

◆특집◆ 전자부품 패키징 기술

펄스식 극저온 CO₂ 세정공정의 공정변수에 따른 인자 최적화

이성훈*, 이주홍*, 김필기*, 석중혁**, 오병준***, 석종원*

Optimization of Factors according to Process-variables
in Pulse-type Cryogenic CO₂ Cleaning Process

Seonghoon Lee*, Juhong Lee*, Pilkee Kim*, Jonghyuk Seok**, Byungjoon Oh*** and Jongwon Seok

Key Words : Pulse-type cryogenic CO₂ cleaning (펄스식 극저온 CO₂ 세정), Minute particle (미세입자), Cleaning efficiency (세정효율), Optimal CO₂ injection condition (최적 CO₂ 분사조건)

1. 서론

현대 반도체 공정에서는 초집적된 칩레벨(Chip level)의 소자를 만들기 위하여 증착(Deposition), 레이저 역류(Laser reflow), 열류(Thermal flow), 희생저항 에치백(Sacrificial resist etchback) 및 스피ن-온 코팅(Spin-on coating) 등의 연속적인 장치 공정들을 이용한다. 그러나 이러한 각 공정에서는 미세입자를 발생시키는 환경요인이 항상 존재한다. 반도체 공정 중 발생하는 미세입자는 전기 이중층(Electronic double layer)이나 쿨롬 이미지(Coulombic image) 등의 정전기력(Electrostatic force), 분자간 힘인 반데르발스력(Van der Waals force), 모세관 현상에 의한 힘(Capillary force) 또는 수력학적 힘(Hydrodynamic force) 등 기계-전기적인 힘이나 다른 종류의 '화학적' 힘^{1,2}에 의해 웨이퍼 표면에 부착된다.

한편, 현대 반도체 공정에서는 다층 상호연결(Multilevel interconnect; MIC) 구조와 웨이퍼 내에서 요구되는 피쳐(Feature)의 크기가 줄어드는 등 반도체의 고집적, 고밀도, 고성능화에 대한 요구가 증

가됨에 따라서 미세입자의 웨이퍼 표면 부착에 따른 오염이 중요한 문제로 부각되었다. 미세입자의 부착으로 인한 오염은 형상결함 및 입자의 분산에 의한 미세 홀(Hall)의 형성과 같은 결함을 유발시킨다. 또한 마스크(Masking)에 의한 결함을 일으키며, 소자의 특성불량의 원인이 되기도 한다. 뿐만 아니라 입자 수의 증가에 따른 게이트 산화막(Gate oxide layer)의 절연막 파괴전압(Breakdown voltage) 감소 등의 치명적인 결함을 발생시킨다. 이러한 미세입자의 웨이퍼 부착에 따른 오염은 제품의 수율 저하와 신뢰성의 실추 등 반도체 제품 품질에 결정적인 악영향을 미친다.^{3,4} 따라서 미세입자를 제거하기 위한 세정은 제품의 수율 향상과 품질 신뢰성을 확보하는데 필수적인 공정으로 대두되고 있다.

그러나 이러한 미세입자의 크기가 서브미크론(Sub-micron) 이하로 작아지는 경우 세정에 사용되는 작동유체의 유동경계층(Boundary layer) 내에 입자가 위치하기 때문에 현재 반도체 산업의 주된 세정방법인 초순수(Ultrapur water; UPW)나 화학제 등을 사용하는 습식세정법으로는 이들의 제거가 매우 어렵다.⁵ 또한 이러한 세정방법은 초순수를 사용하는 경우 과량의 초순수 사용에 따른 에너지 다소비 공정이고, 화학제 사용의 경우 황산, 불산 등 유해 화학물질 사용 등의 치명적인 기술적 문제들을 안고 있다.

