

반도체 제조 근로자의 극저주파 자기장 노출 평가

Occupational Exposure of Semiconductor Workers to ELF Magnetic Fields

정은교* · 김갑배 · 정광재 · 이인섭 · 유기호 · 박정선

Eun Kyo Chung* · Kab Bae Kim · Kwang Jae Chung · In Seop Lee · Ki Ho You · Jung-Sun Park

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objectives: To compare the exposure level of extremely low frequency (ELF) magnetic fields among semiconductor workers, shipyard welders and office workers.

Methods: To measure the ELF magnetic field concentration, EMDEX LITE (Eneritech, USA) were used and monitored for eight hours continuously. Five companies handling the electric and magnetic field (EMF) source were investigated, which the exposure groups were classified into three groups: semiconductor workers, welders, and office workers. Welder group was chosen as a high exposed group and office group as a low exposed group.

Results: The arithmetic mean (\pm SD) and geometric mean (GSD) of personal exposure level of semiconductor workers were $0.73 (\pm 1.33) \mu\text{T}$, $0.43 (2.88) \mu\text{T}$, respectively. The ceiling value ranged between 0.18 and $123.2 \mu\text{T}$. Welders were exposed high with the arithmetic mean value of $3.46 (\pm 13.46) \mu\text{T}$ and geometric mean value of $0.45 (4.70) \mu\text{T}$, respectively, and ceiling value range of $75.5 \sim 129.6 \mu\text{T}$. The exposure levels of office workers were low compared to other exposed groups; the arithmetic mean $0.05 (\pm 0.13) \mu\text{T}$, geometric mean $0.03 (2.38) \mu\text{T}$ and ceiling value range $0.37 \sim 3.35 \mu\text{T}$. This study revealed statistically significant differences of the mean ELF magnetic field exposure doses among three groups ($p < 0.01$).

Conclusions: The average ELF magnetic field exposure doses of semiconductor workers were much higher than those of office workers in control group, but were lower than those of welders in high exposure group.

Key words : ELF magnetic fields, semiconductor, fabrication and assembly lines, shipyard, ceiling limits

I. 서 론

방사선은 여러 종류의 전자파 또는 전자기장으로 구성되며 광자(photon) 에너지의 크기에 따라 전리 방사선과 비전리방사선으로 분류된다. 비전리방사선은 광자에너지가 작아 원자나 분자를 이온화시킬 수 없는 방사선으로서 극저주파(extremely low frequency, ELF), 초저주파(very low frequency, VLF), 라디오파(radio frequency, RF), 마이크로파(microwave, MW), 적외선, 가시광선 등이 해당된다. 모든 비전리 방사선은 전자기파의 일반적인 특징을 갖게 되는데 첫째, 공간속을 일직선으로 이동하고 굴절될 수 있으며, 둘째, 전달되는 에너지는 주파수에 정비례하

고 파장에는 반비례하며, 셋째, 전달되는 에너지는 양자(quantum)라는 단위를 가지게 된다(Cember H, 1983). 비전리방사선이 물질에 충돌하면, 에너지가 전달되게 되는데, 비전리방사선은 전리방사선에 비해 주파수가 낮아 전달되는 에너지가 작기 때문에 원자핵의 이온화를 일으키지 않고 대신 열이 발생하게 된다. 비전리방사선 중 자외선, 적외선 등은 안구, 피부, 면역체계에 건강장해를 일으킬 수 있다. 이 중 안구와 피부에 대한 건강영향은 잘 알려져 있어, 각막염, 백내장 등을 일으키는 것으로 알려져 있다. 라디오파와 마이크로파는 인체에 발열현상 등을 일으키는 것으로 알려져 있으나, 발암성에 대한 연구는 확정적인 것이 없다. 현재까지 백혈병과 관련하여

*Corresponding author: Eun Kyo Chung 인천광역시 부평구 무네미로 478, Tel: 032-510-0803,
Fax: 032-518-0864, E-mail: jungek@kosha.net, Received: 2012. 3. 17., Revised: 2012. 3. 29., Accepted: 2012. 3. 30.

가장 논란이 되고 있는 비전리방사선은 극저주파 전자기장(extremely low frequency-electric and magnetic field; ELF-EMF)이다. 극저주파 전자기장과 인체영향에 대한 연구는 1970년대부터 시작되었다. 직업적으로 노출되는 전자기장에 의한 암에 대한 연구는 아직 정설이 명확치 않다(NRPB, 2001). 그럼에도 전기기술자 및 전기용접공 등은 일반 근로자에 비해 높은 전자기장에 노출되고 있고 이러한 직업군에서는 뇌암 등의 발생률이 높은 것으로 보고되고 있다(Deltour, 2009; Kheifets, 2001; Kheifets 등, 1999). 그리고 역학 및 메타분석 연구에서도 송전탑 주변에 거주하는 아이들이 그렇지 않은 아이들보다 백혈병 발생위험이 높다는 관련성을 입증하고 있다(Li CY 등, 2007; Olsen 등, 1993). 또한, 직업적인 극저주파 자기장 노출로 백혈병 발생 가능성이 있다는 연구(Kheifets 등, 2008)나 여성에 있어 유방암이 발생한 역학연구 사례도 있다(Erren TC, 2001). 반면에, 높은 자기장에 노출되어도 뇌암 등 암의 발생과는 관련이 없다는 주장을 하는 연구 등 상반된 연구결과를 제시하고 있다(NIEHS, 1992). 이러한 연구결과들을 종합해보면, 역학연구를 중시하는 과학자들은 아직 생물학적 기전이 명확히 밝혀지지 않았을 뿐, 그 관련성이 매우 높다는 입장인 반면 동물 및 세포실험을 중시하는 과학자들은 역학연구 방법론이 잘못되었다고 주장하고 있다. 그래서 과학자들은 이러한 차이가 단순히 다른 연구대상을 사용하였거나 높은 자기장의 직업을 평가하는 방법의 차이에서 기인할 수도 있고, 현재까지 알지 못하는 자기장 이외의 다른 요인이 암 발생에 관여하고 있을 수도 있으므로 더 광범위한 연구가 필요하다고 말하고 있다.

