

2. 청정생산 : 온실가스 배출저감을 위한 반도체 제조 공정의 청정기술

요약

1. 반도체 제조공정의 온실가스 배출

- 반도체 산업은 에너지 다소비 업종에 비해 에너지 사용량이 적어 이산화탄소의 배출 또한 타업종에 비해 적은 편이나 PFC기체를 발생함
- 제 3차 기후변화협약에서 PFC를 온실가스로 규정함으로써 반도체 산업은 기후변화협약에서 중요한 산업으로 대두됨

2. PFC 배출현황

- 우리나라의 PFC 사용량 및 배출량은 세계 총사용량의 15%내외를 차지하고 있으며 지속적인 산업의 성장으로 인하여 전년대비 50~60%의 성장률을 보여 미국, 일본, 유럽에 비해 빠른 속도로 배출량이 증가하는 추세임
- 세계반도체협회에서 협의한 PFC 배출저감 협약은 반도체 업계에 큰 부담임

3. PFC 저감을 위한 해외 기술개발 동향

- PFC저감을 위한 해외의 기술은 주로 미국과 일본이 보유하고 있음
- 최신 기술은 주로 대체가스의 사용, 공정의 최적화, 회수 및 재이용 시스템 개발, 처리시설 개선 등임
- 미국 및 일본의 선진기업들은 이들 신기술을 활용하여 최고 99%까지의 PFC 저감 효과를 보고 있음

4. 국내 업계의 대응

- 국내 반도체 업계는 개발 가능성이 높은 분야를 중심으로 한 기술개발 전략을 수립하고 이를 바탕으로 관련기술의 국내 개발을 국책사업으로 추진하고 있음
- 국내 업체가 추진중인 과제는 CVD공정에서의 대체 PFC 사용공정과 식각공정에서 발생한 SF₆ 제거용 반응약재 개발에 관한 것 등임
- 현대전자와 삼성전자는 CVD 세정용으로 C₃F₈ 기체를 적용하여 PFC 배출량을 50% 이상 줄이는 공정을 이미 개발하여 양산공정에 적용할 단계에 있음

1. 배경

- 1997년 일본 교토에서 열린 제3차 기후변화협약 당사국총회에서는 HFCs, PFCs, SF₆ 등을 온실가스로 규정함으로써 반도체 산업은 기후변화협약에서 중요한 산업으로 대두됨
 - 1999년 6월 세계반도체협회(WSC, World Semiconductor Council) 차원에서 자발적 협약의 성격으로 PFC 감축을 합의하였음
 - 자발적 합의는 각국이 2010년까지 1995년도 PFC배출량을 기준으로 10%를 저감한다는 내용을 골자로 함
- 우리나라의 경우 전체 산업계에서 반도체 부문이 차지하는 비중이 상당히 크므로 PFC의 자발적 감축을 위한 적절한 대응이 필요함
 - 반도체 제조공정에서 에너지 효율성을 증가시켜 에너지 소비량을 줄이고 온실 가스의 배출량을 저감시키는 등의 청정기술 개발이 필요함

2. 반도체 제조공정의 온실가스 배출

- 일반적으로 온실가스의 배출은 에너지 소비량과 밀접한 관계를 가지고 있어서 산업부문에서 에너지 다소비 업종이 온실가스의 배출도 많음
 - 반도체산업의 에너지 사용량은 전체 제조업에서 큰 비중을 차지하지 않음
 - 98년도 국내 반도체 주요 2사(舊 LG반도체 포함)의 전력 사용량은 3,990GWh로 제조업 대비 3.8%이며, 총 에너지사용량은 112.5만 toe로 제조업대비 1.6%에 불과하였음
 - 또한 웨이퍼 가공 및 반도체 제조에 사용되는 에너지 비용의 비중은 3% 이내이며, 매출액 대비비중도 2%가 안되기 때문에 에너지비용은 반도체업계의 큰 관심사는 아니었음
- 반도체 산업은 에너지 사용량이 에너지 다소비 업종에 비해 많지 않아 이산화탄소의 배출량 또한 많지 않으나 PFCs 등의 개스를 배출함으로써 기후변화협약에서 중요한 산업으로 대두됨
 - PFC 기체는 배출량이 미미하긴 하지만, 대기 중 수명이 길고(최고 5만년) 기후변화지수(GWP100)가 이산화탄소에 비해 상당히 큼(CO₂에 비해 최고 24,900배)

