

## 드라이 아이스 눈 입자 세척법을 이용한 표면 방사성 오염물 제염

### Surface Decontamination Using Dry Ice Snow Cleaning

류정동, 박광현  
경희대학교

이범식, 김양은  
한국전력공사 월성원자력발전소

#### 요 약

표면에 흡착되어 있는 방사성 폐기물을 제거하기 위하여, 현재는 물세척, 스팀분사 등의 방법을 사용하는 데, 이는 2차 폐기물을 대량으로 발생시키고 세척 과정중 표면을 손상시키는 단점이 있다. 이점을 해결하기 위해서 드라이 아이스 눈 입자의 크기 및 양을 조절할 수 있는 노즐을 제작하여, 드라이 아이스 눈 입자 세척법(Dry Ice Snow Cleaning)을 표면 방사성 오염물 제염에 적용하였다. 지문과 오염된 먼지 기름은 완벽하게 세척되었고, 표면 방사성 오염물의 경우에는 최대 제거율을 82%까지 얻었다. 물세척이 불가능하며 복잡하고 민감하고 고가의 전자 및 광학장비 그리고 계측기를 세척할 때 본 기술을 사용한다면 많은 효과를 얻을 것으로 기대된다.

#### Abstract

The water washing and steam blast cleaning method are currently used in nuclear power plants in decontamination. 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. Glass with finger prints and scratched acrylic plastics surface with adsorbed oil-dust mixture were tested to see the cleaning ability of the developed device. Traces of finger prints and oil-dust mixture could not be detected after cleaning. The radioactivity of pump housing in a primary system of Wolsung Nuclear Power Plant was also tested. 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

원자력 발전소에 제염은 필수적인 기술이다. 발전소 바닥, 벽, 소내의 계측기, 금속공구 및 전자 부품 등의 표면에 흡착되어 있는 방사성 오염물 제거에 있어 현재 물세척과 스팀분사 등의 방법을 사용하고 있다. 그러나, 이와 같은 기존의 제염법은 2차폐기물을 대량으로 발생시키고 제염대상물의 표면을 손상시키는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해, 미세 표면 세척에 사용되고 있는 드라이 아이스 눈 입자 세척법(Dry Ice Snow Cleaning)을 원자력 제염에 적용하였고, 표면에 흡착된 방사성 오염물 제거에 대한 타당성 여부를 검토하였다.

## 2 드라이 아이스 눈 입자 세척법의 원리

고압(약 50bar)의 액체 이산화탄소가 노즐을 통과하여 교축과정(Throttling Process)[1]을 겪으면, 작은 드라이 아이스 눈 입자가 생성되고, 고속의 기체 이산화탄소가 발생하여 미세 입자와 유기성 오염물을 제거하게 된다.(그림1 참조) 이러한 기술을 드라이 아이스 눈 입자 세척법(Dry Ice Snow Cleaning)이라고 한다. 이 기술의 세척원리는 다음 3가지로 나타낼 수 있다[2][3].

### 2.1 항력(Aerodynamic drag force)

고속으로 움직이는 기체 이산화탄소의 항력은 오염 입자의 표면에 가하여 진다. 오염 입자에 가해지는 항력이 오염 입자의 표면 접착력 보다 클 때 오염 입자가 제거된다. 이때, 입자의 직경이 감소함에 따라, 표면 오염 입자의 접착력은 커지고 기체 이산화탄소에 의한 항력은 점차 감소한다. 보통, 오염입자의 직경이 0.05mm이하인 입자는 항력만으로는 제거할 수 없다.

### 2.2 운동에너지 전달

드라이 아이스 눈 입자와 오염 입자가 서로 충돌하면서, 드라이 아이스 눈 입자가 갖고 있던 운동에너지를 오염 입자에게 전달한다. 이때 전달된 운동에너지가 오염입자의 표면접착력보다 크면 오염 입자는 제거된다. 오염 입자 제거 후 눈 입자는 곧 승화하고 승화한 기체를 수집하면 2차 폐기물 발생을 극소화 할 수 있다. 운동에너지 전달량은 오염물의 크기와는 무관하다.