반도체 제조라인은 초정밀 기기 및 분석 장비 등이 집적된 일괄 공정으로 이루어져 있다. 반도체 소자는 크린룸 안에서 만들어지므로 작업자는 하얀 방진복을 입고 입자상물질이 엄격히 관리되는 공간에서 일하게 된다. 반도체제조사업장의 크린룸은 공기 순환 방식에 따른 유해화학물질, 소음, 전리방사선, 레이저광선, 마이크로파, 적외선, 자외선, 특수 재료 가스 등 다양한 유해인자들에 노출될 수 있다(SEMI, 2006; ACGIH, 1987). 또한 전기적인 위험 인자로 고전압과 고전류를 사용하는 시설이 많아 전자기장 발생이 문제가 될 수 있다. 전자기장이란 전기 및 자기의 흐름에서 발생하는 광범한 주파수 영역을 갖는 일종의

전자기 에너지로 빛의 속도와 같이 초당 30 km로 진행한다. “전자기장”이란 단어는 생소한 용어이지만, 흔히 “전자파”란 용어로 많이 불려지고 있으며 전자파의 유해성이란 곧 전자기장의 유해성을 의미한다. 전자기장은 전기와 자기로 나누어지는데 전기장은 전압의 세기에, 자기장은 전류의 크기에 비례하여 발생한다. 전기와 자기는 서로 성질은 다르지만 따로 있는 것이 아니라 서로 결합되어 있으며 생체에 영향을 주는 것은 전기보다는 자기에 의한 효과가 더 큰 것으로 알려져 있다(NIH, 2002). 전기는 모든 전도성 물체에 의해 쉽게 차폐되지만 자기는 거의 모든 물체를 쉽게 통과하기 때문에 전기를 사용하는 모든 기기에서 필연적으로 발생한다.

본 연구의 목적은 암발생과 관련하여 비전리방사선 중 특히 논란이 되고 있는 극저주파 자기장에 대해 반도체 제조공정에서의 노출수준을 파악하려는 것이다. 이를 위해 반도체공장의 웨이퍼 가공(fabrication)라인 및 조립 (assembly)에서 사용하는 각종 생산설비 및 고용량의 전기설비에서 발생하는 ELF 자기장 노출 실태 및 작업근로자들의 ELF 자기장의 노출수준을 평가하여 근로자 건강보호 및 향후 역학조사에 사용될 수 있는 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

II. 연구내용 및 방법

1. 대상 및 범위

반도체소자를 가공 및 조립하는 사업장 4개소를 대상으로 현재까지 논란이 많이 있지만 역학연구에서 백혈병 발생과 관련이 있다고 주장하는 극저주파 자기장을 주요 측정대상인자로 하였다. 평가범위는 웨이퍼 가공 및 조립 라인의 작업근로자 81명을 대상으로 하였으며 각 공정에서 근무하는 근로자의 극저주파 자기장의 노출수준과 다른 직업군을 비교하기 위해 선박수리업의 용접작업자 3명과, 대조군으로 동일 사업장내 사무실 등에서 근무하는 일반 사무직 근로자 7명의 노출수준을 측정하였다.

기기별 노출수준은 웨이퍼 가공 및 조립 라인의 여러 공정에서 사용되는 주파수 50/60 Hz이상의 주파수대역별 전자기장 발생장치 7,000대(반도체장비 6,942, 용접기 8, 사무용기기 50)를 대상으로 하였다.

2. 측정 및 평가방법

노출평가 예비조사시에 대상공정의 발생원 및 노출원 현황, 작업자의 직무특성과 기기의 종류별 주파수 특성 등을 파악하였고 극저주파 자기장의 개인 노출 측정은 공정엔지니어, 장비(설비)엔지니어, 오퍼레이터로 나누어 근로자의 작업시간 동안 6시간 이상 측정하였으며 측정기는 EMDEX Lite(ENERTECH, USA)를 이용하였다. 주요 작업공정간 노출 수준을 파악하기 위해서 지역노출 측정을 병행하였다. 또한, 기기 및 설비별 측정은 직독식 측정기인 3축 등방성 프로브가 부착된 ELT-400(NARDA, Germany)를 사용하여 발생원으로부터 3~30 cm 거리에서 최대값을 측정하였다.

모든 현장 측정자료는 측정이 끝난 후 EMCAL 2007 프로그램을 이용하여 컴퓨터에서 데이터베이스화하여 분석하였다. 측정된 자료에 대한 보정을 위해 자기장이 방출될 수 있는 모든 환경이 배제된 장소에서 배경농도(Background, 이하 “BG” 라 한다)

를 측정하였다. 배경농도의 산술평균값은 0.03 uT (0.01~0.10) 이었다. 측정된 배경농도의 값이 일률적으로 나타나 자기장의 배경농도를 무시하고 계산하여도 측정된 자기장 값에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다.

각 공정에서 측정한 극저주파 자기장의 최고노출량(Ceiling value)은 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygiene, ACGIH) 기준을 준용하여 평가하였다(ACGIH, 2011).

미국 ACGIH의 극저주파(1~300 Hz)에 대한 전신의 자기장 노출기준은 다음식과 같다.

$$B_{TLV} = \frac{60}{f}, B_{TLV}: \text{자속밀도(mT)}, f: \text{주파수(Hz)}$$

주파수 60 Hz에서의 자기장 노출기준은 1.0 mT(mili Tesla) 이다.

