

전과정평가를 이용한 유연 솔더링과 무연 솔더링에 대한 환경성 평가

김영희, 홍기정, 이지용, 허탁, 이지원*, 문영준*

(건국대학교 화학생물공학부, *(주)삼성전자)

Environmental Assessment s of Tin-lead Soldering and Lead-Free Soldering Using LCA

Young Hee Kim, Ki-Jeong Hong ,Tak Hur, *Ji-Won Lee, *Young-June Moon.

(Dept. of Materials Chemistry & Engineering, Konkuk University, *Samsung Electronics)

ABSTRACT

Recently, Tin-lead solder to involve lead is converting to lead-free solder that is developed and produced because of hazardous substances restriction in electronics industry. Lead-free solder to be developed has an effect on the potential human toxic impact and ecological toxic impact less than Tin-lead solder. However, lead-free solder has an effect on the potential global warming and resource depletion more than Tin-lead solder. Therefore, this paper analyzes and compares changes in the following impact categories; potential human toxic impact, ecological toxic impact, global warming and resource depletion due to a conversion from Tin-lead solder to lead-free solder such as Sn-3Ag-0.5Cu, Sn-0.7Cu or Sn-8Zn-3Bi. As a result, it shows that using lead-free solder in soldering decreases a potential human toxic impact but increases both potential global warming and resource depletion, since a process temperature of lead-free soldering is increased by rising a solder melting point.

Key-words : LCA(Life cycle Assessment), Tin-lead soldering, Lead-free soldering, Human toxic, Global warming , Resource depletion .

요 약 문

최근 전자산업계에서는 유해물질 사용제한으로 인하여 기존에 soldering에서 접합재료로 사용하였던 Tin-lead solder에 함유되어 있는 납(Pb) 성분을 대체한 Lead-free solder를 개발 및 출시하여 soldering에 도입 하고 있다. 개발되고 있는 Lead-free solder는 Tin-lead solder에 비하여 인체 및 생태계 영향은 적으나 지구온난화와 자원고갈에 있어서 더 많은 잠재적인 환경영향을 내포하고 있다. 따라서 본 논문에서는 Tin-lead solder가 Sn-3Ag-0.5Cu, Sn-0.7Cu 또는 Sn-8Zn-3Bi와 같은 Lead-free solder로 대체됨으로써 변화하는 soldering의 자원고갈, 지구온난화, 잠재적인 인간 독성 영향에 미치는 잠재적인 환경영향을 비교 분석하였다. 그 결과를 통해 Lead-free solder에 사용이 인간 독성에 미치는 영향은 감소시키나 원료의 채취 및 가공에 많은 에너지가 사용되어 자원고갈에 많은 영향을 미치며, 사용되는 solder의 녹는점 상승으로 Lead-free soldering 공정 온도의 상승을 유발시켜 자원 고갈 및 지구온난화에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

주제어: 전과정평가, 유연 솔더링, 무연 솔더링, 인간 독성, 지구온난화, 자원고갈

1. 서론

오랜 기간동안 전기·전자제품에 가장 유효한 접합 재료로 사용되어 왔던 Tin-lead solder는 전기·전자·제품의 폐기 시, 산성비에 의하여 solder 중에 함유된 납(Pb) 성분이 용출되어 지하수를 오염시키고 이것이 결국에는 인체에 흡수되어 지능저하, 생식기능저하 등의 인체 영향을 미치는 것으로 지적되어 왔다. 또한 인체 및 생태계에 위험성을 내재하고 있는 유해물질들의 사용을 제한하기 위하여 범지구적으로 제안되고 있는 환경규제, 특히 유럽에서 제안된 “특정 유해물질 사용제한지침”(Restriction of Hazardous Substances: RoHS)과 “전기·전자장비 폐기물 처리지침”(Waste Electrical Electronic Equipment: WEEE) 등으로 인하여 국내·외 전기·전자제품과 관련된 기업 및 정부, 연구단체들은 기존에 사용되어 오던 Tin-lead solder를 Lead-free solder로 대체하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 이와 같은 노력의 결과로 인하여 다양한 Lead-free solder를 개발 및 출시하고 있으며, 선진기업들은 이를 양산 공정에 적용하여 전기·전자제품들을 생산하고 있다. 특히, 국내 기업들의 경우, 기업의 경쟁력 강화 및 제품의 비교우위를 선점하기 위해 Lead-free 제품을 출시하기 위한 많은 노력을 기울이고 있다.

