

가속 드라이아이스 snow impact에 의한 도막 제거속도의 측정

나영민 · 김호태 · 김선근*

흑석동 221 중앙대학교 화학공학과 우)156-756 서울특별시 동작구

(접수일자 : 2004. 9. 15 / 채택일자 : 2004. 10. 20)

Measurement of Coating Removal Rate of Accelerated Dry Ice Snow Impact

*Young Min Na, Hotae Kim and Sun-Geon Kim**

Department of Chemical Engineering

Chung Ang University

요 약

드라이아이스 스노우 젯(dry ice snow jet)을 액체 이산화탄소의 고압팽창에 의해 만들고 운반기체에 의해 더욱 가속시킬 수 있었다. 코팅의 제거기구는 표면 오염입자의 그것과 크게 다르지 않았다. 코팅의 제거를 Hutchings 식으로 정량적으로 표현할 수 있었다. 이들 식에 의한 plot에서 얻은 두개의 매개변수로 코팅의 제거속도와 단위 이산화탄소의 질량에 의해 제거된 비 코팅면적을 예측할 수 있었으며 아울러 실험데이터의 신뢰도와 실험 에러의 보정도 가능하게 되었다. 노즐 기관 거리와 노즐길이를 바꾸었을 때 얻어진 이들 plot이 한점에서 만날 수 있음을 알 수 있었으며 이점이 jet plume을 모음에서 얻어진 scar 반경의 증대효과와 jet를 확산시킴에서 얻어진 scar 반경 증대효과가 균형을 맞추는 데서 얻어진 것으로 판단된다.

ABSTRACT : Dry ice snow jet was produced by high-pressure expansion of liquid carbon dioxide and subsequent acceleration by carrier gas flow. Removal mechanism for coating was not so different from that for contaminating particles on the surface. The removal of coating was quantitatively described by Hutchings' equation. The two parameters obtained from the plot, were used to predict the removal rate or the specific coating area removed by a unit mass of carbon dioxide. Their values also enhanced the reliability of the experimental data and enabled the experimental errors corrected. Hutchings' plots obtained with various values of either stand-off distance or nozzle length tends to meet apparently at a single unique point at which the scar-size enlargement by focusing jet plume was balanced with that by spreading it.

Key Words: dry ice snow jet, Hutchings' equation, coating removal rate, specific coating removal area.

1. 서 론

세정공정은 각종 물리적 방법이나 화학적 방법을 동원하여 표면에 퇴적된 불순물을 제거하는 공정이다. 이는 최종 제품의 질을 유지하는 데는 물론 재료나 중간제품으로서 후속공정의 원활한 수행을 위해 거의 모든 산업에서 필요불가결의 요소공정이다[1]. 그러나 기존의 염소계세정제(TCE ; Trichloroethylene, CFC ; Chlorofluorocarbon))는 물론 그 대체 물질로 수계(알칼리계, 중성계), 준수계(탄화수소계), 용제계(알코올, Ester계, 탄화수소계) 세정제 역시 환경적으로 약간의 문제를 갖고 있다. 따라서 화학 세정제를 대신하기 위한 대체세정법의 개발이 다방면에서 활발히 추진되고 있다[2]. 이 중 하나인 드라이아이스 세정은 환경 친화적 특성으로 인해 오염물질의 발생을 원천적으로 줄일 수 있는 청정 생산 가공 기술로 각광을 받고 있다. 이 기술은 기존의 화학적, 기계적 cleaning 방법들이 발생시키고 있는 많은 오염원, 즉 입자분진, 소음, 유독성 화학용제, 세정 후 폐기물 등의 배출이 전혀 발생하지 않아 환경적 충격(environmental impacts)이 없는 청정 세정 기술(green technology)이다.

교축밸브를 통한 고압 액체 이산화탄소의 팽창을 이용한 snow 세정장치의 출현은 1984년 Kashu 등[2]에 의해서였고 이후 반도체 공정에서의 세정공정에 관하여 실무적인 관점에서 팔목할 만한 연구가 이루어져왔다[3][4][5][6][7][8][9]. 그러나 상대적으로 이론적 연구가 출현한 것은 Miller [10]의 업적이었다. 그러나 너무나 이론적인 탓에 이 이론은 실제적인 현상과는 상당한 괴리가 있어 보다 심화된 연구가 이루어지거나 접근 방식의 전환 같은 노력이 필요하다 하겠다.

이 같은 관점에서 본 연구는 보다 실제적이면서도 이론에 바탕을 둔 세정속도의 정량화 방안을 중점적으로 탐구하였다. 여기에는 Hutchings 등[11][12]이 개발한 식을 이용하였다. 이와 같은 접근은 Hutchings 식의 타당성을 입증하는 측면도 있지만, 드라이아이스 snow 세정의 세정력, 또는 세정속도를 객관화하여 다른 세정방법, 즉 화학적 세정, 초임계 세정 등의 속도와 비교할 수 있는 기틀을 마련할 수 있으리라 본다. 본 연구를 통해서 드라이아이스

snow를 이용한 blasting에서 중요 변수, 즉 드라이아이스 질량속도, 가속을 위한 운반기체의 유량, 노즐-기관간 거리, 드라이아이스 snow의 분산을 조절하기 위한 노즐의 길이가 Q_c 로 대표되는 세정속도 와 세정 조건을 표현하는 focus coefficient β 의 값에 미치는 영향을 체계적으로 살필 수 있게 되었다. 그리고 세정대상이 되는 표면 후막의 특성 가운데 후막 두께와 aging 도에 따른 세정효과를 살필 수 있었으며, 이를 통해 이 방법을 표면의 기계적 특성을 알 수 있는 방법으로도 적용될 수 있음을 알게 되어 표면 특성의 탐구에도 이용할 수 있음을 보였다.