3. 자료수집 및 분석

반도체 제조 사업장의 웨이퍼 가공라인은 생산기기

Table 1. Number of machines by frequency band, line and process

Frequency band Line and Process		Total	ELF* (1Hz~300Hz)	VF (300Hz~3KHz)	VLF (3KHz~30KHz)	RF (30KHz~ 300MHz)	MW (300MHz~ 300GHz)
Fabrication	Diffusion	878	875	-	-	3	-
	Photo resist	310	310	-	-	-	-
	Etching	953	-	-	-	795	158
	Cleaning	237	197	-	-	40	0
	CVD†	331	6	-	-	325	0
	IMP	109	95	-	-	14	0
	CMP	100	56	-	-	44	0
	Sub-total	2,918	1,539	-	-	1,221	158
Assembly	Front	2,165	2,165	-	-	0	0
	Package	224	224	-	-	0	0
	Test	1,635	1,635	-	-	0	0
	Sub-total	4,024	4,024	-	-	0	0
Shipyard		8	8	-	-	-	-
Office		50	50	-	-	-	-
Total		7,000	5,621	-	-	1,221	158

* ELF; Extremely Low Frequency, VF; Voice Frequency, VLF; Very Low Frequency, RF; Radiofrequency, MW; Microwave

† CVD; Chemical Vapor Deposition, IMP; Ion Implant, CMP; Chemical Mechanical Polishing

및 설비들이 5개 주파수 대역중 극저주파 영역과 RF 및 MW 영역대로 구분되었다. 식각, 화학기상증착 및 연마공정에서 사용되는 기기들을 제외하고는 대부분의 공정에서 사용하는 기기들이 주파수 범위가 1~300 Hz인 극저주파영역대에 속하였고, 조립라인의 전체공정은 전부가 극저주파 영역대인 50~60 Hz에 속하였다(Table 1). 그러나, 웨이퍼 가공라인의 경우 전자기장 발생장치 대부분이 서비스 지역(service area)에 위치하고 있고 오퍼레이터가 일하는 작업지역(working area)에는 기기를 제어할 수 있는 수백대의 컴퓨터 또는 모니터가 연결되어 있어 이들로 부터 발생하는 주파수 대역은 극저주파 영역대(50/60 Hz)이다. 서비스 지역에 고주파 장치가 설치되어 있어도 작업지역에는 저주파 영역대의 전자기장에 노출될 수 있다. 선박수리업에서 EMF 발생장치는 교류아크 용접기로 약간의 용량 차이가 있을 뿐 주파수는 전부 50/60 Hz 대역이다. 대조군은 사무실 작업자로 전자기장 발생장치는 컴퓨터 및 프린터 등 사무용기기가 대부분이다.

모든 통계분석은 유의수준 0.05수준에서 분석하였고 분석을 위해 사용한 프로그램은 SPSS 18.0을 사용하였다. 측정한 개인 및 지역시료에 대해 기초통계량을 산출하였고 그룹간 평균의 차이를 비교하기 위해서 모수 및 비모수적 통계검정방법을 사용하였다.

III. 연구결과

1. 극저주파 자기장의 개인노출선량

가. 사업장별 개인노출선량

웨이퍼 가공 및 조립라인에서의 극저주파 자기장의 개인노출선량은 산술평균으로 0.73 μ T이었고, 사업장별로는 B사 1공장 0.84 μ T, B사 2공장은 0.16 μ T, C사 1공장 0.36 μ T, C사 2공장 1.00 μ T이었다(Table 2). 반도체 사업장간에도 평균의 차이가 있었다($p < 0.01$). 이것은 설비의 자동화 등과 관계가 있다. 반도체 사업장의 극저주파 자기장의 노출수준을 비교하기 위해 사무실 등에서 측정한 대조군의 개인노출선량은 0.05 μ T으로 BG 수준이었으며 비교군인 선박수리업의 용접공 개인노출선량은 3.46 μ T로 반도체 사업장보다 높았다($p < 0.01$). 또한, 사업장별 극저주파 자기장에 대한 최고노출량(Ceiling value)은 B사 1공장 123.2 μ T, C사 2공장 39.8 μ T, C사 1공장 10.1 μ T, B사

Table 2. ELF exposure summary by work site

Site	N*	AM \pm SD (μ T)	GM (GSD) (μ T)	Range (μ T)	Ceiling value (μ T)
Semi-conductor	B1 [†]	7 0.84 \pm 1.65	0.53 (2.47)	BG [‡] ~123.2	0.18~123.2
	B2	3 0.16 \pm 0.17	0.11 (2.43)	BG~8.78	0.35~8.78
	C1	7 0.36 \pm 0.57	0.21 (2.42)	BG~10.1	0.23~10.1
	C2	7 1.00 \pm 0.93	0.87 (1.66)	BG~39.8	1.75~39.8
	Total	24 0.73 \pm 1.33	0.43 (2.88)	BG~123.2	0.18~123.2
Shipyards	2	3.46 \pm 13.46	0.45 (4.70)	BG~129.6	75.5~129.6
Office	4	0.05 \pm 0.13	0.03 (2.38)	BG~3.35	0.37~3.35

* N; Number of processes or works, AM; Arithmetic Mean, SD; Standard Deviation, GM; Geometric Mean, GSD; Geometric Standard Deviation

[†] B1, B2, C1, C2 : Company name

[‡] BG : Background concentration, < 0.05 μ T

[§] $p < 0.01$, comparing sampling areas from a general linear model

Table 3. ELF exposure summary by task group

Worker's type	N*	AM \pm SD (μ T)	GM (GSD) (μ T)	Range (μ T)	Ceiling value (μ T)
Process engineer	25	0.82 \pm 0.82	0.66 (2.11)	BG [†] ~123.2	0.25~123.2
Maintenance engineer	21	0.74 \pm 1.84	0.38 (2.78)	BG~109.4	0.18~109.4
Operator	35	0.67 \pm 1.22	0.35 (3.24)	BG~15.3	1.25~15.3
Welder	3	3.46 \pm 13.46	0.45 (4.70)	BG~129.6	75.5~129.6
Office worker	7	0.05 \pm 0.13	0.03 (2.38)	BG~3.35	0.37~3.35

* N; Number of personal samples, AM; Arithmetic Mean, SD; Standard Deviation, GM; Geometric Mean, GSD; Geometric Standard Deviation

[†] BG; Background concentration, BG < 0.05

[‡] $p < 0.01$, comparing sampling groups from a general linear model

2공장 8.78 μ T 순이었다.

