

미국의 대중국 AI 반도체 수출규제 영향과 시사점

김혁중 세계지역연구센터 미주팀 부연구위원 (hjkim@kiep.go.kr, Tel: 044-414-1166)



차 례

1. 수출규제 배경과 주요 내용
2. 수출규제 영향
3. 전망 및 정책 시사점

주요 내용

- ▶ 미국은 국가안보에 위협이 될 수 있는 중국 AI 반도체에 대한 수출규제를 시행함(8월 26일).
 - 미국 행정부는 AI 기술개발에 활용도가 높은 고성능 그래픽카드인 엔비디아의 A100, H100과 AMD의 MI250에 대한 수출허가제를 실시함.
 - 이번 정책은 단기적으로 중국의 AI 기술개발에 차질을 줄 수 있으나, 중장기적으로 대체품을 활용하거나 클라우드 서비스 등을 이용하는 방식 등으로 규제를 우회할 수 있어 중국의 AI 기술개발에 큰 영향을 주지는 않을 전망이다.
- ▶ 미국이 중국의 AI 기술개발을 보다 효과적으로 견제하기 위해 추가적인 규제를 도입할 가능성이 있으며, 이는 한국의 반도체 산업에 부정적인 영향을 초래할 수 있음.
 - 미국이 추가할 수 있는 독자적인 규제로는 소프트웨어적 측면에서 ① 독점적인 라이선스하의 프레임워크나 ② 중국의 미국 클라우드 서비스 사용 차단, 하드웨어적으로 ③ 고성능 CPU, FPGA 및 ASICs 등에 대한 수출허가제 실시 등으로 확대될 수 있지만, 동 수단은 미국 내 반도체 산업에 악영향을 끼칠 우려가 있어 파트너국과의 협조를 통해 추가적인 규제를 마련할 가능성이 있음.
 - 반면 파트너국을 통한 규제는 ④ 한국과 대만의 협조를 통해 초미세공정을 이용한 제품이나 ⑤ 고대역 메모리 수출을 차단하는 방식으로 이루어질 수 있으며, 이는 한국 반도체 산업의 제품 개발 동력을 저하시키는 한편 제품 수요 감소의 요인이 될 수 있음.
- ▶ 향후 미국이 파트너국인 한국에 협조를 요청할 경우 한국 반도체 산업에 대한 피해를 최소화하는 방향으로 규제를 유도해야 하며, 별도로 중국의 AI 반도체 국산화 노력에 따른 기술 격차를 유지하는 것이 중요함.
 - 대중국 규제에 동참할 경우 메모리 반도체 및 반도체 제조 모두 광범위한 제품의 특성보다는 세부 품목을 대상으로 규제를 한정 짓는 것이 한국 반도체 산업에 대한 피해를 최소화하는 목표에 부합함.
 - 중국의 AI 반도체 자급화 노력에 대응하여 한국은 기술 격차를 유지하기 위해 고급 인력 유출을 방지하는 한편, 공정 미세화, 차세대 반도체 개발 등을 적극적으로 지원할 필요가 있음.

1. 수출규제 배경과 주요 내용

가. AI 반도체 산업 구조

■ AI 기술은 기계가 인간의 사고를 모방 혹은 보완해 더욱 효율적인 판단을 내리는 데 도움을 주지만 군사적으로 악용될 우려가 있음.

- AI 기술은 자연어 처리(natural language processing), 자율주행(self-driving), 컴퓨터 비전(computer vision) 등과 같은 분야에 널리 응용되면서 사용자 편의를 향상하며, 신시장으로서 잠재력이 높음.
- 반면 AI 기술의 응용은 의사 결정 신속화, 빅데이터 활용, 향상된 표적선정, 전쟁 수행에 필요한 필요인력 감소 등의 경로를 통해 군사적으로 악용될 우려가 있음.¹⁾

■ AI 반도체는 일반적인 반도체와 차별화되는 기술을 요구함.

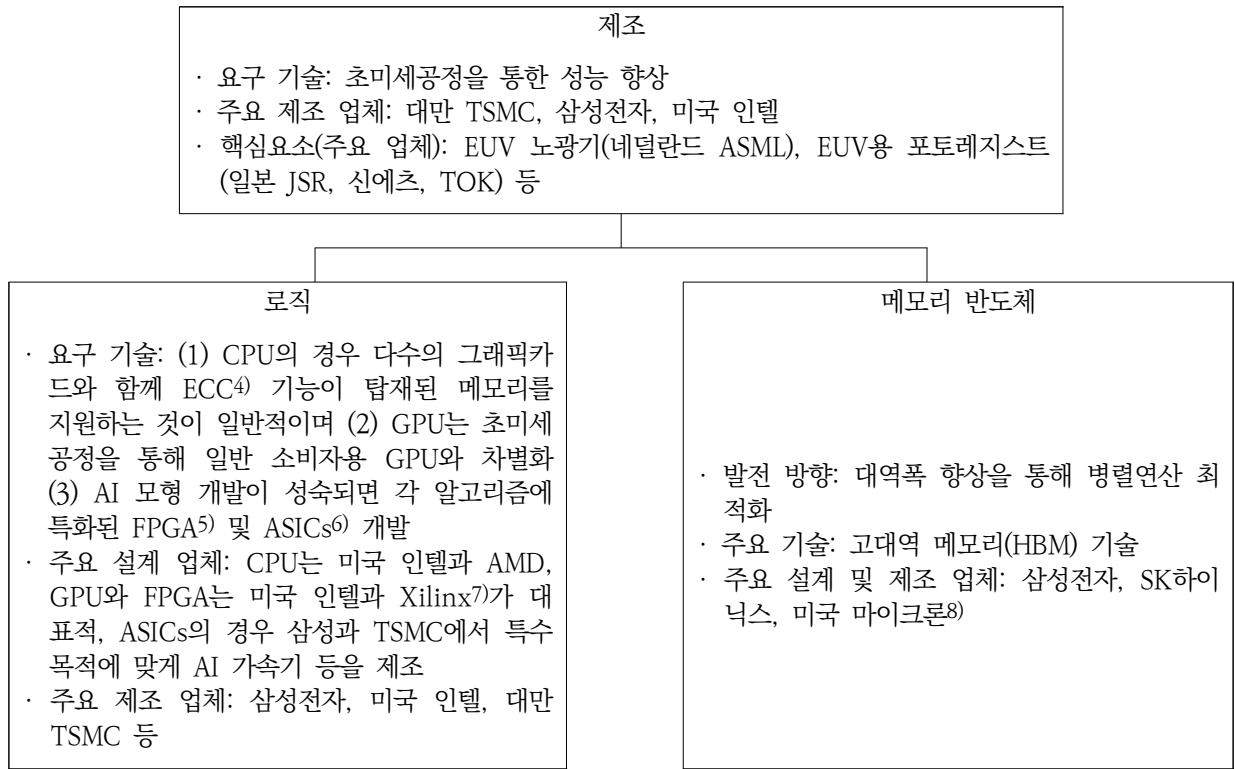
- 근본적으로 AI 기술은 분석하고자 하는 대상(반응변수)과 이를 설명하기 위한 수많은 요인(설명변수) 간 관계를 찾는 과정을 기초로 함.
 - 반응변수와 설명변수 간 관계를 사전에 알기 어렵다는 점에서 AI 기술개발은 보통 광범위한 관계를 나타내는 모형에서 출발해 설명변수를 가장 잘 예측할 수 있는 최적의 모형으로 좁혀가는 단계를 거치게 됨.²⁾
 - 더 광범위한 모형을 사용할수록 반응변수와 설명변수 간의 복잡한 관계를 포착할 가능성이 커지며, 데이터가 많아질수록 광범위해진 모형의 파라미터를 안정적으로 식별함으로써 예측력이 우수해질 수 있음.
- 한편 더 광범위한 모형과 많은 데이터를 사용할 경우, 알고리즘이 탐색하는 범위가 넓어짐에 따라 필요한 계산량이 급증하게 됨.
- 이처럼 급증하는 계산량의 문제는 다수의 작업자(코어)가 최대한 많은 작업을 동시에 수행하는 병렬화(parallelization)를 통해 해결할 수 있는데, AI 반도체는 이에 특화된 연산기기로 이해할 수 있음.
 - 전통적으로 널리 이용되는 중앙처리장치(CPU: Central Processing Unit) 중심의 연산 과정은 수요자가 요구하는 복잡한 체계의 명령을 수행할 수 있으며 한 코어당 빠른 속도로 연산할 수 있다는 장점이 있지만, 활용할 수 있는 코어 수에는 한계가 있음.
 - AI 반도체로 분류되는 그래픽카드 및 기타 연산 가속기는 수행할 수 있는 작업 범위는 한정적이지만 AI 기술에서 요구되는 행렬 연산 등 대량의 데이터 작업을 다수의 코어를 통해 동시에 처리할 수 있게 한다는 점에서 AI 기술개발 및 활용에 적합함.