* 중앙대학교 기계공학부

** 인하공업전문대학 화공환경과

*** (주)에이앤아이

Tel. 02-820-5729, Fax. 02-820-5729

Email : seokj@cau.ac.kr

반면, 고순도의 헬륨, 질소, 아르곤 등 비활성 또는 저활성 기체를 고속으로 분사시켜 이때 발생하는 유체 모멘텀을 이용하여 오염물을 제거하는 건식세정법은 이러한 환경오염 문제들을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 구성이 간단하고 세정소자의 물리적 또는 화학적 제약이 거의 없어 최근에 그 사용이 크게 증가하고 있다. 특히, Edwin Rice에 의해 고안된 극저온 CO₂ 세정법(Cryogenic CO₂ cleaning method)⁶은 고압 상태의 액상 또는 기상 CO₂의 단열팽창 과정에 따른 CO₂의 상변화를 이용함으로써 미세입자의 효율적인 제거가 가능하고, 환경친화적이며, 열충격·열영동 효과에 의한 오염물 제거효율을 향상시킴에 따라서 반도체 공정상 제품의 수율 향상, 신뢰성 확보 및 환경안전 보장 등을 통한 생산성 제고 및 원가 절감에 크게 기여할 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서는 펄스식 극저온 CO₂ 세정공정에서 세정효율에 지배적인 영향을 미친다고 알려진 주요 공정변수들을 선정하고 이러한 인자들의 변화에 따른 미세 오염물의 세정 효율의 변화를 측정하여 평가함으로써 최적화된 세정인자들을 도출하고자 하였다. 각 인자에 따른 세정 효율의 평가를 위하여 세정 중심점에 대하여 최초 오염물 면적에 대한 세정실험 후 제거된 오염물의 면적의 비가 50%가 되는 반경으로 정의되는 r₅₀ 개념을 도입하였다. 또한 펄스식 극저온 CO₂ 세정공정의 적용성에 대한 선행연구를 위하여 미세입자의 표면 부착에 의한 수율저하의 문제가 부각되고 있는 CCM (Compact camera module) 조립 공정의 IR 필터 (Infrared filter)의 반경에 대한 펄스식 극저온 CO₂ 세정법의 공정변수에 따른 세정효율의 평가를 수행하였다.

2. 펄스식 극저온 CO₂ 세정 원리

펄스식 극저온 CO₂ 세정법의 원리는 열적 평형 상태에 따른 액상 또는 기상의 CO₂로부터 고상(Dry-ice)으로의 상변화에 기초한다. 상온 고압 상태(약 25°C, 60 bar)의 액상 또는 기상의 CO₂가 노즐을 통과하여 대기압 환경으로 분출되면 교축밸브에 의한 단열팽창 과정으로 극저온의 기체와 고체 상태로 상변화 된다. Fig. 1의 CO₂ 상태도로부터 상기 한 CO₂의 상변화 과정을 알 수 있다.

액상 또는 기상 CO₂의 상변화에 의해 생성되는

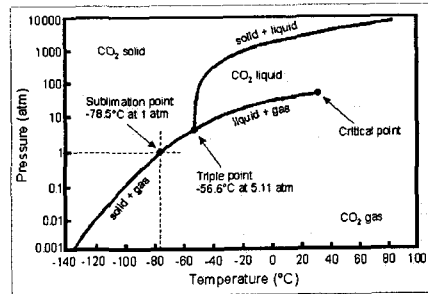


Fig. 1 State diagram of CO₂

고상의 CO₂는 기상의 CO₂로부터 추력을 얻어 유동 경계층 내의 미세입자와 충돌함으로써 미세입자에 힘 또는 모멘트(Moment)를 전달한다. 이 때 이러한 힘 또는 모멘트가 미세입자와 기저부 표면 사이의 점착력(Adhesion force) 등에 의한 구속력이나 구속 모멘트보다 큰 경우 미세입자는 기저부 표면으로부터 제거될 수 있다. 이러한 고상 CO₂의 운동량 전달(Momentum transfer)은 극저온 CO₂ 세정에서 가장 중요한 세정 메커니즘이다. 따라서 기저부 표면에 부착된 미세입자를 성공적으로 제거하기 위해서는 고상의 CO₂와 미세입자 사이에 충분한 모멘텀을 전달할 수 있도록 상변화에 의한 고상의 CO₂ 생성 수율이 기상의 CO₂ 보다 높은 액상의 CO₂(액상: 약 45%, 기상: 약 8%)를 사용하여 세정효율에 지배적인 영향을 미친다고 알려진 공정변수를 최적의 상태로 제어하여야 한다.

