도 상승한다. 지속가능성을 절대적 수치로 계산하면 실상을 제대로 파악하기 힘들다. 특히 등락을 보이면서도 성장 속도가 매우 가파른 반도체 산업의 경우 절대적 수치로는 지속가능성 실상을 파악할 수 없다. 하지만 반도체 산업 매출이 2023년 5,150억 달러에서 2030년까지 두 배 가량 증가해 1조 달러를 넘을 것으로 예상되는 만큼, 지속가능성 노력에 박차를 가하지 않으면 GWP가 큰 폭 상승하는 것을 막기 힘들 수 있다.³

반도체 산업의 지속가능성을 측정할 수 있는 더욱 정확한 지표는 단위당 생산하는 데 소비되는 자원의 양을 측정하는 원단위(intensity)다. 매출 1달러를 창출하는 데 필요한 에너지, 물, 공정가스 소비량을 측정하는 것이다. 딜로이트는 2024년 반도체 산업의 용수(그림 1)와 에너지 원단위가 감소할 것으로 예상한다. 또한 주요 반도체 제조사들이 소비하는 전체 에너지 중에서 재생에너지의 비중이 늘어남과 동시에 재생에너지의 원단위가 줄어들 것으로 전망된다.



그림 1. 반도체 산업의 용수 원단위 2년 이동평균치(2020~2024년)

단위: 매출 1달러당 소비되는 물의 양을 킬로그램(kg) 단위로 측정한 원단위



참조: E는 추정치(estimated value), P는 예측치(predicted value)를 나타낸다. 용수 원단위 2년 이동평균치는 반도체 산업의 총매출 대비 용수 총소비량(백만 톤 단위)의 비율을 집계한 것이다. 반도체 제조사들이 물 소비량을 줄이려는 노력을 지속함에 따라, 2021년과 2022년 용수 원단위는 전년비 각각 6% 및 4% 감소했고, 2023년에는 3% 감소했을 것으로 추정되며, 2024년에도 3% 감소할 것으로 예상된다.

출처: 용수 소비량 데이터는 메모리, 로직, 아날로그 반도체를 생산하는 종합반도체업체(IDM)와 파운드리 등 북미·아시아·유럽의 11개 주요 반도체 상장사들이 발표한 기업의 사회책임(CSR) 보고서를 바탕으로 취합한 것이다. 매출 데이터는 2020~2022년 데이터의 경우 비영리 단체인 세계반도체무역통계기구(WSTS)의 연간 보고서(2020~2022년)에 기반했고, 2023~2024년 수치는 추정치(E)와 예측치(P)를 제시한 것이다.

지난 10년간 반도체 산업 전반에서 반도체 지속가능성 개선 노력이 이뤄지면서 물과 에너지 원단위가 지속적으로 줄고 있다. 특히 첨단시설을 갖춘 그린필드 공장이 급증하면서 반도체 산업의 지속가능성도 개선되고 있다. 그린필드 공장은 다른 조건이 같다는 전제 하에 5~20년된 브라운필드 공장에 비해 설비, 톨, 제조공정 등의 지속가능성이 훨씬 뛰어나기 때문이다. 그렇긴 해도 첨단 노드 기술을 도입한 그린필드 공장은 또다른 지속가능성 문제를 안고 있다. 예를 들어 28나노미터(nm)에서 2nm로 기술이 성숙하면 에너지 소비량은 3.5배, 물 소비량은 2.3배, 온실가스 배출량은 2.5배 늘어난다. 그리고 반도체 기술의 첨단화가 지속되면서 이러한 추세는 지속될 것으로 전망된다.⁴ 하지만 정작 반도체 산업의 지속가능성을 더욱 크게 개선시키는 것은 브라운필드 공장의 제조방식 전환이다. 딜로이트는 브라운필드 공장들이 제조방식 전환 프로젝트를 완수하면 향후 수년간 에너지, 물, 공정가스 원단위가 크게 줄어들 것으로 예상한다.

반도체 산업 지속가능성 노력 여전히 부족하다

반도체 전주기에 걸친 에너지 및 자원 소비량을 살펴보면, 생산 과정에서 소비되는 규모는 미미한 수준이다. 생산 이후 소비되는 에너지(예: 대규모 전력을 소비하는 생성형AI 데이터센터)야말로 본 게임이라 할 수 있다. 자원 채취, 테스트 및 패키징, 유통, 전 주기, 폐기 등의 과정에서도 만만치 않은 규모의 에너지와 자원이 소비된다.

일부 반도체 회사들은 2030년 넷제로 및 여타 지속가능성 목표를 달성한다는 과감한 목표를 설정했지만, 국가와 지역별로 반도체 산업의 지속가능성 진전 속도는 상이하다. 유럽연합(EU) 소재 기업들이 대체로 위와 같은 가장 과감한 목표를 세운 편이고, 나머지는 2040년이나 그 이후를 목표로 삼고 있다.⁵ 싱가포르를 제외하면 대부분 아시아 반도체 회사들은 2050년이나 그 이후를 목표로 하고 있으며, 또는 아예 목표를 설정하지 않은 기업도 다수다.⁶ 지속가능성 관련 가장 선도적인 아시아 반도체 회사는 대만 TSMC(Taiwan Semiconductor Manufacturing Company)로, TSMC는 2023년 9월 재생에너지 100% 전환 목표 시기를 10년 앞당긴 2040년으로 제시했다.⁷ 2021년 기준 반도체 산업은 글로벌 이산화탄소 환산량(CO2e) 배출 규모 중 약 0.2%를 차지했다.⁸ CO2e 배출량이 반도체 산업 규모와 비례해 증가한다면 2030년까지 0.4%로 두 배 증가하게 된다. 이를 막으려면 그린필드 공장의 지속가능성을 개선함과 동시에 브라운필드 공장의 생산방식도 전환해야 한다.

1. 에너지 효율성 개선 및 재생에너지 사용 확대

반도체 생산은 에너지 집약적이다. 실리콘 용해, 고출력 레이저 노광, 진공 형성 및 유지, 세정 등 생산공정 전반에 걸쳐 막대한 전력이 소요된다. 반도체 공장에서 메인 설비들이 위치한 팹(fab)은 시간당 최대 100메가와트시(MWh)의 전력을 소비하는데,⁹ 평균치로 봤을 때 북미 8만여 가구의 전력 소비량에 맞먹는 수준이다. 하지만 현재 전 세계에서 가동 중인 팹은 약 500개뿐이며,¹⁰ 2025년까지 착공 예정인 공장도 전 세계 41개뿐이다.¹¹ 게다가 반도체 회사들은 저누출 트랜지스터와 저전력 시스템을 활용하거나 시스템 전력 모드(해당 모듈이나 IP가 작동 중이지 않을 경우 끄(off)/비가동(idle)/절전(drowsy) 등 모드를 사용)을 조정하는 등 새로운 설계 테크닉과 첨단 프로세스 기술을 사용해 에너지를 절약하고 있다. 이러한 방식으로 범산업적으로 최종사용자 기기와 시스템 전체적으로 에너지 수요를 줄일 수 있지만, 제조업 탄소발자국이 늘어나는 만큼, 자원 활용을 최적화하고 탄소 배출을 절감할 다른 방안을 모색할 필요가 있다.

