

극저온 CO<sub>2</sub> 세정공정의 세정인자 최적화

이성훈\*, 석종원#, 김필기\*, 오승희\*, 석종혁\*\*, 오병준\*\*\*

Optimization of Cleaning Parameters in Cryogenic CO<sub>2</sub> Cleaning Process

Seonghoon Lee\*, Jongwon Seok#, Pilkee Kim\*, Seunghee Oh\*, Jonghyuk Seok\*\* and Byungjoon Oh\*\*\*

## ABSTRACT

The cleaning process of contaminant particles adhering to the microchips, integrated circuits (ICs) or the like is essential in modern microelectronics industry. In the cleaning process particularly working with the application of inert gases, the removal of contaminant particles of submicron scale is very difficult because the particles are prone to reside inside the boundary layer of the working fluid. The use of cryogenic CO<sub>2</sub> cleaning method is increasing rapidly as an alternative to solve this problem. In contrast to the merits of high efficiency of this process in the removal of minute particles compared to the others, even fundamental parametric studies for the optimal process design in this cleaning process are hardly done up to date. In this study, we attempted to measure the cleaning efficiency with the variations of some principal parameters such as mass flow rate, injection distance and angle, and tried to draw out optimal cleaning conditions by measuring and evaluating an effective cleaning width called  $d_{50}$ .

**Key Words** : Cryogenic CO<sub>2</sub> cleaning (극저온 CO<sub>2</sub> 세정), Minute particle (미세 입자), Adhesion force (점착력), Cleaning efficiency (세정효율), Optimal CO<sub>2</sub> injection condition (최적 CO<sub>2</sub> 분사조건)

## 1. 서론

초소형전자공학(Microelectronics)에서 공정변수 또는 주위 변수에 의해 필연적으로 부착되는 오염물은 이들 회로가 고밀도, 고집적, 고성능으로 지향됨에 따라서 반도체 유관 부품이나 LCD(Liquid Crystal Display) 및 PDP(Plasma Display Panel) 등의 수율 및 품질 신뢰성에 결정적인 영향을 미친다.<sup>1,2</sup> 따라서 오염물 제거를 위한 세정은 불량품 발생을

최소화하고 제품의 품질 및 기능을 향상시키며 후속 공정을 원활히 수행하는데 필수적인 공정으로 대두되고 있다. 그러나 현재 반도체 산업에서 오염물을 제거하는 고도 세정과정은 대부분 초순수(Ultrapur Water; UPW)나 화학제 등을 사용하는 습식세정법으로 처리하고 있으며, 이는 초순수 사용에 따른 에너지, 황산이나 불산 등 유해 화학물질 사용 등의 치명적인 기술적 문제들을 안고 있다. 한편, 문제가 되는 오염물들은 크게 유기오염물,

접수일: 2007년 9월 5일; 게재승인일: 2008년 4월 28일

\* 중앙대학교 기계공학부

# 교신저자: 중앙대학교 기계공학부

E-mail: seokj@cau.ac.kr Tel. (02) 820-5729

\*\* 인하공업전문대학 화공환경과

\*\*\* (주)에이앤아이

미세입자, 금속 불순물 등이 있다. 특히, 상기 오염물 중 기계-전기적인 힘이나 화학적인 힘<sup>3,4</sup> 등에 의해 웨이퍼 표면 위에 부착되는 서브미크론(Submicron) 규모의 미세입자는 작동유체의 유동경계층(Boundary layer) 내에 위치하기 때문에 이의 제거는 매우 어렵다.<sup>5</sup>