3. 실험

3.1 펄스식 극저온 CO₂ 세정장치 Set-up

본 연구에서는 극저온 CO₂ 세정법의 공정변수에 따른 최적화된 세정인자를 도출하기 위하여 펄스식 극저온 CO₂ 세정장치를 구성하였다. Figure 2는 본 실험연구를 위하여 구성한 펄스식 극저온 CO₂ 세정장치의 개념도이다.

압력용기의 내부에 상온 고압상태로 주입된 액상의 CO₂는 압력용기의 하단까지 설치된 파이프를 통하여 압력용기로부터 분출되는 CO₂의 유량을 제어할 수 있는 메터링 밸브(Metering valve; SS-4MG-MH, SWAGELOK)와 CO₂의 상(액체 또는 기체)을 시각적으로 확인할 수 있는 사이트글라스(Sight glass)를 통과한다. 사이트글라스를 통과한 액상의 CO₂는 CO₂의 압력을 측정하는 압력계

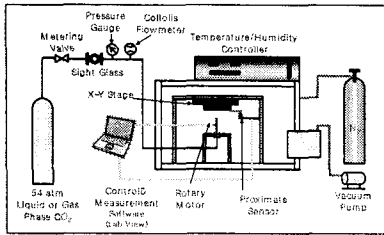


Fig. 2 Schematic diagram of the pulse-type cryogenic CO₂ cleaning equipment

(Pressure gauge)를 지나 CO₂의 질량 유량을 정량적으로 측정할 수 있는 코리올리식 질량 유량계(Coriolis mass flowmeter; RHM08-230VAC, RHEONIK)를 통과한다. 아래 Fig. 3은 Fig. 2의 개념도를 바탕으로 구성된 사이트글라스, 메터링 밸브, 코리올리식 질량 유량계 및 압력게이지의 사진이다.

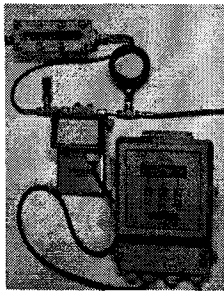


Fig. 3 Picture for the sight glass, metering valve, Coriolis mass flow meter and pressure gauge

압력계를 통과한 액상의 CO₂는 플렉서블 호스(Flexible hose)를 통하여 CO₂ 분사장치에 도달한다. CO₂ 분사장치는 교축밸브에 의한 단열팽창과정으로 액상의 CO₂를 2상(기상과 고상)의 CO₂로 상변화시키는 노즐(K6-10DG, Applied Surface Technology)과 CO₂의 분사를 펄스식으로 제어하는 공압식 로타리 모터(Rotary motor) 및 세정 대상물을 검출하는 근접센서(Proximate sensor)로 구성되어 있다. 아래 Fig. 4는 Fig. 2의 개념도를 바탕으로 구성된 노즐, 로타리 모터 및 근접센서의 사진이다.

세정 대상물은 근접센서에 의해 검출되고, 근접센서로부터의 신호는 제어계측 소프트웨어(Control and measurement software; Lab View)를 통하여 처리가 된다. 제어계측 소프트웨어는 근접센서로부터의 입력신호에 대하여 분사시간 및 Time delay를

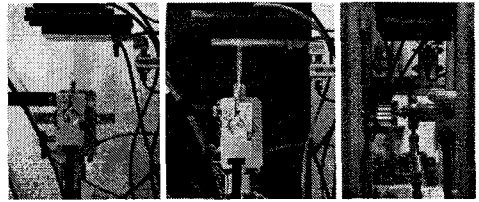


Fig. 4 Picture of the nozzle, rotary motor and proximate sensor

제어하고, 온도를 측정함으로써 세정장치의 자동화를 구현할 수 있도록 설계하였다. 공압식 로타리 모터는 제어계측용 소프트웨어로부터 출력신호를 받아 CO₂ 분사노즐에 직접 장착되어 분사노즐의 ON/OFF를 직접 제어함으로써 CO₂를 펄스식으로 분사한다. 아래 Fig. 5는 제어계측 소프트웨어(Lab View)의 컨트롤 패널(Control panel)이고, Fig. 6은 근접센서로부터 제어계측 소프트웨어로의 입력신호와 제어계측용 소프트웨어로부터 공압식 로타리 모터로의 출력신호에 대한 Timing chart의 사진이다.