1) RAND 연구소(2020), "Military Applications of Artificial Intelligence: Ethical Concerns in an Uncertain World."

2) 예를 들어 사진을 보고 사람인지 아닌지 분류하는 기술의 경우 사진에 나타나는 픽셀의 배치와 색의 구성을 독립변수로 상정할 수 있으며, 사람을 가장 잘 분류해내는 모형을 찾기 위해 많은 사진 자료와 사람에 대한 판별 기록을 이용함으로써 예측력이 우수한 모형과 파라미터를 탐색하게 됨.

- AI 기술에서 요구되는 계산량을 충족하기 위해서는 코어당 연산력과 메모리 대역폭³⁾을 향상시키는 것이 중요함.
 - 기본적으로 한 코어당 연산력이 높을수록 계산 속도 역시 빨라진다는 점에서 병렬연산에 최적화된 그래픽카드 및 기타 연산 가속기들은 CPU에 비해 부족한 코어당 연산력을 끌어올리는 것이 중요한 과제
 - 코어당 연산 속도가 빠르더라도 메모리가 코어에 데이터를 제대로 전달하지 못하면 연산 과정이 정체될 수 있으며, 코어가 많을수록 전달해야 하는 데이터가 많아지므로 메모리 대역폭을 높이는 것이 필수적인 과제
 - 이번 수출규제의 대상이 되는 그래픽카드의 경우 두 핵심 구성요소인 GPU(Graphics Processing Unit)가 연산 능력을, DRAM(Dynamic random-access memory)이 메모리 대역폭을 결정

그림 1. AI 반도체 산업의 구조



자료: 저자 작성.

3) 메모리 대역폭이란 주어진 시간 안에 얼마나 많은 데이터를 RAM이 연산부(CPU, GPU 등)에 전송할 수 있는지를 나타내는 값임.
 4) 오류정정 코드(ECC: Error Correction Code) 메모리는 데이터의 손상을 감지하고 수정하는 기능을 갖추고 있으며, 정밀한 계산이 요구되는 시뮬레이션 등에서 필수적으로 쓰이고 있음. https://en.wikipedia.org/wiki/ECC_memory.
 5) FPGA(Field programmable gate array)란 프로그래밍이 가능한 블록들을 포함한 반도체를 의미하며, 사용자가 요구하는 특수 목적에 따라 기능을 조절할 수 있어 범용 연산을 수행해야 하는 CPU보다 빠르게 작동할 수 있는 장점이 있지만 프로그래밍 난도가 높은 것이 단점임.
 6) ASICs(Application-specific integrated circuits) 혹은 주문형반도체는 특수 용도에 맞게 최적화된 것으로 수행 범위가 한정적인 대신 빠르게 연산할 수 있다는 장점이 있지만, 제작 비용이 많이 들어 AI 연구 초기 단계부터 활용하기 어려운 측면이 있음.
 7) AMD에 2022년 2월 14일 인수됨.
 8) 2021년 4/4분기 기준 삼성전자가 42.3%, SK하이닉스가 29.7%, 마이크론이 22.3%의 점유율을 차지하였으며, 그 외 군소업체인 Nanya(3.1%), Winbond(1.0%), PSMC(0.3%)가 DRAM을 생산하고 있음. DRAMeXchange, <https://www.dramexchange.com/WeeklyResearch/Post/2/11223.html>(검색일: 2022. 9. 20).

