

반도체/디스플레이 소자용 초음파 건식세정 시뮬레이션 연구

Simulation of Ultrasonic Dry Cleaning for Semiconductor/display Device Application

윤의중¹, 이강원², 김철호², 이석태^{1,a}
(Eui-Jung Yun¹, Gang-won Lee², Chol-Ho Kim², and Seok-Tae Lee^{1,a})

Abstract

In this paper, the optimum design of ultrasonic dry cleaning head was investigated. The transducer instead of mechanical dynamic structure was used to generate ultrasonic wave and the horn-shape amplifier was utilized to solve the energy decaying problem of ultrasonic wave with propagating it through the media. The analyses of ultrasonic wave and a fluid for the selected structure of a cleaning head were carried out using SYSNOISE and ANSYS simulators, respectively. Based on simulator results, the distance between a horn and the substrate of 4 mm and the horn diameter of 10 mm were determined to maximize the energy of ultrasonic waves. The cooling structure was also considered to reduce the heat from the transducer and the horn.

The equivalent circuit for the fabricated horn was deduced from HP4194A impedance/gain/phase analyzer and the frequency of an ultrasonic wave of 20.25 kHz was confirmed using the parameters of the equivalent circuit.

Key Words : Ultrasonic dry cleaning, Transducer, LCD, Semiconductor, Horn, Clean air

1. 서 론

멀티미디어 응용을 포함한 LCD 산업은 소재, 부품 및 주변 기술의 일체형 복합기술 산업 및 차세대 평판 디스플레이 산업으로 한국, 일본, 대만 등이 시장을 주도하는 추세이다. 또한 고화질, 고품질, 화면의 대형화 등의 요구로 인한 PDP, 유기 EL, 저온 Poly 등 차세대 디스플레이 시장의 확대로 현재 국내외 우수 업체들의 제품 개발 및 양산 공장 설립이 가속화 될 것으로 예상되는 등, 평판 디스플레이 기술 발전과 더불어 시장의 성장도 지

속될 전망이다.

반도체 소자 제조공정의 약 20 %를 차지하는 Si 표면의 세정기술[1]은 환경, 장비, 사람 때문에 기판 위에 오염되는 이물을 제거하는 기술이다. LCD 세정장비는 높은 수율을 달성하는데 있어서 중요한 장비 중의 하나이며 LCD 공정에서 핵심 세정공정은 Alignment Film Coating, Rubbing 공정 전후에 시행되는 세정공정이다. 습식 세정으로는 브러시와 초음파의 미세한 떨림을 이용한 물리적인 방법과, 전기분해 이온수, 유기용매, 중성세제, 화학 세정액을 이용하는 화학적인 방법이 있으며, 건식 세정으로는 UV/O₃, Plasma, 극저온 CO₂ 등을 이용하고 있다[2,3]. 또한 레이저 세정법도 발표되고 있다[4]. 최근의 건식 세정기술은 친환경 장비 개발을 목표로 기술개발이 진행되고 있다. 반도체와 디스플레이 소자기판 등의 일반적인 초음파 습식 세정방법으로는 파동이 전파해 가면서 세정액

1. 호서대학교 정보제어공학과
(충남 아산시 배방면 세출리 산29-1)
2. 한국생산기술연구원
a. Corresponding Author : mems@kitech.re.kr
접수일자 : 2004. 7. 12
1차 심사 : 2004. 10. 28
심사완료 : 2004. 11. 3

이 고주파 진동을 하여 발생하는 캐비테이션(cavitation) 현상과 진동가속도 등을 활용한다[5-7]. 초음파 습식세정 기술은 그 기반기술이 안정화되어 최근의 MEMS 미세 공정 등의 멤브레인 제작에도 연구되고 있다[8].

습식 초음파 세정기술 중 메가소닉 노즐에 의한 세정법은 진동가속도를 매질인 순수(DI Water)의 빠른 유속에 실어 기판 위에 분사하는 방법이다.

현재 건식 초음파 기술을 응용하는 장비가 국내 디스플레이 기판 제조 라인에 제한적으로 수입·적용되고 있다. 이것은 노즐을 통하여 기판 위에 강하게 분사되는 기체의 압력과, 노즐의 기구적인 구조로부터 발생하는 초음파 효과를 이용하는 것이다. 좁은 노즐 출구를 통하여 기체의 강한 압력을 분사시키는 것은 기존의 에어나이프(air knife) 구조와 비슷하다. 그러나 노즐의 기구적인 구조에 의하여 건식 세정을 위한 20 kHz 이상의 단일 초음파 주파수를 얻는 것은 쉬운 일이 아니다. 또한 디스플레이나 반도체 분야에서 건식 초음파 세정기술을 이용한 학술자료는 국내외에서 찾아보기 어려운 실정이다.