인체 및 생태계의 위험성을 감소시키기 위하여 Lead-free solder로의 전환을 도모하고 있지만, Lead-free solder는 또 다른 환경적 문제들을 유발하는 것으로 알려져 있다. 즉, Lead-free solder의 녹는점 상승으로 인한 Lead-free solder 공정에서의 에너지 소비 증가 및 이와 관련된 대기배출물 발생량의 증가, Lead-free solder에서 사용하는 Silver, Indium 등과 같은 귀금속의 사용 등으로 인하여 자원고갈 및 지구온난화 영향범주 등에 대한 환경영향들을 증가시키는 것으로 분석되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 전통적으로 전기·전자제품에 사용되어왔던 Tin-lead solder를 Lead-free solder로 대체함으로써 야기되는 환경성의 상보효과(trade-off)를 분석하기 위하여 solder를 대체하므로 변화되는 Surface

finishes, Flux, Soldering을 고려하여 환경성의 변화를 평가하였다.

2. 전과정평가

본 연구에서 Tin-lead solder에서 lead-free solder로의 전환에 따른 환경성 변화를 비교·평가하기 위하여 이들 solder를 적용한 soldering 공정을 대상으로 전과정평가 기법을 사용하여 환경성 평가를 수행하였다.

2.1 목적 및 범위정의

본 연구의 목적은 전과정평가 기법을 활용하여 Tin-lead soldering과 Lead-free soldering에서 사용되는 모듈들의 전과정 목록 데이터베이스를 구축하고, 이를 토대로 Tin-lead soldering에서 Lead-free soldering으로 전환 할 경우 발생하는 환경영향의 변화 및 soldering 공정의 주요 이슈(key issue)를 규명하는데 있다.

본 연구에서는 [표 1]과 같이 soldering 공정의 기능, 기능단위 및 기준흐름을 정의하였다. 대상 공정의 기준 흐름은 17인치 LCD모니터 제품에 사용되는 Main PCB 1개로 선정하였으며 중량은 0.414kg이다.

(표 1) 기능, 기능단위 및 기준흐름

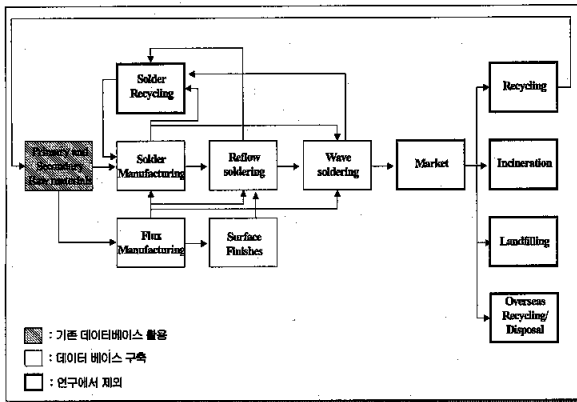
제품 구분	Soldering
기능	PCB기판에 전자부품을 탑재하여 고정시키고 전기적으로 접속하는 것
기능단위	17인치 LCD형 모니터 제품에 사용되는 PCB 1개를 제조하기 위한 Tin-lead soldering, 중·고온계 Lead-free soldering
기준흐름	대상 PCB 1개(0.414kg)

본 연구의 시스템 경계는 [표 2]대상 시스템의 모듈과 같은 soldering 공정에 필요한 모듈들인 solder, Flux 및 PCB(Printed Circuit Board)의 도금공정인 HASL(Hot Air Solder Levelling)과 OSP(Organic

Solder ability Preservative) 공정, reflow soldering 및 Wave soldering 공정을 고려한 "Cradle to gate"로 정의 하였다. 실제 각 모듈에 대한 현장 데이터는 "Gate to Gate" 데이터를 수집하였으며 공정에 사용되는 원료물질이나 에너지 등의 경우, 이미 구축된 데이터를 활용하여 상위흐름을 연결하였다. 본 연구에서 고려된 대상시스템은 [그림 1]에 제시하였다.