- AI 반도체 생태계는 연산성을 향상하기 위해 하드웨어 측면에서 미세공정과 설계기술 발전에 의존하고 있음.
 - 공정 미세화는 트랜지스터 집적도 향상을 통해 하드웨어의 연산부를 강화할 수 있기 때문에 연산성 향상을 위한 필수적인 요소
 - AI 반도체에는 최신 공정이 빠르게 적용되고 있으며, 이번 수출규제 대상인 고성능 그래픽카드 제조에는 7나노미터(nm) 이하의 공정이 요구되는 반면 소비자용 그래픽카드의 경우 대체적으로 8nm 이상의 공정을 사용⁹⁾
 - 현재 7nm 이하의 공정을 수반한 제조가 가능한 파운드리로는 삼성전자, 미국 인텔, 대만 TSMC가 있으며, 현재 개발 중인 엔비디아(Nvidia)의 차세대 고성능 그래픽카드인 H100은 TSMC의 4nm 공정을 이용할 계획
 - 7nm 이하의 초미세공정 중 노광 단계의 핵심 제조장비인 EUV 노광기는 네덜란드 ASML이 독점적으로 공급하고 있으며,¹⁰⁾ EUV를 이용한 노광에 필수적인 EUV용 포토레지스트는 일본 JSR, 신에츠, TOK와 같은 기업들이 대표적인 공급업체
 - 메모리 측면에서는 고대역 메모리(HBM) 기술¹¹⁾이 AI 반도체 생산에 널리 활용되고 있음.
 - 해당 기술은 삼성전자, SK하이닉스, 미국 AMD와 마이크론이 선도하고 있고, 제조 부문에서는 삼성전자, SK하이닉스, 마이크론이 경쟁하고 있으며, 3D 설계를 통해 성능 향상을 이끈 대표적인 사례
 - 가장 최신 규격인 HBM3는 SK하이닉스가 최초로 적용해 대량 생산한 제품으로, 엔비디아의 H100에 탑재될 예정¹²⁾
 - 반면 일반 소비자용 그래픽카드의 경우 GDDR¹³⁾ 계통의 메모리를 사용하고 있으며,¹⁴⁾ AI 기술개발과 일반 소비자용 그래픽 작업에 요구되는 메모리 대역폭의 차이가 있는 만큼 AI 반도체에 대한 차별화된 기술 적용이 지속될 것으로 전망
 - 공정 미세화를 뒷받침하기 위한 반도체 설계 혁신을 통해 반도체 성능 향상을 이끄는 시도가 지속되고 있음.
 - 대표적인 사례로 삼성전자의 PIM(Processing in Memory),¹⁵⁾ 엔비디아의 Grace Hopper 슈퍼반도체,¹⁶⁾ 하바나의 Gaudi 반도체 개발 등과 같은 시도가 이루어지는 중

9) 2022년 9월 19일 기준 소비자용 그래픽카드 중 가장 가격이 높은 엔비디아의 RTX 3090ti의 경우 삼성전자의 8nm 공정을 기초로 하고 있음. <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-rtx-3090-ti.c3829>.

10) EUV(Extreme Ultraviolet, 극자외선) 노광은 파장 길이 13.5nm의 EUV를 이용한 반도체 회로 인쇄 기술로, 이를 위해 EUV가 반도체 회로를 입력한 포토마스크에 반사되어 실리콘 위에 도포된 포토레지스트에 투영되는 방식으로 이루어짐. 이러한 인쇄를 가능하게 하는 모듈을 'EUV 노광기'라고 하며, 현재 네덜란드 ASML이 독점적으로 공급하고 있음.

11) 고대역 메모리(HBM: High bandwidth memory)란 GPU와 DRAM 간 교신이 더욱 효율적으로 일어날 수 있도록 돕는 인터페이스로, 일반적으로 쓰이는 GDDR 계통의 메모리에 비해 GPU와 통신할 수 있는 채널의 수가 많아 한 번에 많은 양의 데이터를 송수신할 수 있는 이점이 있음. 하지만 고대역 메모리는 설계-제조 난이도로 인해 GDDR 계통의 메모리에 비해 가격이 높다는 단점이 있음. 메모리를 층 구조로 쌓아서 연산부와 거리를 좁히는 3D 설계 방식을 통해 대역폭의 향상을 끌어냄.

12) SK하이닉스(2022), 「SK하이닉스, HBM3 혁신을 선도하다」, <https://www.thelec.kr/news/articleView.html?idxno=17141>.

13) GDDR(Graphics double data rate)은 현재 일반 소비자용 그래픽카드에 널리 쓰이는 메모리 규격이며, 고대역 메모리에 비해 대역폭이 좁지만 보다 저렴한 측면이 있음.

14) 2022년 9월 19일 기준 소비자용 그래픽카드 중 가장 가격이 높은 엔비디아의 RTX 3090ti의 경우 GDDR6X 규격의 메모리를 사용하고 있음. <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-rtx-3090-ti.c3829>.

15) PIM은 기존에 단순히 연산부와 데이터를 주고받던 것에서 벗어나 메모리에서 연산까지 수행할 수 있게 하는 반도체 기술로, 연산부와 데이터를 주고받는 횟수를 절감해 메모리 대역폭으로 인한 병목현상을 최소화할 수 있다는 장점이 있음. 「삼성전자 “인공지능 가속화를 위한 새로운 솔루션」, <https://semiconductor.samsung.com/kr/insights/technology/pim/>(검색일: 2022. 9. 19).

■ 그래픽카드를 비롯한 AI 반도체는 전통적인 CPU와 제어 방식이 다르므로, 이를 뒷받침하는 별개의 소프트웨어 생태계 역시 중요함.

- 그래픽카드의 경우 사용할 수 있는 명령어 범위가 한정적이며, 유연하게 캐시메모리¹⁷⁾와 DRAM 간을 교신할 수 있게 하는 별도의 프레임워크가 필요함.
 - CUDA(Compute Unified Device Architecture)는 엔비디아의 독점 라이선스하에 배포되고, 엔비디아의 기기들만 지원하고 있으나, 성능과 프로그래밍상의 이점으로 인해 많은 AI 개발 도구(라이브러리)에 사용되고 있음.
 - OpenCL(Open Computing Language)은 오픈소스로 배포되고 있으며, AMD, 인텔을 비롯한 반도체 업체와 AI 연구재단들이 공동개발하고 있고, CPU, 그래픽카드 및 FPGA 등에 두루 쓰일 수 있다는 장점이 있지만, CUDA에 비해 AI 개발 라이브러리들의 성숙도가 부족함.
- AI 기술개발 초기 단계에서는 여러 모형을 유연하게 실험할 수 있는 환경을 조성해야 한다는 점에서 개발을 쉽게 할 수 있도록 돕는 상기 프레임워크에 대한 의존도가 높음.