- PFC 기체는 반도체산업과 알루미늄 산업 등 소수의 특정 산업에서만 발생하는 관계로 각국 정부에서는 기후변화협약 감축의무와 관련되어 PFC 저감에 대해 많은 관심을 보여왔음

<표 1> PFC 물질의 대기중 수명과 지구온난화지수

PFCs	대기중 수명(yr)	GWP ₁₀₀ *
CHF ₃	250	12,100
CF ₄	50,000	6,300
C ₂ F ₆	10,000	12,500
C ₃ F ₈	2,600	7,000
SF ₆	3,200	24,900
NF ₃	740	8,100
C ₄ F ₈	3,200	9,100
CO ₂	50-200	1

* GWP₁₀₀ : 100년동안 지구온난화에 미치는 영향지수(CO₂=1기준)

자료: IPCC, 1996

○ 1999년 6월 세계반도체협회(WSC, World Semiconductor Council) 차원에서 자발적 협약의 성격으로 PFC 감축을 합의하였음

- 기후변화협약이 진행됨에 따라 1997년 이후 미국을 비롯한 선진국은 자국 반도체업계를 대상으로 자발적 협약을 추진하여 PFC 저감을 위한 노력을 경주함
- 선진국은 PFC의 자발적 감축의무로 인한 자국의 산업경쟁력의 저하를 방지하기 위하여 전 세계 반도체업체를 대상으로 한 PFC 배출감축 협약을 추진하였음

○ 자발적 합의는 각국이 2010년까지 1995년도 PFC배출량을 기준으로 10%를 절감한다는 내용을 골자로 함

- 한국은 기준 연도를 1995년으로 설정할 때 반도체산업의 성장에 큰 영향을 받으므로 산업성장추세를 고려하여 1997년을 기준 연도로 설정하는데 합의하였음

3. PFC 배출현황

○ 우리나라의 PFC 사용량과 배출량은 미국, 일본, 유럽에 비해 빠른 속도로 증가하는 추세임

- 세계 총 PFC 사용량의 11.6%(1997년)~16%(1998년)를 우리나라가 사용하고 있으며 사용량과 온난화지수를 고려한 PFC 배출량에 있어서도 10~18%를 차지함
- 지속적인 산업의 성장으로 인하여 연간 PFC 사용증가율은 50~60%(1998년)에 달함

○ 세계반도체협회에서 합의한 PFC 배출저감 협약은 우리나라 반도체 업계에 큰 부담임

- 우리나라의 반도체 업계는 DRAM 생산위주의 산업구조로서 생산라인의 사용기간이 짧아 단위당 PFC 사용량 증가율은 낮으나 사업확대와 대량생산에 따른 총 사용량은 급증하는 추세임

<표 2> 세계반도체 협회 PFC 배출 현황

구 분	한국	일본	미국	유럽
기준년도	1997	1995		
기준년도 배출량(MMTCE)	0.58	1.30	0.91	0.53
2010년 목표 배출량(MMTCE)	0.52	1.17	0.82	0.48

자료: 기후변화협약 대응을 위한 정책 및 현황, 산업자원부, 2000

*MMTCE(Million Metric Ton per Carbon Equivalent): PFC 배출량에 각 기체별 지구온난화지수(GWP)를 곱하여 산정한 탄소환산백만톤임

<표 3> 공정별 배출 PFC 기체

공 정	배출 PFC 기체
Si 식각	CF ₄ , SF ₆ , NF ₆
SiO ₂ 식각	CHF ₃ , CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈
CVD	C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , NF ₃

4. PFC 저감을 위한 해외 기술개발 동향

○ 반도체 제조공정에서 PFC 기체를 배출하는 공정은 乾式 식각공정(dry etching process)과 CVD공정(Chemical Vapor Deposition)임

- 건식 식각공정에서는 반응 기체로서 사용되고 CVD 공정에서는 chamber 세정용으로 사용되며 그 사용량은 각각 20%, 80%의 비중을 차지함