2. 이론 및 실험

2.1 Blasting 성능의 정량화 - Hutchings의 식

Blasting에 의해 표면을 impact하면 표면에 붙어 있는 coating은 벗겨지게 되고 코팅이 완전히 벗겨지면 코팅의 바닥이 드러난 소위 scar radius r 을 얻게 된다. 이 반경은 사용한 blasting media의 질량 m 이 늘어남에 따라 점점 커지게 된다. Hutchings의 식은

$$r = \frac{h}{\beta} \ln(m) - \frac{h}{\beta} \ln\left(\frac{2\pi h^2 Q_c}{\beta^2}\right) \quad (1)$$

여기서 h 가 노즐 끝에서 기관까지의 거리, m 은 분사된 blasting media의 질량, scar 반경 r 을 제거하는데 필요한 드라이아이스의 임계질량이 Q_c , β 는 초점계수(focus coefficient)라 부르며 드라이아이스 plume의 분산 (spread)을 나타낸다. 이 값은 노즐-기관 간 거리 h 에는 무관하게 되나, 노즐의 종류 및 형태(길이, 반경, 표면의 거칠기 등), 입자 종류, 입자들의 속도가 달라짐에 따라 변화한다. 이 식에서 알 수 있듯이 입자 plume으로 가해진 입자들의 총질량 m 이 증가함에 따라 그 대수 값에 대해 패어진 scar의 반경을 측정하여 plot하면 직선이 얻어지고 이의 기울기(S)와 절편(I)에서 Q_c 와 β 의 값이 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\beta = \frac{h}{S} \quad (2)$$

$$Q_c = \frac{\beta^2}{2\pi h^2} \exp\left[-\frac{l\beta}{h}\right] \quad (3)$$

이 식을 드라이아이스에 적용시키는 데는 정확히 드라이아이스로의 전환율을 알아서 소비된 전체 이산화탄소의 값에 곱해 줌으로써 알 수 있지만 정확한 이산화탄소로의 전환율을 알 수 없을 뿐 아니라 주어진 공정변수, 즉 운반기체의 유량, 노즐의 길이, 기관-노즐 간 거리, 필름의 두께 및 숙성도 (aging)에 대해 이산화탄소의 드라이아이스로의 전환율 f 는 전혀 영향을 받지 않을 것이기 때문에 이산화탄소의 사용량으로 계산해도 β 값의 의미는 전혀 훼손되지 않을 것으로 본다. 따라서 본 연구에서는 (1)식에서 m 을 실린더로부터 소비된 액체 이산화탄소의 전체 질량 M 으로 보고 계산하였다. 엄밀히 고려한다면 m 과 M 은 전환율 f 에 의해

$$m = fM$$

로 구해지며 정확한 전환율이 결정되면 (1)식은

$$r = \frac{h}{\beta} \ln(M) - \frac{h}{\beta} \ln\left(f \frac{2\pi h^2 Q_c}{\beta^2}\right)$$

이 되고 앞서의 가정대로 구한 Q_c 는

$$Q_c = fQ_c$$

가 되어 실제 값에 전환율을 곱해서 그만큼 감소된 값으로 얻은 것이 된다.

2.2 실험

(1) 실험 장치

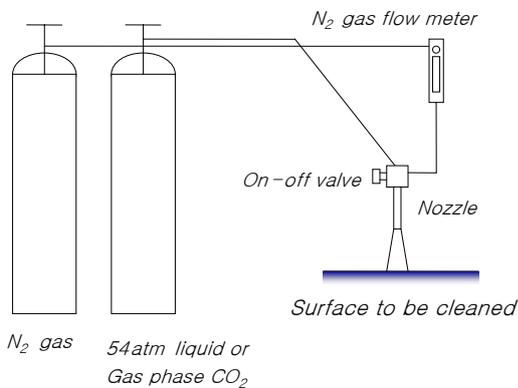


Figure 1. Schematics of dry ice snow cleaning system for removal of coating film.

본 연구에 필요한 공정도는 Figure 1과 같다. 액체 CO₂를 공급할 수 있는 CO₂ 사이폰(Syphon) 실린더와 운반기체를 공급하는 액체 N₂ 니콘(Nikon) 저장탱크(Tank)가 있다. CO₂ 실린더의 액체 CO₂ 저장량은 20kg이고 실린더 압은 50~55 kgf/cm²이다. N₂ 저장탱크의 액체 N₂의 저장량은 160kg이고 탱크 압은 최대 16 kgf/cm²까지 liquid N₂를 기화시켜 상압시킬 수 있고 본 실험에서는 6 ~ 7 kgf/cm²로 유지하였다. CO₂와 N₂는 각각 내경 $\frac{1}{4}$ inch, 길이 5m 단열 튜브(tube)를 통해 특수 설계된 노즐에서 섞여 노즐 밖으로 토출하게 된다. 단열 튜브 내에서 N₂는 기체 상태이고 CO₂는 액체가 대부분인 기·액상태라 생각되며 이는 N₂는 이미 저장탱크에서 기화되어 나온 것이고 CO₂는 노즐에서 단열팽창 되기 전까지 CO₂ 실린더의 액체로 뽑아낸 상태와 같기 때문이다. N₂의 유량은 Dewyer사의 유량계(RMB-180L, RMC-800L)를 사용해 제어하고 CO₂의 공급량은 Swagelok사의 정량밸브(SS-4MG-MH)을 사용해 정밀하게 공급량을 제어하였다. 이 과정을 통해 노즐에서 토출된 N₂(운반기체)+CO₂(세정 source) 혼합물은 준비된 시료 입자와 막을 세정하게 된다.