이러한 문제점을 극복하기 위해 개발된 방법 중 Edwin Rice가 고안한 극저온 CO<sub>2</sub> 세정법(Cryogenic CO<sub>2</sub> cleaning method)<sup>6</sup>은 고상의 CO<sub>2</sub> (Dry-ice)를 기상의 CO<sub>2</sub>와 함께 분사하는 방법이다. 이 방법은 고상의 CO<sub>2</sub>가 발생시키는 모멘텀을 유동경계층 내의 입자에 전달함으로써 건식세정법으로는 제거가 어려웠던 미세입자를 효율적으로 제거할 수 있으며, 세정 후 고상 CO<sub>2</sub>의 승화작용에 의해 잔유물을 거의 남기지 않는다. 또한 유해폐기물의 배출도 문제가 되지 않기 때문에 환경친화적이며, 열충격, 열영동 효과로 오염물 제거효율을 향상시키는 등의 장점에 기인하여 그 영역을 급속히 확장하고 있다. 극저온 CO<sub>2</sub> 세정법은 광섬유, 정밀전자부품, 반도체 등 다방면의 세정에 크게 유효함이 이미 밝혀졌고, 반도체 공정상 환경안전 보장, 공정단축, 수율향상 등을 통한 생산성 제고 및 원가 절감에 크게 기여할 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서는 극저온 CO<sub>2</sub> 세정 공정에서 세정 효율에 영향을 미치는 주요 인자들을 선정하고 이들의 변화에 따른 오염물의 세정 효율의 변화를 측정하여 평가함으로써 최적화된 세정인자들을 도출하고자 하였다. 주요인자는 공정변수로서 세정 효율에 지배적인 인자로 평가되는 유량, 분사거리 그리고 분사각도로 선정하였다.<sup>7,8</sup> 또한 초기 오염물 중에 50%의 오염물이 제거되는 길이로 정의되며 이에 따른 통계학적인 의미를 내포하고 있는 d<sub>50</sub> 개념을 도입하여 오버랩 거리범위(Overlap Length Range; OLR)를 측정하고, 세정 공정에서 OLR에 따른 최적화된 세정조건들을 도출하고자 하였다. 이때 d<sub>50</sub> 개념을 이용하면 노즐의 행정을 오버랩시켜 이론적으로 100%에 가까운 오염물을 제거하면서 최대의 효율을 낼 수 있는 노즐의 행정을 결정할 수 있다. 아래 Fig. 1에 상기 설명한 OLR과 d<sub>50</sub>선에 대한 개념도를 나타내었다.

## 2. 극저온 CO<sub>2</sub> 세정 원리

### 2.1 고상 CO<sub>2</sub> (Dry-ice)의 생성 원리

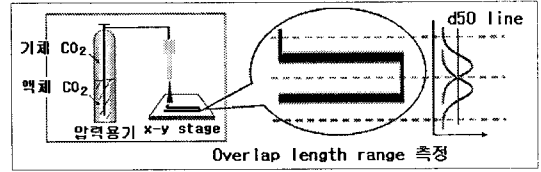


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up with the concepts of OLR and d<sub>50</sub> line

극저온 CO<sub>2</sub> 세정법의 원리는 열적 평형상태에 따른 상변화에 기초한다. 노즐을 통하여 상온 고압 상태(약 25°C, 60 bar)의 액상 CO<sub>2</sub>가 저압(즉 대기압)의 환경으로 분출되면 교축밸브에 의한 단열팽창 과정으로 액상 CO<sub>2</sub>의 온도는 급격히 강하하고, 이때 액상 CO<sub>2</sub>는 극저온의 기체와 고체 상태로 상변화 된다. 아래 Fig. 2의 CO<sub>2</sub> 상태도로부터 고압 상태의 액상 CO<sub>2</sub>가 대기압 수준으로 급강하 하였을 때 CO<sub>2</sub>는 고체와 기체의 두 가지 상(Two phases)으로 존재하며 온도가 최저 약 -78.5°C까지 감소하는 극저온 상태가 되는 것을 알 수 있다.