나. 직군별 개인노출선량

웨이퍼 가공라인에서 작업하는 근로자는 공정엔지니어, 장비엔지니어, 오퍼레이터로 크게 세 그룹으로 나누어지는데 이들의 직군별 극저주파 자기장의 개인노출수준은 Table 3과 같다. 측정된 81명을 직군별로 분류하면, 공정엔지니어는 25명으로 극저주파

자기장의 평균노출량은 산술평균으로 $0.82 \mu\text{T}$, 장비 엔지니어는 21명으로 $0.74 \mu\text{T}$, 오퍼레이터는 35명으로 $0.67 \mu\text{T}$ 이었다. 비교군으로 측정한 선박건조업의 용접작업자는 산술평균 $3.46 \mu\text{T}$, 기하평균 $0.45 \mu\text{T}$ 로서, 산술평균은 반도체사업장 근로자보다 훨씬 높았으나, 기하평균으로는 반도체업종 근로자와 비슷한 농도수준이었다. 이것은 반도체 공정내의 극저주파 자기장의 평균농도 수준이 고르게 일정수준을 유지한다는 것을 의미하며, 용접작업은 연속한 작업이 아닌 단속적으로 이루어지기 때문에 기인된 것으로

볼 수 있다. 또한, 직군별 극저주파 자기장에 대한 최고노출량은 공정엔지니어가 $123.2 \mu\text{T}$, 장비엔지니어가 $109.4 \mu\text{T}$, 오퍼레이터 $15.3 \mu\text{T}$ 순이었다. 웨이퍼 가공라인 근로자만을 비교했을 때와 직군별로 분류한 세 그룹간의 극저주파 자기장의 평균노출량에도 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.01$). 또한, 용접작업자의 최고노출량은 $129.6 \mu\text{T}$ 이었다.

웨이퍼 가공라인에서 2일 동안 연속 측정한 공정 엔지니어와 장비엔지니어의 극저주파 자기장의 밴드특성은 단시간에 자기장값이 $110\sim 120 \mu\text{T}$ 로 최고