(2) 제트 강도의 측정

Strain gauge를 이용하여 드라이아이스 제트의 impact stress를 직접 측정하였으며 이를 운반기체의 유량 및 사용 이산화탄소의 양의 함수로 구하였다.

(3) 오염기관의 제작과 세정 실험

가. 막의 제작 및 특성 실험 방법

본 실험에 사용될 막은 1.5mm두께의 Aluminium 기관(210 mm*300 mm)에 Lacquer형 은분페인트 (동서 화학, 상표등록번호 52355, 앞으로 Coating D라 부름)를 일반적인 분무 방법으로 기관으로부터 30 cm 거리를 유지하여 4~5초간 분무하여 제조한다. 보일유 및 알키드 수지 도료 (삼화페인트 Co., model명 ; SB-P-18, 앞으로 Coating S라 부름)형 은분페인트는 bar coater No.26을 사용하여 막을 제조한다. 이후 이들을 실온에서 30시간 건조하여 용매를 날리고 굳은 막을 얻을 수 있었다.

퇴적된 막의 두께는 coating thickness gauge (Elcometer Instruments Ltd., A456FNFB51)로 측정하였으며, 드라이아이스 snow impact 후 막의 분포를 시간의 경과에 따라 surface texture measuring instrument (Tokyo Seimitsu Co.)로 표면을 scan하였다.

막의 부착력 test는 107 Cross Hatch Cutter (Elcometer Instruments Ltd.)를 BS EN ISO[국제 표준협회 (International Standard Organization)] 2409, ASTM[미국재료시험협회 (American Society for Testing and Materials)] D3359-B의 방법과 결합하여 측정하였다.

나. 세정과정의 관찰

한편 막의 경우, 금속현미경 (Nikon, Eclipse Me 600)을 이용하여 입자 jet에 의해 손상이 된 막의 형상을 관찰하여 막의 제거 기구를 추적하는 데 중요한 정보를 얻을 수 있었다. 그리고 profile meter (Tokyo Seimitsu Co., surface texture measuring instrument)를 이용하여 후막의 제거 과정을 두께 분포를 측정함으로써 살필 수 있었다.

다. 세정속도의 정량화 실험

실험에서 시간에 따라 scar 반경의 값을 주어진 조건에서 5초 간격으로 측정하였다(이 시간은 scar의 형성속도에 따라 추후 시간 간격을 조정). 이 때 한 지점에 대해 5초 간격으로 연속적으로 측정하게 되면 제트의 impact가 계속되는 동안에 직접 반경 측정이 힘들고, 측정시마다 제트를 멈추게 되면 막과 기관의 냉각-수축에 따른 예상치 않은 변화까지 떠안게 되므로 번거롭지만 각각의 시료는 5초, 10초, 15초 간격의 서로 다른 위치에서 별도로 얻었다. 여기서 구한 $\ln m$ 과 r 의 관계를 plot 하여 기울기와 절편을 구하여 이로부터 단위 면적의 코팅을 벗겨내는데 필요한 최소 이산화탄소의 질량 Q_c 와 입자들의 특성 및 노즐 특성에 의해 결정되는 focus coefficient β 를 구하였다. 사용한 공정 변수는 이산화탄소의 질량유량, 가속을 위해 사용한 운반기체의 유량, 노즐의 길이 (이때 노즐의 재질, 제조회사, 반경은 고정), 노즐-기관간 거리 (stand-off distance)가 upstream의 변수이었고 세정대상이 되는 기관의 변

수로는 기관에 입혀진 코팅 막의 종류(부착력을 1차적인 공정변수로 잡음), 코팅 막의 두께, 그리고 그 막의 속성도를 대상이 되는 기관의 변수로 잡았다. 이들이 Q_c 와 β 에 미치는 영향을 정량적이고 체계적으로 살펴 드라이아이스 snow 세정의 특성과 세정속도의 정량화를 보다 객관적이고 가시적이며 비교 가능한 데이터로 만드는 데 주력하였다. 여기서 제거된 막 면적의 반경, 즉 scar 반경 측정에서 구형에서 벗어나는 경우, 최장 직경과 최단직경의 기하학적 평균치를 사용하였다. 실험에서 한 개의 변수효과를 볼 때 다른 변수들은 고정하고 그 변수만 바꾸었다.

3. 결과 및 검토

3.1 오염코팅의 특성분석

실험에 주된 Lacquer막을 20, 30, 40, 60, 100 μm 로 고른 분포로 만들 수 있었다. 막의 두께 분포는 평균치 20 μm 에서 $\pm 3 \mu\text{m}$ 의 오차를 가지고 있었으며, 그 가운데서도 $\pm 1 \mu\text{m}$ 범위에 있는 막의 부위만을 세정 실험에 사용하였다. 드라이아이스 snow는 부착력이 ASTM 규격으로 "3B" 이하의 코팅을 효과적으로 제거할 수 있었다.