[표 2] 대상 시스템의 모듈

	Tin-lead soldering	Lead-free soldering
solder	Sn-37Pb	Sn-3Ag-0.5Cu Sn-0.7Cu Sn-8Zn-3Bi
Flux	for Tin-lead	for Lead-free
surface finish	HASL	OSP
soldering	Wave soldering	Wave soldering
	Reflow soldering	Reflow soldering



[그림 1] 대상시스템

본 연구에서 Tin-lead soldering과 Lead-free soldering의 환경 영향을 비교하기 위하여 기존에 Tin-lead solder에서 사용되는 납(Pb)의 대체로 인하여 변화되는 모듈들을 고려하였으며, Tin-lead soldering에서는 Sn-37Pb Bar, Wire, Paste solder, 표면처리 공정인 HASL, reflow soldering 및 Wave soldering을 고려하였다. Lead-free soldering에서는 공정 온도에 따라 중·고온계와 저온계로 구분하여 고려하였으며, 중·고온계 Lead-free soldering의 경우, Sn-3Ag-0.5Cu Wire, Paste

solder와 표면처리인 OSP, 중·고온계 reflow, Wave soldering을 고려하였다, 저온계 Lead-free soldering 공정에서는 국내에서 실제 Wave soldering의 경우 Sn-8Zn-3Bi solder를 사용하고 있지 않아 Wave soldering 사용되는 원료로 Sn-0.7Cu Bar solder, Sn-3Ag-0.5Cu Wire solder를 사용 하였으며, Sn-8Zn-3Bi Past solder와 표면처리인 OSP, 저온계 reflow soldering을 고려하였다.

2.2 전과정목록분석

전과정목록분석은 연구의 목적 및 범위정의에서 정의된 내용을 토대로 데이터를 수집하고 이를 객관적으로 분석·계산하여 정량적인 환경 부하량을 산출하는 단계로서 ISO 14040의 절차에 준하여 수행되었다. Tin-lead soldering 공정의 경우, 각 모듈을 생산하는 업체를 대상으로 2003년도의 공정 데이터를 수집하였으며 Lead-free soldering 공정은 2004년도 각 모듈을 생산하는 업체를 대상으로 설문 및 현장 조사와 각종 문헌 자료를 참조하여 수집하였다. 데이터 수집을 위한 설문조사는 각 공정의 원료 사용량, 공업용수 사용량, 에너지 사용량, 생산량, 폐기물 발생량 등과 관련하여 수행되었으며, Lead-free soldering 공정의 경우, 현재 Lead-free soldering을 적용한 LCD 모니터 제품의 양산이 이루어지지 않고 있어, 대부분 실험실 수준(Lab scale)의 공정데이터를 수집하여 이용하였다.

2.2.1 Soldering 시스템의 전과정목록분석

soldering 시스템 중 고려된 대상시스템에서 고려하고자하는 자원고갈과 지구온난화 및 인간 독성에 미칠 수 있는 목록을 선정하였다. 선정된 목록은 사용되는 화석 연료 및 대기로 배출되는 이산화탄소와 납의 양이다. [표 3]은 고려된 대상시스템에서 앞에서 언급한 목록들의 양을 나타내었다.