초음파는 일반적으로 PZT 등으로 만든 발진자에 의하여 발생한 것을 사용하고 있다. 초음파 현상은 발진자 없이 기구 역학구조에 유체 압력을 가하는 방법으로도 발생할 수 있다. 그러나 이 기구 역학구조에 의한 방법은 원하는 주파수를 얻기가 쉽지 않다. 한편, 발진자에서 발생한 초음파는 매질인 공기를 통하여 디스플레이 기판에 전달되는 과정에 상당히 많은 에너지가 감쇄되어 세정력을 향상시키는데 도움을 주지 못할 뿐만 아니라, 동작 중 발생하는 고열에 의하여 진동자의 특성을 잃어버리기가 쉬우므로 개발에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 초음파 발진자로부터 발생하는 진동가속도를 매질(기체)을 통하여 기판 위로 분사하는 친환경성 건식 초음파 세정기술을 검토한다. 향후의 디스플레이 소자 등의 양산 라인에서 요구되는 장비의 친환경성에 대응할 수 있는 초음파 건식 세정기술을 구현하기 위하여, 설계 전 단계에서 검토되어야 할 초음파 발생과, 발생한 초음파가 기판 위의 미세한 파티클을 물리적으로 세정하는 과정에서 대두될 수 있는 중요 요소를 검토하였다. 이들 요소로는 사용 주파수, 초음파 감쇄에 대한 보상방법, 초음파와 함께 부가되는 친환경적 기체(Clean air 또는 N₂ gas 등)의 물리적, 그리고 부품의 냉각방법 등을 들 수 있다. 이러한 요소들에 대한 3차원 수치해석을 통하여 세정을 위한 최적 구조를 도출하였다.

2. 초음파 건식세정 헤드설계

2.1 초음파 발생방법 선택

먼저 노즐 형태의 기구적 구조에 의하여 초음파를 발생할 수 있는 매커니즘을 검토하였다. 내부에 공동(cave)이 형성되어 있는 노즐을 제작하여, Laser vibro-meter 측정 장치에서 초음파 분포를 측정하였다. 이는 발진자 없이 청정기체(Clean air 또는 N₂ gas)가 기구 내부의 공동과 노즐을 통하여 분사되는 구조이다. 기류가 기구부의 좁은 통로(노즐)을 통하여 기판에 토출되면서 초음파가 발생된다. 이 초음파는 세정 대상물에 따라 특정 주파수를 발생하여야 할 필요가 있다.

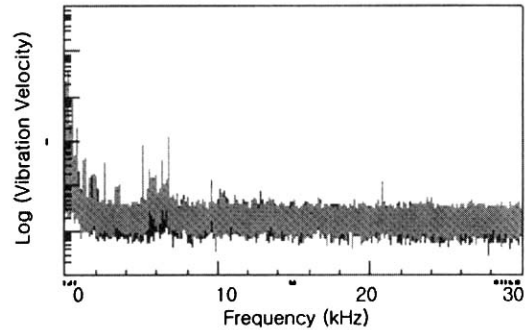


그림 1. 제작된 기구구조의 진동주파수 분포.

Fig. 1. Frequency distribution of the mechanical nozzle fabricated in this study.

그림 1은 제작된 기구구조의 노즐을 통하여 기체가 분사되었을 때의 세정 대상물에 발생하는 진동주파수 데이터를 주파수별로 분석한 그림이며, 여기서 보는 바와 같이 초음파 대역의 주요 주파수가 10 kHz 보다 작은 영역인 6~8 kHz 대에 집중하여 분포하는 형태이다. 일반적으로 미세한 입자를 세정하기 위하여 세정에 적용하는 주파수는 20 kHz 대 이상이며 이를 초음파 변환자가 없는 구조로 구현하기는 쉽지 않을 뿐만 아니라 이때 발생하는 주파수가 공급 압력에 크게 좌우되므로 정밀 세정법으로 범용화하기에는 한계가 있다. 따라서 정밀 세정에 범용적으로 적용하기 위하여 초음파 변환자를 적용하여야 한다. 이 초음파 변환자를 노즐 형태의 초음파 기구부 내부에 설치하여 친환경성 건식 세정기술을 구현 하였다.