반도체 산업은 크게 두 가지 방향으로 에너지 사용과 탄소발자국을 줄일 수 있다. 첫째는 제조공정의 에너지 효율성을 개선하는 것이다. 하지만 제조의 한계를 깨뜨리는 첨단 기술을 누가 먼저 개발하느냐의 경쟁이 가혹할 만큼 치열한 반도체 산업 특성 상 에너지 효율성에 집중하기가 쉽지는 않다.¹²

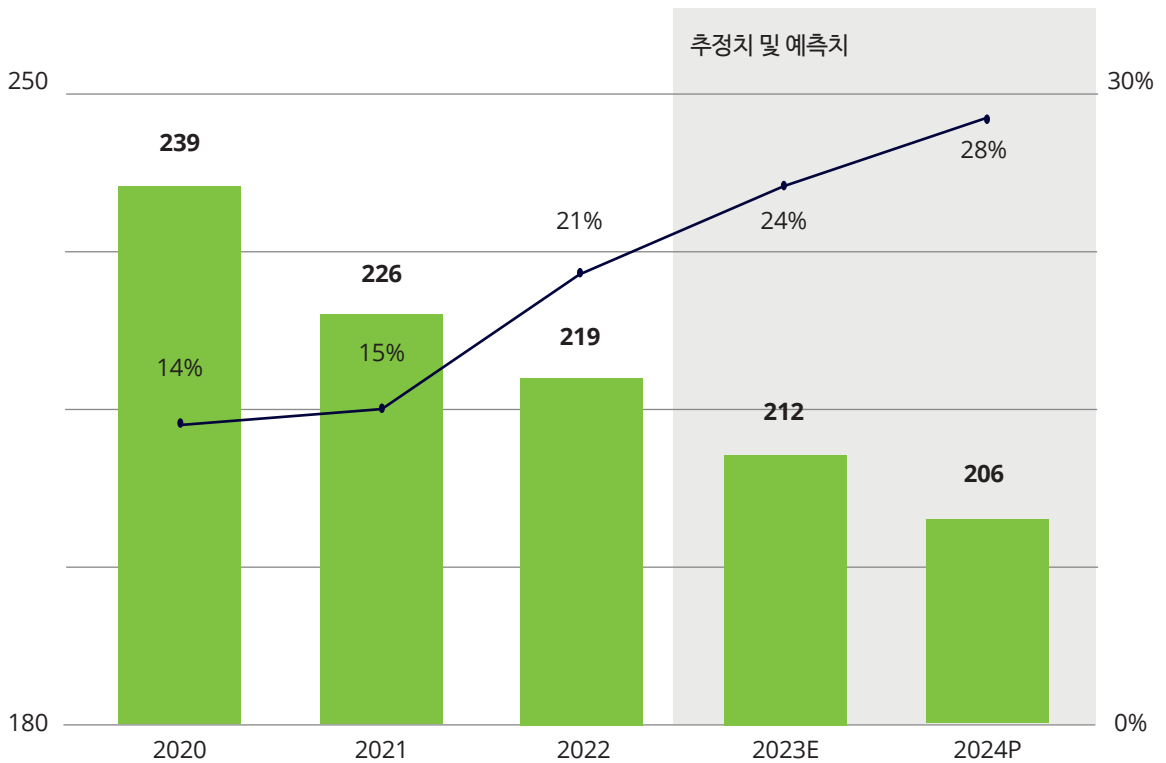
둘째 설비의 에너지 효율성을 더욱 빠르게 개선하는 것이다. 실제로 미국 그린빌딩위원회(US Green Building Council)의 글로벌 친환경 건물 인증 제도인 LEED(Leadership in Energy and Environmental Design) 인증을 받은 건축물은 지난 10년간 반도체 산업의 지속가능성을 개선한 일등 공신 역할을 했다.¹³ 재생에너지 사용을 늘리는 것도 도움이 된다. 미국 소재 한 대형 반도체 회사는 2022/23 회계연도(FY) 에너지 수요 중 93%를 재생에너지로 충당했다.¹⁴ 하지만 2022년 3대 반도체 회사의 에너지 믹스 중 재생에너지가 차지하는 비중은 28%로, 전년비 5%포인트 증가하는 데 그쳤다.¹⁵

반도체 산업이 두 가지 방향을 함께 추진한 결과, 와트-시/달러*로 집계한 반도체 산업의 에너지 집약도가 2020년 240에서 2022년 219로 줄었고, 2024년에는 206으로 한층 떨어질 것으로 전망된다(그림 2).¹⁶ 또한 재생에너지가 전체 에너지 믹스에서 차지하는 비중이 에너지 집약도가 하락하는 속도보다 가파르게 증가할 것으로 예상된다. 반도체 산업의 에너지 믹스에서 재생에너지가 차지하는 비중은 2024년 28%로 2020년에 비해 두 배 늘어날 것으로 예상된다.

* 와트-시/달러(watt-hours/dollar)는 생산 또는 소비된 에너지량을 와트시(watt-hours)로 측정해 들어간 비용(dollar)으로 나눈 값이다. 예를 들어, 100와트시의 전력을 소비하는데 10달러의 비용이 든다면, 와트-시/달러 수치는 10이 된다. 이는 상이한 시스템간 에너지 집약도 및 비용 효율성을 비교하는 지표로 사용된다.

그림 2. 반도체 산업의 에너지 집약도와 재생에너지 사용 추이(2020~2024년)

■ 에너지 집약도: 와트-시/달러 2년 이동평균(왼축) — 에너지 믹스에서 재생에너지가 차지하는 비중(% , 오른축)



참조: E는 추정치(estimated value), P는 예측치(predicted value)를 나타낸다. 에너지 집약도(2년 이동평균)는 반도체산업 전체 매출 대비 총 에너지 소비량(기가와트시) 비율을 연산한 것이다. 재생에너지 비중은 모든 에너지원에 기인한 총 에너지 소비량에서 재생에너지 소비량을 백분율로 집계한 것이다. 에너지 집약도는 2021년 전년비 5%, 2022년 3% 하락한 후, 2023년 3% 하락했을 것으로 추정되며, 2024년 역시 3% 하락할 것으로 예측된다. 재생에너지 비율은 2020~2022년 연 평균 3%포인트씩 상승했으며, 재생에너지 사용을 증대하려는 반도체 산업의 노력을 감안하면 2023년과 2024년에도 재생에너지 비율이 각각 3%포인트 및 4%포인트 늘어날 것으로 예상된다.

출처: 에너지 집약도와 에너지 소비량 데이터는 메모리, 로직, 아날로그 반도체를 생산하는 종합반도체업체(IDM)와 파운드리 등 생산 과정에서 많은 탄소 발자국을 남기는 북미-아시아-유럽의 11개 주요 반도체 상장사들이 발표한 기업의 사회책임(CSR) 보고서를 바탕으로 취합한 것이다. 매출 데이터는 2020~2022년 데이터의 경우 비영리 단체인 세계반도체무역통계기구(WSTS)의 연간 보고서(2020~2022년)에 기반했고, 2023~2024년 수치는 추정치(E)와 예측치(P)를 제시한 것이다. 재생에너지 추세선은 메모리, 로직, 아날로그 반도체를 생산하는 종합반도체업체(IDM)와 파운드리 등 북미-아시아-유럽의 주요 반도체 상장사들 중 연간 재생에너지 소비 데이터를 보고하고 전 세계적으로 많은 탄소 발자국을 남기는 8개사의 데이터를 종합한 것이다.

2. 용수 사용량 절감

글로벌 반도체 산업이 2019년 소비한 용수량은 2,640억 갤런(약 1조 리터)에 달한다.¹⁷ 다만 일부는 증발 등으로 인해 손실되지만, 지역과 제조사에 따라 용수 소비량을 모두 사용하지 않는 경우도 있다. 미국 소재 한 대형 반도체회사는 2021년 160억 갤런의 물을 소비했으나, 그 중 80%가 넘는 130억 갤런의 물을 재활용했다.¹⁸ 대만 반도체회사들은 2016~2020년 용수의 85%를 재활용했다.¹⁹ 반도체산업의 용수는 대부분 제조공정(76%)에서 쓰이지만, 냉각타워(9%)와 스크러버*(11%)에도 쓰인다.²⁰ 스크러버의 가장 중요한 임무는 다음에서 설명할 공정가스를 정화하는 것인데, 정화 시스템을 활발히 작동할 필요가 없을 때는 비가동(idle) 모드로 전환해 용수 사용량을 98% 줄일 수 있다.²¹ 이러한 식으로 공정 용수와 냉각수 사용량도 줄일 수 있다.

* 스크러버(scrubber)는 반도체 공정에서 사용되는 유해가스를 정화하는 장비를 뜻한다.

