

무연솔더 내 마이그레이션 플럭스개발에 관한 연구

유 동수, 임 재훈, 우 성우

삼성전자 생활가전 총괄시스템 가전사업부 Global CS팀 냉장고 CS그룹

A Study on Development of Flux to Restrict Occurrence of Ion Migration in Lead-Free Solder

Dong Su Ryu, Jae Hoon Lim and Seong Woo Woo

Ref. CS Group, Global CS Team, System Appliances Division, Digital Appliance Business,
Samsung Electronics Co. LTD

Abstract

The restriction of the use of hazardous substances in electrical and electronic equipment legislation mandates the substitution of lead and other hazardous substances in electronics products by July 2006. Due to this legislative pressure, the electronics industry is moving to adoption of lead free solders. In this paper, we investigated a flux to restrict generating electrochemical migration in lead-free solder. The lead-free solders used in this study were Sn-0.7Cu-0.01P and Sn-3.0Ag-0.5Cu. To measure the resistance of electrochemical migration, the dew-cycle test and water drop test were adopted. As the result, now flux having high durable of electrochemical migration was developed.

1. 서 론

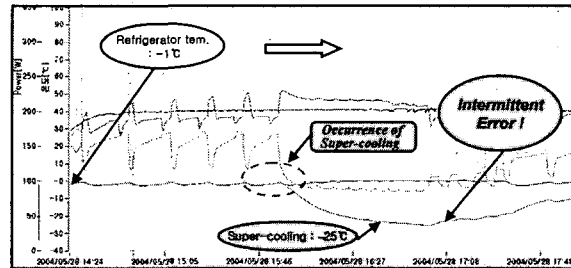
솔더링(Soldering)기술의 역사는 5000년 정도의 역사를 가지고 있으며, 초창기에는 청동기 등의 보수에 사용되었다. BC 100년에는 로마제국의 수도관의 일부에 현재의 Sn-Pb공정조성의 솔더링 기술이 사용되었다. 이와 같이 솔더링은 오랫동안 인류와 친숙한 접합기술로서 사용되었다. 그러나 현재, 세계적인 규모로 지구환경보존의 관점에서 환경에 대한 관심이 고조되고, 특히 전자기기가 폐기될 경우 솔더 내부의 납 성분(Pb) 성분이 산성비에 의해 용출되어 지하수를 오염시키기 때문에 솔더 내부의 납 성분이 문제시 되고 있다. 또한 유럽, 미국, 일본 등의 선진국에서는 2006년 6월부터 전



(a) Malfunction of display



(b) Sensor error



(c) Malfunction of temperature

Fig. 1 Malfunction of display and sensor in Kimchi refrigerator

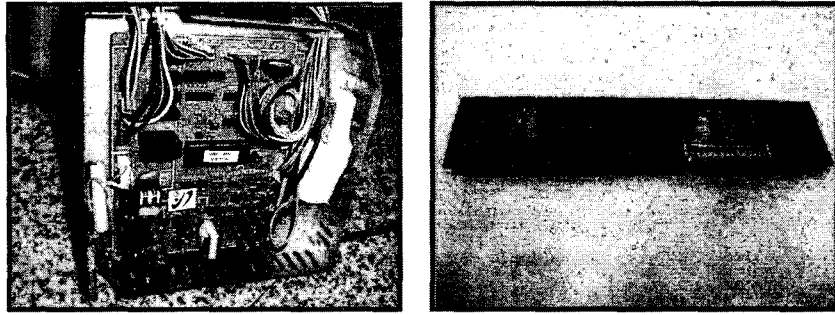
유해물질이 사용이 법률적(WEEE, RoHS)[1]으로 금지되어 있어 유연솔더를 대체할 수 있는 무연솔더(Lead-free solder)의 개발 및 무연솔더 적용시에 발생하는 신뢰성에 대한 검토가 시급한 실정이다.