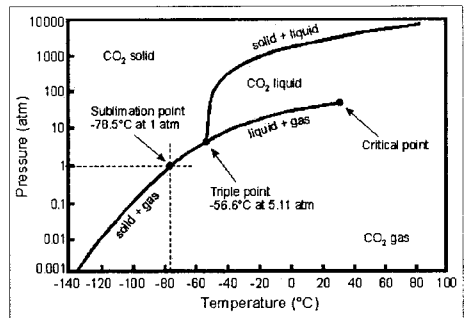


Fig. 2 State diagram of CO<sub>2</sub><sup>9</sup>

급격한 압력강하로 액상의 CO<sub>2</sub>로부터 고상의 CO<sub>2</sub>가 형성되는 상변화는 일종의 핵형성 과정이다. 핵형성은 액상뿐만 아니라 기상의 CO<sub>2</sub>에서도 일어날 수 있지만 핵형성 수율면에서는 액상의 경우가 기상의 경우에 비해 월등히 유리하고,(액상: 약 45%, 기상: 약 8%) 고상 CO<sub>2</sub>의 수율이 높을수록 미세 입자에 대한 고상 CO<sub>2</sub>의 모멘텀 전달 확률이 높아지므로<sup>10</sup> 대부분 액상의 CO<sub>2</sub>를 이용한다. 이는 기상의 CO<sub>2</sub>는 압력 강하로 인하여 생성된 액적이 고체로 상변화 하지만(Fig. 3 참조) 액상의 CO<sub>2</sub>는 압력 강하 후 기포의 폭발로 분산된 작은 액적의 CO<sub>2</sub>가 고체로 상변화하기 때문이다(Fig. 4 참조).

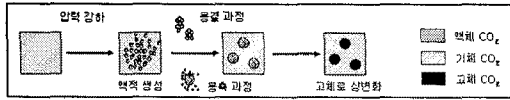


Fig. 3 Nucleation process of gaseous CO<sub>2</sub><sup>11</sup>

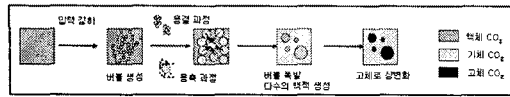


Fig. 4 Nucleation process of liquid CO<sub>2</sub><sup>11</sup>

## 2.2 운동량 전달에 의한 오염물 세정

노즐을 통과하면서 생성되는 2상(Two-phase)의 CO<sub>2</sub> 중에서 고상의 CO<sub>2</sub>는 기상의 CO<sub>2</sub>로부터 추력을 얻어 유동경계층을 뚫고 세정 대상물 표면의 미세 오염물과 충돌하게 되고, 이 때 미세 오염물에 전달된 힘 또는 이 힘에 의한 모멘트가 미세 오염물과 기저부 표면 사이의 접촉력(Adhesion force) 등에 의한 구속력이나 구속모멘트 보다 큰 경우 대상 미세 오염물은 기저부의 표면으로부터 제거될 수 있다. 이러한 고상 CO<sub>2</sub>의 운동량 전달(Momentum transfer)은 극저온 CO<sub>2</sub> 세정에서 가장 중요한 세정 메커니즘이다. 기상 CO<sub>2</sub>도 오염물에 발생하는 항력(Drag-force)에 의해 이를 제거하는 작용을 하지만 오염물의 크기가 서브미크론 규모로 미세할 경우 오염물은 유체의 유동경계층 내에 위치함에 따라 이의 제거가 매우 어렵다. 그러므로 미세 오염물을 성공적으로 제거하기 위해서는 유동경계층을 통과한 고상의 CO<sub>2</sub>가 미세 오염물에 충분한 모멘텀을 전달할 수 있도록 세정 효율에 지배적인 영향을 미치는 노즐부의 CO<sub>2</sub> 분사속도, 분사거리, 분사각 등 분사조건을 최적의 상태로 제어하여야 한다.

## 3. 실험

### 3.1 세정장치 Set-up

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 분사 조건에 따른 최적화된 세정환경을 도출하기 위하여 실험실 규모(Lab-scale)의 극저온 CO<sub>2</sub> 세정 장치를 구성하였다. 아래 Fig. 5는 본 실험연구를 위하여 구성한 극저온 CO<sub>2</sub> 세정 장치의 개념도이다.

압력용기 내에 고압으로 주입된 기체 CO<sub>2</sub>는 액상으로 용기 하단에 존재하므로 고상 CO<sub>2</sub>의 생성 수율이 높은 액상 CO<sub>2</sub>를 사용하기 위하여 용기의 출구에서 하단부까지 파이프를 설치하였다. 액상의

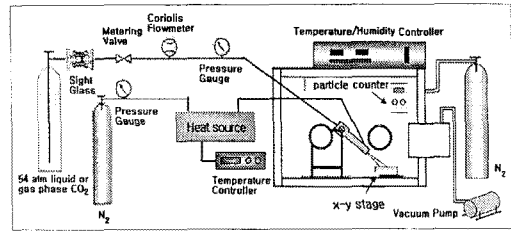


Fig. 5 Schematic diagram of the cryogenic CO<sub>2</sub> cleaning equipment

CO<sub>2</sub>를 이용하는 경우 CO<sub>2</sub> 내부에 용해되어 있는 탄화수소 등의 불순물이 기저부 표면이나 소자에 부착되는 2차 오염이 발생할 수 있기 때문에 고순도 CO<sub>2</sub> (99.999%)를 사용하였다.