3. 공정가스의 환경 유해 영향 감축

반도체 산업에서 사용되는 공정가스는 대체로 GWP가 매우 높다. 식각과 세정 공정에 쓰이는 과불화탄소(PFC), 수소불화탄소(HFC), 삼플루오르화질소(NF3), 과불화화합물(PFAS) 등 불소화 가스²² 및 증착과 퍼징(purging) 공정에서 사용되는 산화질소 가스²³가 대표적이다. 특히 SF6는 GWP가 23으로 이산화탄소(CO2)보다 무려 500배 높다.²⁴ 미국 환경보호청(EPA)에 따르면, “반도체 산업에서 정화되지 않고 공기 중으로 배출되는 불소화 온실가스가 10~80% 수준”으로 정확한 측정이 어렵다.²⁵

공정가스의 온실가스 효과를 줄이는 방법은 크게 △공정 개선 및 자원 사용 최소화 △대체재 사용 △정화 기술 등 세 가지가 있다.²⁶ 이 중 제일 이행하기 쉬운 첫 번째 방법이 가장 일반적이지만, 소소한 개선도 지속되고 있으며 이러한 미세한 변화로 인한 제조업 전환이야말로 강력한 영향력을 발휘할 수 있다. 두 번째 방법인 대체 공정가스 탐색 노력도 일련의 성공을 거둬, 몇 종류의 PFC가 NF3로 교체됐다. NF3도 문제가 없다고는 할 수 없지만, PFC보다는 환경 유해 영향이 적다.²⁷ 하지만 대체재를 파악 및 검증하는 것은 시간이 오래 걸리고, 지금까지 돌파구라 할 만한 것은 옥타플루오로사이클로부탄(C4F8)을 대체할 수 있는 삼성전자의 G1 정도다.²⁸ 따라서 세 번째 방법인 정화 기술이 반도체 산업의 온실가스를 줄이는 역용마로 작용한다. GWP가 높은 공정가스를 최대한 많이 포집 및 파괴(대체로 소각 또는 전환 방식을 활용)하는 것이 핵심이다. 예를 들어, NF3 정화율을 95%에서 99%로 끌어올리는 것이 자원 사용을 최소화하거나 대체재를 사용하는 방식보다 실현 가능성이 크고 효과가 뛰어나다.²⁹ 한편 공정가스는 순도와 비용, 또 서브팹(sub-fab, 메인팹의 하부공간)의 물리적 발자국*에 통합되는 문제 때문에 재사용 및 재활용이 어렵다.³⁰

* 물리적 발자국(physical footprint)은 하나의 물리적 사물 및 개체가 차지하는 공간을 뜻한다. 이를 통해 환경 지속가능성에 미치는 영향과 사람의 활동이 환경에 미치는 영향을 측정할 수 있다.

4. PFAS 사용 중단 추세

본고에서 다루는 중심 내용은 아니지만, 반도체 산업에서는 많은 종류의 PFAS도 사용 및 생산되는데, 이에 대한 규제가 강화되는 추세다. 2023년에는 유럽연합(EU) 5개국의 화학물 규제 당국이 PFAS의 사용 제한을 권고하며, 궁극적으로는 사용 중단을 촉구했다. 관련 규제는 2026~2026년부터 시행될 예정이다.³¹ 국제반도체장비재료협회(SEMI)는 EU와 미국의 관련 규제에 대응해, PFAS의 사용을 줄이고 대체재를 찾기 위한 노력을 기울이고 있다.³²

제조업 전환, 지구 살리고 수익도 개선한다

현대 반도체 공장은 거대한 동치와 뿌리, 여기저기 뻗은 나뭇가지와 풍성한 잎사귀를 가진 거목들로 가득한 우림과도 같다. 각종 장비와 클린룸이 동치를 이루며 즐비한 메인랩에서 고개를 들면 각종 파이프와 도관이 어지럽게 지붕으로 얽혀 있고, 바닥 아래 서버팬에는 펌프와 정화 시스템, 스크러버, 전환 장치 등이 복잡한 뿌리를 형성하고 있다. 반도체 공장이라는 거대한 우림의 생태계는 이처럼 실시간으로 접근하거나 모니터링하기 힘든 수많은 조각으로 이뤄져 있다. 따라서 모델링을 수행하고 커넥티드 센서를 탑재해 자원의 사용을 지속적으로 모니터링하면, 용수와 공정가스를 더욱 효율적으로 활용할 수 있다. 이 때 디지털트윈(digital twin), 생성형AI, 자체 5세대(5G) 네트워크 등 실현 기술을 활용하면, 용수와 에너지의 유실을 포착하고, 시스템을 사용하지 않을 때 비가동 모드로 전환하거나 전원을 차단할 수 있다. 10년도 넘는 낡은 공장의 공정 시스템을 전환하려면 수억 달러의 비용이 들겠지만, 제조업 전환에 따른 지속가능성 효과와 비용 절감 및 효율성 개선 효과는 지구와 회사 수익에 값진 선물이 될 것이다.

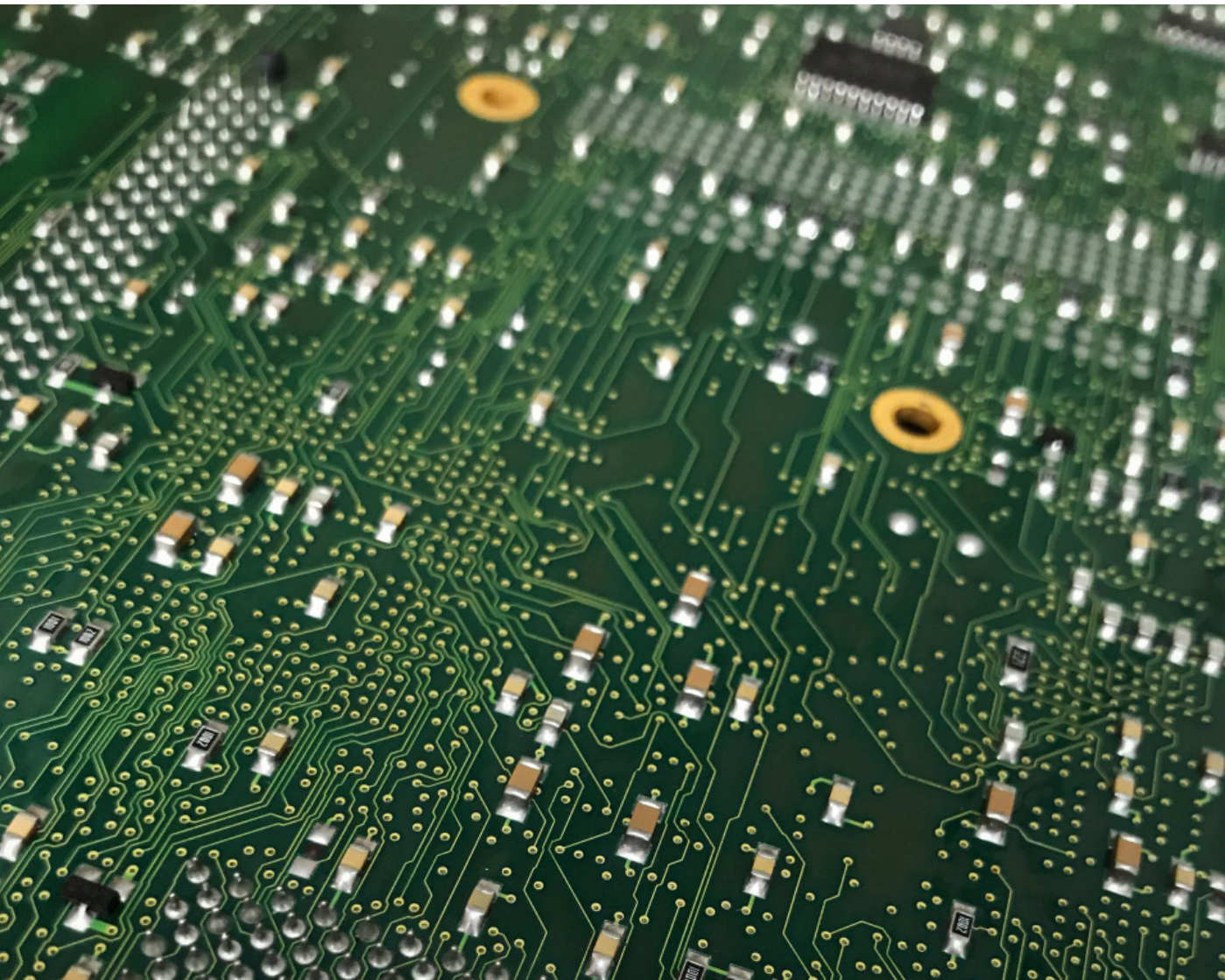
제조업 전환은 6D 건축정보모델링(building information modeling, BIM)이라는 스마트 건설 개념에 필수 요인이다. 6D BIM은 건물의 기능과 지속가능성에 초점을 맞춘 6차원 건축 시스템이다. 건설 단계에서 정보를 창출 및 관리하고 이러한 정보에 기반한 6차원 모델링으로 수립한 가상 모델을 통해 건물의 물리적, 일시적, 비용 관련 요인뿐 아니라 환경 및 사회적 영향까지 미리 파악할 수 있다. 이에 따라 해당 건물이 주변 환경과 지역사회에 미치는 영향을 파악하고 긍정적 영향을 증대하는 방식도 모색할 수 있다.³³