한편, 무연솔더에 대한 신뢰성 향상연구는 여러 가지가 있지만, 그중에서도 PCB의 절연신뢰성 특히 전기화학적 이온 마이그레이션(electrochemical ion migration : 이후, 마이그레이션이라 부름) 큰 문제로 대두되고 있다. 마이그레이션에 의한 고장 발견은 1955년 벨(Bell)연구소의 G.T. Kohman이 전화다이얼의 적층형 접속부에 대한 은(Ag) 마이그레이션을 확인한 것이 최초이고, 그 이후로 은(Ag)뿐 아니라 거의 모든 금속 및 합금에서 마이그레이션이 일어나는 것으로 알려지고 있다[2,3].

PCB 마이그레이션에 대한 국내의 연구에 있어서 이 덕보[4] 등은 Water drop test 법을 이용하여 적하수별 마이그레이션 발생속도를 측정한 결과, 마이그레이션 발생속도는 적하수에 함유되어 있는 전해질량에 의존한다고 보고하였다. 하지만, 이 덕보 등의 연구는 동(Cu)에 대한 마이그레이션 발생과정을 분석하였고, 무연솔더와 같은 합금에 대한 마이그레이션 발생과정과 방지책에 대해서는 언급하지 않았다. 또한 무연솔더와 플럭스(Flux)의 조성비에 따른 마이그레이션 발생과 방지책에 대한 연구는 거의 전무한 상태이다.

본 연구에서는 김치냉장고 고장에 대한 근본원인분석과 김치냉장고 PCB에 적용되고 있는 무연솔더(Sn-0.7Cu-0.01P)의 마이그레이션 발생에 영향을 미치는 인자를 분석하고, 플럭스 조성비 변화에 의한 무연솔더(Sn-0.7Cu-0.01P, Sn-3.0Ag-0.5Cu) 절연 특성(내 마이그레이션)을 향상시킬 수 있는 플럭스 개발에 대해서 보고 하고자 한다.

2. 김치냉장고 고장 사례



(a) Main PCB made in FR4 (b) Control PCB made in FR1

Fig. 2 PCB of Kimchi refrigerator

최근, 생활이 윤택해짐에 따라 김치 냉장고의 사용이 급증하고 있다. 최적의 김치 맛을 내기위해서 김치의 보관온도는 제조사에 따라 조금씩 차이는 있지만 일반적으로 섭씨 -1°C 를 유지하는 것이 좋다고 알려져 있다. 최적의 김치 보관 온도를 유지하기 위해서는 냉매를 조절하는 온도제어부와 김치 냉장고의 상태를 나타내는 display부는 마이컴(MICOM)이 부착된 PCB가 사용된다. PCB에 실장되는 각 부품은 무연솔더에 의해 접착되고 각 부품의 작동은 PCB에 부착된 마이컴의 On-Off 신호에 의해 자동으로 제어된다. 마이컴에는 크게 입력부와 출력부로 나누어지고 입력부에서 들어오는 On-Off신호를 마이컴이 제어(시간적인 지연, 작동유무 등)하는 단순한 On-Off 신호 제어로서 출력부의 부품 동작을 자동제어 한다. 김치 냉장고 일반적인 고장유형은 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 display부의 LED램프의 오점등, 센서의 에러, 냉장고내의 온도제어 불능(약냉, 과냉)이 김치냉장고의 주요고장이다.