[표 3]에 나타난 것과 같이 reflow soldering과 Wave soldering에서 납(Pb)의 양은 기존의 Tin-lead solder를 Lead-free solder로 대체하였을 때 급격히 감소함을 볼 수 있다. 이것으로 Lead-free solder

(표 3) soldering시스템의 전과정목록분석

(단위:kg)

		Reflow soldering		
		Tin-lead	중·고온계	저온계
		Sn-37Pb	Sn-3Ag-0.5Cu	Sn-8Zn-3Bi
Input	Coal	3.93E-2	4.77E-2	4.09E-2
	Crude oil	8.30E-3	6.04E-3	5.18E-3
	Natural gas	7.12E-3	8.36E-3	7.16E-3
Output	CO ₂	1.16E-1	1.37E-1	1.18E-1
	Lead	7.70E-7	5.67E-14	5.63E-14

		Wave soldering	
		Tin-lead	중·고온계
		Sn-37Pb	Sn-3Ag-0.5Cu
Input	Coal	7.78E-3	1.15E-2
	Crude oil	3.06E-3	3.52E-3
	Natural gas	3.66E-3	4.31E-3
Output	CO ₂	2.84E-2	3.88E-2
	Lead	2.99E-6	1.36E-12

의 사용은 납(Pb)에 의해 나타나는 인간 독성 및 생태계에 미치는 영향이 감소하게 된다. 그러나 납의 양을 제외한 화석연료와 이산화탄소 배출량을 비교해본 결과 Lead-free solder를 대체 시 Tin-lead solder를 사용하였을 때 reflow soldering 공정에서는 근소한 증가를 보이며 Wave soldering 공정에서는 필요로 하는 화석연료의 양이 30% 이상 증가되고 있다. 이것은 자원고갈 영향 범주에 높은 환경 영향을 나타낸다. 또한 화석연료의 사용 양의 증가는 이산화탄소 배출량의 증가를 유발하여 지구 온난화 영향 범주에 미치는 환경 영향의 증가가 나타난다.

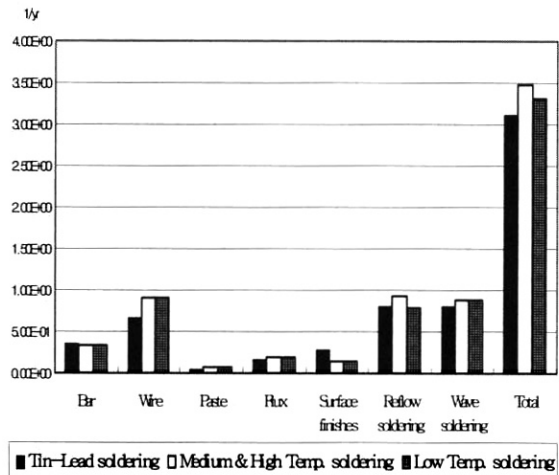
2.3 전과정영향평가

본 연구에서는 산업자원부의 영향평가방법론을 적용하여 전과정영향평가를 수행하였으며, 자원고갈 및 지구온난화, 인간 독성 영향 범주에 따른 환경영향을 분석하였다.

2.3.1 자원고갈과 지구온난화

자원고갈에 대한 각 모듈별 잠재적인 환경영향을

[그림 2]에 나타내었다. 이것은 자원고갈 영향범주에서 중·고온계 Lead-free soldering 공정의 환경부하가 가장 높음을 나타낸다.



(그림 2) 자원고갈 영향범주에 대한 특성화

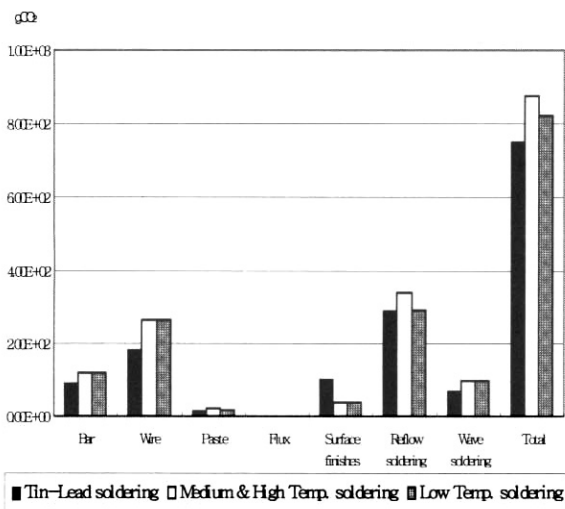
각 공정들에 따른 각각의 자원고갈 영향범주에 대한 잠재적인 환경 영향을 미치는 원인을 알아보았다.