### 2.3 액체 이산화탄소의 용해성

액체 이산화탄소는 유기물질과 비극성물질에 뛰어난 용해성을 갖고 있다. 드라이 아이스 눈 입자(고체)가 오염 입자와 충돌하면서 접촉면의 온도와 압력은 증가한다. 따라서 고체 상태의 이산화탄소는 순간적으로 액체 이산화탄소로 변하고 오염입자를 용해시킨다. 오염 입자를 함유한 체, 관성 충돌에 의해 튀어 오르면서 압력과 온도가 떨어져서 다시 눈 입자(고체)가 된다. 오염 입자를 함유한 눈 입자는 곧 승화하고 승화한 기체를 수집하면 2차 폐기물 발생을 극소화시킬 수 있다.

위와 같은 3가지 원리를 사용한 것이 드라이 아이스 눈 입자 세척법이다. 이것은 2차 폐기물 발생을 극소화시킬 수 있고, 세척하면서 발생하는 기존 제품의 표면손상을 최소화한다. 이러한 장점으로 인해 최근에는 반도체 웨이퍼(Wafer) 세척과 복잡하고 정밀한 장치(Vacuum system) 세척에 적용하여 실용화 단계에 있다[4][5].

## 3. 실험 및 논의

본 실험의 장치는 그림1에서 보여준다. 노즐을 통과한 고압의 액체 이산화탄소는 드라이 아이스 눈 입자를 생성시키고 고속의 이산화탄소 기체와 액체를 발생시켜 시편위의 오염물질을 제거한다.

### 3.1 노즐 제작

오염 물질을 효과적으로 제거하기 위해서는 눈의 크기를 증가시켜야 한다. 노즐내의 눈 형성공간을 변화시켜, 드라이 아이스 눈 입자의 크기를 최대로 얻을 수 있는 형성공간의 체적을 구하였

다. 본 연구에서 제작한 노즐은 눈 형성공간을 간편하게 조절할 수 있어, 눈의 크기와 양을 조절할 수 있다[6]. 그림2와 그림3은 노즐 출구에서 2cm 떨어진 곳의 드라이 아이스 눈의 크기 및 분포를 촬영한 사진이다. 그림2는 눈 형성공간의 체적을 최소로 했을 때의 모습이다. 형성된 눈 입자를 거의 발견할 수 없었다. 그림3은 형성공간의 체적이 적정할 때의 사진이다. 형성된 눈 입자는 고르게 분포하고, 눈의 평균 직경은 대략  $10.7\mu\text{m}$ 으로 나타났다. 눈 형성공간의 크기는 눈 입자의 크기와 직접적인 관계가 있음을 알 수 있다.

### 3.2 노즐 성능 실험

#### 3.2.1 지문 세척 효과

표면에 흡착되어 있는 유기물 중에는 사람의 지문이 존재한다. 정밀하고 민감한 광학 및 전자 부품의 경우에는 지문 제거가 필수적이다. 따라서, 지문으로 오염된 시편을 제작하여 개발된 장치로 세척 실험을 수행하였다. 깨끗하고 매끈한 유리 표면 위에 일정한 힘으로 사람의 지문을 남긴 후 현미경으로 촬영하였다. 세척전의 시편이 그림4이고 고압의 공기를 고속으로 2분간 분사하며 세척한 시편이 그림5이다. 그림4와 그림5를 비교해 볼 때 차이점을 발견할 수 없다. 공기는 흡착된 유기성 지문을 전혀 제거할 수 없기 때문이다. 그러나 그림 1의 실험 장치를 사용하여 2분간(사용한 이산화탄소 240g)드라이 아이스 눈 입자 세척법을 시행한 후 그림 6과 같은 결과를 얻었다. 드라이 아이스 눈 입자 세척법의 이산화탄소 용해성으로 인해 유기성 지문을 완벽하게 제거하기 때문이다.