3. 실 험

3.1 김치냉장고에 사용되는 PCB구조

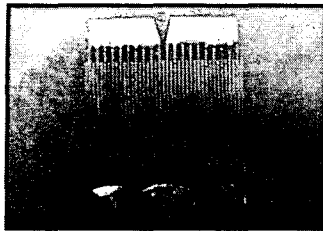
Fig. 2은 김치냉장고에 사용되는 PCB를 나타내었다. 김치냉장고의 전원, 냉매량 등을 조절하는 메인 PCB(Fig. 2(a))는 FR4기판(페놀종이)을 사용하여 부품을 실장하였고, 전장상자가 외기 open형 구조로 되어 있어 외부습기나 염분 및 바퀴벌레 등 이물질에 쉽게 노출되어 있는 구조로 되어 있다. 디스플레이 제어용 PCB(Fig. 2(b))는 FR1기판(FRP)을 사용하여 부품이 실장 되어있고 밀폐구조로 되어있기는 하나 외기에 쉽게 노출되는 구조를 하고 있기 때문에 Control PCB도 마찬가지로 외부습기나 염분 및 바퀴벌레 등의 이물질에 쉽게 노출되어 있는 구조로 되어 있다. 따라서 김치냉장고의 PCB는 모두 외부의 습기 등에 쉽게 노출되는 구조로 되어있다.

3.2 가속시험

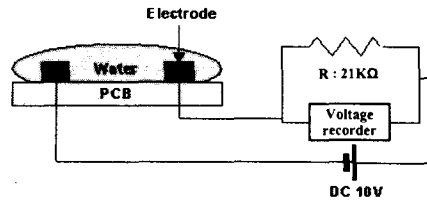
3.2.1 결로시험 및 가속 humidity stress 시험

전절에서 기술한바와 같이 김치냉장고의 PCB는 습기나 이물질에 쉽게 노출되어 있는 구조이고, 사용환경에서도 김치 냉장고는 아파트나 일반주택에서 주로 베란다나 외

부에 위치한다. 베란다나 외부환경의 경우 조석으로 기온의 차이가 심한 곳이기 때문



(a) Specimen for water drop test



(b) Experimental equipment for water drop test

Fig. 3 Specimen and experimental equipment for water drop test

에 온도차에 의한 수분 결로가 많이 발생하는 곳이다. 따라서 본연구에서는 김치 냉장고에 사용되는 3개의 PCB를 5°C, RH65% 30분 방치 후, 다시 45°C, RH75%에서 30분 방치하는 수분 결로 시험하였다. 또한 고장품의 고장재현을 위한 가속시험으로서 가습기를 사용하여 인위적으로 김치냉장고 PCB부위에 가습하여 가속시험에서 고장난 PCB 고장품과 필더 고장품을 비교·검토하였다.

3.2.2 Water drop test

무연솔더용 플럭스의 내 마이그레이션 특성을 관찰하기 위해 본 연구에서 사용한 PCB 기판은 Water drop test용 표준 PCB 가속시험 기판으로서 Fig. 3에 나타내었다. 표준 PCB 가속시험 기판(Fig. 3(a))은 일본 ESPEC사에서 제조한 것으로 동 패턴은 왼쪽으로부터 패턴 A, B, C 3종류로 구성되어 있고, A, B, C 3종류의 패턴과 패턴사이의 거리는 195 μ m(패턴폭:120 μ m), 337 μ m(패턴폭:296 μ m), 656 μ m(패턴폭:603 μ m)이다. 본 연구에 사용한 패턴간의 거리는 C type의 656 μ m를 사용하였고, 실험온도는 상온에서 실시하였다. 무연솔더 PCB 내 마이그레이션 성을 고찰하기 위해서 FR1과 FR4 PCB의 동 패턴 위에 2종류(SV-PBF-302, SV-PBF-LP42)의 플럭스를 사용하여 동의 젖음성을 개선하고 무연솔더로 솔더링 한 후 마이그레이션 test를 하였다. 또한 패턴과 패턴사이의 적하수는 이온수를 사용하였고 적하수량은 마이크로 실린지를 이용하여 1 μ 로 하였다.