변환자에서 초음파가 발생하여 매질의 진폭이 전파될 때 변위 y 는 아래의 1 식과 같이 진폭 A 와 정현 함수의 곱으로 나타낼 수 있다[9].

$$y = A \sin \omega T \quad (1)$$

또, 입자의 속도는 매질입자 변위의 시간에 대한 미분 값이며, 입자 가속도 a 는 다음과 같이 주파수 제곱과 비례한다[6].

$$a = \frac{d^2y}{dt^2} = -A\omega^2 \sin \omega T \quad (2)$$

$$a_{\max} = A\omega^2 = A(2\pi f)^2 \quad (3)$$

가속도를 계산하기 위하여 음파의 강도와 음향 임피던스, 진동속도의 관계수식은

$$I = \rho c v^2 \quad (4)$$

이다. 이때 I 는 음파의 강도이며, ρc 는 음향임피던스[pa.s/m], v 는 진동 속도를 각각 나타내고 있으며 음향파위는 I 에 비례한다. 또한 진동속도와 가속도의 표현은 수식 5와 6으로 나타낸다[6].

$$v = \left(\frac{I}{\rho c}\right)^{1/2} \quad (5)$$

$$a = \omega v = 2\pi f v \quad (6)$$

초음파 건식 세정기술은 위의 수식에서 도출된 초음파 파워를 이용한다. 그림 2에서는 이를 구현하기 위한 간단한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2에서는 변환자(a)에서 발생한 초음파가 기구부 내부의 매질을 통하여 기관이 있는 위치(b)에까지 전파되는 초음파의 모습을 보여준다. 그러나 건식 초음파 세정의 경우, 매질을 전파하여 디스플레이 기관 상에서 세정에 유효한 초음파 파워를 얻기가 쉽지 않고 세정 작업 시에 부품(트랜스듀서 등)에서 발생하는 고열도 문제가 될 수 있다.

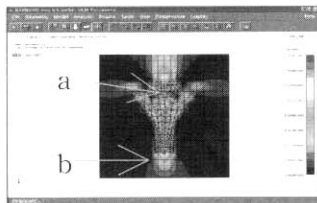


그림 2. Exponential 감쇄관을 이용한 초음파의 집중.

Fig. 2. The focused ultrasonic wave using an exponential attenuation pipe. (a) PZT and (b) substrate.

일반적으로 일정면적의 진동에 의하여 초음파를 방사하게 되면 음압은 넓은 영역으로 확산되어 분포된다. 이러한 확산을 줄이기 위하여 exponential 형태로 줄어드는 관을 놓고 음압을 한 곳으로 모은 것이다. 그러나 이렇게 음압을 한 곳으로 집중하더라도 공기 중 감쇠가 심하여 원하는 결과를 얻을 수 없었다.

2.2 초음파 증폭 혼의 설계

한편, 발진자에서 방사되어 매질(공기)을 통과하는 초음파 파워는 급격히 감쇠하여 이를 보완하기 위하여 진동 진폭을 크게 하는 구조를 필요로 한다. 이를 위하여 그림 2의 발진자의 끝 부분에 증폭기 혼 구조를 그림 3과 같은 구조로 설계하였다. 그림 3에서의 (a), (c)는 각각 발진자와 증폭기 혼의 구조를 나타내며 (b)는 세정용 공기(clean air)의 통로(노즐)가 된다.

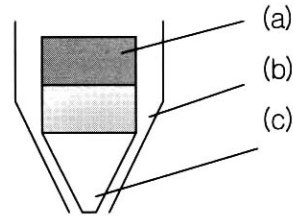


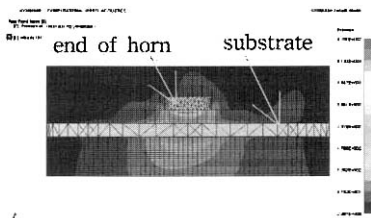
그림 3. 설계된 혼 구조.

Fig. 3. The horn-shape structure.

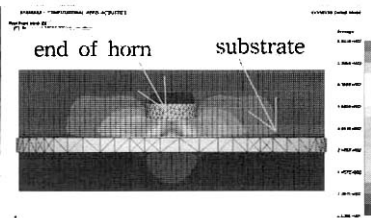
(a) PZT, (b) air flow path, and (c) horn designed in this paper.