나. 수출규제 주요 내용

■ 2022년 8월 이전의 수출규제는 반도체 공정 단계의 핵심 품목들에 대한 규제에 집중되었고, AI 반도체에 대한 규제는 미흡했음.¹⁸⁾

- 미국의 수출규제는 크게 품목과 사용자에 대한 규제로 구분할 수 있음.¹⁹⁾
 - 미국은 Bureau of Industry and Security(BIS)에서 Commerce Control List(CCL)를 통해 자국 안보에 필수적인 '신흥 및 기반 기술' 관련 품목들을 명시하고 특정 국가 그룹에 대한 수출규제를 실시하고 있음.
 - 사용자에 대한 규제는 BIS의 Entity List를 통해 관리되고 있으며, 이를 통해 CCL에 포함되지 않는 품목에 대한 수출통제도 이루어질 수 있음.
- 미국은 반도체 및 생산 재료, 설계 소프트웨어, 제조 장비에 대해 전방위적으로 규제를 시행하고 있으나, AI 반도체 완성품에 대한 규제는 모호한 측면이 있음.
 - 초미세공정에 필수적인 극자외선 마스크 가동을 위한 노광 소프트웨어, 5nm 웨이퍼 생산 기술 등을 신흥 기술로 지정하고 이를 기반으로 CCL을 작성해 수출규제를 시행하고 있음.
 - 반도체 완성품 측면에서 2022년 8월 전 기준으로 AI 기술개발에 필수적인 그래픽카드에 대한 규제는 미흡했고, FPGA는 규제하고 있으나 ASICs에 대한 규제는 모호한 측면이 있음.²⁰⁾

16) <https://www.nvidia.com/ko-kr/data-center/grace-cpu/>(검색일: 2022. 9. 19).

17) 연산부는 데이터 입출력 속도가 빠른 캐시메모리를 포함해 설계되어 연산의 효율을 높이고 있으나, 캐시메모리는 제조 가격 등의 문제로 인해 용량에 한계가 있음. 그래픽카드를 사용한 프로그래밍은 작은 캐시메모리에 최대한 적은 횟수로 DRAM의 데이터를 전송하는 최적화 과정이 일반 CPU를 이용한 프로그래밍에 비해 용이하므로 추가적으로 성능을 향상한다는 이점이 있음.

18) 미국의 중국 반도체 및 AI 산업에 대한 규제 현황에 대한 보다 일반적인 내용은 연원호, 나수엽, 박민숙, 김영선(2020), 「첨단기술을 둘러싼 미·중 간 패권 경쟁 분석」, KIEP 오늘의 세계경제, Vol. 20, No. 18; 현상백, 연원호, 나수엽, 김영선, 오윤미(2021), 「미·중 갈등시대 중국의 통상전략 변화와 시사점」, KIEP 정책연구브리핑; 조은교, 서동혁, 심우중, 김바우, 백서인(2021), 「미·중 기술패권 경쟁과 우리의 대응전략-반도체·인공지능을 중심으로」 등에서 설명하고 있으며, 본고는 AI 반도체와 직접적으로 관련 있는 부분에 집중함.

19) 이정민(2022. 5. 4), 「미국 수출통제 제도 심층 분석 및 시사점」 참고.

- 다만 인텔, AMD, 엔비디아가 중국의 Tianhe-2를 비롯한 슈퍼컴퓨터 업그레이드용 CPU와 그래픽카드를 수출하려는 것을 미국 상무부에서 Entity List를 통해 불허한 전례가 있음.²¹⁾

■ 미국은 ‘국가안보에 위협이 되는 기술개발에 이용될 수 있다’는 이유로 중국(홍콩 포함)과 러시아에 대한 엔비디아와 AMD의 고성능 그래픽카드의 수출 허가제를 실시함(8월 26일).

- 엔비디아가 미 증권거래소에 제출한 공시자료에 따르면, 미국 행정부는 엔비디아의 데이터센터용 그래픽카드인 A100 혹은 H100과 유사한 수준의 최고성능 기능(peak performance capability)과 입출력 성능을 기준선으로 삼아 이 두 개의 항목 중 어느 것이라도 성능상 우월한 그래픽카드의 수출을 제한하는 방침을 세움.
 - 여기서 말하는 최고성능 기능은 GPU가 수행할 수 있는 32비트 연산이나 64비트 연산²²⁾의 최대 연산 횟수(TFLOPS)²³⁾를 기준으로 할 것으로 예상됨.
 - 구체적으로 밝혀지지 않았으나, 입출력 성능(chip-to-chip I/O performance)은 GPU와 메모리칩 간의 교신 성능으로 해석할 수 있으며, 앞서 언급한 AI 모형 학습의 병목 지점으로 지목되는 메모리 대역폭을 기준으로 할 것으로 전망됨.
 - 이번 수출규제에 포함되지 않은 엔비디아의 기존 최상위 그래픽카드 중 하나인 V100을 통해 미국 정부의 수출규제 하한선을 예상해볼 경우, 연산성능은 15TFLOPS(32비트 기준), 메모리 대역폭은 1TB/s 수준일 것으로 추측됨.
- 미 증권거래위원회 공시자료에 따르면 엔비디아는 이번 규제로 인해 대중국 수출이 4억 달러 정도 감소할 것으로 예상했으며, 규제 당일 엔비디아의 주가는 전일 증가 대비 10.3% 하락함.
 - 다만 9월 1일 엔비디아가 미 증권거래위원회에 제출한 동향 보고서(8-K current report)에 따르면 미국 정부는 한시적으로 홍콩 지사를 통한 A100 및 H100 주문 접수와 운송을 2023년 9월 1일까지 허용했으나, 이후에는 수출 허가 신청을 반려했을 가능성이 있음.
- AMD는 중국에 대한 데이터센터용 그래픽카드 수출이 미미하여 수출규제에 따른 수익의 큰 영향은 없을 것이라고 자체적으로 전망함.

20) Commerce Control List의 3A001.a.9는 신경망집적회로(neural network integrated circuits)를 규정하고 4A004.b에서 신경망컴퓨터(neural computer)를 명시하고 있으나 구체적으로 어떤 품목들이 이에 해당하는지 판단하기 어려움. Center for Security and Emerging Technology(2020), “U.S. Semiconductor Exports to China: Current Policies and Trends.”

21) WCCFTECH (2015. 4. 14), “US Government Bans Intel, Nvidia and AMD From Selling High End Chips To The Chinese Government,” <https://wccftech.com/us-government-bans-intel-nvidia-amd-chips-china/>.

22) 32비트와 64비트는 숫자를 표현하기 위해 동원되는 비트의 수를 의미하며, 숫자가 높을수록 정밀한 수를 표현할 수 있음. 정밀한 과학 시뮬레이션과 같은 계산에는 64비트가 요구되며 AI 모형 학습에는 32비트 수를 대체적으로 사용함.

23) Floating point operations per second(FLOPS)란 1초에 부동소수점(floating point) 수를 얼마나 많이 계산할 수 있는지 나타내는 지표이며 1 TFLOPS는 10^{12} FLOPS에 해당함.