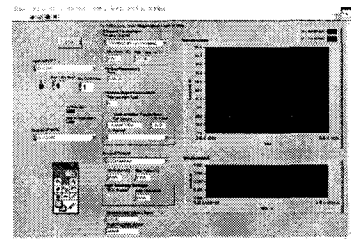


Fig. 5 Control panel of control and measurement software

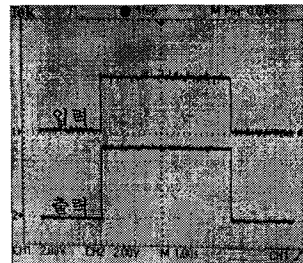


Fig. 6 Timing chart

또한 시편의 위치 및 이동속도를 제어하기 위하여 x-y 스테이지(Stage)를 사용하였으며, 신뢰성 있는 세정실험을 위하여 외부의 환경과 분리된 청정한 분위기를 조성하고, 온·습도를 제어할 수 있는

질소 치환식 클리닝 테스트 배스(Cleaning test bath)를 구성하였다. 뿐만 아니라 파티클 카운터(Particle counter)를 사용하여 질소 치환 후 클리닝 테스트 배스 내부의 미세입자 수의 변화를 정량적으로 측정할 수 있도록 하였다. 아래 Fig. 7은 Fig. 2의 개념도를 바탕으로 구성한 클리닝 테스트 배스의 사진이다.

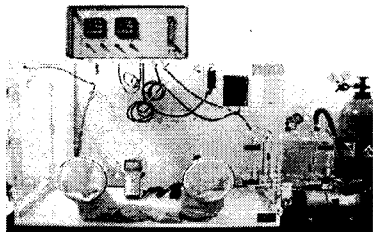


Fig. 7 Cleaning test bath

한편, 본 연구에서 사용된 CO₂는 CO₂ 내부에 용해되어있는 탄화수소 등의 불순물이 시편에 부착되는 2차 오염을 방지하기 위하여 초고순도 CO₂(99.999%)를 사용하였다.

3.2 시편제작

본 연구에서는 금속표면에 저점도의 감광액(Positive photoresist; Az1512)을 도포한 후 미세 알루미나(Al₂O₃)를 이용하여 오염물을 도포하여 시편 전체에 대하여 균일한 분포를 나타내지만 비교적 약한 점착력을 가지는 시편을 제작함으로써 고상의 CO₂와 미세입자간의 운동량 전달에 의한 기저부로부터 미세입자의 제거 양태를 실험적으로 모사하고자 하였다.

먼저 한 변의 길이가 3cm인 정사각형의 금속표면에 스펀코터(Spin coater)를 이용하여 감광액을 균일하게 도포한 후 가열판(Hot-plate)을 이용하여 베이킹(Baking)하였다. 그 후 급냉에 따른 PR막 내부 열응력의 최소화를 위하여 약 30분에 걸쳐 서냉하였다. 시편의 오염물은 탈이온수(De-ionized Water; DIW)에 아세톤을 같은 부피비로 혼합한 용액과 알루미나 파우더를 희석하고, 이 용액을 스포이드로 시편 표면에 떨어뜨리며 스펀코터를 이용하여 알루미나 입자를 PR막 표면에 균일하게 분산시킨 후 베이킹을 하였다. 이 때 아세톤은 기존 PR막 표면을 용해시켜 알루미나 파우더와 시편 표면 사이의 점착력을 높이는 역할을 한다.

상기 과정을 통하여 시편에 부착시킨 오염물의 공간적 분포를 균일하게 제어함으로써 정량화된 세정효율 측정실험의 신뢰성과 재현성을 확보할 수 있었다.

3.3 세정실험

극저온 CO₂ 세정공정에서 세정효율에 지배적인 영향을 미치는 공정변수는 CO₂ 유량, 분사속도, 분사거리, 분사각도, 노즐의 길이 등이다.^{8,9} 따라서 본 연구에서는 상기 설명한 펄스식 극저온 CO₂ 세정장치 및 시편을 이용하여 CO₂의 유량은 CO₂ 분사시간과 밀접한 관계가 있기 때문에 본 실험에서 제어 가능한 공정변수로서 CO₂ 분사시간, 분사거리 및 분사각도를 선정하고, 이러한 인자들의 변화에 따른 세정효율을 정량적으로 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 실제로 코리올리식 질량 유량계를 통하여 CO₂ 분사시간과 유량과의 관계를 측정한 결과 Fig. 8과 같은 선형적인 결과를 얻을 수 있었다.