3. 결과 및 고찰

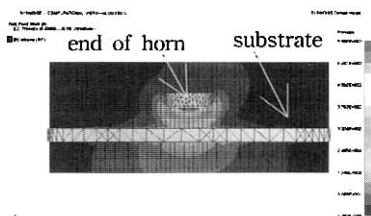
매질을 통하여 기관 위에 전파되는 초음파 파워에 빠른 속도의 공기를 인가하여 건식 세정 기술을 구현하기 위한 방법과 조건을 검토하여 알맞은 구조를 도출하였다. 앞의 그림 3에서처럼 발진자에서 방사되어 매질에서 감쇄되는 초음파 파워를 보완하기 위한 증폭기 혼의 구조를 설계하였다. 증폭기 혼을 사용하면 세정목표물(기관)과의 거리에 따라 세정력이 달라지며 이는 혼의 끝단에서 발진하는 진동에 의하여 형성되는 음장이 그 거리에 따라 달라지기 때문이다. 수치 해석을 통하여 증폭기 혼의 끝단과 세정목표물과의 거리에 따른 음장 형성 변화를 계산하였다.



(a) distance = 3 mm



(b) distance = 4 mm



(c) distance = 5 mm

그림 4. 혼과 기관사이의 거리에 따른 초음파 파워 변화에 대한 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. Simulation results for the change of ultrasonic power as a function of the distance between the horn and the substrate.

그림 4는 그림 3과 같은 개념으로 고안한 증폭기 혼을 통하여 매질에 분사되는 초음파 파워(음압)가 혼의 끝단과 기관 상부 사이의 거리에 따라 그 크기가 변하는 모습을 나타낸다. 그림 4 (b)에서처럼 혼의 끝부분과 기관간의 거리가 4 mm 거리에 있을 때, 기관 위에 발생하는 음압이 가장 크며, 그 보다 가까워지거나(a), 멀어지면(c) 혼의 끝단에서만 음압이 형성되고 기관 상의 오염물 세정에 영향을 주는 파워가 감소하는 것을 볼 수 있다.

위와 같은 조건을 고려하여 제작된 초음파에 빠른 유속의 공기(clean air)를 흐르게 하기 위하여 높은 압력을 걸어주면 더 큰 세정 효과를 거둘 수

있다. 이를 위하여 3차원 수치해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 유체유동해석을 실시하였다. 그림 5에서 증폭기 혼과 기관 간의 거리는 4 mm로 하였다. 유체 출구의 양 옆에는 높은 압력이 걸린 공기가 흐르고 있다(5 kgf/cm^2). 초음파 혼의 가장자리 부분과 유체 출구의 간격에 따라 세정 효과도 다르게 나타나는데 이때 서브 마이크론 단위의 초정밀 세정에 적합한 간격은 $0.15 \sim 0.25 \text{ mm}$ 이다.

한편 초음파가 방사되는 동안 변환자와 증폭기 혼에는 고열이 발생할 수 있는데 이때 발생하는 고열에 의하여 발전자의 특성이 변하며 문제를 야기할 수 있다. 그림 5의 구조에서는 변환자와 증폭기 혼 주위를 감싸면서 흐르는 기류(air)가 유체분사 출구(outlet)를 통과하면서 빠르게 토출된다. 이때 발생하는 빠른 속도의 기류가 변환자와 증폭기 혼에서 발생하는 열에 대한 냉각 효과를 갖는다.

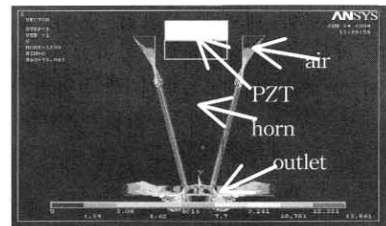


그림 5. 초음파 혼의 냉각구조.
Fig. 5. Cooling mechanism for ultrasonic horn.

그림 3에서 설계한 초음파 증폭기 혼을 제작하여 Impedance Gain Phase Analyzer(HP4194A)를 이용하여 특성을 측정 한 결과 $f = 20.25 \text{ kHz}$ 였으며 그림 6은 그에 대한 임피던스의 등가회로를 나타낸다.

이 구조에서 초음파 매질을 통과하여 피세정물에 영향을 줄 수 있는 파워의 범위(거리)를 시뮬레이션 한 결과, 증폭기 혼과 기관과의 거리가 4 mm가 되는 지점이 세정하기에 최적 조건이라는 것을

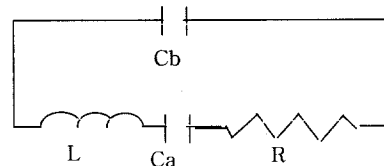


그림 6. 그림 3의 설계로 제작된 혼으로부터 얻은 등가회로.

Fig. 6. Equivalent circuit of the horn fabricated as shown in Fig. 3.

알 수 있었다.