압력용기로부터 분출되는 액체 CO<sub>2</sub>는 CO<sub>2</sub>의 상태(액체 또는 기체)를 시각적으로 확인 할 수 있는 사이트글라스(Sight glass)를 통과한다. 사이트글라스를 통과한 액상의 CO<sub>2</sub>는 노즐에서 분사되는 CO<sub>2</sub>의 속도를 제어할 수 있는 메터링 밸브(Metering valve; SS-4MG-MH, SWAGelok)를 통과하며, 이때 유량은 코리올리식 질량 유량계(Coriolis mass flowmeter; RHM08-230VAC, RHEONIK)를 이용하여 측정하였다. 그 후 압력계(Pressure gauge)를 이용하여 압력을 측정하고 압력계를 통과한 액상의 CO<sub>2</sub>는 분사장치에 도달한다. 압력용기와 분사장치 사이의 모든 플렉시블 호스에는 CO<sub>2</sub>와 외부와의 열전달을 최소화하기 위하여 단열재를 도포하였다.

CO<sub>2</sub> 분사장치는 액상의 CO<sub>2</sub>가 2상의 CO<sub>2</sub>로 상변화 할 수 있도록 설계된 노즐(K6-10DG, Applied Surface Technology)과 노즐의 분사각도 및 거리를 조절할 수 있는 프레임으로 구성되어 있다. 한편, CO<sub>2</sub> 분사노즐을 통해 분사되는 극저온 상태의 CO<sub>2</sub>는 노즐 주위의 온도를 급격히 강하시켜 분사장치 출구단 주위의 수분을 응축, 응결시킴으로써 CO<sub>2</sub>의 원활한 분사를 방해하기도 하고, 열응력에 의해 세정 대상물을 파손시킬 우려도 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 열원에 의해 가열된 N<sub>2</sub> 가스가 분사되는 직관형태의 노즐들이 CO<sub>2</sub> 노즐의 출구단 주위에 환형으로 분포되어 있다. 또한, 노즐행정의 자동화를 위하여 x-y 스테이지(stage)를 사용함으로써 오버랩 길이와 세정 시 노즐행정 경로 및 이동속도를 제어할 수 있도록 하였다.

신뢰성 있는 세정 실험을 위하여 질소 치환식 클리닝 챔버(Cleaning chamber)를 구성하여 챔버 내

부를 청정한 분위기로 유지하였다. N<sub>2</sub> 가스 치환 중 챔버 내부 공기의 미세 입자에 대한 변화를 정량적으로 파악하기 위하여 미세입자측정기(Particle counter)를 설치하였으며, 챔버 내부의 온·습도를 제어할 수 있도록 설계하였다.

### 3.2 시편 준비과정

본 연구에서는 Flexible-PCB와 같이 점착특성이 강한 폴리머를 세정 대상으로 선정하였다. 일반적으로 이러한 폴리머에 점착된 미세 입자의 점착에너지(Adhesion energy)는 웨이퍼나 금속재질의 표면을 가지는 기저부에 비해 매우 크기 때문에 기존의 건식세정법을 적용하여 효과를 얻기에는 한계가 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결할 수 있는 대안으로 극저온 CO<sub>2</sub>세정법이 제시될 수 있다.

폴리머에 부착되는 오염물들의 부착력은 화학적 활성이 높은 경우 매달린 본드(Dangling bond) 등에 의해 강한 부착력을 수반하기도 한다. 따라서 활성이 적은 웨이퍼에 반도체 공정에서 감광물질(Photoresist; PR)로 사용하는 SU-8을 도포시켜 부착력을 강화시킴으로써 상기 환경을 상사하여 미세오염물 제거 양태를 실험적으로 모사하고자 하였다.

