

드라이아이스 눈입자 세정기의 개발 및 제염성능 연구

Development and Decontamination Efficiency of Device Using Dry Ice Snow Cleaning

전길호

한택방사선(주)

경상북도 울진군 북면 부구리

요 약

방사능 제염(Decontamination)은 원자력 분야에서 중요한 현안이며, 현재는 물세척, 스팀분사 등의 방법을 사용하는 데, 이는 2차 폐기물을 대량으로 발생시키고 세척 과정에서 표면을 손상시키는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 드라이 아이스 눈 입자 세척법을 이용하였으며, 상변화(Phase change) 노즐을 설계 및 제작하였다. 세척 성능시험 결과 표면 오염물이 깨끗하게 세정되었으며 방사성오염물의 표면선량 감소율을 최대 82%까지 줄이는 결과를 얻었다. 물 세척이 불가능한 고가의 전자 장비 및 계측기 표면 세척에 본 기술을 사용하면 뛰어난 세척 효과를 얻을 것이다.

Abstract

The decontamination technology is essential in the operation of nuclear power plants. Water washing, steam blast cleaning, sand blast cleaning and hand work cleaning are currently used in removal of radioactive wastes absorbed on the work surface. However, these methods produce lots of secondary wastes and tend to damage the work surface. A dry ice snow cleaning device with an adjustable nozzle was developed for the decontamination purpose. An adjustable nozzle to control the size of snow was developed. A cleaning device with this nozzle was devised and tested. Using this cleaning device, specimen contaminated with oil and dust were easy to remove. Decontamination ability was measured using a radioactive contaminated pump-housing surface. The maximum of 82 % of radioactivity was reduced after dry ice snow cleaning. This device is expected to be used in decontamination of expensive electronic and optical instruments and detectors that cannot be decontaminated by water.

1. 서론

방사능 제염(Decontamination)은 원자력 분야에서 중요한 현안이며, 표면이 방사능에 오

염된 부품 및 장비의 정비와 처분을 위해 제염은 반드시 필요하다. 발전소 바닥, 벽, 소내 계측기, 금속공구 및 전자부품 등의 표면에 흡착되어 있는 방사성 오염물 제거에 있어 현재 사용되고 있는 제염 방법은 물 세척, 스팀 분사 세척, 모래 분사 세척 또는 사람의 손으로 직접 문지르는 세척법 등의 방법을 사용하고 있다. 이러한 제염법은 2차 폐기물을 대량으로 발생시키고, 제염 대상물의 제품 표면을 손상시키는 단점을 갖고 있다^{1,2)}.

이러한 단점을 보완하기 위해, 미세 표면 세척에 사용되고 있는 드라이 아이스 눈 입자 세척법(Dry Ice Snow Cleaning)을 이용하여 위에서 언급한 단점을 보완하였다. 드라이 아이스 눈입자 세척법은 고압(약 50bar)의 액체 이산화탄소가 노즐을 통과하여 교축과정(Throttling Process)³⁾을 겪으면서 작은 드라이 아이스 눈 입자가 생성되고, 고속의 기체 이산화탄소가 발생하여 미세 입자와 유기성 오염물을 제거하는 원리이다.(그림 1 참조) 드라이 아이스는 이산화탄소가 고체 상태일 때를 말하는 것으로, 드라이 아이스가 갖고 있는 상온에서 승화되는 성질을 이용하면, 세척할 때 2차폐기물을 대량으로 줄일 수 있으며 세척 대상물의 표면 손상을 극소화시키며, 세척 효과가 뛰어나다는 장점을 갖고 있다^{4,5)}. 또한 드라이 아이스는 이산화탄소의 장점(안정한 화합물, 무독성, 무공해물질)으로 인해서 환경 친화적인 세척물질로 인식되고 있어 원자력발전소에서의 적용이 용이하다.