표 1. 규제 대상 그래픽카드 및 대체 가능 품목

구분	제조사	모델명	파운드리	공정 (nm)	메모리			연산성능(TFLOPS)		
					규격	용량 (GB)	대역폭 (TB/s)	64 비트	32 비트	16 비트
규제 품목	엔비디아	A100	TSMC	7	HBM2e	40	1.6	9.8	19.5	78.0
		H100		4	HBM3	80	1.3	12.0	24.1	96.3
	AMD	MI250		6	HBM2e	128	3.3	45.3	45.3	362.1
대체 품목	엔비디아	V100		12	HBM2	32	0.9	7.1	14.1	28.3
	AMD	MI150		7		16	1.0	6.7	13.4	26.8
	Biren Tech.	BR100		7	HBM2e	64	1.6	-	256	1024
		BR104	7	32		0.8	-	128	512	

자료: 엔비디아와 AMD의 그래픽카드들은 TechPowerUp(<https://www.techpowerup.com/>)을 참고하고, Biren Technology의 제품들은 해당사 홈페이지의 소개글(<https://www.birentech.com/BR100.html>)과 The Next Platform에서 TSMC가 Biren Technology의 7nm 공정 GPU를 제조한다는 보도(<https://www.nextplatform.com/2022/08/25/china-launches-the-inevitable-indigenous-gpu/>)를 참고하여 작성.

2. 수출규제 영향

가. 중국 AI 산업에 미치는 영향

- 중국 외교부 대변인 왕원빈(汪文斌)은 최근 기자회견(9월 1일)에서 “그간 미국정부가 국가안보를 이유로 권한을 확대 해석해 개도국의 발전을 억압해왔다”고 하며, ‘주요 기술을 독점화하는 시도는 성공하지 못할 것’이라고 평가함.
- 이번 규제로 인해 AI 기술개발에 필요한 시간이 늘어날 수는 있지만 중국에 대한 모든 그래픽카드를 대상으로 한 규제가 아니기 때문에 대체품을 통한 연구개발 등이 이루어질 수 있어 중국의 AI 연구에 큰 영향을 주기는 어려워 보임.
 - 단기적으로 해당 그래픽카드를 활용하지 못함에 따라 다른 대체품을 사용하는 과정에서 AI 기술개발에 필요한 시간이 증가할 수 있음.
 - 그러나 AI 기술개발 과정에서 여러 종류의 그래픽카드가 두루 쓰이는 만큼 대체품을 이용하는 것이 프로그래밍상 큰 수정을 동반하지는 않음.
 - 기술개발 과정은 보통 비용 절감을 위해 프로토타입을 만들기까지 저성능 그래픽카드에 의존하고 최종 단계에서 기술이 어느 정도 검증되면 고성능 그래픽카드, FPGA나 ASICs와 같은 AI 반도체를 사용하는 방식으로 이루어짐.
 - 그래픽카드간 메모리 크기나 코어 수 차이에 따른 알고리즘상 미세조정은 있을 수 있으나, 해당 요소들이 연구에 크게 지장을 준다고 보기는 어려움.

- 또한 중국 내 고성능 그래픽카드의 주고객이라고 할 수 있는 클라우드 서비스 업체들은 수출규제 품목 외에도 다른 대체품들에 대한 서비스를 제공하고 있음.
- o 중국의 주요 클라우드 서비스 업체들은 수출규제 품목인 A100 외에 AMD와 엔비디아에서 구입 가능한 대체품들에 대한 서비스도 원활하게 제공하고 있음.
- o 또한 중국 외 서버의 클라우드 서비스를 사용하는 방식들을 통해 고성능 그래픽카드를 활용한 중국 내 AI 연구는 큰 영향을 받지 않을 것으로 보임.

표 2. 중국 클라우드 컴퓨팅 업체의 그래픽카드를 통한 서비스 현황 및 시장 점유율

클라우드명	제조사	모델명	점유율(%)
알리바바 클라우드	AMD	S7150	36.7
	엔비디아	M40, P100, P4, V100	
화웨이 클라우드	엔비디아	V100	18.0
텐센트 클라우드	엔비디아	M40	15.7
바이두 클라우드	엔비디아	A100, A10, V100, T4, P40, P4, K40	8.4
총계			78.8

주: 시장 점유율 기준 상위 4개 업체 선정해 각 클라우드 서비스 업체들의 홈페이지에서 GPU 인스턴스를 검색함.

자료: 시장 점유율은 2022년 1/4분기 기준으로 infotechlead(<https://infotechlead.com/cloud/top-china-cloud-providers-and-their-share-in-q1-canalys-72839>, 검색일: 2022. 9. 2)의 자료를 재인용.

■ AI 연구와 관련성이 높은 슈퍼컴퓨팅 분야에서도 중국에 대한 미국의 영향력은 제한적임.

- 2022년 6월 기준으로 중국의 3대 슈퍼컴퓨터²⁴⁾인 선웨이 타이후라이트, 티엔허-2A, 고등연산시스템(Advanced Computing System)은 모두 그래픽카드를 배제하고 CPU 형태의 반도체만을 사용하며, 중국 내에서 제작한 반도체들을 포함해 시스템을 구성함.
- o 과거 2012년 6월 중국의 슈퍼컴퓨터 성능 1, 2위를 기록한 티엔허-1A와 Nebulae는 모두 미국의 CPU를 사용하고 엔비디아의 M2050 그래픽카드를 사용해 미국에 대한 의존도가 높았음.
- o 중국은 미국의 Entity List를 통한 제재에 대한 대응으로 슈퍼컴퓨팅 분야에서 국산화를 지속적으로 달성하고 있음.

■ 중국의 Biren Technology는 이번 수출규제 대상인 그래픽카드와 유사한 수준의 제품 개발을 발표함.²⁵⁾

- Biren Technology는 중국의 신생기업으로, 벤처사업가인 Zhang Wen과 엔비디아, AMD 및 삼성전자에서 그래픽카드 설계자로 근무했던 Lingjie Xu에 의해 설립됨.
- Biren Technology는 자사 그래픽카드인 BR100이 이번 수출규제 대상인 엔비디아의 A100과 비교하여 다양한 기계학습 알고리즘 수행 시 2배 이상의 성능을 낸다고 발표함.
- o 단순히 메모리 대역폭이나 이론상 최고성능 기능을 비교하더라도 이번 수출규제 대상인 그래픽카드에 비해 우월하거나 비슷한 수준인 것으로 확인됨.