먼저 4인치 순수 웨이퍼(Bare-wafer) 표면의 이물질들을 스핀코터(Spin coater)와 유기용매인 아세톤(Acetone)을 이용하여 세척한 후 SU-8을 도포하였다. 점도가 매우 높은 SU-8의 도포막 두께의 정량화를 위하여 아세톤을 희석시켜 도포하였으며, 이때 SU-8과 아세톤의 희석비율(부피비)은 각각 4 대 1 (SU-8: 80%, 아세톤: 20%)로 균일하게 하였다. 그 후 스핀코터를 처음 10초간 3000 rpm, 이후 50초간 3500 rpm으로 회전시켜 PR막을 균일하게 코팅하고, 가열판(Hot-plate)으로 약 60°C에서 30분간 베이킹(Baking) 하였으며, 베이킹 후 세정 과정에서 급냉에 따른 PR막 내부 열응력의 최소화를 위하여 약 30분에 걸쳐 웨이퍼를 서냉하였다.

시편의 오염물은 탈이온수(De-ionized Water; DIW)에 아세톤을 같은 부피비로 혼합한 용액과 알루미나 파우더를 희석시키고, 이 용액을 스포이드로 웨이퍼 표면에 떨어뜨리며 스핀코터를 2500 rpm과 3000 rpm으로 각각 10초간 회전시켜 알루미나 입자를 PR막 표면에 균일하게 분산시킨 후 약 5분간 베이킹을 하였다. 이때 아세톤은 기존 PR막 표면을 용해시켜 알루미나 파우더와 웨이퍼 사이의 점착력을 높이는 역할을 한다. 아래 Fig. 6은 실험

에 사용된 시편의 샘플 사진이다.



Fig. 6 Specimen sample

상기 과정을 통하여 시편에 부착시킨 오염물의 공간적 분포를 제어할 수 있었으며 시편과 오염물 사이에 부착력을 증가시킴으로써 정량화된 오염물 제거효율의 신뢰성과 재현성을 확보할 수 있었다.

### 3.3 세정실험

본 연구에서는 이전에 기술한 세정 장치 및 시편을 이용하여 CO<sub>2</sub>의 유량, 분사 거리 및 분사 각도에 따른 세정 효율을 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 세정 실험 전 청정 분위기를 조성하기 위하여 질소 치환식 클리닝 챔버의 내부를 청정도 클래스 1000의 수준 이하로 유지하였다. 또한 클리닝 챔버 내부의 온도는 약 25°C, 습도는 약 8%로 유지하였다. 세정 시 노즐행정은 웨이퍼 표면에 대하여 시계 방향으로 정사각형을 이루는 경로를 따라서 200 mm/min의 속도로 구성하였으며, 총 행정 거리는 각 방향에 대하여 60 mm 씩, 총 240 mm로 설정하였다.

노즐부에 공급되는 CO<sub>2</sub>의 유량은 비교적 안정적으로 고상의 CO<sub>2</sub>가 생성될 수 있는 유량과 소비되는 CO<sub>2</sub>의 유량을 고려하여 40, 60, 80, 100 (단위: g/min)으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 또한 분사 거리는 30, 50, 70 (단위: mm), 분사각도는 30, 60, 90 (단위: °)로 각각 변화시켜 세정 실험을 수행하였다. 이때 분사거리는 시편의 세정 중심으로부터 노즐 출구단까지의 거리로 정의하였고, 분사각도는 시편과 노즐 사이의 수직상태를 90°로 정의하였다.

시편의 세정경로에 대한 정사각형의 각 모서리 4개 지점을 측정점으로 선정하고, 세정 전 웨이퍼 표면 위의 알루미나 오염물의 면적에 대한 세정 후 잔존한 알루미나 오염물의 면적의 비로 세정 효율을 정의하였다. 측정을 위하여 광학 현미경과 이미지 프로세싱(Image processing)을 이용하였다. 이때

얻은 데이터를 바탕으로 OLR을 구하기 위해 2차 다항식 곡선적합(Quadratic polynomial curve fitting)을 통하여 최초 오염물 면적 대비 세정된 오염물의 면적이 50%가 되는 길이( $d_{50}$ )를 계산하였다. 아래 Fig. 7은 (a) 광학 현미경으로 촬영한 시편 표면과 (b) 이미지 프로세싱을 거친 후의 시편 표면의 사진이다.