○ PFC 감축을 위한 기술은 대체물질의 개발, 기존 공정의 최적화, 미반응 기체의 재이용 등이 주를 이룸

- 제품의 질에 직접적으로 영향을 미치는 가에 따라 적용기술이 달라짐
 - CVD공정은 제품의 질에 직접적으로 영향을 미치지 않기 때문에 대체물질을 개발하거나 배출된 기체를 응집하여 재이용하는 방향의 연구가 진행되고 있음
 - 식각공정의 경우 배출된 기체를 처리하는 방향으로 연구가 진행되고 있음

<표 4> 미국의 PFC 저감기술 개발 동향

구 분	내 용	저감효과	주요회사
대체가스	· Etching 대체가스 검토 - perfluoroalkyl perfluorovinyl ethers - 2H-heptafluoropropane	95% 95%	Dupont Motorola
	· CVD용 대체가스 - C ₂ F ₆ 를 C ₃ F ₈ 로 변경적용 - Iodotrifluoromethane, 1&2-iodoheptafluoropropane - NF ₃ 를 사용하는 CVD설비 개발	50% 95%	3M Motorola
		93%	Novellus
공정최적화	· CVD C ₂ F ₆ 사용공정 최적화 장비개발 · CVD NF ₃ 사용장비 개발	30% 95%	Novellus AMT
회수/재이용	· PFC 액화 회수시스템 test	99%	TI
	· Air Liquid Membrane System 평가	99%	Intel, TI
처리시설	· 플라즈마를 이용한 분해시설 test	99%	Motorola

- 대체물질의 개발은 미국의 SEMATECH과 일본 ASET을 중심으로 진행되고 있는데 일본이 가장 선도적인 기술을 보유한 것으로 평가되고 있음
 - 대체물질 개발의 대상은 C₃F₈, C₄F₈, C₅F₈, ClF₃, HFE-216, HFE-227 등임
- 공정 최적화 연구는 현재 사용하는 C₂F₆의 CVD 챔버세정 조건을 최적화하여 배출량을 30% 이상 줄이는 공정 개발을 비롯해 NF₃를 사용하여 배출량을 95% 이상 줄이는 공정을 미국에서 개발하였음

<표 5> 일본의 PFC 저감기술 개발 동향

구분	내용	저감효과	주요회사
대체가스	· CVD용 대체가스 · 식각 가스 및 새로운 공정 검토 · 식각 가스 대체가능성 검토 -HFE-216, 227, 236, 329, HFO-Z1 등 · CVD용 대체가스 검토 : C1F ₃	90%이상 95%이상 95%이상 95%이상	국책과제 국책과제 Hitachi Tokyo Electron
공정최적화	· 반도체 제조 각사별 진행	10-20%	
회수/재이용	· 회수 및 재이용 시스템 검토	99%이상	국책과제
처리시설	· EIAJ와 장비업체가 역할을 분담하여 개발 추진 -플라즈마 -소각장치 -화학반응 시스템	95%이상 90%이상 99%이상	

- PFC 재이용 기술은 미반응 PFC를 저온 응축이나 막분리 기술을 응용하여 회수한 후 PFC 생산회사에서 정제하는 기술임
 - 정제의 경우 사용업체는 순도에 대해 회의적일 수 있으므로 현재로선 회수하여 처리하는 기술을 선호하고 있음
- PFC 처리기술은 300℃~1200℃의 고온을 이용한 연소열분해, 플라즈마 분해기술, 화학물질과 반응시켜 처리하는 처리기술 등이 있음
 - 연소기술은 미국, 일본, 유럽 등지에서 이미 개발되었고 플라즈마 처리기술은 미국, 유럽에서 약제반응 처리기술은 유럽, 일본에서 각각 개발되었음
- 우리 나라도 후처리장비기술력을 바탕으로 플라즈마 분해기술과 열분해 기술을 이용한 처리장비를 개발한 단계임

5. 국내 업계의 대응

○ 국내 업체들도 반도체 제조공정의 온실가스 배출을 저감하기 위한 다양한 청정 기술을 개발하고 있음

- 추진중인 과제는 CVD공정에서의 대체 PFC 사용공정과 식각공정에서 발생한 SF₆ 제거용 반응약재 개발에 관한 것 등임
 - 추진과제는 관련분야의 기술력이 비교적 우위에 있고 양산공정 적용가능성이 높은 부문임