24) Top500 프로젝트의 LINPACK 벤치마크 기준으로 선정함. <https://www.top500.org>.

25) 세부 내용은 The Next Platform(2022. 8. 25), "CHINA LAUNCHES THE INEVITABLE INDIGENOUS GPU," <https://www.nextplatform.com/2022/08/25/china-launches-the-inevitable-indigenous-gpu/>(검색일: 2022. 9. 2) 참고.

- 단기적으로는 Biren Technology의 그래픽카드를 AI 기술개발에 활용할 수 없더라도 앞선 슈퍼컴퓨터의 국산화 사례와 같이 점차 미국산 그래픽카드 수요를 대체할 수 있을 것으로 전망됨.

나. 국내 메모리 반도체 및 파운드리 산업에 미치는 영향

■ 메모리 반도체 산업에서 삼성전자와 SK하이닉스가 큰 비중을 차지하는 것을 고려하면 이번 규제는 한국의 동 산업에 부정적인 영향을 줄 수 있음.

- 이번 수출규제의 대상이 되는 그래픽카드는 공통적으로 고대역 메모리를 활용하고 있으며, 앞서 언급했듯이 GPU와 메모리 간의 병목현상을 해결하기 위해 고성능 메모리에 의존하는 현상은 앞으로도 지속될 것으로 전망됨.
- 이번 수출규제로 미국의 대중국 고성능 그래픽카드 수출이 감소하면 HBM2e²⁶⁾ 규격의 메모리를 생산하는 삼성전자, SK하이닉스, 마이크론의 매출 역시 타격을 입을 수 있음.
- 앞으로 이러한 정책이 확대될 경우, 고성능 메모리 반도체의 주수요처인 그래픽카드 업체들의 판매처가 불안정해지므로, 고성능 메모리 개발 동력도 약화될 수 있음.

■ 고성능 그래픽카드는 대부분 7nm 이하의 초미세공정에 의존하기 때문에 해당 공정 능력을 갖춘 TSMC와 삼성전자 파운드리 부문에도 부정적인 영향을 줄 수 있음.

- 이번 수출규제에 포함된 그래픽카드나 그에 대한 대체품의 GPU는 대부분 TSMC에서 제조하고 있음.
 - 현재 엔비디아에서 개발 중인 H100도 TSMC의 4nm 공정을 이용할 계획임.
 - 삼성전자 파운드리도 이번 수출규제 대상 그래픽카드를 생산하지 않는 것으로 보이나, AI 반도체 생산에 필수적인 초미세공정 능력을 갖추고 있다는 점에서 향후에는 영향을 받을 가능성이 있음.

3. 전망 및 정책 시사점

■ 앞서 지적하였듯이 이번 수출규제 자체로는 중국의 AI 기술 활용에 유의미한 영향을 주기 어렵기 때문에 미국의 추가적인 조치가 있을 것으로 예상됨.

- 본고에서는 미국이 독자적으로 활용할 수 있는 추가 제재 수단을 검토하고, 이에 대한 정책적 대응을 고려하고자 함.
 - 현재 소프트웨어 분야에서 중국의 AI 기술 활용을 견제하는 제재가 부족하다는 점에서 이를 보완할 수 있는 수단(추가조치 1~2)을 살펴보고, 기존 정책과 맥락을 같이하는 하드웨어 측면의 수단(추가조치

26) HBM 계통의 메모리는 초기의 HBM부터 HBM2, HBM2e 순으로 규격이 변경되면서 성능이 향상됨. 현재 시판되는 최신 그래픽카드에는 HBM2e가 탑재되고 있음.

3~4)을 검토하였음.

- 또한 AI 반도체 산업 내에서 한국과 대만의 반도체 업계가 긴밀하게 협력하고 있다는 점에서 미국의 파트너국을 활용한 수단(추가조치 5~7) 역시 검토할 필요가 있음.

가. 미국의 예상되는 추가조치

1) 미국의 독자적인 조치

■ 추가조치 1: 엔비디아의 CUDA 프레임워크에 대한 중국 내 사용 제한

- 엔비디아 그래픽카드를 활용하기 위한 핵심 프레임워크는 AI 학습 관련 모형에 두루 쓰이는 CUDA로, 중국 내 CUDA 사용이 제한되면 당분간 AI 기술개발이 정체될 수 있음.
 - 부분적으로 OpenCL과 같은 프레임워크로 대체할 수 있으나, CUDA에 의존적인 AI 라이브러리들의 경우 단기간에 이를 대체하기 어려운 측면이 있음.
 - 클라우드 컴퓨팅 업체들이 활용하는 그래픽카드 역시 대부분 엔비디아 제품인 점을 고려하면 중국 내에서 이에 대한 의존도가 높을 것으로 예상할 수 있으며, CUDA에 의존하던 AI 모형의 경우 전면 재개발이 불가피함.
- 이 경우 중국에서 AI 연구개발에 필요한 엔비디아의 모든 그래픽카드에 대한 수요가 줄어들기 때문에 엔비디아에 막대한 타격이 발생하게 되는 등의 부작용이 우려됨.
- 추가조치 1은 엔비디아의 그래픽카드를 일반 소비자용과 전문가용으로 양분한 다음 전문가용에 대한 그래픽카드 수출은 전면 규제하고, 일반 소비자용에 대해 CUDA 사용을 제한하는 방법으로 변형할 수 있음.
 - 소비자용 그래픽카드를 데이터센터에 탑재하는 것은 엔비디아의 방침²⁷⁾에 어긋나는 행위이며, 엔비디아는 전문가들이 일반 소비자용 그래픽카드를 사용하지 않도록 유도하는 전략을 사용하고 있어 해당 조치는 엔비디아의 사업 방향과 부합하는 면이 있음.
 - 제재에도 불구하고 거대한 소비자용 그래픽카드 시장을 잃지 않으면서도 중국에서의 AI 연구를 위한 그래픽카드 사용을 전면 차단하는 효과를 가져올 수 있음.

■ 추가조치 2: 중국 내에서 미국 데이터센터의 그래픽카드 및 ASICs 이용 서비스 사용 금지

- 이번 수출규제는 데이터센터의 그래픽카드 및 ASICs를 이용하는 방법으로 우회할 수 있음.
- 중국에서 미국 데이터센터가 제공하는 그래픽카드 및 ASICs에 접근하는 것을 차단할 경우, 규모의 경제에 기반한 서비스를 이용하는 기업 단위의 연구자들이 직접적인 타격을 받을 수 있음.
- 다만 이러한 조치는 기술적인 어려움이 있을 수 있고, 미국 데이터센터들의 영업권을 침해하는 행위이기 때문에 논란이 있을 수 있음.