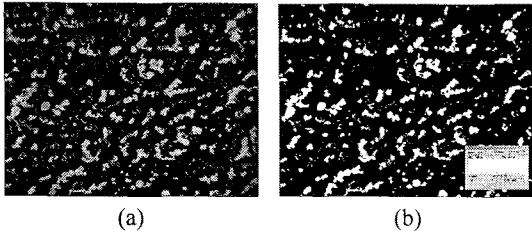


Fig. 7 (a) Specimen surface taken by optical microscope, (b) Specimen surface after image processing process

#### 4. 결과

본 연구에서는 광학현미경의 이미지 프로세싱을 통하여 세정실험 전 오염된 시편의 최초 오염물 면적을 측정하였다. 세정실험 후 같은 실험 조건의 각 4개 지점에 대하여 상기한 방법과 마찬가지로 잔존한 오염물의 면적을 측정하여 평균화하였다. 그 후 세정실험 전 최초 오염물 면적 대비 세정실험 후 제거된 오염물의 면적의 비율로써 세정효율을 계산하였다. 이 때 한 측정점에 대하여 0.5~1 mm 간격의 이미지 프로세싱을 통하여 세정실험 후 잔존한 오염물의 면적을 계산하였다. 다음으로 상기한 방법으로 측정된 거리에 따른 오염물의 세정 효율에 대하여 곡선적합을 하였다. 이때 구한 곡선과  $d_{50}$ 선과의 교점을 구함으로써 OLR을 계산할 수 있다.

먼저 Hutchings 등의 연구결과<sup>12</sup>로부터 시편에 작용시키는 CO<sub>2</sub>의 유량을 세정효율에 영향을 주는 가장 중요한 인자로 선정하였으며 이어 분사거리와 분사각도의 순서로 인자의 중요도를 가정하였다. 본 연구에서는 상기 기술한 순서로 각 인자에 따른 최적치를 부분적으로 결정해 나가는 순차적인 실험을 수행하였다. 실험결과 Fig. 8은 유량에 따른 세정 실험 결과로부터 구한  $d_{50}$ 를 도시한 그림이다. 이 때 CO<sub>2</sub>의 유량은 각각 40 g/min, 60 g/min, 80 g/min, 100 g/min이다. 측정 결과 유량에 따른 시편의 세정 중심점에 대한 세정 효율은 각각 71.1 %, 73.9 %, 74.8 %, 89.8 %로 나타났으며,  $d_{50}$ 는 각각 3.59 mm, 3.71 mm, 6.21 mm, 6.46 mm로 계산되었다. 세정 효율의 측면에서 보면, 40 - 80 g/min 구간에서 유량의 증가 대하여 5% 이하의 낮은 세정 효율의 증가를 보인 반면에 80 - 100 g/min 구간에 대하여 약 15 %의 세정 효율의 증가를 보였다. 또한 40 - 60 g/min, 80 - 100 g/min구간에서 유량 증가에 대한  $d_{50}$ 는 약 0.1 mm ~ 0.2 mm의 미소한 증가를 보였지만 60 - 80 g/min 구간에서는 유량 증가에 대해  $d_{50}$ 는 약 2.5 mm로 급격한 증가를 보였다. 따라서 세정 효율과 CO<sub>2</sub> 유량 소비에 따른 경제성 및 유효 세정거리에 따른 생산성을 고려하면 CO<sub>2</sub> 유량에 대한 최적의 분사조건은 약 80 g/min으로 판단할 수 있다.