반도체 산업 지속가능성의 양면성

반도체 산업은 2030년까지 수조 달러 규모로 성장하겠지만, 그 과정에서 수많은 에너지와 물이 소비되고 온실가스가 발생해 막대한 환경 영향을 초래할 수 있다. 하지만 반도체 자체가 지속가능성 개선 효과를 가져오기도 한다. 반도체 발전으로 화상회의가 가능해져 비즈니스맨들의 출장이 줄었고, 반도체로 작동하는 고성능 컴퓨터 덕분에 신약 연구와 개발이 더욱 첨단화됐고,³⁴ 첨단기술을 활용하면 식량도 더욱 지속가능한 방식으로 생산할 수 있다. 뿐만 아니라 하이퍼스케일러(hyperscaler)들이 데이터센터용 반도체칩의 전력원으로 재생에너지 사용을 늘리는 등³⁵ 환경 영향을 최소화하기 위한 노력이 지속되고 있다. 이에 따라 일각에서는 반도체가 미치는 환경 유해 영향보다 지속가능성 이점이 더 크다는 주장이 나오기도 한다.

하지만 이를 반박하는 주장도 있다. 첫째, 반도체 제조공정 자체는 지속가능성 개선이 이뤄지고 있을 수 있지만, 자원 추출, 테스트와 패키징, 유통, 반도체 전주기와 폐기까지 고려하면 반도체에 따른 환경 영향이 더 클 수 있다.³⁶ 둘째, 제본스의 역설(Jevon's paradox)이 반도체 산업에도 적용될 수 있다. 제본스의 역설은 석탄을 활용한 산업혁명으로 효율성이 향상돼 석탄 사용이 줄어들 것이라는 기대와 달리, 효율성 향상으로 석탄 단위 사용당 비용이 하락해 수요가 오히려 촉발됐다는 논리다. 반도체도 생산공정의 효율성이 강화되면 생산량과 사용량이 증가함으로써 자원 소비량과 함께 환경 발자국이 늘어날 수 있다.³⁷



결론: 반도체 산업의 지속가능성, 수익 개선과 공급망 회복력에 핵심 요인으로 부상

반도체 회사들이 지속가능성을 개선하는 것은 단순히 공익을 위함이 아니라 수익과 성장에도 도움이 된다. 투자자(capital), 규제당국 (compliance), 구성원(constituent), 지역사회(community), 혁신(creativity) 등 이른바 '5C'의 프레임워크에서 기업을 평가할 때 지속가능성이 갈수록 핵심 요인으로 자리잡고 있기 때문이다. 또한 지속가능성을 개선하면 비용 절감뿐 아니라 고급 인력 쟁탈전에서도 우위를 점할 수 있고, 공급망 취약성도 줄일 수 있다.

현재 환경·사회·지배구조(ESG) 전용펀드 규모가 8조 달러에 달하며, 2030년에 이르면 최대 30조 달러까지 확대될 것으로 전망된다.³⁸ 전용펀드가 아니라도 포트폴리오를 수립할 때 ESG 평가 기준을 적용하는 자산운용사들이 늘고 있으며, 반도체회사들도 이러한 평가에서 벗어날 수 없다. 규제도 강화되는 추세다. 현재 상장기업은 자체 시설의 직접배출(Scope 1)과 사용하는 유틸리티의 간접배출(Scope 2) 공시만이 의무인 경우가 대부분이다. 하지만 미국과 유럽 규제당국들이 업스트림 공급망 및 다운스트림 가치사슬을 포함하는 기타 간접 가치사슬 배출(Scope 3)의 공시까지 의무화하는 방향으로 움직이고 있다. 팬데믹 기간 발생한 반도체 부족난으로 전 세계 거의 모든 물자의 공급망이 붕괴됐던 당시 절실히 체감했듯이, 반도체는 현대 사회에서 사용되는 거의 모든 물건의 공급망에 포함돼 있다. 따라서 반도체 산업에 대한 규제가 특별히 강화되지 않더라도, 규제 강화에 직면한 고객사들이 반도체회사들에 높은 수준의 지속가능성 기준을 요구할 가능성이 크다.

게다가 에너지와 가스, 물은 비싼 자원이며, 앞으로 관련 비용은 더욱 늘어날 것이다. 이러한 자원에 대한 투입 비용을 줄이면 회사 수익이 개선되는 것은 말할 것도 없다. 반도체 회사들은 반도체 거점인 아시아뿐 아니라 미국과 유럽에서도 그린필드 공장을 늘려가며 이러한 자원 투입 비용을 줄이기 위한 노력을 펼치고 있다.³⁹ 전 세계적으로 치열해지는 인력 쟁탈전에서도 지속가능성이 중요한 요인으로 작용한다. 첨단 기술 인력 쟁탈전은 반도체 산업 내에서만 아니라 범산업적으로 갈수록 치열해지고 있기 때문에, 기업의 환경 영향 이력이 갈수록 중요해지고 있다.⁴⁰ 이들 인력은, 특히 젊은층일수록 지속가능성 노력을 기울이는 기업에서 일하기를 원하기 때문이다. '딜로이트 2023 밀레니얼 및 Z 세대(MZ 세대) 서베이'에 따르면, MZ 세대 6명 중 한 명이 기후 우려 때문에 이직을 하거나 아예 직종을 바꾼 적이 있으며, 응답자의 25%는 향후 그럴 생각이 있다고 답했다.⁴¹

마지막으로, 에너지와 용수 사용량을 줄이면 공장 위치의 선택지가 대폭 늘어난다. 실제로 '물이 없는 곳에는 반도체칩도 없다'는 말도 있듯이 최근 대만에서는 가뭄으로 반도체 생산이 중단된 사태가 발생했다.⁴² 아시아와 미국에서는 기후변화에 따른 정전으로 반도체 생산에 차질이 빚어지는 경우도 종종 발생했다.⁴³ 하지만 자원 의존도를 줄이고 지속가능성 개선에 투자하면 위치와 상관없이 공급망 회복력도 그만큼 강화된다.