#### 3.2.2 오염 기름 제거 효과

국내 원전 및 일반 산업 현장에서는 윤활유 등의 기름류와 먼지에 의해 공구, 전자 제품, 계측기, 기계, 벽 등이 오염된다. 본 연구에서는 현장의 오염물을 다음과 같은 방법으로 모사하여 시편을 제작하였다. 먼저, 일반 환경중에서 발생하는 점유형 먼지와 그리스유(grease 油)를 무게비 1:100 비율로 잘 혼합하여 오염된 기름을 제작하였다. 그리고 오염된 기름이 좁은 틈새로 흡착되는 것을 모사하기 위해 표면이 매끈한 아크릴 판 위에 사포(sand paper) 180을 사용하여 일정한 압력으로 거칠기를 주어 오염전의 깨끗한 시편을 만들었다.(그림7) 그리고, 거칠기를 준 아크릴 판 위에, 앞서 제작한 얇은 막의 오염된 기름을 일정한 압력으로 흡착시켜 오염된 시편을 제작하였다.(그림8) 이렇게 제작된 시편을 대상으로 그림1의 실험 장치를 이용하여 세척을 시행하였다. 이때 사용된 이산화탄소의 질량은 240g(질량유량 2g/s로 2분간 세척)이다. 세척과정중 이산화탄소 눈 입자는 약  $-80^{\circ}\text{C}$ 로 냉각되어 시편 표면에 얼음막을 형성한다. 이 얼음막은 세척을 방해하는 요소로 작용하는 데, 이를 제거하기 위해 고체 이산화탄소의 승화열( $573.02\text{J/g}$ ) 이상의 열에너지를 공급하면서 세척을 실행하였다. 위와 같은 간단한 과정을 겪은 시편은 그림9에서 보이는 것처럼 오염 전 시편 이상의 수준으로 깨끗해 졌음을 알 수 있다.

#### 3.2.2 방사성 오염 물질 제거 효과

개발된 노즐의 현장 적용가능성을 확인하기 위해, 월성원자력발전소 1호기에서 발생한 감속재 펌프 하우징을 시험대상으로 삼았다. 방사능에 오염된 감속재 펌프 하우징의 표면 세 곳을 선택하여 스메아법(smear method)으로 세척 전후의 표면선량을 계속하여 비교하였다. 그리고, 표면 A, B, C 각각의 지점에 사용된 이산화탄소의 질량은 240g으로 동일하였다. 그 결과는 표1과 같다.

| 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     |

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

표1에 나타난 것과 같이 표면 세척 후 표면 방사선량이 감소된 것으로 나타났으며, 드라이 아이스 눈 입자 세척법이 방사성 오염물질 제거에 적용될 수 있음을 확인하였다. 그림10을 보면 표면 C의 주변은 계통수에 노출되어 산화막을 형성하고 있다. 본 장비를 사용하여 세척한 결과, 표면 C위에 있던 산화막이 상당히 제거되었음을 알 수 있다. 본 장비의 기름 성분이 주된 제거 성분이지만, 산화막제거에도 어느 정도 효과가 있음을 알 수 있다. 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)을 설치한다면 그 효과는 더욱 클 것으로 기대된다.

### 3.3 적용분야

본 기술은 원래 고도의 청정도와 정밀도를 요구하는 전자 및 광학 분야의 세척을 하기 위해 개발되었다. 이 분야에서 사용되는 세척장치는 대단히 복잡하고 높은 제작비용을 수반한다. 본 연구에서는 위 기술의 핵심적 사항인 노즐을 원자력 분야에 적용 가능하도록 고안하였고, 간단하고 사용이 간편한 드라이 아이스 눈 입자 세척기를 개발하였다. 이렇게 개발된 장치는 표면 오염물질 제거 필요성이 대두되는 곳에 모두 사용할 수 있다. 특히 물세척이 불가능하거나 표면이 굴곡이 많고 복잡한 기계와 정밀하고 민감한 전자 장비 부품을 세척할 때 본 장비의 효과가 클 것으로 예상된다.

## 4 결 론

표면에 흡착된 오염물을 제거하는 방안으로 드라이 아이스 눈 입자 세척법의 타당성을 연구하였다. 눈 형성공간의 체적을 조절하여 생성되는 눈의 양과 크기를 조절할 수 있는 노즐을 개발하였고, 그 노즐의 성능에 대해 검토하였다. 본 장비는 고압의 공기로도 세척이 불가능한 유리 평면 위의 지문을 깨끗이 제거하고, 기름과 먼지로 오염된 장비의 표면을 모사한 시편위의 오염물을 깨끗이 세척할 수 있다. 방사능에 오염된 시편에 적용한 결과 방사선량 감소율을 최대 82%까지 올릴 수 있었다. 본 기술을 물세척이 불가능하며 복잡하고 민감한 고가의 전자 및 광학 장비 그리고 계측기를 세척하는 데 사용한다면 매우 좋은 효과를 얻으리라고 전망된다.