Fig. 3(b)은 Water drop 가속시험 장치도를 나타내었다. 실험에 있어서는 무연솔더 표준 PCB test기판의 C type 패턴에 마이크로 실린지를 이용하여 적하수량 1 μ 를 적하하고 DC 전원공급장치로 10V의 전압을 인가하였다. 무연솔더 패턴 간 마이그레이션 발생 과정을 측정하기 위하여 Microscope를 사용하여 동영상 촬영을 하였다. 마이그레이션 발생속도는 동영상을 이용하여 발생시간을 측정하여 산출하였고, 내 마이그레이션용 플럭스 개발에 있어서는 기존의 플럭스 조성비를 변화 시키고, 변화된 플럭스에 대한 마이그레이션 발생속도를 측정함으로써 내 마이그레이션성을 판단하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 김치냉장고 오작동에 대한 고장재현시험

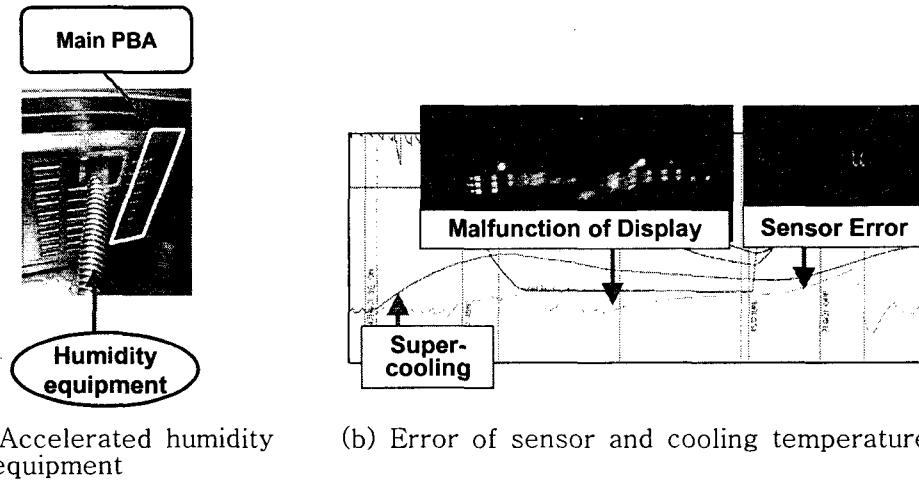


Fig. 4 Accelerated humidity equipment and malfunction of sensor and cooling temperature

무연솔더를 적용한 김치 냉장고의 필터 데이터를 분석한 결과 초기 고장율은 최대 0.9%를 차지하고 우발고장율은 0.4%, 마모고장율은 36개월 후 증가하는 전형적인 육조곡선을 나타내었다. 고장의 유형은 대표적으로 과냉, 약냉, button 오작동, LED 오점등, sensor error를 나타내었다. 이들의 고장은 PCB의 마이컴과 관련이 깊은 고장이라 사료되어 PCB의 결로 시험을 하였다. 결로 시험 결과 PCB 앞/뒷면 모두 결로가 생성되었고 결로 생성에 의한 오작동은 3대중 1대가 오작동을 일으켰다.

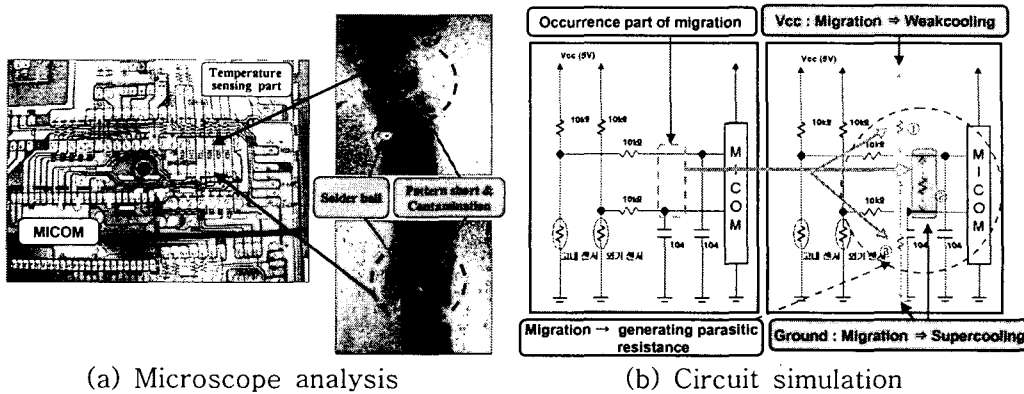
Fig. 4는 가속 습기장치와 습기에 의한 오작동을 나타내었다. 가속습기시험에서의 오작동은 3대중 3대 모두가 오작동을 일으켰다. 3.1절에서 기술한 필터 데이터에서 나타난 고장의 형태와 결로, 가속 습기시험에서 나타난 고장의 형태가 거의 동일하였다.