27) Digital Trends(2018. 1. 7), "Nvidia's updates EULA to ban the use of gamer-oriented GPUs in data centers," <https://www.digitaltrends.com/computing/nvidia-bans-consumer-gpus-in-data-centers/>.

■ 추가조치 3: 고성능 CPU에 대한 수출규제

- 다수의 그래픽카드를 활용하거나 고성능 연산기기를 구성하기 위해서는 일반 소비자용이 아닌 다수의 고성능 서버용 CPU 활용이 필수적
- 기존의 Entity List와 더불어 품목 중심으로 고성능 CPU 역시 규제할 수 있음.
- 중국 내 고성능 CPU의 완전한 국산화가 이루어지지 않은 점을 감안하면, 이러한 수출규제 정책은 잠재적인 판매처를 잃을 수 있는 인텔이나 AMD로부터의 반발을 초래할 수 있음.

■ 추가조치 4: 기타 연산 가속기(FPGA, ASICs)에 대한 규제

- 특정 AI 기술에 대한 검증이 끝나면 해당 기술 활용에 대한 효율성을 높이기 위해 FPGA나 ASICs와 같은 연산 가속기에 의존할 수 있다는 점에서 기타 연산 가속기에 대한 규제 역시 AI 기술개발 견제를 위한 유효한 전략이 될 수 있음.
- 2022년 9월 현재 ASICs에 대한 제재 기준이 명확하지 않아²⁸⁾ CCL을 보완해 새로운 수출규제를 도입하는 것이 미국의 과제로 남아 있으나, 주문형 반도체의 성능을 평가하는 기준이 각 목적에 따라 상이할 수 있다는 점에서 일관된 규제를 마련하는 것은 쉽지 않음.

2) 파트너국을 통한 조치

■ 추가조치 5: 고대역 메모리에 대한 수출규제

- 구체적으로 AI 반도체의 핵심 구성요소인 고대역 메모리의 주제조기업인 삼성전자와 SK하이닉스에 ‘대중국 최신 규격 메모리 수출 금지에 대한 협조’를 요청할 수 있음.
 - 고대역 메모리 사용은 AI 반도체 제조의 중요한 부분으로, 중국이 독자적으로 그래픽카드를 설계하기 위해서는 삼성전자, SK하이닉스, 마이크론과의 협력이 필수적임.
- 미국이 파트너국을 통한 조치를 활용하면 자국에 대한 피해를 최소화하면서 중국의 AI 기술개발을 효율적으로 견제할 수 있기 때문에 그와 같은 조치를 최우선으로 고려할 것이나, 이는 한국의 고대역폭 판매 및 개발에 큰 지장을 초래할 수 있음.
- 해당 조치는 향후 ECC 기능을 탑재한 메모리 등에 대한 수출규제로 변형될 수 있음.

■ 추가조치 6: TSMC와 삼성전자의 대중국 수출을 위한 AI 반도체 생산 규제

- 중국은 자체적으로 초미세공정을 이용한 반도체 생산이 어렵기 때문에 삼성전자와 TSMC의 초미세공정을 이용한 중국으로부터의 위탁 생산이 금지될 경우, 중국의 AI 반도체 생산 능력이 크게 떨어질 수 있음.
 - 미국의 요구로 TSMC는 화웨이에 대한 공급을 중단한 전례²⁹⁾가 있으며, 이와 유사하게 미국은 TSMC

28) Center for Security and Emerging Technology(2020), “U.S. Semiconductor Exports to China: Current Policies and Trends.”

29) 이에 대한 자세한 내용은 연원호(2020), 「트럼프 행정부의 대(對)화웨이 반도체 수출규제 강화와 시사점」, KIEP 세계경제포커스 20-15와 연원호(2020), 「트럼프 행정부의 대(對)화웨이 반도체 수출규제 확대와 전망」, KIEP 세계경제포커스 20-25에서 다루고 있음.

및 삼성전자에 AI 반도체 제조 관련 제재에 협조하도록 요구할 수 있음.

- 이러한 조치는 주요 파운드리 업체의 공정 개발 목표 달성에 큰 지장을 줄 수 있으며, 매출 감소 경로를 통해 TSMC와 삼성전자에 직접적으로 피해를 줄 수 있음.

■ 추가조치 7: 생산기지 이전을 통해 핵심 기술을 미국 생태계로 편입

- 미국은 「CHIPS for America Act & FABS Act」 등을 통해 이미 반도체 세제 혜택을 통한 자국으로의 반도체 생산기지 유치정책을 펼치고 있으며, AI 반도체 생산에 필요한 초미세공정 및 고대역 메모리 생산 시설이 미국 내로 이전되면 보다 효과적으로 중국 AI 기술개발에 대한 견제가 가능할 것으로 보임.

나. 중국의 예상되는 정책 대응

■ 중국은 AI 반도체 설계의 국산화를 위해 박차를 가할 것으로 예상됨.

- 중국은 앞선 슈퍼컴퓨터들의 사례에서 보이듯 이미 CPU에 대한 국산화를 상당한 수준으로 진행했으며, 이와 유사하게 미국의 AI 반도체 제재에 대응하기 위해 그래픽카드를 비롯한 AI 반도체의 국산화를 추진할 것으로 예상됨.

■ 중국은 AI 반도체 제조의 핵심 요소인 고성능 메모리와 생산 공정의 국산화를 추진할 것으로 전망됨.

- 삼성전자, SK하이닉스, 마이크론 등이 미국정부 제재의 영향을 받으면 중국은 고성능 메모리를 공급받지 못함으로써 AI 반도체 생산에 어려움을 겪을 수 있으며, 이를 타개하기 위해 자체적으로 고성능 메모리를 설계하고자 시도할 수 있음.
- 반도체 제조 측면에서도 초미세공정 기술 도입을 시도할 것으로 보이지만 EUV 노광기, EUV용 마스크 제조 기술 등이 수출규제를 받고 있어 단시간 내에 이를 극복하기는 어려울 것으로 보임.³⁰⁾

■ AI 반도체 활용을 위해 중국 내 독자적인 AI 연구개발용 프레임워크를 발전시킬 수 있음.