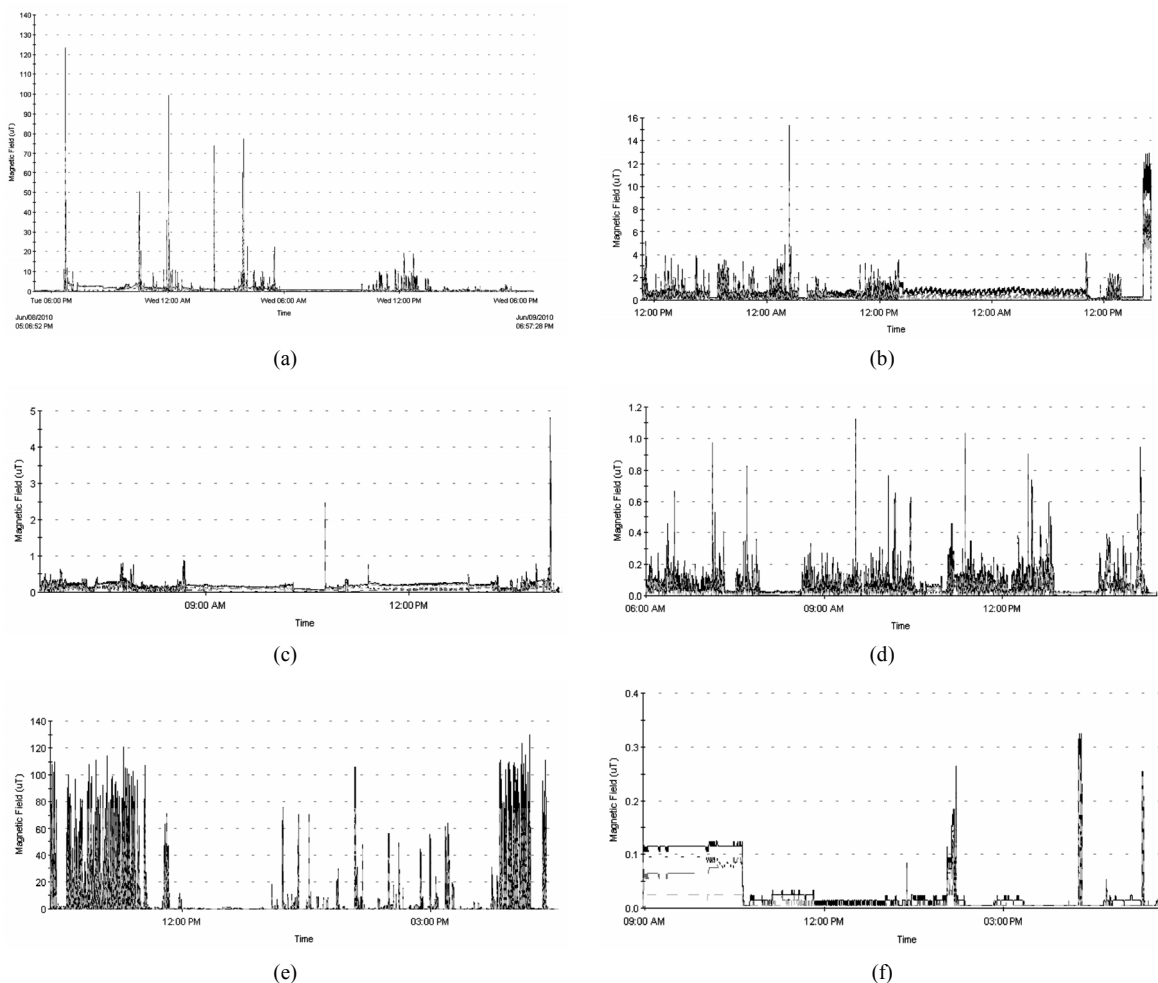


Figure 1. Examples of EMF Exposure profile of several workers. (a) Two days' real time exposure profile of a maintenance engineer at the fabrication line. (b) Two days' real time exposure profile of an operator at the fabrication line. (c) Eight hours exposure profile of a maintenance engineer at the assembly line. (d) Eight hours exposure profile of an operator at the assembly line. (e) Eight hours exposure profile of a welder at the AC manual metal arc welding work in shipyard. (f) Eight hours exposure profile of a worker at the office room

점이 순간적으로 높아지는 분포를 보였고, 오퍼레이터는 13~15 μT 정도에서 최고값을 나타내었다((a), (b) in Fig. 1). 반면에, 조립라인에서의 장비엔지니어 등의 극저주파 자기장의 최고값은 10 μT 를 넘지 않았다((c), (d) in Fig. 1). 용접작업은 고정된 자세로 하는 경우와 이동하면서 하는 경우가 있는데, 용접작업을 하지 않을 때에는 자기장값이 0.1~0.5 μT 로 낮았지만 작업 할 때는 최고값이 70~130 μT 로 고노출되는 경향을 보였다((e) in Fig. 1). 전반적으로 용접작업자들이 웨이퍼 가공라인의 작업자들보다 노출강도가 넓고 높은 것이 특징이다. 사무직업자의 극저주파 자기장의 밴드특성은 배경농도와 유사한 분포를 보

였다((f) in Fig. 1).

다. 공정별 개인노출선량

주요 공정별 극저주파 자기장의 개인노출선량은 Table 4와 같이, 웨이퍼 가공라인의 경우 확산공정의 평균노출량은 1.14 μT , 증착공정 0.54 μT , 감광공정 0.96 μT , 식각공정 0.65 μT , 이온주입공정 0.64 μT , 연마공정 0.90 μT 이었다. 조립라인은 Front 공정 0.22 μT , Package 공정 0.10 μT 이었다. 또한, 공정별 극저주파 자기장에 대한 최고노출량은 확산공정 123.2 μT , 증착공정 101.4 μT , 이온주입공정 27.7 μT , 포토공정 19.6 μT , 식각공정 17.3 μT , Package 공정 8.78

Table 4. ELF exposure summary by process in semiconductor industry

	Process	N*	AM \pm SD (μT)	GM(GSD) (μT)	Range (μT)	Ceiling value (μT)
Fabrication	Diffusion	132,563	1.14 \pm 2.01	0.82 (2.12)	BG [†] ~123.2	39.8~123.2
	CVD [‡]	126,697	0.54 \pm 1.02	0.36 (2.35)	BG~101.4	13.2~101.4
	Photo resist	86,682	0.96 \pm 1.39	0.54 (3.00)	BG~19.6	4.90~19.6
	Etching	43,561	0.65 \pm 0.74	0.41 (2.67)	BG~17.3	10.1~17.3
	IMP	65,780	0.64 \pm 0.56	0.51 (1.99)	BG~27.7	2.74~27.7
	CMP	168	0.90 \pm 0.89	0.62 (2.28)	BG~7.50	0.55~7.50
	Cleaning	1,063	0.31 \pm 0.41	0.13 (4.12)	BG~3.60	1.50~3.60
Assembly	Front	34,707	0.22 \pm 0.80	0.16 (2.30)	BG~6.31	4.40~6.31
	Package	32,054	0.10 \pm 0.15	0.07 (2.13)	BG~8.78	2.23~8.78

* N; Number of measurements, AM; Arithmetic Mean, SD; Standard Deviation, GM; Geometric Mean, GSD; Geometric Standard Deviation

[†] CVD; Chemical Vapor Deposition, IMP; Ion Implant, CMP; Chemical Mechanical Polishing

[‡] BG : Background concentration, BG < 0.05

[§] p < 0.01, comparing sampling processes from a general linear model

Table 5. ELF exposure summary by distance at major semiconductor equipments

Process	Machine name	3 cm거리(μT)	10 cm거리(μT)	30 cm거리(μT)
Diffusion	DNIT, DHT, DIF, DFO, DFN, DNT	280~860	54~157	15~34
IMP*	IHEZ, IHE, IHEX	100~450	20~130	6~10
CVD	TS7BAY cable, TSN601, P-5000, TEOS, CHDPH	10~42	8~21	3.6~12
Etching	AC RACK ES/EH, S/A PEOX, EAP705, TS5BAG, EWC, FWC	2.0~70	0.7~4.3	0.4~3.8
Front	die attach, UV irradiator, power cable	40~120	10~15	1~3

* IMP : Ion Implant, CVD : Chemical Vapor Deposition

μT , 연마공정 7.5 μT 순이었다.