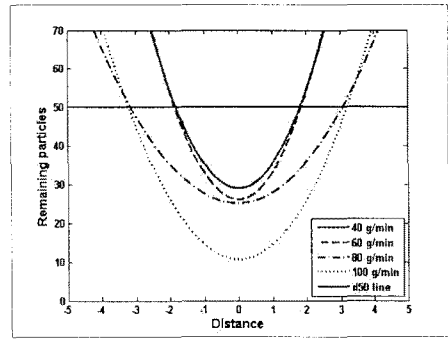


Fig. 8 Experiment results with respect to the mass flow rate

73.9 %, 74.8 %, 89.8 %로 나타났으며,  $d_{50}$ 는 각각 3.59 mm, 3.71 mm, 6.21 mm, 6.46 mm로 계산되었다. 세정 효율의 측면에서 보면, 40 - 80 g/min 구간에서 유량의 증가 대하여 5% 이하의 낮은 세정 효율의 증가를 보인 반면에 80 - 100 g/min 구간에 대하여 약 15 %의 세정 효율의 증가를 보였다. 또한 40 - 60 g/min, 80 - 100 g/min구간에서 유량 증가에 대한  $d_{50}$ 는 약 0.1 mm ~ 0.2 mm의 미소한 증가를 보였지만 60 - 80 g/min 구간에서는 유량 증가에 대해  $d_{50}$ 는 약 2.5 mm로 급격한 증가를 보였다. 따라서 세정 효율과 CO<sub>2</sub> 유량 소비에 따른 경제성 및 유효 세정거리에 따른 생산성을 고려하면 CO<sub>2</sub> 유량에 대한 최적의 분사조건은 약 80 g/min으로 판단할 수 있다.

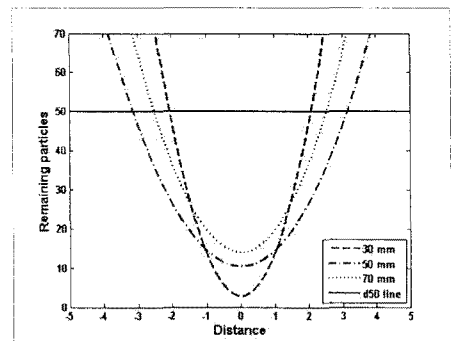


Fig. 9 Experiment results with respect to the injection distance

실험결과 Fig. 9는 분사거리에 따른 세정효율을 기초로  $d_{50}$ 를 측정된 결과를 도시한 그림이다. 이때 유량은 첫 번째 우선인자인 유량의 최적값인 80 g/min을 유지하였으며 시편과 노즐 사이의 거리는 각

각 30 mm, 50 mm, 70 mm로 설정하였다. 측정결과 분사거리에 따른 시편의 세정 중심점에 대한 세정 효율은 각각 97.1 %, 88.8 %, 85.6 %로 분사거리가 증가할수록 세정 효율이 낮아지는 경향을 보였고, 이에 따른  $d_{50}$ 는 각각 4.15 mm, 6.28 mm, 5.05 mm로 나타났다. 본 실험 결과, 상기 조건하에서 세정 효율과  $d_{50}$ 를 고려한 최적의 분사거리는 50 mm임을 알 수 있었다.

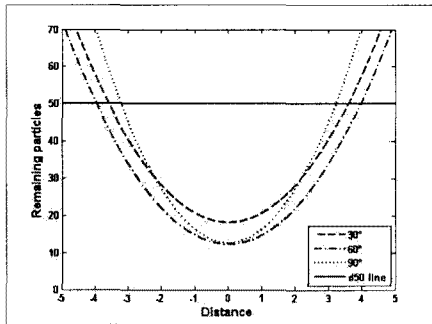


Fig. 10 Experiment results with respect to the injection angle

위의 Fig. 10은 분사각도에 따른 세정효율을 바탕으로  $d_{50}$ 를 구한 결과이다. 이때 첫 번째 및 두 번째 우선인자인 CO<sub>2</sub> 유량과 분사거리는 최대의 세정 효율을 보인 유량인 80 g/min과 분사거리 50 mm를 유지하였으며 시편과 노즐 사이의 각도는 각각 30°, 60°, 90°로 설정하였다. 측정 결과 분사각도에 따른 시편의 세정 중심점에 대한 세정 효율은 각각 81.8 %, 87.7 %, 87.4 %로 비교적 큰 차이를 보이지 않았고,  $d_{50}$ 는 각각 7.17 mm, 7.93 mm, 6.42 mm로 나타났다. 따라서 상기 조건하에서 시편과 노즐 사이의 각도에 대한 최적의 CO<sub>2</sub> 분사 조건은 약 60°라고 결론 내릴 수 있다.

아래 Fig. 11은 (a) 유량, (b) 분사거리, (c) 분사각도에 따른  $d_{50}$ 의 변화를 도식화한 그림이다. 실험 결과로부터 CO<sub>2</sub> 소모에 따른 경제성과 유효 세정 거리에 따른 생산성을 고려해 볼 때, 인자의 중요도에 따른 순차적 실험결과 최적의 CO<sub>2</sub> 분사 조건은 유량은 약 80 g/min, 분사거리는 약 50 mm, 분사각도는 약 60°임을 알 수 있다. 또한 분사조건에 따라서  $d_{50}$ 는 약 3.5 mm ~ 7.9 mm로 비교적 큰 차이를 보였으며, 최적의 분사조건에서의  $d_{50}$ 는 약 7.9 mm로, 그 결과 최대의 효율을 낼 수 있는 행정 경로에 대한 오버랩 길이는 약 7.9 mm임을 알 수 있다.