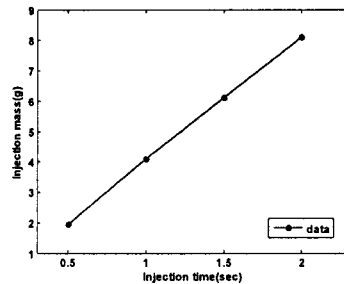


Fig. 8 Relation between injection time and mass of CO₂

CO₂의 분사시간은 0.5초, 1초, 1.5초, 2초로 선정하였고, 분사거리는 20mm, 40mm, 60mm, 80mm로 선정하였다. 또한 분사각도는 30°, 60°, 90°로 선정하여 세정 실험을 수행하였다. 세정실험은 각 인자의 변화에 대한 조합으로써 총 48가지 경우에 대하여 2회씩, 총 96회의 실험을 수행하였다. 이 때 분사거리는 노즐의 출구단으로부터 시편의 세정 중심점까지의 거리로 정의하였고, 분사각도는 노즐과 시편 사이의 수직상태를 90°로 정의하였다.

한편, 신뢰성 있는 세정실험의 환경을 조성하기 위하여 클리닝 테스트 배스 내부를 청정도 클래스 1000 이하의 수준으로 유지하였고, 온도는 약 25℃, 습도는 약 8%로 조성하였다.

세정실험 결과에 대한 측정은 공학현미경의 이

이미지 프로세싱(Image processing)을 이용하였다. 세정효율은 세정 전 시편 표면의 알루미늄 오염물의 면적에 대한 세정 후 잔존한 오염물의 면적의 비로 정의하고, 실험조건이 같은 각 2회의 실험에 대하여 세정효율을 계산한 후 평균화 하였다. 계산된 세정효율을 바탕으로 2차 다항식 곡선적합(Quadratic polynomial curve fitting)을 통하여 세정효율이 50%되는 반경(r_{50})을 계산하였다.

4. 결과

4.1 r_{50} 세정반경

본 연구에서는 상기하였듯이 광학현미경의 이미지 프로세싱을 통하여 세정효율을 측정하였다. 이 때 한 측정점에 대하여 1~2mm 간격의 이미지 프로세싱을 통하여 세정효율을 계산하였으며, 이 데이터를 바탕으로 곡선적합을 통하여 각 실험조건에 대한 r_{50} 를 계산하였다.

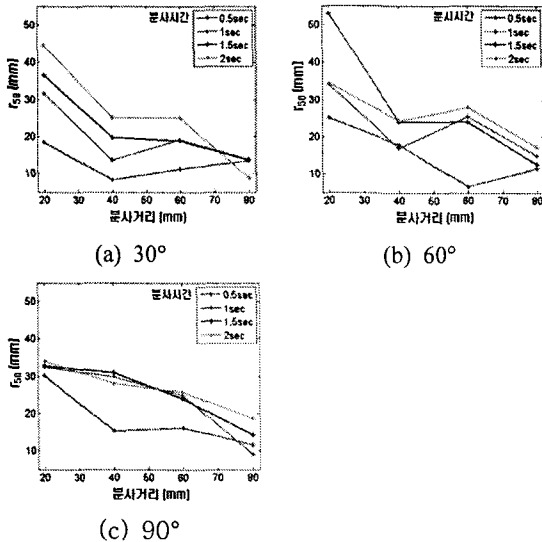


Fig. 9 Variation of r_{50} radius according to CO_2 injection distance

Figure 9는 각각 분사각도 30°, 60° 및 90°에 대하여 분사거리에 따른 r_{50} 세정반경 측정 결과를 나타낸 그래프이다. Figure 9에 도시한 실험 결과로부터 분사거리에 대하여 20mm에서 80mm로 증가 시 r_{50} 는 20mm의 분사거리에 대한 결과에 비하여 약 50~60% 감소(약 20mm) 되는 것을 알 수 있다. 특