2. 극저주파 자기장의 지역노출선량

웨이퍼 가공 및 조립라인에서 측정한 지역노출선량은 주로 기기별로 측정거리 3 cm, 10 cm 및 30 cm에서 측정하였는데, 노출량이 미국 ACGIH기준(Ceiling limit ; 1,000 μT)을 초과하는 경우는 없었지만, 국제비전리방사선방호위원회(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP)기준(Ceiling limit ; 417 μT)을 초과하는 경우는 일부 장비에서 나타났다(Table 5). 비교적 높은 수준의 노출량을 보인 공정 및 장비로는 웨이퍼 가공라인에서는 확산공정의 DNIT, DHT, DIF, DFO, DFN 장비 등과 이온주입공정의 고에너지 임플란터, 그리고 각 공정의 분전반 전기판넬과 전선(power cable) 등 이었다. 3 cm거리에서 측정한 확산공정 생산장비들의 노출수준은 최대 860 μT 이었고 고에너지 임플란터의 노출수준은 최대 450 μT 로써, 가전제품(형광등 40~400 μT , 진공청소기 200~800 μT)의 3cm거리에서의 수준과 비슷하다(Germany Federal Office for Radiation Safety, 1999). 증착 및 식각공정의 서비스 지역에서 사용되는 장비는 고주파 장비가 많았는데 이들 지역의 ELF자기장 수준은 대부분 극저주파영역대의 장비를 사용하는 확산 및 이온주입공정의 ELF 자기장 노출수준 보다 낮은 분포를 차지하였다. 조립라인에서는 Front공정의 칩 집착(die attach)장비, UV조사기 및 분전반의 전기설비 등이 40~120 μT 이었다.

IV. 고찰 및 결론

본 연구는 반도체 제조사업장의 웨이퍼 가공 및 조립라인의 여러 공정에서 제품을 생산하기 위해 사용하는 각종 생산설비 및 고용량의 전기설비 등에서 발생하는 비전리방사선중 극저주파 자기장의 노출평가에 초점을 두고 실시하였다. 비전리방사선중에는 여러 종류의 전자기파 방사선이 있지만 극저주파 자기장을 선택한 것은 비록 논란이 많지만 지금까지 알려진 여러 역학연구에서 백혈병과의 관련성이 있는 것으로 보고하고 있기 때문이다(Li CY 등, 2007; Kheifets 등, 2008).

반도체 제조사업장 근로자의 직군별 극저주파 자기장의 최고노출량은 공정엔지니어가 123.2 μT , 장

비엔지니어가 109.4 μT , 오퍼레이터 15.3 μT 이었고 8hr-TWA (Time Weighted Average)는 공정엔지니어가 0.82 μT , 장비엔지니어가 0.74 μT , 오퍼레이터가 0.67 μT 이었다. 이것은 미국 NIOSH에서 발표한 봉재사[0.68 μT (0.09~3.20 μT)]나 임업 및 벌목작업자[0.76 μT (0.06~9.55 μT)]의 평균노출선량과 유사한 수준이었지만 최고값은 반도체사업장이 더 높았다(NIOSH, 1996). 본 연구에서 장비엔지니어가 가장 높을 것으로 추정되었으나 의외로 공정엔지니어가 더 높았다. 이것은 공정엔지니어가 전체공정의 작업 및 설비에 대해, 장비엔지니어는 특정작업 및 설비에 대해서만 관여하므로 발생하는 노출의 차이인 것으로 볼 수 있고 오퍼레이터가 가장 낮은 이유는 공정 및 장비엔지니어 보다는 고노출설비가 많은 서비스 지역보다 작업지역에서 주로 업무가 이루어지기 때문이다. 개인노출량이 미국 ACGIH 및 ICNIRP 기준을 초과하는 경우는 없었다(ICNIRP, 2009, 1998; IEEE, 2002). WHO(World Health Organization)에서는 ICNIRP 기준을 권고하고 있다. 측정결과값만을 본다면 미국 ACGIH의 노출기준의 1/8 수준이지만, 반도체 제조사업장 생산직근로자의 극저주파 자기장 노출수준은 일반 사무직 근로자보다는 높은 수준이다.

주요 공정별 극저주파 자기장의 개인노출수준은 8시간 가중평균농도로 확산공정이 1.14 μT 로 가장 높았다. 증착, 식각 등 공정에서는 주로 고주파영역의 장비들이 사용되고 있어, 개인노출수준이 저주파영역대의 장비를 사용하는 타공정에 비해 낮을 것으로 판단되었으나 뚜렷이 구분이 안되었다. 이것은 작업자들이 소속 공정의 작업공간에만 머무는 것이 아니라 공정간 이동이 빈번히 이루어지고 있고 주로 컴퓨터 및 모니터를 통해 주작업이 이루어지기 때문으로 판단되었다. 그러나, 지역노출선량은 고주파 장비의 유무에 따라 공정간 차이가 있었다. 고주파 장비가 많은 공정이 그렇지 않은 공정보다 ELF 자기장 노출수준은 낮았다. 확산공정의 주요장비들의 지역노출선량은 타공정의 장비들보다 높았는데 이것이 개인노출선량의 노출수준을 높이는 결과가 되었다고 볼 수 있다. 웨이퍼 가공라인인 경우 사업장간의 노출량 차이는 전체공간이 클수록 낮게 나타났다.

조립라인의 공정별 개인노출량은 8시간 가중평균으로 Front 공정 0.22 μT , Package 공정 0.10 μT 이었다. 조립라인의 극저주파 자기장 노출수준이 웨이퍼 가

공라인보다 낮은 이유를 밝히기는 쉽지 않으나 웨이퍼 가공라인은 공정과 공정간 형태가 조립라인의 공정보다 더 자동화되어 있고 생산설비들로 공간이 협소한데 기인한 것으로 판단된다. 또한, 조립라인의 기기노출수준이 웨이퍼 가공라인에 있는 장비들의 기기노출수준보다 대부분 낮은 것도 이유가 될 수 있다.