본 논문의 목적은 드라이아이스 눈입자 세정기의 핵심기술인 이산화탄소 상변화 노즐을 개발하는 것과 원자력발전소 제염현장에 적용하여 장치의 효과를 검증하는데 있다.

2. 실험장비 설계

드라이 아이스 눈 입자 세척법(Dry ice snow cleaning method)에 대한 연구 상황은 특허를 중심으로 하기 때문에 저변의 학문적인 배경이 제시되지 않고 있으며 수량화된 세척기능의 제시가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 특히, 드라이 아이스 눈 입자를 사용할 때, 가장 중요한 사항인 고체 눈 입자의 크기 조절과 세척 효과 등에 대한 연구는 거의 없는 실정^{6,7,8)}이어서 자체적으로 노즐을 개발하여 그 성능을 시험하였다.

2-1. 노즐제작

드라이 아이스 눈 입자 세척법의 세척 원리에 따르면 노즐 통과 후 생성되는 드라이 아이스 눈 입자와 세척효과는 밀접한 관련이 있다. 즉, 생성되는 눈 입자의 크기가 세척효과에 영향을 미친다. 일반적으로 큰 입자는 운동량 전달이 용이하여 세척력이 증대하지만 표면을 상하게 할 가능성이 있다. 일례로 반도체 웨이퍼(Semi-conductor Wafer) 세척에 적용할 경우에는 수 μm 미만의 크기를 가져야만 웨이퍼 표면손상을 극소화 할 수 있다고 알려져 있다. 따라서, 생성되어 나오는 눈 입자의 크기를 세척 대상물의 종류에 따라 조절할 수 있는 노즐을 설계하는 것이 가장 중요하다.

그림 3은 본 연구에서 설계한 드라이 아이스 눈 입자 형성공간의 부피를 조절할 수 있는 가변성 이산화탄소 상변화 노즐의 개략도이다. 전체적으로 볼 때 수축발산(Converging-diverging) 노즐의 형태를 띤다. 가변성 이산화탄소 상변화 노즐은 크게 두 부분으로 나누어져 있어, 1차 노즐과 2차 노즐을 결합하여 사용한다. 1차 노즐은 액체 이

산화탄소가 직접 공급되는 고압호스와 직접 연결한다. 고압의 액체 이산화탄소는 입구공간을 지나서 직경이 좁아지는 입구관을 통과하면서 압력은 낮아진다. 이렇게 통과한 액체 이산화탄소는 드라이 아이스 눈 형성공간을 지나면서 압력이 낮아져 팽창하여 드라이 아이스 눈 입자를 형성한다. 형성된 눈 입자와 기체 및 액체 이산화탄소는 출구관을 거쳐 출구공간을 통과하여 분출된다. 1차 노즐과 2차 노즐을 결합한 후, 2차 노즐을 조절하면서 형성공간 길이(ℓ)를 조절 할 수 있다. 이렇게 함으로써 눈 형성공간의 길이 및 부피 조절한다. 눈 형성공간의 부피가 적정할 때, 형성되는 드라이 아이스 눈의 최대 크기를 얻을 수 있다. 또한 눈 형성공간의 부피를 적절하게 조절하면, 생성되는 눈의 크기를 조절하여 적합한 제염 환경에서 사용자가 자유롭게 조절하며 사용할 수 있도록 설계⁹⁾하였다. 그리고, 이와 같은 형태를 갖으면서 형성공간 내부 직경(d)을 서로 다르게 설계하여 상변화 노즐을 다수 제작하여 최적의 노즐을 제작하였다.(그림 4, 5)

2-2. 장치 구성

실험에 사용한 장치의 모습을 그림 1 및 그림 2에 나타내었다. 액체상태의 이산화탄소를 공급하기 위하여 출구 방향을 아래쪽으로 하여 이산화탄소 고압 용기를 거꾸로 세워 놓았다. 방출되는 이산화탄소의 압력을 조절하기 위하여 이산화탄소 고압 용기 출구 쪽에 압력조절기(Outlet pressure regulator)를 설치하였고, 이어서 고압호스, 볼 밸브(Ball valve)와 본 연구에서 제작한 가변성 이산화탄소 상변화 노즐을 설치하였다. 또한 세척 과정 중에 발생하는 드라이 아이스 얼음막을 제거하기 위해서 열풍기(Hot blast heater)를 장착하였다.