- 이미 중국은 선웨이 타이후라이트와 같은 슈퍼컴퓨터 활용에 국산 OS를 활용하는 등 소프트웨어 측면에서도 국산화에 진척을 보이고 있으며, 독자적인 고성능 그래픽카드 설계가 어느 정도 궤도에 오른 만큼 이를 뒷받침할 프레임워크 개발에도 많은 인력을 투입할 것으로 예상됨.
- 점차 중국의 AI 기술력이 제고되고 있으며³¹⁾ 중국이 강점을 지닌 컴퓨터 비전(computer vision)이나 패턴 인식(pattern recognition) 분야를 중심으로 영향력을 확대하면서 장기적으로 중국산 프레임워크로의 종속을 유도할 수도 있음.³²⁾

30) 미국의 반도체 제조 측면의 견제조치에 대해 중국이 취하고 있는 구체적인 대응전략은 조은교(2021), 「미국의 반도체 공급망 제재에 대응하는 중국의 전략과 시사점」, 『KIET 산업경제』에서 신기술 개발, 인재 육성, AI 반도체 투자 확대로 나누어 설명하고 있음.

31) Center for Security and Emerging Technology(2022), "Comparing U.S. and Chinese Contributions to High-Impact AI Research."

32) 이밖에 중국 정부는 미국의 AI 기업 기술 제재에 대한 대응으로 AI 기술자립 전략 및 표준확대 전략을 추진하고 있으며, 이에 대한 자세한 내용은 조은교(2021), 「미·중 AI 경쟁에 대응하는 중국의 전략과 시사점」, 『KIET 산업경제』에서 소개하고 있음.

■ 또한 중국은 고급 인력 유입이나 합작회사 설립 등의 형태로 기술 격차를 좁히기 위해 노력할 것으로 예상됨.

- 반도체 설계나 메모리 제조 분야에서의 고급 인력 확보는 기술 격차 해소를 위한 핵심 요소라는 점에서 앞선 Biren Technology 사례 등에 비춰볼 때 중국은 지속적으로 초미세공정이나 고성능 메모리 분야에서 인재 유치를 시도할 것으로 예상할 수 있음.
- 아울러 중국은 미국의 기술 제재에 대응해 반도체 생산 기술의 선두주자들과 합작회사를 설립하는 방식 등으로 기술 격차를 좁히려 할 수도 있음.
 - 미국의 대중국 고성능 CPU 제재에 대한 반작용으로 중국의 수곤(Sugon)은 AMD와의 협력을 통해 서버용 CPU인 Hygon Dhyana를 생산한 사례가 있으며,³³⁾ 이와 유사한 기업간 협력 관계가 AI 반도체 산업 전반으로 확산될 가능성도 있음.

다. 정책 시사점

■ 메모리 규격이나 공정 단위를 대상으로 한 규제는 관련 제품 수요를 크게 저하할 수 있으므로 지양해야 함.

- 미국의 이번 수출규제 조치나 앞서 살펴본 독자적인 추가 예상조치는 모두 자국 기업에 큰 피해를 초래할 수 있으며, 중국의 AI 반도체 개발 및 활용을 근본적으로 차단하기는 부족함.
- 독자적인 제재만으로 중국의 AI 기술개발에 일정 수준 이상의 영향을 주기 어렵기 때문에 미국은 향후 FAB4(CHIP4)와 같은 협의체를 통해 군사적 목적으로 이용되는 품목에 대한 제재 논의를 시작할 수 있으며, 이 과정에서 한국과 대만의 동참을 유도할 수 있음.
 - 고대역 메모리는 실질적으로 고성능 그래픽카드 전 품목 수요에 영향을 받기 때문에 미국이 중국에 대한 전방위적인 규제를 요구할 경우 이를 그대로 수용하기는 어려움.
 - AI 반도체 산업에 미치는 부정적 영향을 최소화하기 위해 파트너국을 활용한 제재도 이번 수출규제 대상의 품목 범위에서 크게 벗어나지 않도록 할 필요가 있음.

■ 고대역 메모리와 초미세공정 기술 격차를 유지할 필요

- 기술 발전 흐름에 따라 프로세서의 연산성능 발전과 메모리 대역폭은 지속해서 AI 기술 발전의 효율을 결정짓는 가장 중요한 두 축이 될 것임.
 - 한국은 반도체 제조 측면에서는 삼성전자가, 메모리 부문에서는 삼성전자와 SK하이닉스가 고성능 AI 반도체 생산에서 차지하는 지위를 공고히 할 필요가 있음.
- 중국은 상기 핵심 기술에 대한 국산화를 시도하고, 미국은 생산기지의 자국 내 생태계 편입을 시도하는 가운데, 한국 반도체 산업의 경쟁력을 유지하기 위한 노력이 필요함.
 - 앞서 살펴본 바와 같이 중국은 반도체 설계 및 제조의 국산화 과정에서 고급 인재를 영입하기 위해 적

33) ANANDTECH(2020. 2. 27), "Testing a Chinese x86 CPU: A Deep Dive into Zen-based Hygon Dhyana Processors," <https://www.andtech.com/show/15493/hygon-dhyana-reviewed-chinese-x86-cpus-amd>.

극적으로 시도할 수 있음.

- 한국은 AI 기술개발에 활용되는 반도체 생산 기술 격차를 유지하기 위해 관련 인력 유출을 방지해야 함.
- 중국과 핵심 메모리 반도체에 대한 합작회사 설립 등의 형태는 향후 미국정부와의 정책 협조에 문제가 있을 수 있고, 중국기업들의 추격을 초래할 수도 있으므로 협력 수준을 조절할 필요가 있음.
- 한국은 K-반도체 전략(2021. 5. 21)을 통해 EUV 기반 7nm 이하 첨단 파운드리 생산능력 확대 지원정책을 펴고 있는데, 이러한 핵심 기술에 대한 꾸준한 지원이 필요함.

■ 공정 미세화의 한계를 뛰어넘는 새로운 형태의 AI 반도체 개발을 위한 지원을 강화할 필요가 있음.

- 한국정부는 과학기술정보통신부와 산업통상자원부 주도하에 △Neural Processing Unit △PIM △시스템 소프트웨어 △초거대 인공지능 시스템 등에 향후 5년간 1조 200억 원을 투자함으로써 초격차 기술력을 확보하기 위한 지원 대책을 발표함.³⁴⁾
- 새로운 형태의 반도체 개발에 따르는 위험은 크지만, 선두주자로서 업계 표준으로 장착되면 이를 뒤따르는 플랫폼 경쟁에서 유리한 고지를 선점할 수 있으므로 적극적인 지원이 필요함. KIEP

34) 과학기술정보통신부 보도자료(2022. 6. 28), 「과기정통부, 「인공지능(AI) 반도체 산업 성장 지원대책」 발표.