따라서 본 연구에 있어서 필터 고장에 대한 재현실험으로 결로시험과 가속습기시험이 타당하다는 것을 알았다.

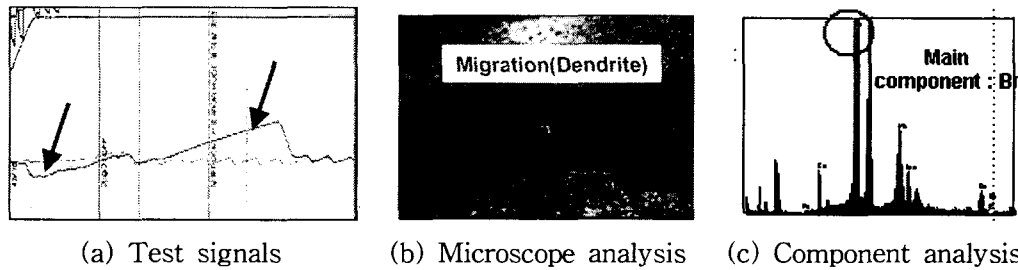
5.2 김치냉장고 오작동에 대한 근본원인분석(고장분석)

Fig. 5은 대표적인 예로 결로 및 가속습기 시험을 한 후, PCB Pattern을 분석한 결과를 나타내었다. 김치냉장고에 사용되는 메인 PCB는 수분에 노출되어 패턴과 패턴 사이에 마이그레이션이 발생(Fig. 7(a))하였다. 마이그레이션은 공기중의 습도가 높은 경우, 고체의 표면에 공기중의 물분자가 PCB에 부착해 PCB 표면에 물의 얇은 막을 형성하기도하고 물의 막이 매우 얇은 경우에는 물의 단분자층으로 된다. PCB 전기회로의 패턴과 패턴사이는 절연체로 되어 있지만, 패턴과 패턴사이에 물의 얇은 막이 형성되고, 직류전원이 인가되면 물의 얇은 막을 통해 전류가 흐르게 된다. 이때 수분이 전기분해하여 양극에서 산화반응이 일어나 구리, 은, Pb-Sn 등의 금속이온이 용출되어 음극을 향해 금속이온의 형태로 이동하게 되고 금속이온이 음극에서 전자를 받아서 다시 금속으로 환원됨으로써 수지상(dendrite)으로 성장한다. 성장한 수지상은

양 전극간에 전기적 단락(short)을 일으킴으로, 기기 또는 마이컴의 오작동 등 전자 제품에



(a) Microscope analysis (b) Circuit simulation
 Fig. 5 Malfunction of cooling temperature caused by migration on main PCB



(a) Test signals (b) Microscope analysis (c) Component analysis
 Fig. 6 PCB pattern analysis of Kimchi refrigerator

치명적인 고장을 유발한다. Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 마이그레이션은 마이컴의 출력부 온도센싱 부분에 마이그레이션이 발생하고 마이그레이션 발생위치에 따라 김치냉장고의 온도가 오작동을 일으키는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 5(b)에 나타난 것과 같이 VCC단에 마이그레이션에 의한 발생하면 약냉 현상이 일어나고, ground단에 마이그레이션에 의한 short가 발생하면 과냉 현상이 발생한다.