3. 실험

제작한 상변화 노즐을 사용하여 세정장치의 세척 정도를 알아보기 위해 세척 성능 실험을 수행하였다. 먼저, 일반 산업계에서 존재하는 표면 오염물을 모사한 시편을 제작하여 상변화 노즐을 이용한 드라이 아이스 눈 입자 세척법 실험을 하였다. 모사한 시편의 종류로는, 일반 산업계에서 존재하는 표면 오염물인 공업용 오염기름을 선정하였으며, 원자력 발전소에서 나오는 방사능에 오염된 기계 부품을 선택하여 세정 및 방사능 제염 정도를 알아보는 실험을 시행하였다.

3-1. 오염기름 제거 효과

원자력 발전소뿐만이 아니라 모든 산업 현장에서는 윤활유 등의 기름류와 먼지에 의해 작업 도구, 전자 제품, 계측기, 기계 부품, 바닥 그리고 벽 등이 오염된다. 기름류에 의해 오염된 제품 표면 역시, 세척은 반드시 필요하다. 본 연구에서는 현장에서 기름과 먼지에 오염된 도구 및 부품을 모사하기 위하여 다음과 같은 방법으로 시편을 준비하였다. 먼저, 일반 환경 중에서 발생하는 섬유형 먼지와 그리스 유(Grease 油)를 질량비 1대 100의 비율로 잘 혼합하여 오염 기름을 제작하였다. 그리고 오염된 기름이 좁은 틈새로 흡착되는 것을 모사하기 위해서, 표면이 매끈한 아크릴 판 위에 사포(Sand paper) 180을 사용하여

일정한 힘으로 거칠기를 주어 오염전의 깨끗한 시편을 만들었다. 그리고 거칠기를 준 아크릴 판 위에 먼저 제작한 먼지와 기름이 혼합된 오염된 기름을 일정한 압력으로 흡착시켰다. 이렇게 제작된 시편은 기름류와 먼지에 의해 오염된 제품의 표면을 모사한 시편이다. 이와 같은 방법으로 제작된 시편을 대상으로 본 연구에서 개발된 노즐과 그 노즐을 장착한 세정장비를 사용하여 세척한 후 표면을 현미경으로 관찰하였다.

3-2. 방사성오염물질 제거 효과

본 연구의 궁극적인 목적은 일반 산업 현장의 표면 오염물을 제거하는 것뿐만이 아니라 원자력 발전소에서 발생하는 표면 방사성 오염물을 제거하는데 있다. 따라서, 원자력 발전소에서 발생한 표면 방사성 오염물을 대상으로 개발된 노즐을 장착한 세정장치를 사용하여 세척 및 제염 실험을 수행하였다. 월성 원자력 발전소 1호기에서 발생한 감속재 펌프 하우징을 제염 대상으로 삼았다. 우선, 방사능에 오염된 감속재 펌프 하우징의 표면 세 곳을 선택하여 세척전의 표면 방사선량을 스메아법(Smear method)으로 측정하였다. 그 후 제작된 상변화 노즐의 제염기 성능을 실험하기 위해 앞서 선택한 표면 세 곳을 대상으로 세척 및 제염 실험을 수행하였다. 세척 및 제염 실험을 마친 후 동일한 방법으로 표면 선량을 측정하여 세척 전후의 방사선량 차이를 비교해 보았다. 그리고, 표면의 세 부분의 각각의 지점에 사용된 이산화탄소의 질량은 680 g(질량유량 5.7 g/s)으로 동일하였다. 또한, 세척 과정에서 발생하는 얼음막을 제거하고 드라이 아이스의 승화를 돕기 위하여 간간히 열풍기를 사용하면서 세척 실험을 진행하였다.

