상압 플라즈마 매개변수들이 산업용 전자부품의 세척공정(cleansing)에 미치는 효과

리의재*

(주)동원 이엠 환경기술 연구실

The Effect of Atmospheric Plasma Parameters on Cleansing the Electronic-Industrial Parts

EuiJae RI*

Enviro-Technical Lab, DongWon EM Co., Ltd. SiHeungSi JeongWangDong SiHwa GongDan 2Ra
505, GyeongGiDo 429-450, DaeHan MinGug

(Received February 27, 2009 ; revised October 28, 2009 ; accepted October 30, 2009)

Abstract

We employed atmospheric plasma to reactively remove the lubricant sprayed onto such industrial electronic parts as LCD chassis during sheet-metal forming processes and investigated basically the effect of plasma parameters on cleansing the surfaces of zinc-electroplated steel plates (EGI). Specimen prepared with some controlled amount of lubricant sprayed on their surfaces beforehand were subjected to two different kinds of atmospheric plasma, one being generated by using air and the other generated by using nitrogen (99.9% purity). Locating the plasma beams at the height range between 3.5 and 13.5 mm from the surface of each specimen and radiating for 5 to 30 seconds resulted out that the cases with a position of 3.5 mm and a duration of 5 seconds or longer showed the surfaces completely cleansed without a trace of lubricant. Furthermore we found out that the plasma generated by using simple air depicted higher cleansing ability than the other one generated by using expensive nitrogen, interestingly useful very much for industrial purposes. On another aspect, we confirmed that the drilled or cut surfaces of Zn-plated steel substrate would not be oxidized even under the influence of plasma during its cleansing process. Therefore, we could probably conclude from this fore-survey that a dry process adopting atmospheric plasma for cleansing industrial parts might be determined to become successful in terms of commercialization, cautiously.

Keywords: Plasma, Cleansing, Cleaning, Atmospheric plasma, Atmospheric pressure, Industrial parts

1. 서 론

상대적으로 부가가치가 큰 전자정보 기술(IT) 산업부문의 핵심부품인 반도체 또는 부대 부품들의 실장공정(electronic-packaging procedure)에서 세척(cleansing/cleaning) 기술은 기본사항 중 하나이다. 근래에는 유리를 기판으로 한 각종 평판화면(FPD), 액정화면, 그리고 광전지 산업 등이 한층 활기를 띄고 있어 자동화 공정선 상(in-line) 대면적 세척기법

들이 주목을 받고 있다. 친환경 기술(ET)에 관한 사회적 관심의 고조로 각종 산업부품 제작을 위한 공정의 전처리 혹은 후처리 공정의 일부로서, 청정성을 유지 또는 확보하기 위해 세척기술의 중요도 또한 높아지고 있다.

산업초기에는 영세한 세척업체가 손쉽게 효과를 볼 수 있는 유기용제를 주로 사용하였으나, 갖가지 공해발생의 유해물질로 판명되어 일각에서 청정기술을 도입하면서, 최근에 전 세계적으로 친환경 액체로 탄화수소 계 용액을 사용하거나 수계 세척액을 사용하는 경우가 점차 늘고 있음은 매우 고무적

*Corresponding author. E-mail : profri@hotmail.com

인 현상이다¹⁾. 일례로 액정화면(LCD)용 뒷 판(chassis)을 제작하기 위해 보통 아연 전기도금 강판(EGI, 1 mm 두께)을 판금, 성형, 라사 공정 등을 통하여 완성된 중간부품의 요철 표면은 일반적으로 여러 차례 가공 공정 도중에 분무된 타발유와 가공 부스러기들로 오염되어 있다. 이러한 이물질을 제거하기 위한 세척작업으로서 일부 유기 용제나 탄화수소 계 세척용제를 사용하고 있기도 하나, 현재 첨단방법으로서는 기능수의 일종인 수계 세척제가 선호되고 있다²⁾. 하지만 수계 세척제를 사용하는 경우에도 단점은 있다. 폐수처리 문제가 남아 있고 장치 투자비도 공정단가 면에서 감안해야 한다. 정밀 부품의 정밀한 세척은 아직 완전치 못하며, 또한 세척 후 부식가능성 때문에 완전 건조가 까다로운 문제로 대두되기도 한다.