주석

1. Chris Richard, Dan Hamling, Duncan Stewart, and Karthik Ramachandran, [Five fixes for the semiconductor chip shortage](#), Deloitte Insights, December 6, 2021.
2. World Semiconductor Trade Statistics (WSTS), [“WSTS semiconductor market forecast spring 2023,”](#) news release, accessed November 2, 2023.
3. Vyra Wu, [“Global semiconductor market to exceed US\\$1 trillion in 2030, at CAGR of 7%, says DIGITIMES Research,”](#) DIGITIMES Asia, January 10, 2023.
4. Marie Garcia Bardon and Bertrand Parvais, [“The environmental footprint of logic CMOS technologies,”](#) EE Times, December 14, 2020.
5. Sarah Barry James, Stefan Modrich, and Sydney Price, [“Path to net-zero: US chipmakers balance growth vs. going green,”](#) S&P Global Market Intelligence, June 13, 2022.
6. Ibid.
7. Cheng Ting-Fang and Katherine Creel, [“Taiwan Semiconductor Manufacturing Company moves up 100% green energy goal by 10 years,”](#) Nikkei Asia, September 15, 2023.
8. 2021년 반도체 산업의 Scope 1 및 Scope 2 배출량은 이산화탄소 환산량(CO₂e) 기준 76.5 메가톤을 기록했다. 이는 같은 해 글로벌 배출량인 37.9기 가톤의 0.2%에 해당하는 수준이다. See: Maxime Pelcat, [Green house gas emissions of semiconductor manufacturing in 2021](#), University of Rennes, June 1, 2023.
9. Christel Galbrun-Noel, [“How to improve power reliability for semiconductor fabs,”](#) Schneider Electric blog, November 15, 2021.
10. 492 plants based on [Wikipedia’s consolidated list of semiconductor fabrication plants](#), accessed September 14, 2023.
11. SemiMedia, [“41 new fabs to be added globally from 2022 to 2025,”](#) November 4, 2022.
12. Bardon and Parvais, [“The environmental footprint.”](#)
13. Deloitte analysis of sustainability reports from multiple semi companies.
14. Intel, [2022-23 corporate responsibility report](#), accessed September 14, 2023.
15. Analysis based on data reported in publicly available corporate sustainability reports of select semiconductor companies.
16. See source and methodology notes for figure 2.
17. Shannon Davis, [“Water supply challenges for the semiconductor industry,”](#) Semiconductor Digest, October 24, 2022.
18. Editorial, [“Intel achieves net positive water in three countries,”](#) Intel, July 13, 2022.
19. Davis, [“Water supply challenges.”](#)
20. Ibid.
21. Ibid.
22. US Environmental Protection Agency (EPA), [“Semiconductor industry,”](#) accessed September 14, 2023.
23. Generon, [“Using nitrogen gas in the semiconductor manufacturing process,”](#) accessed September 14, 2023.
24. Mike Czerniak, [“The time is now: Sustainable semiconductor manufacturing,”](#) Semiconductor Digest, November 2021, pp: 16-19.
25. US EPA, [“Semiconductor industry.”](#)
26. Ibid.
27. Mike Czerniak, [“The time is now: Sustainable semiconductor manufacturing,”](#) Semiconductor Digest, November 2021.
28. 삼성전자는 일부 제품에서 옥타플루오로사이클로부탄(C4F8)을 대체해 GWP를 낮출 수 있는 대체재 중 하나인 G1을 개발 중이다. See: Samsung, [A journey towards a sustainable future: Samsung Electronics sustainability report 2023](#), accessed September 14, 2023.
29. Marie Garcia Bardon and Bertrand Parvais, [“The environmental footprint of logic CMOS technologies,”](#) EE Times, November, 2020.

30. Chris Bailey, "[Recovery and recycling of process gases: What are the options?](#)," Semiconductor Digest, accessed November 2, 2023.
31. Eurofins Scientific, "[Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances \(PFAS\) restriction proposal: The largest substances ban project ever in Europe](#)," accessed September 16, 2023.
32. SEMI, "[PFAS Explainer: The semiconductor industry responds](#)," accessed September 16, 2023.
33. The BIM Engineers, "[From 3D BIM to 7D BIM](#)," June 8, 2023.
34. Wikipedia, "[Drug design](#)," accessed October 25, 2023.
35. Rick Johnston, "[How data centers can use renewable energy to increase sustainability and reduce costs](#)," Device 42, Inc., April 5, 2023.
36. Interview with Deloitte semiconductor sustainability practitioners, July and August, 2023.
37. Jaume Freire González, "[The Jevons paradox and rebound effect: Are we implementing the right energy and climate change policies?](#)," The OECD Forum Network, September 22, 2022.
38. Jag Alexeyev, "[ESG and sustainable investment outlook: US\\$30 trillion by 2030 on the way to net-zero](#)," Broadridge Financial Solutions, Inc., 2021.
39. Deloitte, "[2023 semiconductor industry outlook](#)," accessed November 2, 2023.
40. Karen Weisz, Christie Simons, Brandon Kulik, Duncan Stewart, and Teresa Lewis, "[The global semiconductor talent shortage](#)," Deloitte, accessed November 2, 2023, p. 7.
41. Deloitte, "[2023 Gen Z and Millennial survey](#)," accessed November 2, 2023.
42. Emanuela Barbiroglio, "[No water no microchips: What is happening in Taiwan?](#)," Forbes, May 31, 2021.
43. Analysis based on publicly available information sourced from [EDN](#) (2001), [Silicon Expert](#) (2021), and [CNBC](#) (2022) showed how power outages and disruptions affected fab operations and chip production at different points in time in the United States and Asia.



첨단산업 원자재 공급망이 위태롭다... 다각도의 과감한 투자 필요

Duncan Stewart 딜로이트 캐나다 TMT Research Director 외 3인



“

원자재 수요는 치솟는데 무역 긴장이 고조되면서, 공급망 불안정 우려가 심화되고 있다. 이에 대한 해결책으로 전자폐기물 재활용, 디지털 공급 네트워크(DSN) 강화, 원자재 공급망에 대한 총체적 접근법 등이 부상하고 있다.

반도체칩, 자동차, 배터리 등 첨단산업에 반드시 필요한 원자재가 있다. 그런데 이러한 핵심 원자재의 글로벌 공급망이 계속 불안정한 상태다. 딜로이트는 이르면 2024년 상당수 지역에서 갈륨(gallium)과 게르마늄(germanium) 부족난이 발생해 반도체 생산에 차질이 빚어지고, 2025년에는 전기차 핵심 원자재인 희토류(REE)뿐 아니라 배터리 생산에 필요한 리튬(lithium)과 코발트(cobalt)가 부족할 것으로 전망한다.¹ 하지만 단기-중기-장기 전략을 수립하면 이러한 공급망 취약성에 대비할 수 있다.

전 세계 원자재 공급망 동향

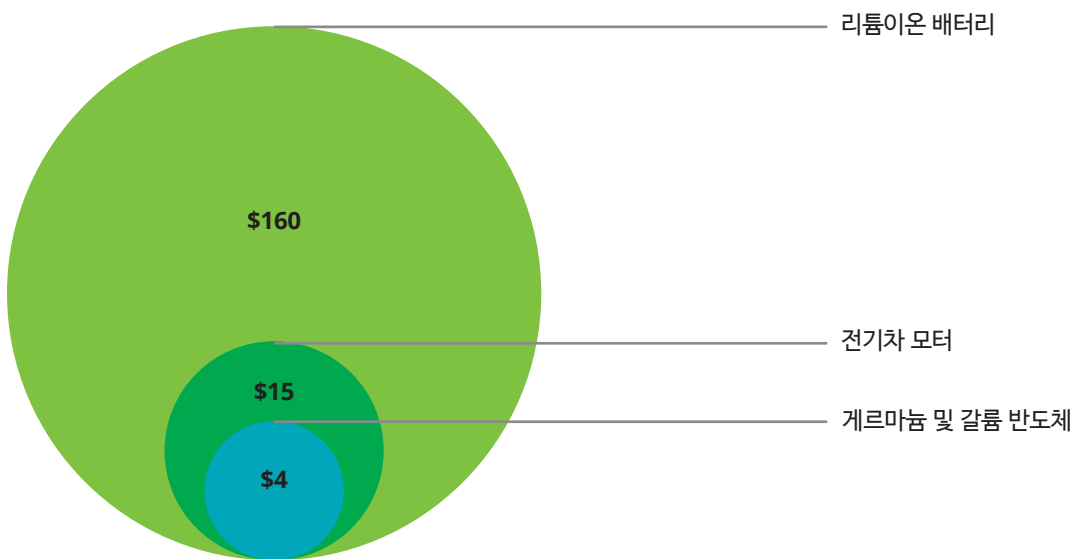
원자재 부족난은 대체로 충분히 예측 가능한 일이다. 리튬과 코발트는 수년간 생산이 급증했지만 배터리 전기차(BEV) 수요가 증가하면서 공급이 달릴 것으로 예상된다. 이는 다시 전기차 생산뿐 아니라 노트북과 태블릿, 스마트폰 등 생산에도 영향을 미친다.² 게다가 중국과 서방국 간 지정학적 긴장이 고조되면서 초래된 공급망 불안정이 미래에도 지속될 것으로 예상된다.