4. 세척 실험 결과

4-1. 노즐 성능 분석

노즐을 통과해 나오는 드라이 아이스 눈 입자는 대기중에서 금방 승화해 버리기 때문에 측정에 상당한 어려움이 따른다. 드라이 아이스 눈 입자의 크기 및 그 수를 유동 계측 장비 중의 하나인 미립자 유동 계측기(PAMS, Particle Motion Analysis System)를 사용하여 측정하였다. 그림 6에서 보이는 바와 같이, 실험 장치의 볼 밸브를 열어 드라이 아이스 눈 입자를 노즐을 통해 계속 분출시키고, 노즐 출구에서 3cm 떨어진 곳에서 생성되는 눈 입자를 측정하였다. 2초마다 1번 씩 광원을 발생시키면서 일정한 면적(1mm×1mm)내에 들어오는 드라이 아이스 눈 입자를 CCD 카메라를 사용하여 촬영하였다. 이때 촬영 간격은 2초마다 1번씩 10번 촬영을 하여 그 때마다 측정되는 입자의 크기 및 수를 측정하였다. 그 후 컴퓨터 프로그램을 이용하여 측정된 값을 분석하였다¹⁰⁾.

그림 7과 그림 8은 노즐 출구에서 2cm 떨어진 곳의 드라이 아이스 눈의 크기 및 분포를 촬영한 사진이다. 그림 7은 눈 형성공간의 체적을 최소로 했을 때의 모습이다. 형성된 눈 입자를 거의 발견 할 수 없었다. 그림 8은 형성공간의 체적이 적정할 때의 사진이다. 형성된 눈 입자는 고르게 분포하고, 눈의 평균 직경은 대략 10.7 μ m으로 나타났다. 눈 형성공간의 크기는 눈 입자의 크기와 직접적인 관계가 있음을 알 수 있다.

4-2. 오염기름 제거효과

산업 현장의 표면 오염기름을 모사한 시편을 세척 대상으로 삼아 실험을 수행한 결과를 그림 9, 10, 11에 나타내었다. 그림 9는 사포(Sand paper) 180으로 아크릴 판 위에 거칠기만을 준 시편으로서, 표면 오염물이 흡착되기 전의 깨끗한 원 시편을 현미경으로 촬영한 사진이다. 그림 10은 그림 9의 깨끗한 원 시편 위에, 미리 제작한 먼지와 기름류의 혼합 오염물을 일정한 힘으로 흡착시킨 사진이다. 이 모습은 먼지와 기름류에 의해 오염된 일반 산업계에서 상당히 많이 존재하는 오염물의 표면을 모사한 것이다. 또한 먼지와 기름류 등의 오염물이 틈새에 흡착된 모습을 보여 주고 있다. 그림 11은 그림 10의 시편을 대상으로 개발된 노즐을 장착한 세정장비를 사용하여 실험을 수행하였을 때의 결과이다. 이때 사용한 이산화탄소의 양은 약 680 g이며, 2분간 세척을 시행하였다. 그리고, 얼음막의 생성을 막고 드라이 아이스의 승화를 돕기 위해 열풍기를 사용하였다. 그 결과 그림 11에서 보이는 것처럼 표면에 흡착된 먼지와 기름류 등의 오염물이 완벽하게 제거되었음을 알 수 있다. 오염 전 시편(그림 9) 이상의 수준으로 깨끗해 졌다. 드라이 아이스 눈 입자 세척법은 유기성 물질에 대하여 탁월한 세척 효과를 갖고 있음을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