새 공법으로서 플라즈마(plasma)를 활용한 건식 세척법은 이러한 문제들을 해결할 수 있는 대안이 될 수 있을 것이다³⁾. 진공조 내에서 고전압(직류 및 고주파) 방전에 의해 만들어지는 플라즈마(plasma)는 양성 전하를 띤 전리자(ion), 즉 양전리자(cat-ion)들과 음성 전하를 띤고 있는 전자 및 음전리자(an-ion)들의 혼합체로서 전체적으로는 전기적 중성을 유지하고 있다. 이러한 플라즈마의 전자기적 특성을 적절히 활용하면 원하는 물질의 원자들을 기판 위에 적층(deposition)하여 착막(coating)을 한다거나, 거꾸로 기판 표피층(surface layer)을 플라즈마 식각법(plasma etching)으로 제거할 수도 있다. 이 공법은 각종 공해를 유발하는 화학물질 용액을 사용하는 습식법이나 유해기체를 방출하는 방법들과 달리, 원천적으로 무공해이며 친환경적인 특징점이 있다.

이리하여 전통적으로는 이 식각법이 주 연구 대상이었고 일부 산업체에 적용되기도 하였으나, 진공장비가 비싸고 장비운영에 있어 고급인력을 필요로 하기 때문에 공정단가가 올라가는 단점이 부각되는 형편이었다. 그러나 근래에는 플라즈마가 대기 속에서도 형성될 수 있음에 착안하여 진공장비 없이 고전압 방전에 의해 플라즈마를 얻어내는 방법, 즉 상압 플라즈마(atmospheric plasma, 또는 atmospheric pressure plasma)에 관한 연구에 초점이 맞추어져 왔다⁴⁻⁶⁾. 상압 또는 대기압 플라즈마는 기본 구성요소인 양·음 전리자 외에도 전기적으로 중성인 활성원자를 다량 포함하고 있는 특징점이 있다. 바로 이 추가적인 활성원자들의 물리·화학적 활성성을 세척법에 적극 활용하려는 다양한 시도가 최근 활발하게 일어나고 있으며, 결과적으로 공정단가를 더욱 저렴하게 할 수 있는 방법들을 부지런히 찾아가고 있는 것이 현실이다^{7,8)}.

특히 상압 플라즈마를 활용하는 방법은 공정의 단순성 때문에 장비의 간략화가 가능할 뿐 아니라, 공정구역 공간의 경제성 등을 포함하여 상용화에 성공할 수 있도록 궁극적으로 공정단가를 낮출 수 있게 해줄 것으로 기대된다. 여기서 반드시 짚고 넘어가야 할 점은 적합한 세척효과를 보이는 세척공정의 매개변수들을 확정해야 만 실용화될 수 있다는 것이다.

한편, 액정화면용 뒷 판을 제작하기 위해 사용되는 원 기판은 강판에 아연 전기도금 하여 만들어진 것으로서, 만일 표면에 약간의 흠집이 있다 하여도 아연 층은 낮은 기전력에 의해 먼저 부식되는 관계로 기판재인 철과 접촉하는 일부 공기 중 산소로부터 어느 정도 보호하여 주는 구실을 하게 된다. 그러나 흠집이 크거나 파단면처럼 공기와의 전면 접촉을 피할 수 없을 경우, 철은 당연히 산화되어 붉게 변색되게 마련이다. 표면산화는 민감한 문제일 수도 있는데, 이 상황은 세척공정 중 조사되는 플라즈마 다발(beam)에 의해 시편의 표면이나 절단면의 산화가 급속히 진행될 가능성도 있으므로, 이들 현안 문제를 확인하기 위해 엄격한 실험을 실시해 볼 필요가 있겠다.

2. 실험 방법

아연 전기도금 강판(1 mm 두께)으로부터 액정화면용 뒷 판으로 판금 가공처리 된 원 기판을 본 연구를 위해 적절한 크기(약 30×30 mm²)로 절단하여 시편을 만들어 실험준비를 하였다. 각 시편의 표면에 속건성 소성(타발 용) 가공유(삼화유업 제품, Punch H, Lot #0801290)를 분무기를 활용하여 1~2 회 분무, 표면에 흐르지 않을 정도로 일정량을 시편의 중앙부를 중심으로 고르게 도포하였다.