3.2 코팅제거의 일반적 관찰

Figure 2는 앞서 기술한 profile meter를 이용하

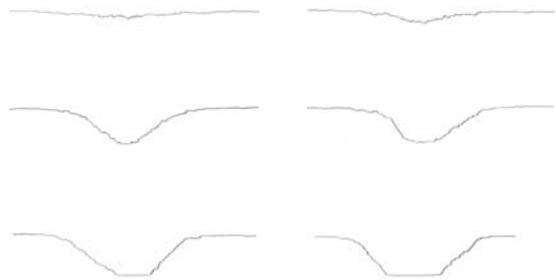


Figure 2. Thickness distribution of 100 μm coating D film impacted by dry ice snow jet according to time, otherwise under reference conditions.

1st row- (L) 5s; (R) 10s; 2nd row-(L) 15s; (R) 20s; 3rd row-(L) 25s; (R) 30s

여 시간 별로 드라이아이스 snow jet의 impact를 받은 후막의 단면을 보인 그림이다. 예상되는 바와 같이 가운데부터 흠집이 나기 시작하여 주변으로 번지게 되며 가운데부터 패여서 scar radius로 측정 가능하게 됨을 보여준다. 이에 사용한 표면 막은 코팅의 상황을 정확히 묘사하기 위해 표준 조건보다 두꺼운 100 μm 두께의 것을 사용하였다.

3.3 공정변수의 효과

(1) 이산화탄소 공급 속도의 효과

먼저 실린더로부터 needle valve를 통한 이산화탄소의 공급 속도가 세정력에 미치는 효과를 살펴 보았다. Figure 3에는 impact 시작 30s 동안에 이산화탄소의 공급 유량에 따라 보다 견고한 은분 페인트 (Coating S) 도막의 제거 과정을 금속현미경으로 찍은 사진이다. 그림에서 시간이 경과함에 따라 표면의 훼손 (irritated)이 눈에 띄며 그러다가 표면이 거북이 등처럼 갈라지기 시작하면서 처음에는 큰 crack, 나중에는 작은 crack의 형성을 볼 수 있으며 마침내 갈라진 부분이 박편 상으로 제거됨을 알 수 있다. 낮은 드라이아이스 유량에서는 부위가 작으나 깊이 커질

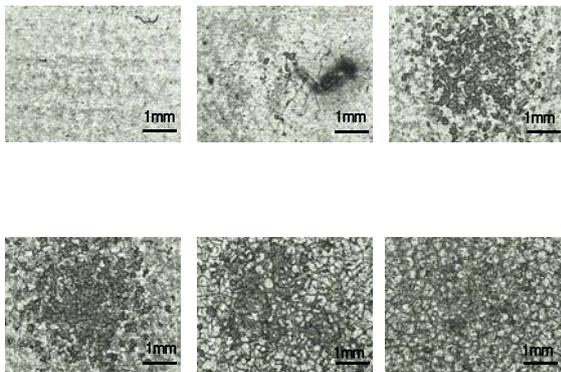


Figure 3. Micrographs of impacted area on 20 μm coating S at different CO₂ supply rates after 30s, otherwise under reference condition. Bars are representing for 1mm. (Above) from left to right; 6.05 g/min; 15.1 g/min; 30.3 g/min; (Below) from left to right; 45.4 g/min; 60.5 g/min; 75.6 g/min.

수록 부위는 늘어난다. 따라서 표면에서부터 layer-by-layer로 세정되는 일반적인 화학세정과는 달리 드라이아이스 snow jet의 경우 irritation - crack formation - crack removal의 순서로 후막의 제거가 일어남을 확인시켜 준다.

(2) 운반기체 유량의 영향

다음으로 plume 및 세정표면의 관찰과 impact stress의 측정을 통하여 드라이아이스의 유속을 더욱 빠르게 가속하기 위해 사용한 정제된 공기의 유량이 제트 plume의 형성과 세정속도에 미치는 영향을 알았으며 마지막으로 Hutchings의 식을 통해 정량적으로 살펴보았다. 운반기체의 유량 증가에 따른 에어로졸 plume의 농도 희석 현상을 육안 관찰할 수 있었다. Figure 4는 드라이아이스 snow jet의 impact stress 변화를 이산화탄소의 질량 공급 속도를 바꾸면서 운반기체의 유량을 매개변수로 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 변수들에 따라 0.05에서 0.55 Kg/cm²의 stress를 얻을 수 있으며, 운반기체의 유량이 증가할수록 그 값이 증가하고 있다. 그러나 이산화탄소의 유량의 효과는 80 L/min까지는 impact stress가 꾸준히 증가하고 있으나 90 L/min을 넘게 될 경우 공급 이산화탄소의 유량이 높을 때 오히려 그렇지 않은 때보다 조금 감소함을 알 수 있다. 이는 금속 현미경 사진에서도 확인 할 수 있는데

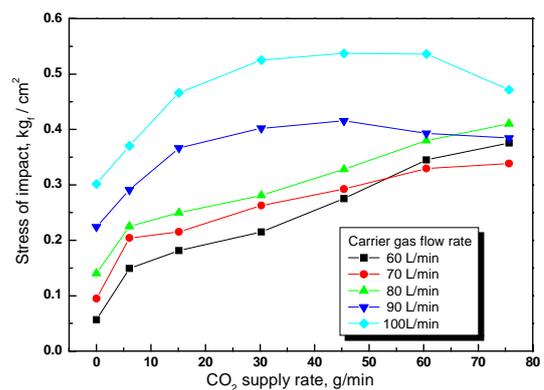


Figure 4. Effect of CO₂ supply rate on stress of impact as a parameter of carrier gas flow rate, otherwise under reference condition.