<표 6> 국내 PFC 저감 추진현황

구 분	내 용	저감효과	비 고
대체가스	· CVD용 대체가스 적용 test -대체가스 : C ₂ F ₆ → C ₃ F ₈ -저감설비 도입	70-76% 90%	
공정최적화	· 시가 대체가스 공저 기츠기술 평가 · 각사별로 원가절감과 연계하여 추진 중		
처리기술	· 플라즈마 : KC-Tech(2000년 완료) · 연소처리 : UNION(2000년 완료)		국책과제

- PFC를 분리·흡착하여 처리하는 기술개발에 대해서도 투자할 계획임
- 또한 현대전자와 삼성전자는 CVD 세정용으로 C₃F₈ 기체를 적용하여 배출량을 50% 이상 줄이는 공정을 이미 개발하여 양산공정에 적용할 단계에 있음

○ PFCs의 자발적 감축협약으로 국내 반도체산업의 신규라인 증설에 제약을 받게 됨에 따라 국내업계는 한국반도체협회를 중심으로 대응방안을 모색하고 있음

- 국내 반도체업계의 현실을 고려한 PFC 관련기술의 국산화 및 기술력 확보를 위해 노력하고 있음
 - PFC 배출량이 매년 50% 이상 급증하고 있고 2010년까지 1997년 배출량의 90%를 달성하기 위해서는 대체 PFC사용공정 개발, 기존 사용 공정개선, 처리 및 회수 재이용기술 등 관련기술의 개발이 시급함
- 국내 반도체 업계는 개발 가능성이 높은 분야를 중심으로 한 기술개발 전략을 수립하고 이를 바탕으로 관련기술의 국내 개발을 국책사업으로 추진하고 있음

6. 결론

○ 반도체 산업의 PFC 감축을 비롯한 온실가스 저감을 위한 근본적인 해결책은 재료 및 설비의 변경 및 개선을 필요로 함

- 우리나라 반도체 설비산업이나 재료산업, 소자산업의 기술 수준상 핵심적인 장비나 재료에 대한 접근이 불가능하며 대부분의 대응책은 외국의 기술에 의존하고 있음

<표 7> PFC 저감기술개발 전략

		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
기술발	design rule	0.25 μ m	0.18 μ m	0.11 μ m	차세대 기술								
전현황	wafer size	200mm	300mm			차세대 제품							
PFC 배출감축계획		- 1994~1997년 국내 PFC 사용량은 매년 2배 증가 - 2010년까지 1997년 PFC배출량 기준 10% 감축											
PFC 배출감소기술													
(1) Monitoring&분석	PFC 분석기술												
	monitoring 기술/장비												
(2) 공정최적화	운전조건최적화												
	대체경과물질test			pilot	현장								
(3) 포집/회수/농축 재사용	장치개선(최적화)			pilot test		현장적용							
	포집/분리/농축기술			pilot test									
	초고순도 정제/재사용			pilot test									
(4) 분해/폐기	분해기술공정적용												
(5) 대체화합물 개발	신분해기술개발			장치개발/pilot test		현장							
	대체물질 test												
	대체물질제조/고순도정제			공정개발/pilot		공정상용화							

자료 : 「국제경쟁력강화를 위한 반도체제조 청정공정 기술개발 전략수립」, 산업자원부, 1999

- 국내 반도체 업계가 전적으로 외국기술에만 의존할 경우 독과점 가격 형성으로 막대한 비용 발생에 의한 국내 반도체의 수출경쟁력 약화의 초래가 우려됨
 - PFC 관련 원부자재, 제조장비 등을 대부분 해외에 의존하고 있으므로 관련 기술력이 취약한 실정임

○ 이러한 현실에 반도체 협회를 중심으로 청정공정 기술개발 전략을 수립, 추진하고 있으며 공정수의 증가에도 불구하고 에너지 효율적인 청정공정을 개발함으로써 에너지 사용량을 줄이려는 국내 반도체 업계의 노력은 매우 고무적임

조정국(02-3669-4095, jgcho@hri.co.kr)