상압 저온 플라즈마 발생기(유이온(주) 제품; RPS-50 형)를 사용하여 플라즈마(직경 5 mm) 다발(beam)을 시편 표면에 조사하되, 시편마다 시험 조건들을 바꿔가며 세척 실험을 실시하였다. 플라즈마가 표면에 균일하게 쏘일 수 있도록 평균 60 mm/s 속도로 시편을 왕복시켰다. 플라즈마 발생을 위한 작업 기체로는 공기 또는 순도 99.9 푼(%)의 질소를 사용하였다.

플라즈마 다발의 조사 높이는 3.5 또는 13.5 mm로 하며, 조사 시간은 5 또는 10초로 하기로 한다. 세척시험 후 세척효과를 확인하기 위해, 기름성분의 잔류여부를 확인할 수 있는 특수 붓(Hill GmbH 제품; 시험막물: 48 mN/m)을 사용하여 시편 표면에 시험막물을 도포한 후 그 결과[pen-test] 상황을

기록으로 남기기 위하여 사진 촬영을 실시한다. 또한 잔류 기름의 유무 상태를 확인하기 위해 점적시험(droplet test)을 행하기로 한다.

3. 실험 결과 및 토론

3.1 상압 저온 플라즈마 세척시험

세척전 시편의 대표적 초기 표면상태는 아래 첫째 사진철(표 1)과 같다. 기름이 시편 표면에 많이 모여 막을 이루고 있을 때, 기름이 없는 상태와는 육안으로도 확연히 구분이 된다. 그러나 미세한 잔류 기름의 상태는 불분명하여 시험먹물을 도포하지 않으면, 육안으로 식별하기는 거의 불가능하였다. 이 붓 시험(pen-test) 결과도 정성적이기는 하지만, 다행히 연구 대상부품이 전장(電裝) 외부부품이어서 크게 정밀도를 요구하지는 않는 기초실험 단계이므로 결론을 추출하는데 별 문제는 없을 것으로 판단되었다. 각 시편의 플라즈마 세척 실험조건과 건식세척 후 시편번호는 아래 첫째 표(표 1)와 같다.

Table 1. Various conditions for cleansing tests

Surface	Working Gas	Radiation Height, mm	Duration, [s]	Sample #
Lubricant sprayed	Nitrogen (99.9% purity)	3.5	5	13가
			10	14가
		13.5	5	15가
	Air	3.5	10	16가
			5	3가
		13.5	10	4가
Control (without lubricant)	Nitrogen (99.9% purity)	3.5	5	7가
			10	8가
		13.5	5	11가
	Air	3.5	10	12가
			5	9가
		13.5	10	10가

Fig. 1. Typical samples showing their surfaces without lubricant.

Fig. 2. Typical sample surfaces after cleansed by using plasma generated with nitrogen (99.9% purity).

3.2 플라즈마 발생을 위해 사용한 기체가 세척능에 미치는 영향

타발유를 도포한 시편의 경우에 플라즈마에 의한 세척효과를 1차적으로는 육안으로 확인하였다. 작업기체를 순도 99.9 푼(%) 질소로 하였을 때(표 1에서 시편번호 '9가'~'16가') 세척 후 시편 표면은 작업기체를 단순히 공기로 하였을 때(표 1에서 시편번호 '1가'~'8가')와 비교하여 전반적으로 큰 차이를 보이지는 않았다(그림 2와 그림 3 참조.) 그러나 정성적이기는 하지만 비교적 명확한 비교가 가능한 시험먹물 도포시험을 실시한 결과, 약간의 차이를 확인할 수 있었다.

시편 '13가'와 '3가'(높이 3.5 mm, 5초), '16가'와 '8가'(높이 13.5 mm, 10초) 등 서로 짝을 지어 먹물시험 직후 별도로 비교해 보았다. 타발유가 도포된 시편을 질소 플라즈마로 세척한 결과는 아래 사진철(그림 4)에서 볼 수 있으며, 공기 플라즈마로 세척한 결과는 다음 사진철(그림 5)에 보였다. 그림 4과 그림 5에서 먹물시험 결과 사진들을 조사 높이와 시간이 같은 경우들끼리 각각 비교해보면 세척 결과의 차이를 뚜렷이 알 수 있다.