먼저 접합재료인 solder제조 공정들은 원재료 투입, 용해, 분말채, Flux 혼합, 포장 공정으로 이루어져 있다. 이 단위 공정들 중에서 자원고갈에 미치는 잠재적인 영향에 가장 큰 기여를 하는 공정은 원재료 투입 공정이다. 이 공정에서 Lead-free solder의 경우, 금속을 채취 및 가공하는데 많은 양의 에너지를 필요로 하는 주석(Sn) 및 은(Ag)의 사용량이 기존의 Tin-lead solder보다 높다. 이것은 금속 채취 및 가공에 사용되는 화석연료의 양이 증가를 유발하여 [그림 3]에서와 같이 Lead-free solder가 자원고갈 영향범주에 미치는 기여도가 Tin-lead solder보다 증가하게 된다.

다음으로 reflow soldering 및 Wave soldering 공정은 전자부품을 실장 후, solder를 가열하여 전자부품을 PCB 기판에 고정시키고, 전기적으로 접속시키는 것이다. reflow soldering은 솔더 도포, 고속마운팅, 이형마운팅, reflow soldering 검사 공정으로 이루어져 있으며, Wave soldering은 수납, Wave soldering, 스크래치 절단, 수납땜, 검사 공정으로 이루어져 있다. reflow soldering 공정에서 단위공정들 중 reflow soldering 단위공정에서 자원고갈에 대한

잠재적인 환경영향이 큰 것으로 나타나고, Wave soldering 공정에서도 reflow soldering에서와 마찬가지로 Wave soldering 단위 공정에서 자원고갈 영향범주에 대한 잠재적인 영향이 크게 나타난다. Lead-free reflow 및 Wave soldering의 경우, Lead-free solder의 녹는점이 기존의 Tin-lead solder보다 증가하여 reflow 및 Wave machine의 전기에너지 사용량이 증가한다. 이것은 Lead-free soldering을 하기 위해 사용되는 화석연료의 사용량이 Tin-lead soldering 보다 증가하게 되고 그것으로 인해 자원고갈 영향범주에서의 잠재적인 환경영향에 Tin-lead soldering보다 크게 기여하게 된다.

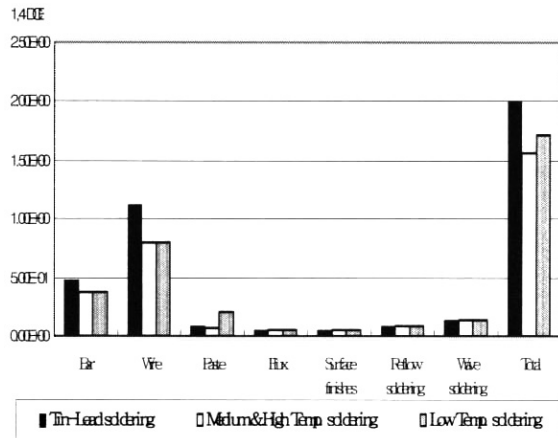
지구온난화에 대한 각 모듈별 잠재적인 환경영향이 [그림 3]과 같이 나타났다. 지구온난화 영향범주는 이전의 자원고갈 영향범주와 유사한 형태의 환경영향을 나타내는 것으로 분석되었다. 지구온난화 영향범주에서 가장 높은 환경부하를 나타내는 공정은 중·고온계 Lead-free soldering 공정으로 이것은 전기에너지 및 solder의 원료를 채취, 가공하는데 있어 많은 양의 화석연료를 사용하므로, 화석연료의 연소 시, 대기로부터 배출되는 CO₂ 등의 대기배출물 증가로 인하여 유발된다.