또한, 여러 문헌에서 극저주파 자기장의 노출수준이 가장 높은 것으로 보고하고 있는 용접작업자의 8시간 가중평균 노출선량은 $3.46 \mu\text{T}$ 이고 최고노출량은 $129.6 \mu\text{T}$ 로 나타났는데, 이것은 미국 NIOSH의 연구결과 $0.95 \mu\text{T}$ ($0.140\sim 6.61 \mu\text{T}$)보다 훨씬 높았으나, 덴마크 NIOH(National Institute of Occupational Health)의 연구결과인 8시간 평균선량 $7.22 \mu\text{T}$ 와 최고노출량 $218 \mu\text{T}$ 보다는 낮았다(NIOSH, 1996; Jorgen 등, 1997).

최근 Comba 등의 연구에서는 자기장의 고노출과 관련된 암과 알츠하이머 질환(Alzheimer's disease)과의 상관성은 유의하나 타 질환과는 통계학적으로 관계가 없는 것으로 나타났다고 보고하였고(Comba 등, 2009; Sobel 등, 1995, 1996) 자기장 노출과 루게릭병(Amyotrophic lateral sclerosis, ALS)의 발생 가능성을 제시하기도 하였다(Ahlbom, 2001; Johansen 등, 1998; Savitz 등, 1998).

이와 같이, 전자기장에 대한 발암성 평가에 논란이 계속되어 WHO에서는 좀 더 정확한 과학적 증거를 찾기 위해서 1996년 부터 프로젝트를 수행하여 2007년 연구결과를 발표하였다. 연구결과, 발암과의 인과관계는 의학적으로 뚜렷한 증거가 없다는 결론을 내렸다. 또한, 약한 자기장에서 장기간노출에 의한 암이 진전된다는 생체작용은 밝혀진바 없으며 일부 역학연구에서 $0.3\sim 0.4 \mu\text{T}$ 이상의 극저주파 자기장에 상시노출시 소아백혈병이 유의하게 증가한다는 보고가 있었다(Mezei G 등, 2008; Ahlbom 등, 2000; Greenland, 2000; Dockerty 등, 1998; Linet 등, 1997; Olsen 등, 1993; Feychting M. 등, 1993). 그래서 소아에 대해서만 전자기장에 대한 발암 등급을 「2B(possibly carcinogenic)」로 분류하고 있다(IARC, 2002).

결과적으로, 극저주파 자기장이 백혈병, 뇌암, 흑색종, 유방암 등 다양한 암이 발생할 수 있다는 과거 역학연구들은 교란인자를 잘 통제하지 못하는 등의 한계를 갖고 있다. 일부 역학연구들은 비례사망률(proportional mortality rate, PMR)연구에서 전기공에게

암의 위험도가 증가한다고 보고되었으나 노출량이나 노출기간에 대한 결과는 제시하지 못하였다(Bracken TD 등, 2009; Kheifets LI 등, 1999). 비교적 최근의 연구 역시 이러한 문제점을 안고 있으므로, 통계적 유의성을 만족시키지 못하거나 표본수가 적다거나 질병의 일관성이 떨어진다는 데에 있다. 관련연구에 따라서는 백혈병 또는 뇌종양이 증가하기도 하며 백혈병도 종류가 다양하게 나타났다(Deltour 등, 2009). 일부 역학조사에서 긍정적인 결과가 나오는데 반해 동물실험에서는 긍정적인 결과가 아직 확인된 것이 없다. 극저주파에 의한 건강장해는 백혈병 등 암 이외에 심혈관질환, 생식기계 문제, 자살 및 우울증, 전신성측색경화증 등이 발생할 가능성이 제기되고 있으나 아직 확정적인 것은 없으며, 다만 소아에서 백혈병이 의심되는 것이 가장 유의한 결과로 나타나고 있을 뿐이다(NRPB, 2001; ICNIRP, 2001).

웨이퍼 가공라인의 기기별 노출량이 국제비전리방사선방호위원회 기준을 초과하는 확산공정 및 이온주입공정의 일부지역에 출입하여 작업을 할 경우에는 주의가 요망된다. 특히, 장비엔지니어 등이 이들 공정의 고노출장비가 설치되어있는 서비스 지역에서 정비를 위해 장기간 출입하거나 체류시에는 보호대책이 강구되어야 할 것이다.

극저주파 자기장은 역학연구와 동물실험간의 상관성이 아직도 학자간에 이견이 많고 논란의 여지가 있는 유해인자로 작업환경개선측면에서 고노출되는 설비에 대한 차단판 설치, 개방된 전선(power cable)에 대한 밀폐 등과 같은 작업환경관리를 통해 발생원의 노출을 최소한으로 줄여 나가는 노력이 필요하다.

References

- Ahlbom A, Neurodegenerative disease, suicide, and depressive symptoms in relation to EMF, Bioelectromagnetics (Suppl 5): 2001; S 132-S143.
- Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T and Verkasalo PK. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia. British J of Cancer 2000; 83:692-698.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Hazard assessment and control technology in semiconductor manufacturing. LEWIS PUB-