플라즈마의 세척능이 가장 클 것으로 짐작되는 조건(높이 3.5 mm, 10초)에서 세척한 시편 '4가'와 '14가'를 비교할 때, '14가'의 먹띠는 균일하지 않은 모습으로 나타나는 한편, '4가'는 매끈함을 알 수 있다. 또한 플라즈마의 세척능이 가장 작을 것으로 짐작되는 조건(높이 13.5 mm, 5초)에서 세척한 시편 '7가'와 '15가'를 비교할 때도, '7가'의 먹

띠는 균일한 모습으로 나타났고 '15가'는 오히려 매끈하지 못함을 알 수 있다. 이로부터 공기를 사용했을 때가 질소를 사용했을 경우보다 오히려 세척능이 강하다고 판단된다.

이는 기존의 연구결과들과도 일치하는 것이다⁹⁾. 작업기체로 사용한 공기속의 산소가 플라즈마 발생 시 음전리자로 될 뿐만 아니라 활성화된 중성원자 또는 들뜬 상태의 산소분자로 되어 기름분자들과 활발한 연소반응을 일으킨 것으로 판단된다. 따라서 부득이한 경우가 아니면 비싼 질소보다는 공기를 사용하는 것이 유리하다는 결론이 가능하다.

한편, 보충적으로 점적시험을 위해 초기 표면에 물방울을 떨어뜨려 보니 납작한 단추 형태로 되었고, 기름이 도포된 표면의 경우에는 둥근 구슬꼴로 나타났는데, 이는 기름기가 물과는 어울리지 못하는 소수성이므로 그리 되는 것으로 판단되었다. 세척 후의 시편들 표면의 경우에는 물방울이 초기 표면처럼 납작한 형태를 유지하는 경우들(시편 '13가'~'16가')와 떨어지면서 좌악 퍼져 버리는 경우들(시편 '3가', '4가', '7가' 및 '8가')로 대별되며, 이는 일반적으로 붓 시험 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

잔류 기름의 정도를 정량적으로 확인하기 위해서는 점적 시험기를 사용하여 물방울(크기: 3 mm 미만)의 표면 접촉각을 측정해보아야 정량적으로 명확한 결과를 제시할 수 있을 것이나, 이로써 초기 실험으로서는 관찰만으로도 충분한 것으로 판단되었다. 물론 내부부품에 적용하기 위해서는 잔류 기

Fig. 3. Typical sample surfaces cleansed with plasma generated with air.

Fig. 4. Lubricant-sprayed surfaces, after cleansed with nitrogen plasma.

름의 상태를 정량적으로 확인하기 위해 더욱 엄격한 통제시험이 필요할 것이지만 이번 기초연구에서는 생략하고 다음 연구과제로 넘기기로 하였음을 밝혀둔다.

3.3 조사 시간이 세척도에 미치는 영향

조사 시간을 5초로 하였을 때는 10초로 하였을 때와 비교하여 대체로 세척효과가 떨어지는 것으로

나타났다. 그림 4에서 보이듯이 높이 3.5 mm에서 질소 플라즈마를 쏘아준 시편 '14가'의 표면의 먹물무늬는 멋진 띠 모습을 간직하고 있어 시편 '13가' 표면보다 깨끗함을 알 수 있다. 그리고 높이 13.5 mm에서 질소 플라즈마를 쏘아준 시편 '15가'는 시편 '16가'보다 먹물무늬가 균일하지 않고 중간 중간 끊어진 형태를 보임을 알 수 있다.

또한 그림 5에서 보이듯이 높이 3.5 mm에서 공

Fig. 5. Lubricant-sprayed surfaces, after cleansed with air plasma.

기 플라즈마를 쏘아준 시편 '3가'와 시편 '4가', 높이 13.5 mm에서 공기 플라즈마를 쏘아준 시편 '7가'와 시편 '8가'에서도 같은 경향을 볼 수 있었다. 따라서 잔류기름이 많을 경우에는 일반적으로 세척 시간을 충분히 주어야 할 필요가 있다고 판단된다.