김치냉장고의 온도는 냉매의 양에 의해 조절되고 냉매의 양은 냉매조절 밸브의 위치제어에 의해 제어된다. 냉매조절 밸브 위치제어는 마이컴의 입력부에서 받은 On-Off 신호에 의해 밸브작동시간과 위치가 결정되고 결정된 신호는 TR(Transformer)에서 신호가 증폭된다. 이 증폭된 신호에 의해 냉매밸브의 작동시간과 위치가 자동제어 되어 김치냉장고의 온도가 일정시간 일정하게 유지된다. 하지만, 마이컴의 입/출력단자부에 마이그레이션이 발생하여 단자들이 short가 일어나면 순간적인 과전류에 의해 On신호가 Off로 인식(입력단자부의 경우)되어 기기의 작동이 반대로 되는 오작동을 발생한다(Fig. 4(b)참조).

5.3 마이그레이션 성분분석

마이그레이션 발생에 영향을 미치는 인자 중의 하나는 PCB의 오염(지문, 솔더볼, 플럭스 등)이다. 특히 무연솔더의 경우는 무연솔더 단체에는 마이그레이션이 발생하지

않지만 플럭스의 성분에 상당한 영향을 많이 받는다. 따라서 PCB에 발생한 마이그레이션의 성분분석을 하였다.

Flux		Domestic							Foregin(외산)				
		KS-LGM				JS-75			JS-75				
Component		F ⁻	Cl ⁻	NO ²⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
Wash -ing water	Cleaned	0.61	9.23	0.16	0.16	0.16	0.16	0.83 ↓	0.37	0.14	1.17	0.46	0.67
	Deionized	0.92	6.87	0.17	0.33	0.17	0.17	0.83 ↓	0.70	0.15	0.67	0.36	0.33
		0.70	1.28	0.16	0.16	0.16	0.16	0.83 ↓	1.91	0.10	0.04	0.04	0.67

Table 1 Component analysis of flux

Fig. 6은 PCB 마이컴부에 발생한 마이그레이션의 성분분석한 결과를 나타내었다. 김치냉장고 PCB에 발생한 마이그레이션의 성분 중 주요성분은 Br이 상당량 검출되어 있다. 다량의 Br 성분은 솔더링시 젖음성을 개선시키기 위한 플럭스 성분 중의 하나이다.

5.4 무연솔더 내 마이그레이션을 위한 플럭스의 개발

마이그레이션 발생에 영향을 미치는 인자로서는 PCB제도시 세정의 불충분 등에 의해 플럭스에 잔류해 있는 이온류, 사람의 인체로 부터의 오염(땀, 지문 등); 등이 있다. 본 연구에서는 마이그레이션 발생 인자 중 플럭스에 의한 영향을 고찰하기 위해 무연솔더(Sn-0.7Cu-0.01P)에 사용되는 기존의 플럭스(SV-PBF-302)를 이용하여 세척수로 세정한 후, 세척수 종류에 따른 용출 성분을 분석하고 그 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 알 수 있듯이, 세척수의 종류에 따라 마이그레이션 발생에 영향을 주는 Br, Cl⁻, F⁻의 양이 동일한 플럭스에서 세척수의 종류에 따라 상당한 차이를 보였다. 따라서 PCB제조과정에서 세척수의 사용이 마이그레이션 발생에 상당한 영향을 주는 것을 알았다.