현재 핵심 반도체칩뿐 아니라 반도체칩 생산에 필요한 첨단기술과 소프트웨어의 수입도 차단³된 중국은 2023년 7월 게르마늄과 갈륨의 수출 제한이라는 카드로 맞대응했다.⁴ 일각에서는 중국이 전자제품, 청정에너지, 항공우주 산업, 자동차, 국방 등 분야에서 사용되는 희토류 17종의 수출도 제한할 수 있다는 우려가 나오고 있다. 이렇게 되면 서방국들은 수년간 희토류 부족난에 시달릴 수 있다.⁵ 게다가 이러한 핵심 원자재의 대체재들조차 정치·규제·사회 환경이 불안정한 지역에 위치해 장기적으로 의존할 수 있는 공급망을 기대하기가 어렵다.⁶

과거에도 원자재 부족난은 발생했다. 대표적으로 2000년 탄탈륨(tantalum) 공급난으로 콘덴서 생산이 큰 차질을 빚었다.⁷ 하지만 2024~2025년에는 10여 개의 원자재가 동시에 부족한 전례 없는 사태가 발생할 수 있다.⁸ 더욱 우려스러운 것은 이러한 원자재들을 핵심 원료로 하는 산업들이 경제에서 차지하는 중요성이 과거보다 훨씬 커졌다는 점이다. 이러한 첨단기술 산업의 연간 규모는 1,600억 달러를 넘는 것으로 추정된다. 반도체나 전기차 산업의 경우 절대적 액수로는 규모가 크지 않을 수 있지만, 혁신과 경제성장, 국가안보에 매우 중요한 분야다(그림 1).⁹

그림 1. 원자재 공급난으로 가장 심각한 영향을 받을 것으로 예상되는 세 가지 핵심 첨단기술 산업의 2024년 예상 시장 규모

단위: 미화 10억 달러



출처: 국제에너지기구(IEA) 'Global EV Outlook 2023', Energy.gov 데이터, 'Charged EVs' 매거진 리서치, 온라인 소매가격에 기반한 달러이트의 추정 및 예측

원자재 공급난에 대비할 단기-중기-장기 전략

우선 단기적으로, 게르마늄과 갈륨을 원재료로 하는 기업들 대다수는 2024년 상반기까지 충당할 재고를 갖추고 있다. 이후에는 갈륨 확보가 어려워질 수 있다. 반면 게르마늄은 캐나다 브리티시컬럼비아(British Columbia)주(州)에 대량의 보유고가 있어 공급이 안정적으로 유지될 것으로 예상된다.¹⁰

장기적으로는 광산과 제련 시설이 늘어날 것으로 예상된다. 갈륨은 원광인 보크사이트(bauxite)에서 알루미늄을 생산할 때 나오는 부산물인데,¹¹ 보크사이트는 전 세계 모든 대륙에 걸쳐 10여개국에 보유고가 있다.¹² 희토류도 알고 보면 그다지 희귀하지 않으며, 호주, 앙골라, 아프가니스탄, 캐나다, 미국 등지에 향후 수년간 광산이 개발될 예정이다.¹³

이러한 단기~장기 변화가 발생하는 과정에서 기존의 공급난과 향후 공급난 가능성에 대응하기 위해 공급망 취약성을 완화할 수 있는 방법으로 아래 세 가지 방안을 제시한다.

전자폐기물 재활용

글로벌 전자기기 산업에서 발생하는 폐기물과 함께 버려지는 원자재의 가치는 연간 무려 500억 달러를 넘는 것으로 추정된다.¹⁴ 이러한 원자재는 공급망이 취약하므로, 재활용을 늘리면 공급이 크게 개선될 수 있다. 전자폐기물 재활용 기술에 혁신이 필요한 이유다.

디지털 공급 네트워크(DSN) 강화

DSN을 강화하면 공급망 효율성이 개선된다. 원자재 부족난을 예측해 적재적소에 배치하면 폐기되는 원자재를 줄일 수 있다. 공급난을 완전히 막을 수는 없지만, 정도와 기간을 줄일 수는 있다. 온실가스 및 폐기물 배출 감축을 위해 공급자 네트워크와 협력하거나 인센티브를 제공하는 방식으로 여타 공급망 지속가능성 노력과 DSN을 병행하면 시너지 효과가 창출될 수 있다.

전략적 비축고 마련

미국은 현재 석유, 곡물, 금괴, 헬륨, 핵심 국방 원자재 등의 전략적 비축고를 두고 있다.¹⁵ 전기차와 반도체 핵심 원자재도 전략적 비축고를 마련해 두면, 공급망 취약성에 유연하게 대처할 수 있다.



공급난에 취약한 것은 원자재만이 아니다

본고는 원자재에 초점을 맞췄지만, 첨단기술과 반도체 공급망에서 다음의 소재도 빼놓을 수 없다.

1. 정제물, 가공물, 정화물

저순도 네온(neon)이나 실리콘(silicon)은 공급이 충분하다. 하지만 반도체 제조용 레이저에 쓰이는 가스와 잉곳(ingot)용 실리콘은 초고순도여야 하는데, 공급원이 극히 제한적이다. 반도체 등급 네온의 경우 우크라이나에서 약 50%가 생산되며,¹⁶ 반도체와 태양광 발전에 쓰이는 폴리실리콘의 글로벌 공급원 중 80%가 중국에 집중돼 있다.¹⁷

2. 특수 합성물

지정학적 위기나 팬데믹, 또는 지진·태풍·허리케인·화재·홍수·가뭄 등 사태가 발생하면 에폭시 수지(epoxy resin), 특수 세정액 및 세정가스, 특수 플라스틱¹⁸ 등의 심각한 공급난이 장기화될 수 있다.

재활용, DSN 강화, 반도체 제조공정의 지속가능성 개선에 비추고까지 확보해두면 공급망 취약성에 훨씬 잘 대처할 수 있다. 자원을 더 많이 확보하기 위해 신규 광산을 개발하기까지는 5~10년이 걸리지만, 신규 공장은 2~3년이면 건립해 제조공정의 지속가능성을 빠르게 개선할 수 있다.¹⁹



결론: 첨단산업 공급망 취약성 극복 위해 다각도의 과감한 투자 필요

전 세계에서 발생하는 전자폐기물의 양은 2022년 5,740만 톤에 달했지만,²⁰ 이중 공식적으로 집계된 수집 및 재활용 비율은 17%에 그쳤다.²¹ 다만 전자폐기물 재활용 비율은 지역마다 매우 상이했다. 미국의 경우 2019년 약 15%가 재활용된 반면, 유럽연합(EU)의 경우 2022년 약 42.5%가 재활용됐다.²² 현재 추세라면 2030년까지 연간 전자폐기물 양이 7,500만 톤으로 증가할 것으로 전망된다.²³ 전자폐기물은 다양한 곳에서 나온다. EU의 경우 2020년 기준 대형 전자기기가 절반 이상을 차지했지만, 정보화기술(IT)과 통신, 소비자용 전자제품도 약 30%를 차지했다.²⁴ 국제전기통신연합(International Telecommunication Union, ITU)은 2023년까지 글로벌 전자폐기물 재활용 비율을 30%까지 끌어올린다는 목표를 세웠지만, 실현 가능성은 크지 않다.²⁵

전자폐기물 재활용이 활성화되지 않는 이유는 수익성이 떨어지기 때문이다. 재활용으로는 돈을 벌기 힘들고 오히려 비용만 발생한다. 전자기기에는 여러가지의 재활용 가능한 원자재가 있지만, 화학적·물리적으로 서로 결합 및 합성화돼 있어(예: 납땀, 플라스틱, 세라믹),²⁶ 각각의 금속을 추출하려면 여러 공정, 에너지, 화학적·물리적 과정이 필요한 데다 그 과정에서 위험한 유독 폐기물이 발생할 수 있다.²⁷ 특히 선진국의 전자폐기물이 재활용을 위해 개발도상국으로 넘어가는 경우가 많은데, 개발도상국의 비공식 폐기물 시설에 고용된 290만~1,290만 명의 여성과 약 1,800만 명의 어린이가 유독 물질에 노출될 위험이 있는 것으로 나타났다.²⁸

전자폐기물(주로 인쇄 회로 기판)에서 추출할 수 있는 금속의 가치는 연간 150억 달러로 추정되지만,²⁹ 비용이 수익을 초과하는 경우가 많아 재활용 비율이 낮다. 하지만 경제적 이유보다 희토류와 리튬, 코발트, 반도체 등의 공급망 회복력을 위한 노력에 초점을 맞추면 두 가지 긍정적 변화를 기대할 수 있다. 우선 전자폐기물 재활용 비율이 상승할 것이고, 두 번째로는 북미와 EU 영토에서 재활용되는 전자폐기물이 늘어 다른 국가에 미치는 부정적 환경 영향이 줄어들 것이다.