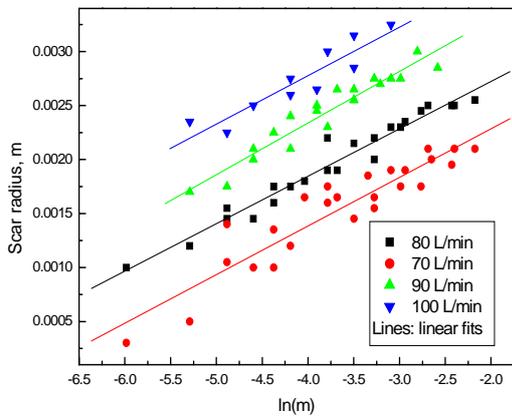


Figure 5. Plot of scar radius vs. logarithm of CO₂ supply mass for various carrier gas flow rates. Standoff distance=3 cm.

이산화탄소의 유량이 지나치게 높아지거나 운반기체의 유량이 너무 커지면 드라이아이스 입자들의 충돌(농도 증가 또는 난류에 의한)이 심해져 드라이아이스 입자가 가지던 운동에너지가 다른 드라이아이스 입자들과의 충돌에 의해 많이 소모됨으로 인하여 충분한 impact를 내기 힘들기 때문이다.

Figure 5에는 scar 반경을 이산화탄소의 총 소모 질량의 대수치 (ln m)에 대해 plot 한 그림으로 운반기체의 유량을 매개변수로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 흥미로운 것은 운반기체의 유량변화에 따른 각각의 직선이 거의 동일한 기울기를 나타낸다. 이는 곧 focus coefficient인 β의 값이 운반기체의 유량에 따라 변하지 않음을 뜻한다. 이는 노즐의 길이가 고정되어 있을 때 운반기체의 유량이 증가할수록 plume의 spread가 줄어든다는 일반적인 경향을 따르지 않음을 의미한다. 즉 노즐-기판 거리가 3 cm로 고정된 경우 운반기체의 유량이 증가하여 70 L/min을 넘어서게 되면, 더 이상 증가해도 입자의 focusing 또는 제트의 spread에 전혀 영향을 주고 있지 않음을 보여주는 결과이다. 그러나 절편은 모두 다르므로 단위면적의 해당 코팅을 벗겨 내는데 필요한 임계 이산화탄소의 공급 질량 Q_c는 달라짐을 보여준다. 실제 기울기와 절편에서 구한 값이 운반기체의 유량에 따라 변하는 그림이 Figure 6이다. 이 그

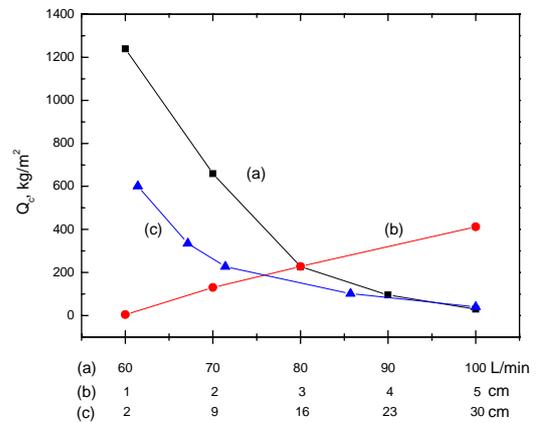


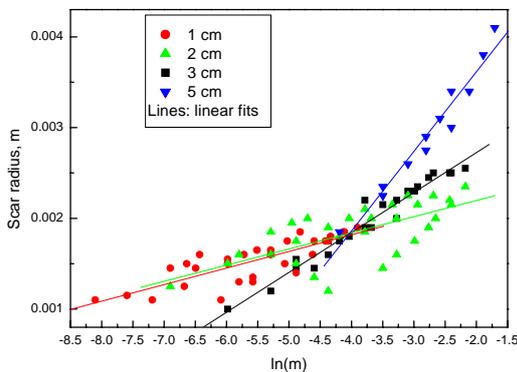
Figure 6. Effect of carrier gas flow rate on mass of CO₂ required to remove unit area of coating. (a) carrier gas flow rate; (b) standoff distance; (c) nozzle length.

림에서 운반기체의 유량이 70 L/min에서 660 kg/m² 이던 Q_c 값이 100 L/min으로 증가하면 40 kg/m²으로 급격히 감소하여 단위 면적의 코팅을 벗겨내는데 필요한 이산화탄소 소모량이 운반기체의 유량의 값이 증가할수록 민감하게 감소하고 있음을 나타낸다. 이는 운반기체의 유량 증가가 spread에 영향을 주지 않지만 드라이아이스 입자의 가속을 더욱 증대시켜 실제 impact를 크게 만들기 때문으로 풀이된다.