4-3. 방사성오염물질 제거효과

실험 대상물인 감속재 펌프 하우징의 모습을 그림 12에 나타내었다. 먼저, 방사능에 오염된 감속재 펌프 하우징의 표면 세 곳 A, B, C를 선택하여 세척전의 표면 방사선량을 스메아법(Smear method)으로 측정한 결과를 표 1에 나타내었다. 그 다음에, 앞서 선택한 동일한 표면 세 곳 A, B, C를 대상으로 세척 및 제염 실험을 수행한 후, 같은 방법인 스메아법으로 방사선량을 측정하였다. 그 결과 역시 표 1에 나타내었다. 그리고, 표면의 세 부분의 각각의 지점에 사용된 이산화탄소의 질량은 680g으로 동일하였으며, 세척 시간은 각각의 지점에 2분씩 세척하였다. 세척 과정 중에 발생하는 얼음막을 제거하고 드라이 아이스의 승화를 돕기 위하여 간간히 열풍기를 사용하면서 세척 및 제염 실험을 수행하였다. 월성 원자력 발전소 1호기에서 발생한 감속재 펌프 하우징(그림 12)을 대상으로 삼아 세척 실험을 수행한 결과는 표 1과 같다. 표 1에 나타난 결과를 볼 때, 개발한 노즐과 그 장치를 사용하여 표면 세척한 후의 표면 방사선량은 분명히 감소된 것으로 나타났다. 따라서, 드라이 아이스 눈 입자 세척법이 방사성 오염물질 제거에 적용될 수 있음을 확인하였고 표면 방사능을 최대 82% 까지 제거하는 결과를 얻었다. 그리고, 그림 12를 보면, 표면 C의 주변은 계통수에 노출되어 산화막을 형성하고 있다. 본 장비를 사용하여 세척한 결과, 표면 C위에 있던 산화막이 상당히 많이 제거되었음을 시각적으로 확인할 수 있었다. 본 실험에서 사용한 세정장치의 사용범위는 기름이 주된 제거성분이지만, 산화막 제거에도 어느 정도 효과가 있음을 보여주고 있다. 세척 실험은 표면 A, B, C 순서로 세척하였는데, 표면 A에 비해 표면 B, C의 제거율이 떨어지는 이유는 실험장 내에 기체 오염물 방출구가 없었기 때문에, 제염 중 높아진 주변 방사능에 의해 재오염된 것으로 판단된다. 따라서 재오염을 방지할 수 있는 시설(기체 오염물 흡입기, 후드 등)을 설치하여 그

효과를 극대화 할 수 있다.

세척 실험 수행 중 시편 표면에 생성되는 얼음막을 제거하고 드라이 아이스의 승화를 돕기 위해 열풍기를 장착하여 세척과정 중에 사용하였다. 이로 인해 세척 효과가 상당히 증대되고 소모되는 이산화탄소의 양도 줄일 수 있는 결과를 얻었다.

5. 결론

표면에 흡착된 방사성 오염물을 제거하는 방안으로 드라이 아이스 눈 입자 세척법에 사용할 수 있는 이산화탄소 상변화 노즐을 개발하였다. 노즐의 종류별 특성과 노즐 설계 요건을 파악하여 이산화탄소의 상변화에 적합한 노즐을 설계 및 제작하였다. 제작한 노즐 내부의 유동을 열역학적 방법을 사용하여 유동 특성을 규명하였고, 눈 입자 형성공간을 조절함으로써 최적의 세척 효과를 얻을 수 있는 눈 입자의 생성 조건을 알아내었다.

드라이 아이스 눈 입자의 크기 및 수를 조절할 수 있는 노즐을 세정장치에 부착하여 세척 성능을 시험하였다. 먼저, 표면에 흡착된 오염기름을 대상으로 세척실험을 수행하였다. 그 결과, 이산화탄소의 유기성 물질에 대한 용해성으로 인해 오염 기름이 깨끗하게 세척되는 효과를 거두었다. 또한, 원자력 발전소에서 발생한 표면 방사성 오염물에 대한 세척 및 제염 효과에 대하여 실험을 실시하였다. 이 경우에는 표면 선량 감소율을 최대 약 82%까지 얻는 결과를 보였고, 원자로 계통수에 노출되어 산화된 산화막도 어느 정도 제거할 수 있는 효과를 거두었다. 또한 재오염을 막기 위하여 후드 등을 연결하여 장비를 개선할 수 있다.