최근 재활용 산업의 성장 잠재력이 조금씩 나타나고 있다. 특수 재활용 및 순환 물류·공정·사업모델 등을 제공하는 기업들이 등장해 재활용 산업의 규모 확대를 위한 기반을 만들고 있으며, 최근 미국 정부는 전자폐기물에서 추출되는 리튬과 희토류에 대한 다양한 인센티브 제도를 발표했다.³⁰

한편 전기차뿐 아니라 풍력 터빈, 국방 시스템 등 다용도로 활용되지만 공급원이 중국에 집중된 희토류는 공급 우려가 특히 심각하지만,³¹ 베트남에서 장기적 해결책을 찾을 수 있다. 미국 지질조사국(USGS)에 따르면 베트남 희토류 보유고가 2,200만 톤에 달한다. 중국에 이어 세계 2위다.³² 베트남은 이미 희토류 생산 확대에 주력해, 2022년 생산량이 전년비 10배 이상 늘어난 4,300 톤에 달했으며, 2030년까지 연간 생산량을 200만 톤으로 늘린다는 목표를 세웠다.³³

전략적 보유고 전략은 공급망 안정성을 확보하기에 용이한 방법이지만 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 미국과 EU의 경우 저순도 갈륨의 전략적 보유고 비용이 킬로그램당 약 280 달러, 99.99999% 순도의 갈륨은 킬로그램당 약 450 달러, 금은 킬로그램당 약 6만6,000 달러가 든다.³⁴ 갈륨을 대량으로 사용하는 전자기기 기업들은 연간 10 톤 이상을 사용하므로,³⁵ 3년간 쓸 수 있는 전략적 보유고를 비축하는데 저순도의 경우 약 2,000만 달러, 고순도의 경우 3,000만 달러가 든다.

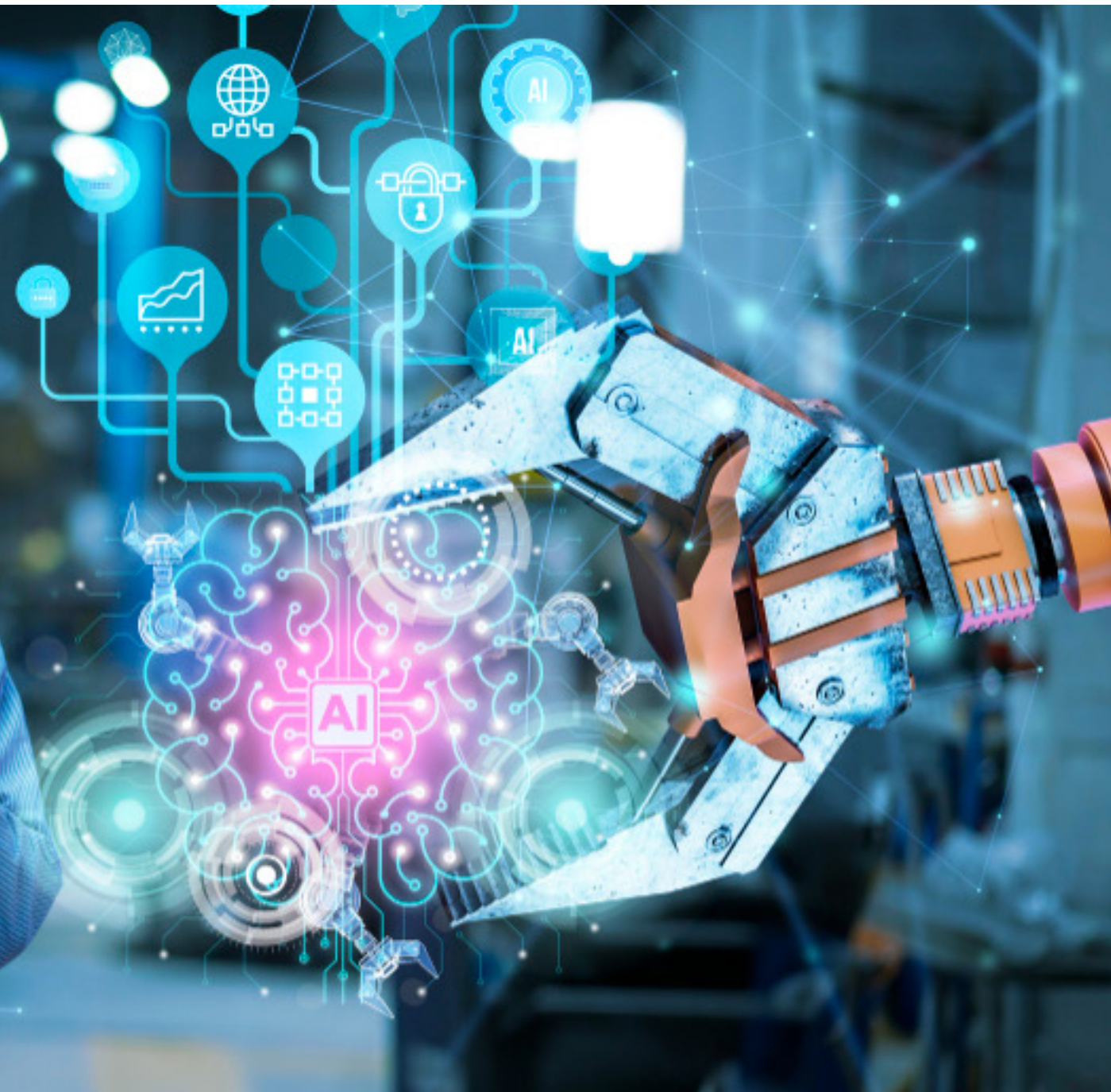
지정학적 긴장은 좀체 해결하기 어려운 난제다. 희토류뿐 아니라 갈륨과 게르마늄 등 핵심 금속들은 중국에서 채굴될뿐 아니라 제련까지 이뤄지는 경우가 많다. 중국과 서방 간 무역 긴장이 한층 고조되는데 이들 금속에 대한 수요가 증가하면, 장기적으로 자국 또는 인근에 광산과 제련 시설을 확충해 공급원 집중도를 중국으로부터 분산해야 한다. 단기적으로는 전자폐기물 재활용, DSN 강화, 재고 확충 등에 대한 투자를 늘리는 것으로 대처할 수 있다

공급망 취약성이 이처럼 다각적으로 발생하므로 이에 대응하기 위해서는 수십억 달러의 투자가 필요하다. 하지만 이들 첨단기술 산업은 혁신, 경제성장, 국가안보에 핵심 산업이므로, 안정적 공급망을 확보하기 위한 다각도의 과감한 단기·중기·장기 투자가 시급하다.