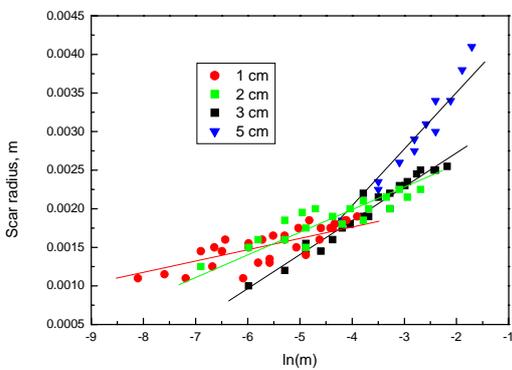
(3) 노즐-기판 간 거리의 영향

노즐-기판 간 거리에 상관없이 노즐에서 오는 plume의 spread는 일정할 것이므로 focus coefficient β에 영향을 주지 않을 것이나 임계 이산화탄소 소비량 Q_c에는 영향을 줄 것으로 예측된다. 이는 결과적으로는 그 경향에 있어 앞서의 운반기체의 유량효과와 같은 효과이다. 노즐-기판의 거리가 멀어질수록 impact stress는 감소함을 확인할 수 있고 이는 spread에 의한 충격력의 감소 때문임을 알 수 있다.

Figure 7(a)은 Hutchings 식에 의해 scar 반경 r을 ln m으로 plot한 것으로 해당 조건하에서 직선이 얻어짐을 확인 할 수 있다. 그리고 기울기가 제각각 다르게 나타남을 알 수 있다. 특이한 현상은 이 그림에서 모든 직선이 한 점을 지나고 있음이다. 이 점을



(a)



(b)

Figure 7. Scar radius vs. liquid CO₂ mass supplied for various standoff distances.

(a) Lines are regressed as given; (b) Lines are regressed with given of 68.29.

중심으로 그 보다 낮은 이산화탄소의 질량이 공급되면 노즐-기관 간 거리가 가까울수록 더 큰 scar 반경을 가지지만 이 점 이상에서는 그 반대의 경향이 나타남을 의미 한다. 이는 거리가 가까울수록 plume의 spread가 없고 강도가 커 낮은 이산화탄소의 질량으로도 충분한 크기의 scar를 먼저 얻을 수 있으나 어느 정도의 scar가 만들어지고 난 다음에는 더 이상의 이산화탄소가 공급된다 하더라도 scar의 폭을 더 넓히기는 상대적으로 힘들음을 반영하고 있다. 반면 거리가 멀면 이산화탄소의 공급이 작을 경우 scar를 만들지 못하나 충분한 이산화탄소가 가해진 경우는

오히려 spread가 넓은 만큼 더 큰 scar 면적을 가지게 됨을 의미한다. 그러나 왜 꼭 한 점, 특히 본 연구의 조건에서는 사용한 이산화탄소의 양이 0.0161 kg일 때 scar의 크기가 반경으로 0.0181 m 되는 점에서 수렴하는 이유는 현재로서는 알 수 없으나 표준조건 (노즐직경 3mm, 길이 10cm)에서 얻어낼 수 있는 의미 있는 점으로 판단하여 "Point X" 라 명명하였으며, 이 노즐로 해당 코팅 필름을 벗겨 낼 때 적용되는 고유의 값으로 추정된다. 즉 주어진 노즐로 이산화탄소 0.0161 kg을 사용하게 되면 노즐-기관의 거리에 관계없이 0.0181m의 scar 반경을 얻어낼 수 있으며, 이 scar radius 보다 더 큰 면적을 노즐 하나로 벗겨낼 때는 노즐-기관 간 거리를 더 길게 하는 것이 유리하고 더 작은 면적을 벗겨낼 때는 거리를 더 가까이 하는 것이 유리함을 보여준다. 앞서 보인 Figure 6에는 이와 같은 결과를 바탕으로 노즐-기관의 거리의 효과가 임계 이산화탄소의 질량 Q_c 에 미치는 영향도 나와 있다. 거리가 멀어질수록 비례에 가까이 증가하는 관계를 보여주며 spread에 의한 impact 속도의 감소는 거리가 멀어질수록 제공에 반비례하나 앞서 기술한 유리한 요인들로 인하여 포물선 형 감소를 어느 정도 상쇄시킨 것으로 판단된다. 한편 노즐-기관 거리는 이미 밝힌 바와 같이 focus coefficient β 의 값에는 영향을 주지 않아야 함에도 불구하고 노즐-기관간 거리가 달라질 경우 focus 계수는 노즐-기관 거리가 1, 2, 3, 5 cm로 증가함에 따라 54.64, 67.56, 68.19, 36.10으로 조금 변화함을 알 수 있다. 이를 확인하기 위해 가장 많은 실험 데이터를 가지고 있는 표준조건, 즉 거리가 3 cm 인 경우에 얻어진 β 값을 다른 거리에도 그대로 적용시켜 기울기를 h/β 로 정한 다음 다시 데이터를 regression하여 Figure 7(b)과 같은 그림을 얻어 보았다. 이 그림의 fitting을 보면 regression의 결과가 전혀 동 떨어진 결과는 아닌 것으로 보여 Q_c vs. 거리의 관계에서 이미 얻은 데이터의 신빙성을 다시 확인 할 수 있다. 이 그림은 앞의 그림과 비교하면 Point X의 존재는 뚜렷이 보이지는 않으나 비슷한 점에서 네 직선이 만나게 됨을 알 수 있고, 앞서의 검토를 큰 수정 없이 그대로 수용할 수 있음을 알 수 있다.