원자력 발전소 내의 물 세척이 불가능한 고가의 전자 장비 및 계측기 표면을 세척할 때 본 연구에서 적용한 드라이 아이스 눈 입자 세척법을 사용한다면 뛰어난 세척 효과를 얻을 뿐만 아니라 2차 폐기물 발생을 근원적으로 줄일 수 있다. 현재, 외국에서는 드라이 아이스 눈 입자 세척법을 사용하여 반도체 웨이퍼(Wafer) 위의 미세 입자 세척과 병원 소독용 의료 장비, 식품 공장의 복잡한 기계장치 세척에 사용되고 있다.

본 연구에서 개발한 이산화탄소 상변화 노즐은 생성되는 눈 입자의 크기 및 수를 조절할 수 있어서 다양한 세척 환경에 적용 가능하다. 물 세척이 불가능한 곳, 드라이 아이스의 극저온 성질을 이용하여 소독이 필요한 곳, 미세 입자 제거가 필요한 곳, 그리고 표면의 굴곡이 심한 곳 등을 대상으로 하여 세척을 수행한다면 상당한 효과를 얻으리라고 예상된다. 근래에 환경 친화적 세척에 점차 관심이 확대되고 있는 추세이므로, 본 연구에서 개발된 장비 및 세척 방법에 대한 활용이 점차 커질 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 경희대학교 산학협력기술원 원자력기술 연구센터, “초임계 유체를 이용한 제염 방법 연구,” 과학기술부 (1999) 2.
2. “방사성 세탁배수관리 개선방안,” 영광원자력 제 1 발전소 (1994) 8.
3. Gordon J. Van Wylen, and Richard E. Sonntag, Fundamentals of classical

thermodynamics, John Wiley & Sons, (1990)

4. Applied Surface Technologies Web site, <http://www.co2clean.com>, 1998.
5. Walter H. Whitlock, William R. Weltmer, Jr., and James D. Clark, "U. S. Patents - 4,806,171," 1988.
6. 주동운, 정종현, 김선근, "얼음 미립자 제트에 의한 표면세척(I)-에어로졸의 제조와 저압 Impaction," 화학공학, 38 (1996) 346.
7. Dal-Sik Shin, Eui-Kyung Oh and Sun-Geon Kim, "Preparation of Polymer Particles in Aerosol-Phase Reaction," Aerosol Science and Technology 24 (1996) 243.
8. Applied Surface Technologies Web site, <http://www.co2clean.com>, 1998.
9. 박광현, "특허출원 No. 10-1999-0018741," 1999.
10. (주)브이·텍 부설 광계측 기술 연구소, "유동 및 광계측 장비", (주)브이·텍 (1998) 8.