히 분사거리가 20mm에서 40mm로 증가 시 r_{50} 는 약 40~50% 급감하는 것을 알 수 있다. 그러나 분사각도의 증가에 따른 r_{50} 는 분사거리와 분사시간에 비하여 r_{50} 에 상대적으로 미미한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있으며, 또한 분사각도 90°에 대하여 1초 이상의 분사시간은 r_{50} 에 미미한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

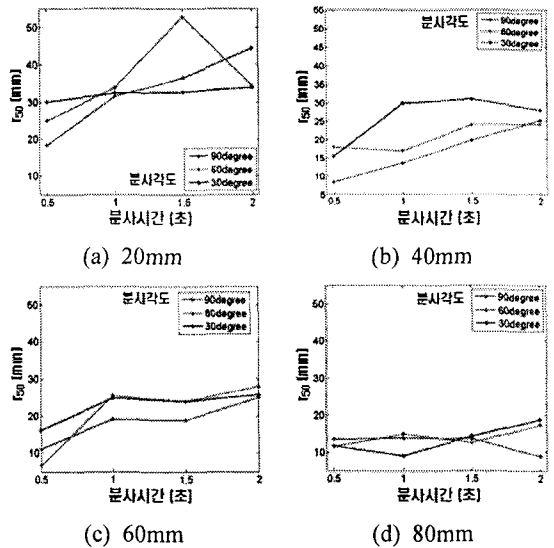


Fig. 10 Variation of r_{50} radius according to CO_2 injection time

Figure 10은 각각 분사거리 20mm, 40mm, 60mm 및 80mm에 대하여 분사시간에 따른 r_{50} 세정반경 측정 결과를 나타낸 그래프이다. Figure 10에 도시한 실험결과로부터 20mm, 40mm 및 60mm의 분사 거리에 대하여 분사시간이 0.5초에서 2초로 증가 시 0.5초의 분사시간에 대한 r_{50} 는 약 60% 증가(약 15mm)됨을 알 수 있다. 그러나 80mm의 분사 거리에 대하여 분사시간과 분사각도에 따른 r_{50} 의 영향은 변동폭이 약 10% 미만으로 상대적으로 미미한 것을 알 수 있다.

상기 실험결과로부터 펄스식 극저온 CO_2 세정 공정의 공정변수에 따른 효율적 측면을 분석한 결과 실험범위 내에서 분사각도의 영향은 상대적으로 미미하였고, 분사거리 증가에 따라서 r_{50} 는 감소하는 경향을 보이므로 20mm의 분사거리, 유량대비 최적의 세정효율을 보이는 0.5초의 분사시간이 최적의 CO_2 분사조건이라는 결론을 내릴 수 있었다.

4.2 세정반경 2.5mm에 대한 세정효율

본 연구에서는 미세입자의 표면 부착에 따른 오염에 의한 수율저하의 문제가 부각되고 있는 CCM 조립 공정의 IR 필터의 반경에 해당하는 약 2.5mm의 세정반경 대한 펄스식 극저온 CO₂ 세정법의 공정변수에 따른 세정효율의 평가를 수행하였다. 세정효율은 세정중심점에 대하여 2.5mm 떨어진 지점을 이미지 프로세싱하고, 세정조건이 같은 각 2회의 실험에 대하여 세정효율을 계산한 후 평균화 하였다.

5. 결론

본 연구에서는 펄스식 극저온 CO₂ 세정공정에서 세정효율에 지배적인 영향을 미친다고 알려진 주요 공정변수들을 선정하고 이러한 인자들의 변화에 따른 미세 오염물의 세정 효율의 변화를 측정하여 평가함으로써 최적화된 세정인자들을 도출하고자 하였다. 또한 펄스식 극저온 CO₂ 세정공정의 적용성에 대한 선행연구를 위하여 미세입자의 표면 부착에 의한 수율저하의 문제가 부각되고 있는 CCM 조립 공정의 IR 필터의 반경에 대한 펄스식 극저온 CO₂ 세정법의 공정변수에 따른 세정효율의 평가를 수행하였다.