(4) 노즐 길이의 효과

노즐의 길이가 늘어나면 주어진 같은 시간 (같은 이산화탄소를 사용한 때)에서 scar 반경이 더 커지고 있음을 확인 할 수가 있었다. 이를 r vs. $\ln m$ plot으로 그린 것이 Figure 8이며 여기서 각각의 직선은 모두 기울기와 절편이 다르나 그림 상으로 표현되지는 않았지만 역시 노즐-기판의 효과처럼 한점을 향하여 가고 있음을 보여 준다. 즉 실험의 영역, 즉 실험에 사용한 이산화탄소 사용 범위에서는 아직 노즐의 길이가 길수록 더 넓은 scar 면적을 얻을 수 있으나 보다 더 큰 이산화탄소의 질량을 사용하면 그 반대 현상이 생길 것이다. 그러나 노즐-기판 거리의 경우와 마찬가지로 scar를 만드는데 한 곳을 집중적으로 필요이상의 이산화탄소를 공급하여 주변을 파낸다는 것과 노즐을 옮기면서 또는 다중 노즐을 사용하여 주변을 파내는 것은 상업화하기 전에 충분한 비교 검토가 있어야 할 것이다. 이 같은 관점에서 Point X를 가려낸다는 것은 매우 의미 있는 일이다. 이 Point X 아래라면 길이가 긴 노즐을 가지고 표면 세정을 진행하는 것이 중요하다고 판단된다. 다만 장치의 구조상 노즐의 길이가 짧을 수밖에 없다면 조금 더 이산화탄소를 써서 Point X를 넘어가든지, 혹은 앞에서 기술한 바처럼 노즐을 움직이든가 적정 간격의 다중 노즐에서 얻을 수 있는 상황과 비교 검토가 필요할 것이다.

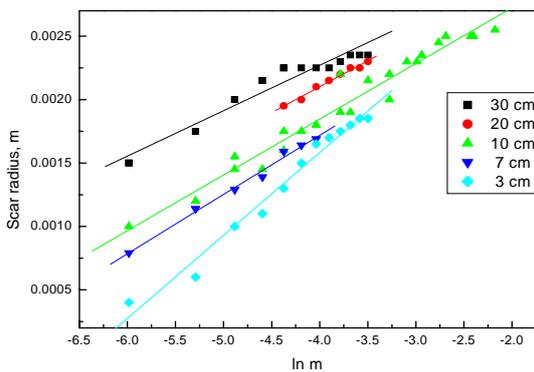


Figure 8. Scar radius vs. mass of CO₂ supply for various nozzle lengths, otherwise under reference condition.

Figure 6(c)에는 노즐 길이에 따른 입계질량, 즉 단위 면적인 1/m²의 해당 코팅 필름을 벗겨 내는 데 필요한 최소한의 이산화탄소의 공급 질량의 값이 노즐 길이에 반비례함을 보여준다. 세정속도에 미치는 노즐 길이의 이와 같은 관계가 나온 원인의 하나로 Miller의 해석[10]을 먼저 검토해 본다. 그에 따르면 긴 노즐을 지나는 동안 드라이아이스 입자의 크기가 응집에 의해 보다 성장하여 impact가 더 크게 나올 수 있다고 하였으나 지금까지 본 연구의 결과로는 드라이아이스의 크기가 성장했다고 해서 전체 공급 질량에 의존했던 관계가 이 때문에 바뀔 것 같지는 않다. 보다 근원적인 요인은 노즐을 떠나는 드라이아이스 plume의 spread가 노즐 길이가 길어질수록 점차적으로 억제되어 곧게 좁게 나가기 때문에 드라이아이스 입자의 빠른 유속이 가장 큰 원인인 것으로 판단된다. Figure 8의 노즐길이에 따른 focus coefficient β 의 변화가 이를 잘 설명할 수 있을 것이다. 즉 예상하던 대로 노즐 길이에 따라 plume의 spread를 줄이는 효과가 반영되어 focusing coefficient가 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

3.5 대상기판의 변수 효과

(1) 코팅 두께의 효과

지금까지의 모든 변수들은 impact가 일어나기전의 upstream의 공정조건과 관계있는 변수들이었다. 다음으로는 impact를 받는 코팅이 가지는 변수의 효과를 살펴보기로 한다. 먼저 코팅의 두께의 효과를 먼저 살펴본다. 코팅의 두께는 jet의 downstream으로 jet를 만들기까지와는 달리 focus coefficient β 값에 전혀 영향을 주지 않는다. 이는 노즐-기판 간 거리에서 이미 확인 한 바와 같이 노즐을 통해 드라이아이스가 분사된 이후의 가변적 요소의 하나로서 드라이아이스 plume의 spread에 전혀 영향을 줄 리 없기 때문이다. Figure 9에는 다양한 두께의 코팅을 제거하는 실험을 했을 때의 scar 반경이 분사된 이산화탄소의 질량의 대수 값에 어떠한 영향을 받는가를 나타낸 그림이다. 그러나 코팅이 두꺼워질수록 초기의 값들이 직선성에서 상당히 어긋남을 알 수 있는데 이는 전술한 바와 같이 초기 코팅이 파내질 때

표면의 손상, crack의 발생 등이 어느 정도의 유도기를 가지는 것으로서 일단 바닥이 드러난 이후와는 다른 양상을 보이고 있음을 나타낸다. 더욱이 데이터의 수가 적기 때문에 직접 regression 하는 것보다 이번에는 β 의 값이 일정할 것으로 확신되는 만큼 기울기를 데이터가 가장 많은 표준 조건, 즉 20 μm 일 때의 값인 $4E-4$ 을 정하여 regression을 해 보았다. 그 결과가 같은 그림에 직선으로 표시되어 있는데, 이 결과를 보면 직선 성을 얻는데 큰 무리가 없을 것으로 보인다.