[그림 3] 지구온난화 영향범주에 대한 특성화 결과

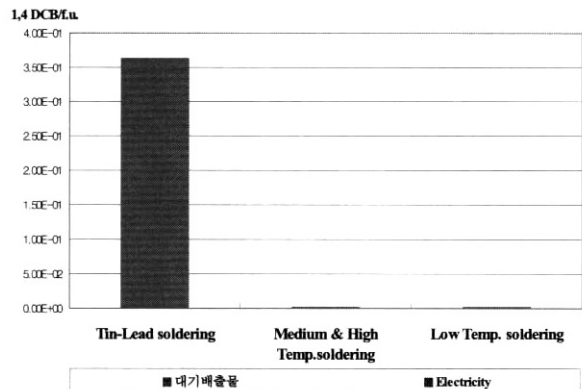
2.3.2 인간 독성

인간 독성 영향범주에 대한 각 모듈별 잠재적인 환경영향의 변화는 [그림 4]에 제시하였다.

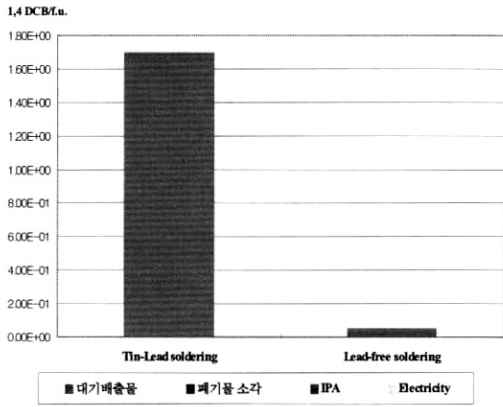


[그림 4] 인간 독성 영향범주에 대한 특성화 결과

인간 독성 영향범주에서 가장 높은 환경부하를 가지는 것은 Tin-lead soldering 공정으로 나타났다. 이것은 Tin-lead solder에 함유되어 있는 납(Pb)이 Reflow soldering 및 Wave soldering 공정에서 대기로 배출되며 또한 solder 제조 공정에서 원료인 주석(Sn) 및 납(Pb)을 용해, 혼합하는 공정에서 대기로 납(Pb), 주석(Sn) 등이 배출되고 원료를 채취 및 가공하는데 NO₂ 및 Benzene 등이 대기로 배출되어 야기되는 환경영향이다.

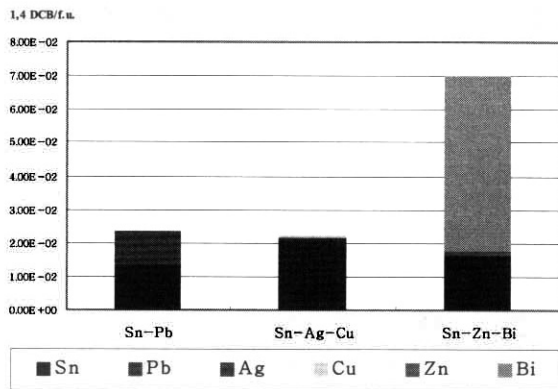


[그림 5] Reflow soldering 단위공정에서의 인간 독성 잠재성



[그림 6] Wave soldering단위공정에서의 인간 독성 잠재성

[그림 5], [그림 6]와 같이 Lead-free soldering 공정의 경우, 상대적으로 납(Pb)과 같은 인체에 유해한 물질들의 배출량이 적어 Tin-lead soldering 공정보다 인간 독성 영향범주에 대하여 낮은 환경영향을 가지는 것으로 분석되었다. 그러나 비스무스(Bi)를 포함하는 저온계 Lead-free Paste solder의 경우 비스무스의 채취 및 가공단계에서 상당량의 As가 대기로 배출되어 Tin-lead Paste solder보다 인간 독성 영향범주에서 높은 환경부하를 가지는 것으로 분석되었다. 그 결과는 [그림 7]에 제시하였다,