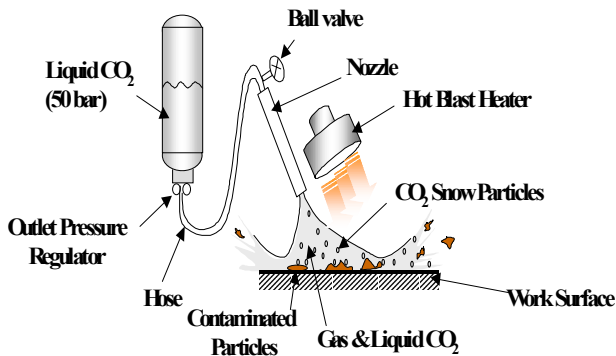


그림 1. 드라이 아이스 눈입자 세정장치도



그림 2. 장치 실물

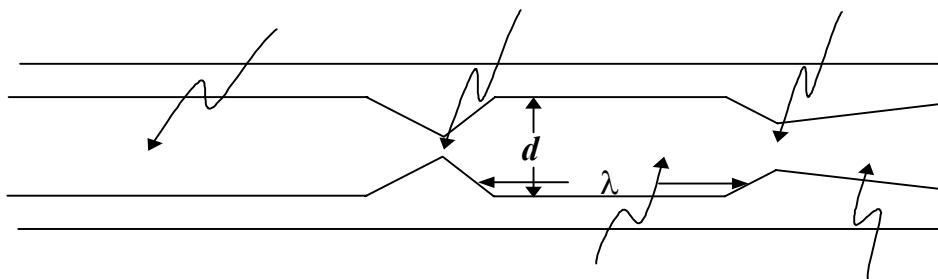


그림 3. 이산화탄소 상변화 노즐 단면도

- (① 입구공간, ② 입구관, ③ 드라이 아이스 눈 입자 형성공간,
④ 출구관, ⑤ 출구공간, d ; 형성공간 직경, l ; 형성공간 길이)