- LISHERS, INC. 25th ed. Ohio, Oct. 1987, 20-22.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Threshold Limit Values(TLVs) for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices(BEIs). 2011.
- Bracken TD, Kavet R, Patterson RM, Fordyce TA. An integrated job exposure matrix for electrical exposures of utility workers. *J Occup Environ Hyg* 2009; 6 (8): 499-509.
- Cember H, Introduction to Health Physics, Northwestern, University, 2nd ed. Pergamon Press, 1983.
- Comba P and Fazzo L. Health effects of 50~60 Hz magnetic fields generated from power lines : new clues for an old puzzle, *Ann Ist Super Sanita* 2009; 45 (3): 233-237.
- Deltour I. Time Trends in Brain Tumor Incidence Rates in Denmark, Finland, Norway, and Sweden, 1974~2003, *J Natl Cancer Inst* 2009; 101: 1721-1724.
- Dockerty JD, Elwood JM, Skegg DC and Herbison GP. Electromagnetic field exposures and childhood cancers in New Zealand. *Cancer Causes and Control* 1998; 9: 299-309.
- Erren TC. A meta-analysis of epidemiologic studies of electric and magnetic fields and breast cancer in women and men, *Bioelectromagnetics* 2001; 22: S105-S119.
- Federal Office for Radiation Safety, [Internet] <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index3.html>, Germany, 1999.
- Feychting M and Ahlbom A. Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish highvoltage power lines. *Am J Epidem* 1993; 138: 467-481.
- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C and Kelsh MA. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes and childhood leukemia. EMF Study Group. *Epidemiology* 2000; 11: 624-634.
- IARC (International Agency for Research on Cancer), Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields, Volume 80, 2002.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. *Health Phys* 2009; 96: 504-514.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 1998; 74: 494-522.
- ICNIRP Standing Committee on Epidemiology, Review of the Epidemiologic Literature on EMF and Health, *Environmental Health Perspectives*, Vol. 109, Supplement 6, 2001.
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), IEEE PC95.6-2002 standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0 to 3kHz. Prepared by Subcommittee III of Standards Coordinating Committee 28, IEEE Standards Department. New York : IEEE, Inc. ; 2002.
- Johansen C and Olsen JH Risk of cancer among Danish utility workers - A nationwide cohort study. *Am JEpidem*; 1998; 147: 548-555.
- Jorgen H. Skotte, Henrik I. Hjollund, Exposure of Welder and Other Metal Workers to ELF Magnetic Fields, *Bioelectromagnetics* 1997; 18: 470-477.
- Kheifets L, Bowman JD, Checkoway H, Feychting M, Harrington M, Kavet R, Marsh G, Mezei G, Renew DC, van Wijngaarden E. Future Needs of Occupational Epidemiology of Extremely Low Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields (EMF): Review and Recommendations. *Occupational and Environmental Medicine* advance online publication, 19 Sep 2008.
- Kheifets L, Monroe J, Vergara X, Mezei G, Afifi A. Occupational Electromagnetic Fields and Leukemia and Brain Cancer: An Update to Two Meta-Analyses. *J Occup Environ Med* 2008; 50: 677-88.
- Kheifets L, Electric and magnetic field exposure and brain cancer: A review, *Bioelectromagnetics*, 2001; 22 (S5) S1-S3.
- Kheifets LI, Gilbert ES, Sussman SS, Guenel P, Sahl JD, Savitz DA and Theriault G. Comparative analyses of the studies of magnetic fields and cancer in electric utility workers: studies from France, Canada, and the United States. *J Occup Environ Med* 1999; 56 (8): 567-574.
- Lewis Scarpace, Michel Williams, David Baldwin, James Stewart, Results of Industrial hygiene sampling in semiconductor manufacturing operations, LEWIS PUBLISHERS, ACGIH, 1987.
- Li CY, Mezei G, Sung FC, Silva M, Chen PC, Lee PC, et al. Survey of Residential Extremely-Low-Frequency Magnetic Field Exposure among Children in Taiwan. *Environ International* 2007; 33: 233-8.
- Li CY, Sung FC, Chen FL, Lee PC, Silva M, Mezei G. Extremely-Low-Frequency Magnetic Field Exposure of Children at Schools near High Voltage Transmission Lines. *The Sci the Total Environ* 2007; 376: 151-9.
- Linnet MS, Hatch EE, Kleinerman RA, Robison LL, Kaune

- WT, Friedman DR, Severson RK, Haines CM, Hartsock CT, Niwa S, Wacholder S & Tarone RE. Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *New Eng J Med* 1997; 337: 1-7.
- Mezei G, Spinelli JJ, Wong P, Borugian M, McBride ML. Assessment of Selection Bias in the Canadian Case-Control Study of Residential Magnetic Field Exposure and Childhood Leukemia. *Am J Epidem* 2008; 167 (12): 1504-10.
- National Institute of Environmental Health Sciences (Kenneth Olden), Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields, National Institutes of Health, 1992.
- National Institutes of Health (NIH), Electric and Magnetic Fields Associated with the Use of Electric Power, NIEHS/DOE EMF RAPID Program, 2002.
- National Radiological Protection Board, ELF Electromagnetic Fields and the Risk of Cancer. Volume 12:1, Chilton, Didcot, Oxon, UK OX11 0RQ (2001).
- National Institute for Occupational Safety and Health, National Institute of Environmental Health Sciences, U.S. Department of Energy. Questions and Answers: EMF in the Workplace. Electric and Magnetic Fields Associated with the Use of Electric Power. Report No. DOE/GO-10095-218 (September 1996).
- Olsen JH, Nielsen A and Schulgen G. Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children. *Brit Med J* 1993; 307: 891-895.
- Savitz DA and Loomis DP. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am J Epidem* 1995; 141: 123-134.
- Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI). Environmental, Health, and Safety Guideline for Semiconductor Manufacturing Equipment, <http://www.semi.org/>, 2006.
- Sobel E, Dunn M, Davanipour Z, Qian Z, Chui HC. Elevated risk of Alzheimer's disease among workers with likely electromagnetic field exposure, *Neurology*, 1996; 47 (6): 1477-81.
- Sobel E, Davanipour Z, Sulkava R, Erkinjuntti T, Wikstrom J, Henderson VW, Buckwalter G, Bowman JD, Lee PJ, Occupations with exposure to electromagnetic fields: a possible risk factor for Alzheimer's disease, *Am J Epidem*. 1995; 142 (5): 515-24.