3.4 플라즈마 다발의 높이에 따른 세척효과

일반적으로 플라즈마 다발의 조사 높이를 시편에서 13.5 mm로 멀리 하였을 때보다 3.5 mm로 가까

이 하였을 때 세척효과가 두드러졌다. 이는 플라즈마 다발의 길이가 길수록 시편에 도달하는 플라즈마의 세척효과가 떨어진다는 의미로서, 당연한 결과로 판단된다. 플라즈마의 수명은 주변기체와의 접촉시간과 밀접한 관련이 있기 때문이다.

일례로 그림 4에서 볼 수 있듯이, 3.5 mm 높이에서 질소 플라즈마로 10초 동안 세척한 시편 '14가' 표면에 도포된 먹물의 무늬가 같은 시간 먼 거리에서 세척을 시도한 시편 '16가' 표면의 경우보

다 선명하여, 객관적으로 훨씬 깨끗한 표면의 모습을 알 수 있겠다. 질소 플라즈마로 같은 시간 5초 동안 세척한 시편 '13가'와 시편 '15가'를 비교해보아도 같은 경향을 알 수 있다.

이는 그림 5에서 공기 플라즈마로 세척한 시편 '8가'와 시편 '4가'(세척시간 10초)의 경우나 시편 '7가'와 시편 '3가'(세척시간 5초)의 경우에서 또한 다르지 않은 경향을 볼 수 있었다. 따라서 조사 높이가 큰 경우를 위해서는 플라즈마 밀도를 올려주던가, 조사 시간을 늘려주는 등 추가 조치가 필요할 것으로 판단된다.

3.5 산화여부 확인시험

강관에 아연 전기도금을 하여 만들어진 원 기관은 만일 표면에 약간의 흠집이 있다 하여도, 아연층이 낮은 기전력에 의해 먼저 부식되는 관계로 공기의 산소와 접촉하는 철을 어느 정도 보호하여 주는 구실을 하게 된다. 그러나 흠집이 크거나 파단면처럼 공기와의 접촉을 피할 수 없을 경우에 철은 당연히 산화되어 붉게 변색되게 마련인데, 흠집을 과장한 형태로 시편 표면에 착공하였을 때 그 바닥면은 공기와의 접촉에 민감할 수밖에 없을 것이다. 그리고 이 상황은 세척공정 중 조사되는 플라즈마와 잔류 기름에 의해 악화될 수도 있을 것으로 추측되었다.

세척도중 플라즈마에 의한 산화여부를 확인하기 위하여, 시편 표면의 일부를 착공(drilling)하였다. 아래의 조건들로써 각각 산화실험을 한 다음, 산화상태를 확인하기 위해 광학 현미경으로 관찰(10×5배) 후 사진 촬영하여 기록하였다. 작업기체의 종류는 세척 실험 때와 마찬가지로 공기 또는 순도 99.9%의 질소로 하되, 조사 높이는 세척능을 최대로 올릴 수 있는 3.5 mm로 하여 모든 시편에 고정적

Table 2. Various conditions for oxidation tests

Surface	Working Gas	Radiation Height, mm	Duration, [s]	Sample #
Drilled	Nitrogen (99.9% purity)	3.5	5	마1
			10	마2
			30	마3
	Air	3.5	5	마4
			10	마5
			30	마6
Control (without a pore)	Nitrogen (99.9% purity)	3.5	5	마7
			10	마8
			30	마9
	Air	3.5	5	마10
			10	마11
			30	마12

으로 적용하였다. 조사 시간은 5~30초 범위 내에서 변화시키면서 실험을 위한 조건들을 **아래 둘째 표 (표 2)와** 같이 잡았다.

기준 시편들로서 표면을 착공하지 않고 타발유를 도포한 상태(표 2에서 시편 '마7'~'마12')에 플라즈마를 5~30초 조사하여 타발유를 완전 제거한 후 시편 표면을 관찰해 보았을 때 별 이상 징후는 나타나지 않았다. 즉, 그림 6에서 보였듯이 작업 기체를 순도 99.9%의 질소로 하여 30초 동안 조사(시편 '마3')하였어도 뚜렷한 산화 흔적은 볼 수 없었으며, 그림 7처럼 작업기체를 공기로 하였을 때(시편 '마6')도 마찬가지였다. 앞서 플라즈마 세척 시험에서, 5초간 조사한 시편들에서 기름이 완전히 제거됨을 확인할 수 있었는데, 30초는 그보다 6배나 오랜 시간으로서 산화가 전혀 감지되지 않았기 때문에, 더 이상 조사는 별 의미가 없는 것으로 판단되었다. 플라즈마 세척이 확실히 안전한지는 좀

Fig. 6. Results of oxidation tests with nitrogen plasma which was radiated for 30 seconds on the surfaces of specimen, sprayed with lubricant and drilled.