## 감사의 글

본 연구에 도움을 주신 주식회사 V.Tek의 이 은일 과장, 박 종원 연구원과 경인가스공업주식회사의 이 효제 이사께 감사 드립니다. 본 연구는 기초전력공학공동연구소의 단기자유과제로 지원 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Gordon J. Van Wylen, and Richard E. Sonntag, Fundamentals of classical thermodynamics, John wiley & Sons, (1990)
- [2] David. E. Moore, U. S. Patents 4,744,181, (1988)
- [3] Applied Surface Technologies Web Site, (1998)
- [4] L. Layden, and D. Wadlow, High velocity carbon dioxide snow for cleaning vacuum system surfaces, J. Vac. Sci. Technol. A8, (1990), 3881-3883
- [5] Robert sherman, John Grob, and Walter Whiltlook, Drysurface cleaning using CO<sub>2</sub> snow, J. Vac. Sci. Technol. B9, (1991), 1970-1977
- [6] 박광현, 특허출원중, (1999)
- [7] Particle Motion Analysis System(MX-II)으로 촬영, (주)브이·텍 제조

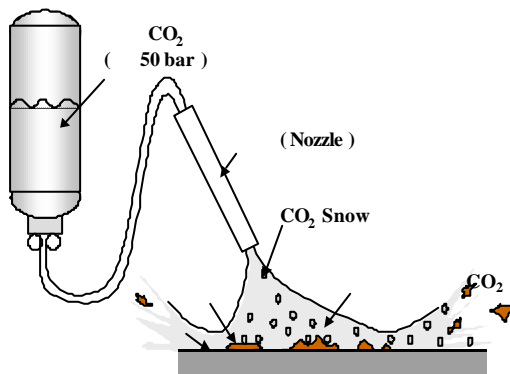


그림 1 드라이 아이스 눈 입자 세척 장치도

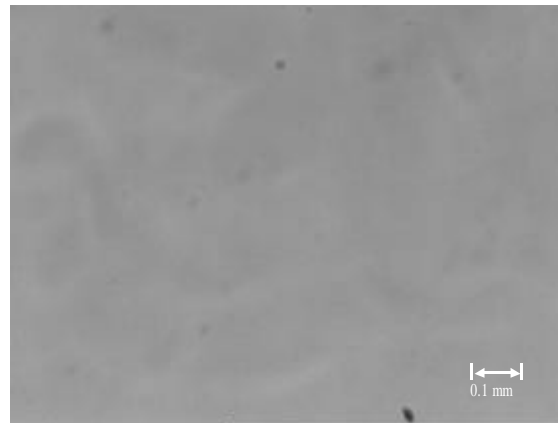


그림 2 .형성공간이 없을 때 드라이 아이스 눈 입자의 크기 및 분포[7]

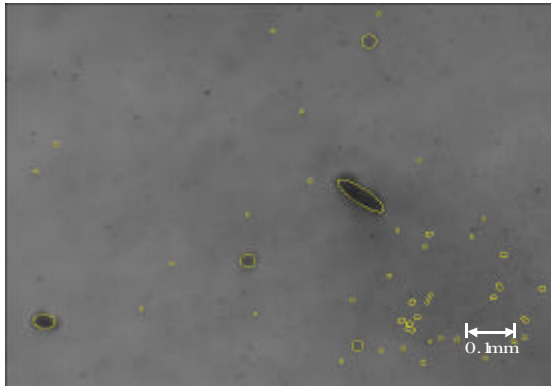


그림 3 . 적정 형성공간을 갖을 때  
드라이 아이스 눈 입자의 크기 및 분포 [7]