주석

1. Joe McDonald, "Threatened by shortages, electric car makers race for supplies of lithium for batteries," AP News, June 27, 2023.
2. Jessica Shankleman, Tom Biesheuvel, Joe Ryan, and Dave Merrill, "[We're Going to Need More Lithium](#)," Bloomberg, September 17, 2017.
3. Bureau of Industry and Security (U.S. Department of Commerce), "[Commerce strengthens restrictions on advanced computing semiconductors, semiconductor manufacturing equipment, and supercomputing items to countries of concern](#)," press release, October 17, 2023; European Parliament, "[EU AI Act: first regulation on artificial intelligence](#)," news release, June 14, 2023.
4. Hannah Ziady and Xiaofei Xu, "[China hits back in the chip war, imposing export curbs on crucial raw materials](#)," CNN Business, July 3, 2023.
5. Mai Nguyen and Eric Onstad, "[China's rare earths dominance in focus after it limits germanium and gallium exports](#)," Reuters, October 20, 2023.
6. U.S. Department of Energy, "[Critical materials assessment](#)," July 2023.
7. Gina Roos, "[Tantalum capacitor suppliers still wary about ability to meet demand](#)," EETimes, June 2, 2001.
8. U.S. Department of Energy, op. cit.
9. Deloitte estimates and predictions based on our analysis of publicly available third party sources, reports, and articles including: IEA, Global EV Outlook 2023, 2023; Energy.gov data; data and research presented in Charged EVs magazine; and online retail prices of products and components.
10. Reuters, "[What are Gallium and Germanium and which countries are producers?](#)" Reuters, July 7, 2023.
11. Nora Foley and Brian Jaskula, "[Gallium – A smart metal](#)," US Geological Survey, March 2013.
12. Ruth F. Schulte and Nora K. Foley, "[Compilation of Gallium resource data for Bauxite deposits](#)" US Geological Survey, 2014.
13. Jason Mitchell, "[China's stranglehold of the rare earths supply chain will last another decade](#)," Investment Monitor, April 26, 2022.
14. Vanessa Forti, Cornelis Peter Baldé, Ruediger Kuehr, Garam Bel, "[The Global E-waste Monitor 2020 – Quantities, flows, and the circular economy potential](#)," United Nations Institute for Training and Research, 2020.
15. Wikipedia, "[Strategic reserves of the United States](#)," accessed October 26, 2023.
16. Alexandra Alper, "[Russia's attack on Ukraine halts half of world's neon output for chips](#)", Reuters, March 11, 2022.
17. Kelly Pickerel, "[China's share of world's polysilicon production grows from 30% to 80% in just one decade](#)," Solar Power World, April 27, 2022.
18. Deloitte employee (semiconductor manufacturing expert), interview, July 2023.
19. Deloitte employee (manufacturing expert), interview, July 2023.
20. WEEE Forum, "[International E-Waste Day: 57.4M Tonnes Expected in 2021](#)," accessed October 3, 2023.
21. UN environment programme, "[How disposable tech is feeding an e-waste crisis](#)," November 21, 2022.
22. Alex Barshai, "[Precious metals recovery from e-waste](#)," emew clean technologies, blog post, December 28, 2022.
23. Carolyn Gramling, "[Earth's annual e-waste could grow to 75 million metric tons by 2030](#)," ScienceNews, July 2, 2020.
24. European Parliament News, "[E-waste in the EU: facts and figures \(infographic\)](#)," April 12, 2023.
25. ITU, "[Global E-waste Monitor 2020](#)," accessed October 3, 2023.
26. Barshai, op. cit.
27. Ibid.
28. World Health Organization, "[Children and digital dumpsites: E-Waste exposure and child health](#)," 2021.

29. Barshai, op. cit.
30. The White House, "[Fact sheet: Securing a Made in America supply chain for critical minerals](#)," press release, February 22, 2022.
31. Office of Fossil Energy and Carbon Management, "[Rare Earth Elements](#)," accessed October 26, 2023.
32. United States Geological Service, "[2022 Mineral commodity summaries – Rare Earths](#)," accessed October 26, 2023.
33. Reuters, "[Vietnam to up annual raw rare earths output to 2m tonnes by 2030](#)," Nikkei Asia, July 25, 2023.
34. 2023년 10월 26일 현물 가격 기준임. See: Shanghai Metals Market, "[Latest update in the SMM Indium/Germanium/Gallium Market](#)," accessed October 26, 2023.
35. Ephrem Joseph, "[Global semiconductor industry feels the heat as China plans gallium export controls](#)," Proactive, July 20, 2023.



딜로이트 첨단기술, 미디어 및 통신 산업 전문 리더

딜로이트 첨단기술, 미디어 및 통신 산업 전문팀은 빠르게 발전하는 산업 환경 속에서 고객들의 전략적 과제들을 해결할 수 있는 최상의 서비스 경험을 제공합니다. 딜로이트 첨단기술, 미디어 및 통신 산업 전문팀은 국내외 기업의 전략수립, 회계감사, 재무자문, IT 시스템 구축 등 다양한 서비스 경험을 보유한 우수 전문인력으로 구성되어 있습니다.

Contact



김우성 파트너

Technology Strategy & Transformation 리더 | 딜로이트 컨설팅

Tel: 02 6099 4670

Email: wooskim@deloitte.com



안상혁 파트너

디지털부문 리더/금융산업 총괄리더 | 딜로이트 컨설팅

Tel: 02 6676 3625

Email: sanghyan@deloitte.com



박지숙 파트너

금융 IT, 오피레이션 리더 | 딜로이트 컨설팅

Tel: 02 6676 3722

Email: jisukpark@deloitte.com



장지영 파트너

Tech Strategy 부문 파트너 | 딜로이트 컨설팅

Tel: 02 6676 3956

Email: jiyoung@deloitte.com



강기식 파트너

Lead Architect | 딜로이트 컨설팅

Tel: 02 6676 2039

Email: gikang@deloitte.com



주형열 파트너

반도체 CoE 리더 | 딜로이트 컨설팅

Tel: 02 6676 3750

Email: hjoo@deloitte.com



최호계 파트너

Technology Sector 리더 | 감사본부

Tel: 02 6676 3227

Email: hogchoi@deloitte.com



박형곤 파트너

TME Sector 리더 | 딜로이트 컨설팅

Tel: 02 6676 3684

Email: hypark@deloitte.com



조명수 파트너

Digital Finance & Operation 리더

Tel: 02 6676 2954

Email: mjo@deloitte.com



박권덕 파트너

TME Sector 리더 | 딜로이트 컨설팅

Tel: 02 6676 3567

Email: gwapark@deloitte.com



앱스토어, 구글플레이/카카오톡에서 '딜로이트 인사이트'를 검색해보세요.
더욱 다양한 소식을 만나보실 수 있습니다.

Deloitte.

Insights

성장전략본부 리더

손재호 Partner

jaehoson@deloitte.com

딜로이트 인사이트 리더

정동섭 Partner

dongjeong@deloitte.com

연구원

김선미 Manager

seonmikim@deloitte.com

디자이너

박주리 Consultant

jooripark@deloitte.com

Contact us

krinsightsend@deloitte.com

Deloitte refers to one or more of Deloitte Touche Tohmatsu Limited (“DTTL”), its global network of member firms, and their related entities (collectively, the “Deloitte organization”). DTTL (also referred to as “Deloitte Global”) and each of its member firms and related entities are legally separate and independent entities, which cannot obligate or bind each other in respect of third parties. DTTL and each DTTL member firm and related entity is liable only for its own acts and omissions, and not those of each other. DTTL does not provide services to clients. Please see www.deloitte.com/about to learn more.

Deloitte Asia Pacific Limited is a company limited by guarantee and a member firm of DTTL. Members of Deloitte Asia Pacific Limited and their related entities, each of which are separate and independent legal entities, provide services from more than 100 cities across the region, including Auckland, Bangkok, Beijing, Hanoi, Hong Kong, Jakarta, Kuala Lumpur, Manila, Melbourne, Osaka, Seoul, Shanghai, Singapore, Sydney, Taipei and Tokyo.

This communication contains general information only, and none of Deloitte Touche Tohmatsu Limited (“DTTL”), its global network of member firms or their related entities (collectively, the “Deloitte organization”) is, by means of this communication, rendering professional advice or services. Before making any decision or taking any action that may affect your finances or your business, you should consult a qualified professional adviser.

No representations, warranties or undertakings (express or implied) are given as to the accuracy or completeness of the information in this communication, and none of DTTL, its member firms, related entities, employees or agents shall be liable or responsible for any loss or damage whatsoever arising directly or indirectly in connection with any person relying on this communication. DTTL and each of its member firms, and their related entities, are legally separate and independent entities.

본 보고서는 저작권법에 따라 보호받는 저작물로서 저작권은 딜로이트 안진회계법인(“저작권자”)에 있습니다. 본 보고서의 내용은 비영리 목적으로만 이용이 가능하고, 내용의 전부 또는 일부에 대한 상업적 활용 기타 영리목적 이용시 저작권자의 사전 허락이 필요합니다. 또한 본 보고서의 이용시, 출처를 저작권자로 명시해야 하고 저작권자의 사전 허락없이 그 내용을 변경할 수 없습니다.