변환자와 증폭기 혼 주위에 형성되는 공기(세정용)의 빠른 흐름을 이용하여 부품(변환자 및 증폭기 혼의 구조)에서 발생하는 고열에 대응하는 냉각장치 역할을 수행할 수 있게 하였으며, 이때의 유체(공기) 속도는 입력부의 공기 압력과 출력부의 직경에 따라 정해진다. 디스플레이 기관의 경우, 공기의 속도와 출력부의 직경은 적용하는 공정에 따라 변수가 있으므로 이를 고려하여야 할 것이다. 일반적으로 적용하는 공기 압력은 5 kgf/cm^2 이상, 출력부 직경은 0.15~1 mm 까지 다양하게 적용될 수 있다.

그림 7에서는 본 연구에서 도출된 결과에 따라 디스플레이 기관용 건식 초음파 세정 장비용 초음파 헤드(head)를 제작하기 위한 외형도를 나타내었다. 대면적 기관에 대응하기 위하여 변환자와 증폭기 혼을 어레이 형으로 길게 배치하였다.

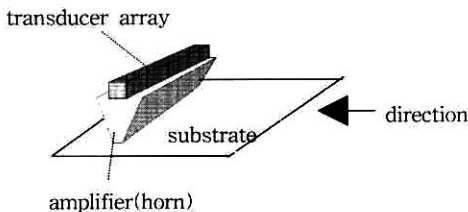


그림 7. 디스플레이 소자 세정을 위한 초음파 세정헤드(개념도).

Fig. 7. Cleaning head for cleaning the display device.

4. 결론

국내외적으로 학술자료가 부족한 친환경적 건식 초음파 세정기술을 구현하기 위한 구조를 검토하고 기구적 구조에 의한 초음파 분포실험 및 경계요소법에 의한 시뮬레이션을 실시하였다. 공기를 매질로 하는 건식 세정에 있어서, 공기 중 감쇄되는 초음파 파워를 보완하기 위하여 증폭기 혼을 도입하였고, 이를 사용하기 위한 최적의 조건을 해석하여 증폭기 혼과 세정 대상이 되는 디스플레이 기관과의 거리는 4 mm로 하는 것이 가장 효과적인 것을 확인하였다.

또한 초음파 변환자와 증폭기 혼 주위에 빠른 속도의 기류를 형성하는 구조를 설계하였다. 이는 이동하는 빠른 기류가 초음파 변환자와 증폭기 혼 표면에 인가되어 냉각작용을 하게 되므로, 초음파 변환자가 계속 구동함에 따라 발생하는 열에 의한 변화를 억제하는 효과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구의 수행은 생산기술연구사업, RRC 연구비 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참고 문헌

- [1] Yang-Hee Jung and Myoung-Kyu Kim, "A study on microroughness of silicon surface induced by APM cleaning and electrical properties of Si/SiO₂ system", J. of KIEEME (in Korean), Vol. 12, No. 7, p. 571, 1999.
- [2] M. G. Byun, H. W. Back, B. H. Cho, and Y. H. Kim, "Development of New Cleaning Technology using Ionized Water by Electrolysis", Proc. 1999 Autumn Conf. KIEEME, p. 617, 1999.
- [3] Jin-Sik Choi, Yong-Deuk Ko, Kyung-Wan Koo, Sung-Il Kim, and Hui-Gon Chun, "Dry cleaning of si contact holes using UV/O₃ method", J. of KIEEME (in Korean), Vol. 10, No. 1, p. 8, 1997.
- [4] V. B. Bregar and J. Mozina., "Optoacoustic Analysis of the Laser-cleaning Process", Applied Surface Science 185, p. 277, 2002.
- [5] Hall, R. M., Jarvis, T. D., Parry, T., Li, L., and Hawthorne, R. C., "Investigating Particle, Metallic Deposition in Megasonic Wafer Cleaning", Micro July/ August, p. 80, 1996.
- [6] Qi, Q. and Brereton, G. J., "Mechanisms of removal of micron-sized particles by high-frequency ultrasonic waves", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 42, p. 619, 1995.
- [7] Mayer, A. and Schwartzman, S., "Megasonic cleaning: A new cleaning and drying system for use in semiconductor processing", Journal of Electric Materials, Vol. 8, No. 6, p. 855, 1979.
- [8] Mikko O. Laminen, Harold W. Walker, and Linda K. Weavers, "Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes", Journal of Membrane Science 237, p. 213, 2004.
- [9] A. P. Cracknell., "Ultrasonics", Wykeham Publications(London) LTD, The Wykeham Science Series, p. 4, 1980.