[그림 7] 솔더와 관련된 원재료 투입공정에서의 인간 독성 잠재성

3. 결론

본 연구에서는 Tin-lead solder와 Tin-lead

solder에 함유되어 있는 납(Pb) 성분을 대체한 Lead-free solder가 soldering에 반영 되었을 시 Tin-lead soldering 공정과 Lead-free soldering공정의 전과정을 고려하여 자원고갈, 지구온난화, 인간 독성 영향 범주들에 대한 잠재적인 환경영향을 비교 분석하여 주요 이슈를 도출하였다. 그 결과 Lead-free soldering공정은 Lead-free solder인 Sn-3Ag-0.5Cu 및 Sn-0.7Cu, Sn-8Zn-3Bi solder에서 사용되는 원료의 채취 및 가공에 더 많은 양의 에너지가 필요로 하므로 Tin-lead soldering 공정보다 자원 사용량이 높은 것으로 분석되었다. 또한, Lead-free solder의 녹는점은 Sn-3Ag-0.5Cu 경우 218℃, Sn-0.7Cu 227℃이고 Sn-8Zn-3Bi solder의 경우193℃로 Tin-lead solder의 녹는 점인 183℃보다 높기 때문에 이 solder들을 사용하는 Lead-free reflow soldering 및 Wave soldering 공정에서 공정온도 상승을 유발하여 Tin-lead soldering보다 더 많은 양의 에너지를 소비하게 된다. 결론적으로 Lead-free soldering 공정에서 에너지의 사용으로 인한 화석연료의 증가 및 화석연료의 증가는 대기배출물 발생량의 증가 시켜 관련된 영향범주인 자원고갈 및 지구온난화 등에서 더 높은 환경부하를 가지는 것으로 분석되었다. 인간 독성의 경우, Tin-lead soldering 공정에 함유되어 있는 납(Pb)의 영향으로 Lead-free soldering 보다 인간 독성에 크게 기여하지만 비스무스(Bi)를 포함하는 저온계 Lead-free Paste solder의 경우 상대적으로 비스무스의 채취 및 가공단계에서 상당량의 As가 대기로 배출되어 인간 독성 영향범주에 높은 환경영향을 나타내게 된다.

참 고 문 헌

1. 강춘식·정재필, 마이크로 접합, 삼성복스, 2002
2. 신영의·임승수·정재필, 솔더링기술 실무, 삼성복스, 2002
3. 이진모, 허탁, 김승도, 환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침, 한국품질환경인증협회, 1998
4. Nobuhiko Narita, Masayuki Sagisaka, Life cycle Inventory Analysis for the recycling of Zinc and Lead metal, Ecobalance, 2000
5. E. Funagi, K. Satoh, I. Komatsu, Evaluation and comparison of change of Environmental load by

- substitution to the Lead-free solder of an electric device, Ecobalance, 2002
6. K. Griese, Fraunhofer, Lead-free in Europe: technology roadmaps, legislation and research , care innovation, 2002.
 7. H. Yamaguchi, K. tahara, A. Inab, A life cycle inventory analysis of liquid crystal display, care innovation, 2002
 8. Z. Miric, W.C. Heraeus, Lead-free soldering: Legislation, Projects, Alternatives, Outlook, Electronics goes green 2000+, 2000
 9. T. Yamaguchi, M.Shikako, Environmental analysis of Pb-free solders applicable for Electric Device, Journal of advanced sciences, 1999.
 10. O. Deubzer, H. Hamano, T. Suga, Lead-free soldering-Toxicity, Energy and resource consumption, IEEE, 2001.
 11. H. Hamano, T. Suga, Environmental impact Evaluation for the full life cycle of products using Pb-free solders, IEEE, 2001.