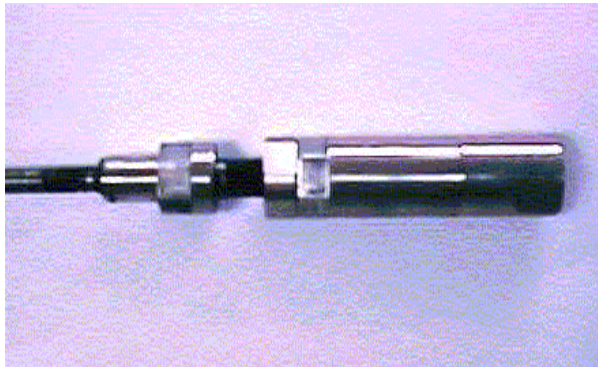


그림 4. 상변화 노즐 실물 1



그림 5. 상변화 노즐 실물 2

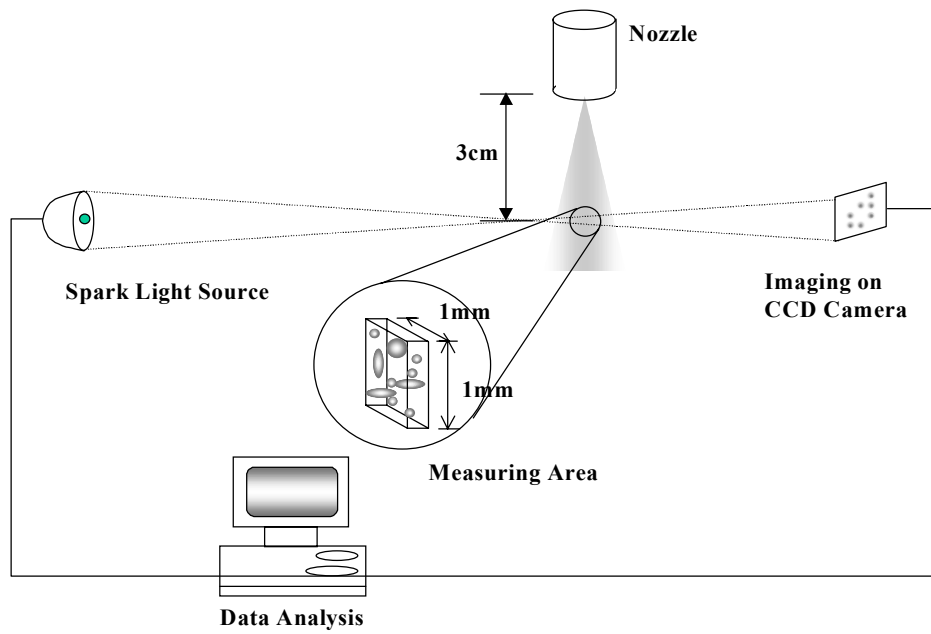


그림 6. 드라이 아이스 눈 입자 계측 방법

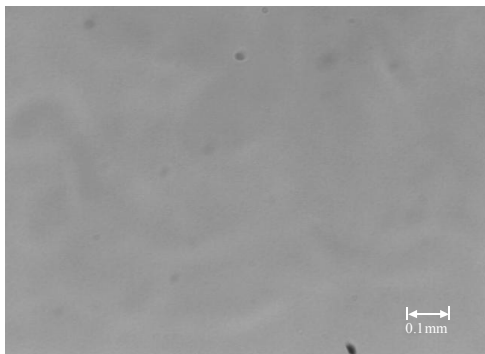


그림 7. 형성공간이 없을 때
드라이 아이스 눈 입자의 크기 및 분포

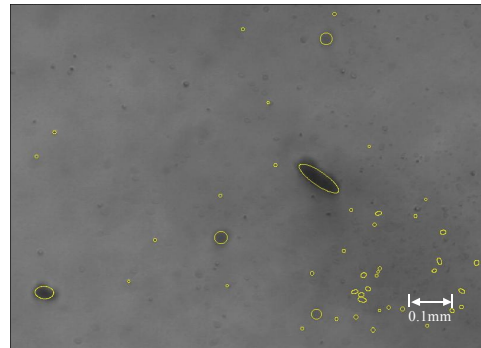


그림 8. 적정 형성공간을 갖을 때
드라이 아이스 눈 입자의 크기 및 분포

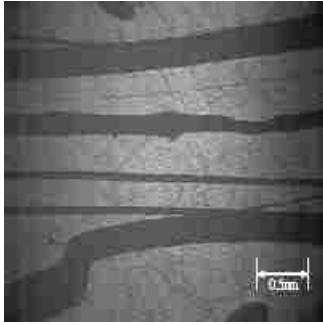


그림 9. 오염전 시편

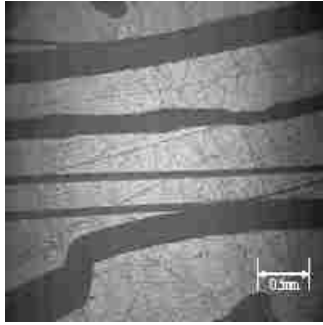


그림 10. 오염을 모사한 시편

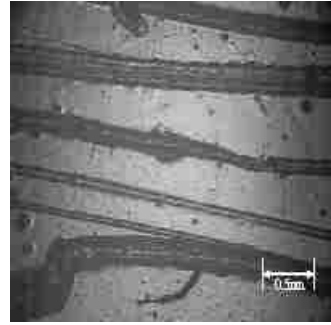


그림 11. 세척후 시편

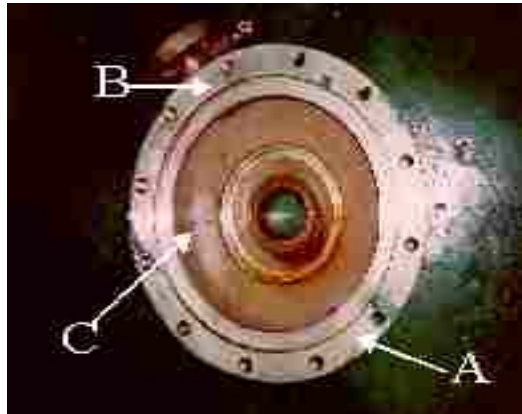


그림 12 감속재 펌프 하우징의 세척후 모습

표 1. 감속재 펌프 하우징의 드라이 아이스
눈 입자 세척법 전후의 표면선량

구 분	세척전($\mu\text{Ci}/\text{m}^2$)	세척후($\mu\text{Ci}/\text{m}^2$)	제거율(%)
표 면 A	0.28	0.05	82
표 면 B	0.26	0.15	42
표 면 C	1.21	0.65	46