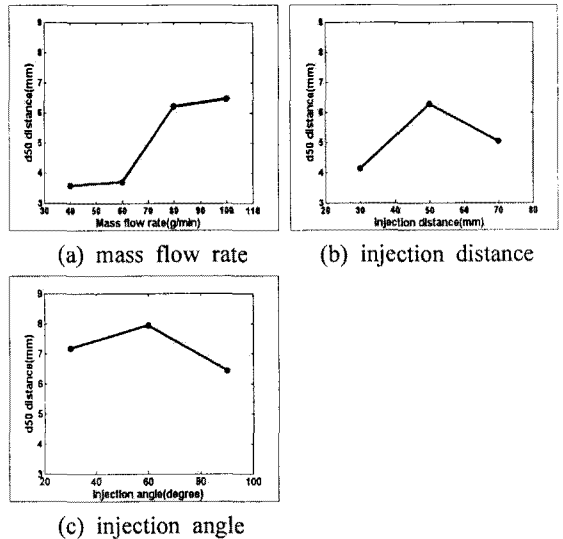


Fig. 11 Variation of  $d_{50}$  radius according to CO<sub>2</sub> injection conditions

## 5. 결론

본 연구에서는 미세 오염물을 효율적으로 제거할 수 있는 극저온 CO<sub>2</sub> 세정 실험을 통하여 CO<sub>2</sub> 분사조건 (유량, 분사거리, 분사각도)에 따른 웨이퍼 표면에 부착된 오염물의 세정 효율을 인자의 중요도에 따른 순차적 실험결과를 기초로 평가하였다. 또한 이를 바탕으로 면적대비 50 %의 오염물이 제거되는 거리인  $d_{50}$ 에 따른 오버랩 길이를 측정함으로써 최적화된 세정조건을 도출하고자 하였다.

실험결과, 세정에 걸리는 시간과 CO<sub>2</sub> 소모량 등을 고려해 볼 때, 약 80 g/min의 CO<sub>2</sub> 유량, 약 50 mm의 분사거리, 그리고 약 60°의 분사각도에서 최고의 세정 효율을 달성할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 분사조건에서  $d_{50}$ 에 따른 행정 경로에 대한 오버랩 길이는 약 7.9 mm임을 알 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 (KRF-2005-041-D00099) 또한 2007년 정부(산업자원부)의 재원으로 중기거점기술개발사업 (100-24121-2006-12)의 지원을 받아 수행된 연구로써 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Hattori, T., "Contamination control: problems and prospects," *Solid State Technol.*, Vol. 33, No. 7, pp. 1-8, 1990.
2. Hattori, T. and Koyate, S., "An automated particle detection and identification system in VLSI wafer processing," *Solid State Technol.*, Vol. 34, No. 9, pp. 1-6, 1991.
3. 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.
4. 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.
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., "CO<sub>2</sub>(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. 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.
8. 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.
9. Banerjee, S. and Campbell, A., "Principles and mechanisms of sub-micrometer particle removal by CO<sub>2</sub> cryogenic technique," *J. Adhes. Sci. Technol*, Vol. 19, No. 9, pp 739-752, 2005.
10. Narayanswami, N., Heitzinger, J., Partrin, J., Rader, D., O'Hern, T. and Torczynski, J., "Development and optimization of a cryogenic aerosol-based wafer cleaning system," *Particles on Surfaces: Detection, Adhesion and Removal*, pp. 251-266, 1999.
11. Na, Y., "The cleaning rate of injection jet using dry ice snow produced high pressure liquid expansion," Master dissertation, Choong-Ang Univ., 2003.
12. Trezona, R. I. and Hutchings, I. M., "Resistance of paint coatings to multiple solid particle impact: effect of coating thickness and substrate material," *Progress in Organic Coatings*, Vol. 41, No. 1, pp. 85-92, 2001.