실험결과 본 연구에서 선정한 공정변수에 따른 효율적 측면을 고려할 때 20mm의 분사거리, 0.5초의 분사시간이 최적의 CO₂ 분사조건이라는 결론을 내릴 수 있었다. 그러나 실험범위 내에서 분사각도의 영향은 상대적으로 미미하였다. 또한 세정반경 2.5mm에 대한 세정효율은 실험범위 내의 분사시간 및 분사각도에 대하여 20mm의 분사거리에서 90% 이상 달성할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

후 기

본 연구는 정부(산업자원부)의 재원으로 중기거점기술개발사업(10024121-2006-12)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Maboudian, R., Ashurst, W. R. and Carraro, C., "Self-assembled monolayers as anti-stiction coatings for MEMS: characteristics and recent developments," Sensors and Actuators A, Vol. 82, No. 1, pp. 219-223, 2000.
2. Zhao, Y. P., "Morphological stability of epitaxial thin elastic films by van der waals force," Arch. Appl. Mech. Vol. 72, No. 1, pp. 77-84, 2002.
3. Hattori, T., "Contamination control: Problems and prospects," Solid State Technol., Vol. 33, No. 7, 1-8, 1990.
4. Hattori, T. and Koyate, S., "An automated particle detection and identification system in VLSI wafer processing," Solid State Technol., Vol. 34, No. 9,

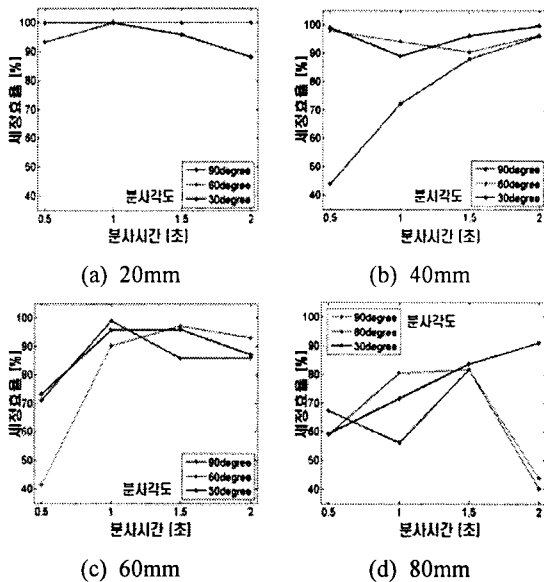


Fig. 11 Cleaning efficiency about cleaning radius of 2.5mm according to CO₂ injection time

Figure 11은 각각 분사거리 20mm, 40mm, 60mm 및 80mm에 대하여 분사시간에 따른 세정반경 2.5mm에 대한 세정효율 측정결과를 나타낸 그래프이다. Figure. 11의 실험결과로부터 20mm의 분사거리에 대하여 실험 범위내의 분사각도와 분사시간에 대한 세정효율은 90% 이상 달성할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 40mm와 60mm의 분사거리에 대하여 1~2초의 분사시간에 대한 세정효율은 80% 이상으로 측정되었다. 그러나 40mm와 60mm의 분사거리에 대하여 0.5초의 분사시간에 대한 세정효율과 80mm의 분사거리에 대하여 실험범위 내의 분사시간과 분사각도에 대한 세정효율은 80% 미만으로 측정되었다.

pp. 1-6, 1991.

5. Sung, U. C., Yoon, C. N. and Kim, S. G., "Surface cleaning by ice-particle jet(II): preparation of contaminated surface and its cleaning," Korean J. of Chem. Eng, Vol. 14, No. 1, pp. 15-22, 1997.
6. Linger, D. R., "CO₂(dry-ice) particle blasting as a mainstream cleaning alternative," Particles on Surfaces 5&6: Detection, Adhesion and Removal, K.L. Mittal(Ed.), pp. 203-220, 1999.
7. Banerjee, S. and Campbell, A., "Principles and mechanisms of sub-micrometer particle removal by CO₂ cryogenic technique," J. Adhes. Sci. Technol, Vol. 19, No. 9, pp. 739-752, 2005.
8. Spur, G., Uhlmann, E. and Elbing, F., "Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization, and application," Wear, Vol. 233, No. 235, pp. 402-411, 1999.
9. Na, Y. M., Kim, H. and Kim, S. G., "Measurement of coating removal rate of accelerated dry ice snow impact," Clean Technol, Vol. 10, No. 4, pp. 177-187, 2004.