Fig. 7. Results of oxidation tests with air plasma which was radiated for 30 seconds on the surfaces of specimen, sprayed with lubricant and drilled.

더 정교한 검토가 필요하겠지만, 한편 육안검사 결과로 충분히 가늠할 수 있는 본 과제에 초기 결론을 위해서는 일반적으로 별 문제가 없을 것으로 일단락 지었다.

4. 결 론

액정화면용 뒷 판으로 쓰이는 아연 전기도금 강판에 판금 성형·가공 처리되는 도정에 도포되는 타발유를 플라즈마로 세척하는 실험을 수행하여 상압 플라즈마 매개변수들이 세척공정에 미치는 효과를 1차적으로 알아보았다. 플라즈마 발생기는 유이온(주)에서 제작한 장비이며, 상압 플라즈마 발생을 위해 작업기체를 질소 또는 공기를 사용하였고, 이렇게 발생한 플라즈마 타발을 타발유를 분무 도포한 시편들에 높이 3.5~13.5 mm 범위에서 5~30초 동안 조사하였다. 결과적으로 플라즈마 타발이 충분히 가까운 거리에서 최소 5초간 조사되었을 때 기름이 완전히 제거되는 것을 직접 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

공기를 사용하여 발생시킨 플라즈마의 경우에 순도 99.9 퍼센트의 질소를 사용한 경우보다 오히려 세척능이 월등한 것으로 판정되었다. 결과적으로 재료비가 들지 않는 공기를 사용해도 좋다는 결론을 확보한 것이다.

한편 세척공정 중 조사되는 플라즈마와 잔류 기름에 의해 기관의 파단면이 산화되는지 알아보기 위해 시편 표면을 천착한 상태로 플라즈마를 조사하는 실험을 통하여 작업기체를 질소나 공기로 하여 최대 30 초간 조사후 산화되지 않았음도 확인하였다. 이로써 플라즈마 세척은 산업부품에 1차적으로는 별 해를 끼치지 않는 것으로 결론지어졌다.

후 기

본 연구는 (주)동원의 지원으로 수행한 기초 연구과제의 결과를 일부 포함하고 있음을 밝혀둔다. 한편 실험을 위해 장비를 제공해준 (주)유이온과 실험과정에서 자기 일처럼 도와준 임·직원 여러분에게 감사의 말씀을 드린다. 특히 잔일을 도맡은 (주)동원의 안 동식 연구원에게 고맙다는 말도 함께 이 자리를 빌어 전한다.

참고문헌

1. 이호열, 한국 청정기술 학회, 추계 학술대회 발표물 요약집, 공주대 천안교정 (2008) 278.
2. 홍연희, 한국 청정기술 학회, 추계 학술대회 발표물 요약집, 공주대 천안교정 (2008) 262.
3. 리의재, 환경박막 기술, (주)도서출판 북스힐 (2004) 117.
4. U. Kogelschatz, Plasma sources Sci. Technol. 11 (2002) A1.
5. F. Massines, A. Rabehi, P. Decomps, R. B. Gadri, P. Segur, C. mayoux, JAP, American Inst. of Physics, 83(6) (1988) 2950.
6. A. Schutze, J. Y. Jeong, S. E. Babayan, J. Park, G. S. Selwyn, R. F. Hicks, IEEE Trans. on Plasma Sci., 26(6) (1998) 1685.
7. U. Kogelschatz, Plasma Phys. Control. Fusion, 46 (2004) B63.
8. 표재환, 한국 청정기술 학회, 추계 학술대회 발표물 요약집, 공주대 천안교정 (2008) 213.
9. 엄환섭, “전자파에 의한 고온 열 플라즈마”, 물리학과 첨단기술 9월호 (2008) 37.