Table 2는 Water drop test에 의한 PCB, 솔더, 플럭스종류에 따른 마이그레이션 발생시간을 나타내었다. 마이그레이션 발생시간의 정의는 무연솔더 표준시험편에 이온수를 적하하고 전원을 인가했을 때부터 무연솔더 표면에서 마이그레이션 현상이 발생하는 순간까지의 시간으로 하였다. 평가에 있어서는 기존의 유연솔더 마이그레이션 발생시간을 기준으로 하였다. Table 2에서 알 수 있듯이 PCB와 무연솔더 종류에 따른 마이그레이션 발생시간은 크게 차이가 없지만, 플럭스의 종류에 따라서는 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 기존의 플럭스(SV-PBF-302)의 경우는 PCB종류와는 상관없이 30초대의 마이그레이션 발생시간을 나타내었고, 특히 김치냉장고 메인 PCB 사용되는 FR4에 적용되는 무연솔더(Sn-0.7Cu-0.01P)에서는 26초로 Sn-3Ag-0.5Cu에 비해 상당히 빠르게 마이그레이션이 발생하고 김치 냉장고에 문제가 되었던 패턴의 오염원(Fig. 6 참조)은 플럭스에 의한 것이라는 것을 알았다.

새롭게 개발한 플럭스(SV-PBF-LP42)의 경우는 기판과 무연솔더의 종류와는 상관없이 모두 300초 이상의 마이그레이션 발생시간을 나타내었고, 기존의 플럭스에 비해 마이그레이션 발생시간을 상당히 지연시켰다. 또한 플럭스의 성분(Br, Cl⁻, F⁻:활성물질)

이 마이그레이션 발생에 많은 영향을 주는 것을 알았다.

Table 2 Migration time of developed Flux

	Material			Migration time(sec)
	Flux	Solder	PCB	
Base line (Sn-Pb)	JS-75	Sn-37Pb	FR4	60
PCB	-	-	FR1	45
	-	-	FR4	42
Solder	-	Sn-3Ag-0.5Cu	FR1	85
			FR4	111
	-	Sn-0.7Cu-0.01P	FR1	100
			FR4	112
Flux	SV-PBF-302 (Current)	Sn-3Ag-0.5Cu	FR1	34
			FR4	37
		Sn-0.7Cu-0.01P	FR1	36
			FR4	26
	SV-PBF-LP42 (Development)	Sn-3Ag-0.5Cu	FR1	300↑
			FR4	300↑
		Sn-0.7Cu-0.01P	FR1	300↑
			FR4	300↑

5

결론

김치냉장고 고장에 대한 근본원인 분석과 PCB에 적용되고 있는 무연솔더의 마이그레이션 발생에 영향을 미치는 인자를 분석하고, 플럭스 조성비 변화에 의한 무연솔더 (Sn-0.7Cu-0.01P, Sn-3.0Ag-0.5Cu) 절연특성(내 마이그레이션)을 향상시킬 수 있는 플럭스 개발에 대한 연구 결과, 김치냉장고의 고장은 메인PCB와 디스플레이 PCB의 마이컴 입력부와 출력부에 발생한 마이그레이션에 의한 것이었고, 마이그레이션 발생에 영향을 미치는 인자는 플럭스 성분 중 활성물질성분(Br⁻, Cl⁻, F⁻)이 마이그레이션 발생을 촉진시켰다. 또한 Water drop 가속시험을 이용하여 플럭스의 성분을 변화시킴으로써 무연솔더 절연신뢰성을 향상시킬 수 있는 새로운 플럭스(SV-PBF-LP42)를 개발하였다.

[참고 문헌]

- [1] Casy, P., and Pecht, M.,(2002), The Technical, Social and Legal Outlook for Lead-Free Solders, Proceedings of IEEE International Symposium on Electronic Material and Packaging, 483-492.
- [2] 下平三郎, (1995), 腐食・防食 の材料科學, アグネ技術センター.
- [3] 柳澤 武, (2000) イオンマイグレーションの歴史と發生要因, 表面技術, 479~483.
- [4] 이 덕보, 김 정현, 강 수근, 장 석원, 임 재훈, 유 동수, (2005), PCB 전기적 신뢰성 평가를 위한 이온 마이그레이션 가속시험, 한국동력기계공학회지 Vol. 9, 64-69.