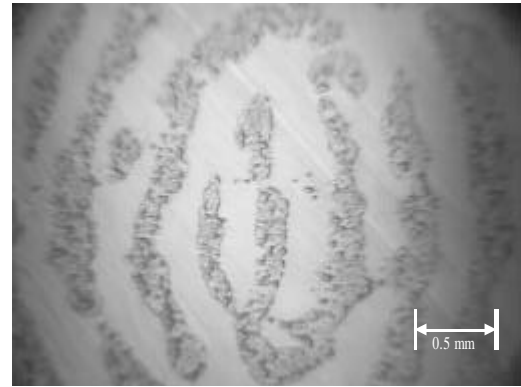


그림 4 . 세척전 유리판 위의 지문

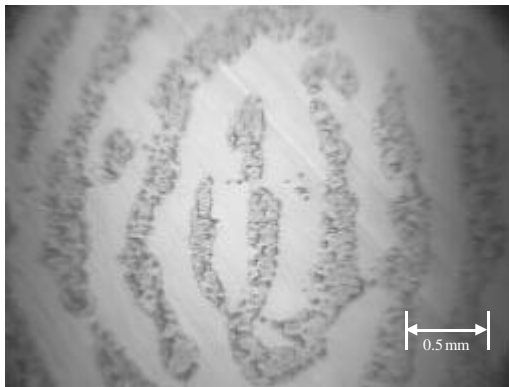


그림 5 . 고압공기로 세척 후의 지문



그림 6 . 드라이 아이스 눈  
입자 세척후 시편

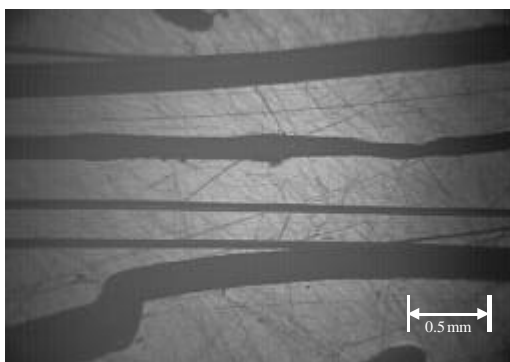


그림 7 . 오염전 시편

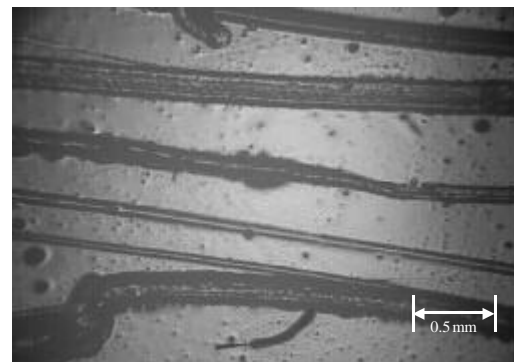


그림 8 . 기름 오염을 모사한 시편

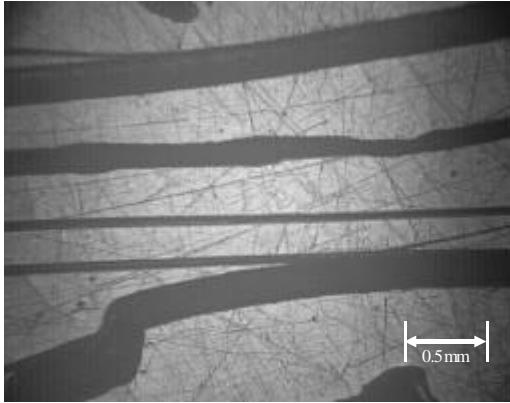


그림 9. 드라이 아이스  
눈 입자 세척후 시편의 모습

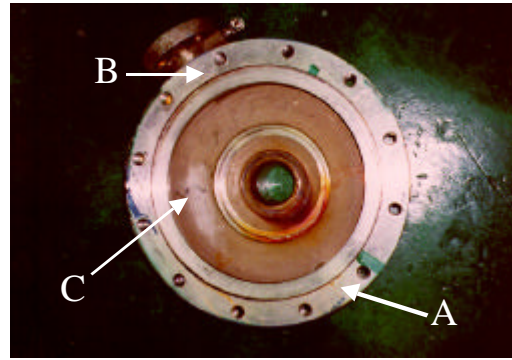


그림 10. 감속재 펌프 하우징의  
세척후 모습