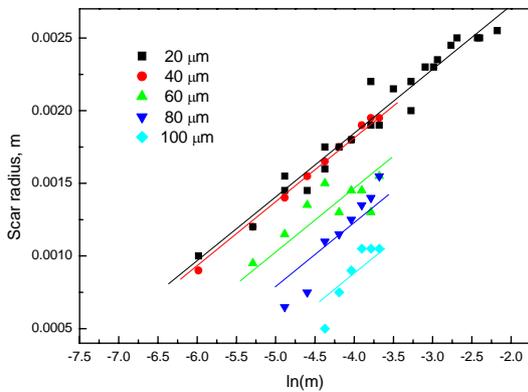


Figure 9. Mass of CO₂ required to remove unit area of coating vs. coating thickness, otherwise under reference conditions.

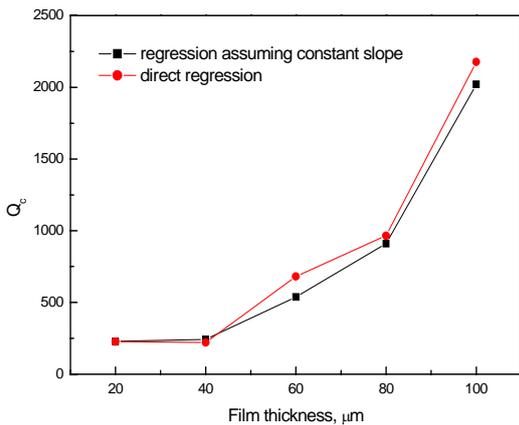


Figure 10. Mass of CO₂ required to remove unit area of coating vs. coating thickness, otherwise under reference conditions.

여기서 구한 Qc 값을 Figure 10에 보였다. 그림에는 기울기 가정 없이 직접 구한 Qc 값도 함께 그려져 있다. 두 값에 큰 차이가 없는 것으로 보아 β 값이 일정하다는 가정의 타당성을 보여준다.

(2) 코팅 속성의 영향

일반적으로 코팅은 코팅 후 시간이 경과할수록 점점 더 견고해진다. 이와 같은 현상은 코팅 후 시간 경과에 따라 각각 같은 조건에서 실험을 행하여도 코팅의 연령에 따라 상당한 차이를 느낄 수 있다. 미리 예측 해 보면 코팅의 두께와 마찬가지로 코팅의 연령 또한 코팅의 문제로 드라이아이스 plume의 spread를 나타내는 β 의 값에는 전혀 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. Qc를 구한 결과가 Table 1에 나와 있으며 여기서 β 값이 일정한 것은 기울기를 같게 한 탓으로 당연한 결과이다. 그러나 Qc의 값은 코팅이 숙성됨에 따라 크게 증가하고 있음이 확인 된다. 그런데 30cm 노즐을 썼을 경우 낮은 이산화탄소의 질량 값에서는 각 데이터의 직선성과 두 데이터의 평행성이 인정되지만 두 가지 점에서 데이터 간에 전혀 다른 양상을 보여준다. 그 중 하나는 30시간, 30일 두 데이터의 간격이 다른 경우보다 줄어들었다는 사실이다. 이는 30cm의 노즐이 매우 강력한 세정력을 가지고 있다는 앞서의 결과를 반영하는 것으로 판단된다. 그래서 숙성이 이루어져도 30cm의 긴 노즐을 통한 세정은 아직도 상당한 제거능력을 가지고 있음을 알 수 있다. 다른 하나는 많은 이산화탄소의 질량을 사용하면 30시간 경과 코팅은 scar 반경의 증가가 거의 없게 되는, 즉 제거가 종료된 상황이 발생하나, 30일 간 숙성시킨 것은 오히려 scar radius가 더 많은 이산화탄소의 질량에서 더욱 증가하는 양상을 보인다. 이 역시 30cm 노즐의 강력한 세정력과 숙성된 코팅의 특성으로 설명할 수 있다. 즉 30cm 노즐로는 숙성이 덜된 것은 상대적으로 세정이 쉬워 미리 제거되어 scar 반경이 미리 증가한 다음 충분히 반경이 늘어나면 더 이상의 반경 증가가 없다. 그러나 오래된 것은 처음에는 일반적인 경우와 같이 가운데서부터 차례로 벗겨지다가, 숙성시간이 길만큼 가장자리로 가면 앞서의 미세한 가격(impact)에 미리 crack이 또는 탈리 준비가 되어 있어 crack의 탈리가 더욱 쉽게 이루어지고 있음

을 의미한다.

이상에서 살펴본 바와 같이 속성의 효과나 코팅 깊이의 효과에서 코팅의 특성에 따라 드라이아이스 snow jet의 세정효과가 달리 나타나는 것을 바꾸어 해석하면 snow jet의 성능을 알고 있다면 역으로 코팅의 특성을 측정하는 데 매우 좋은 기술이 될 수 있음을 의미한다. 그래서 만일 데이터가 코팅의 성격에 따라 더 축적 될 수 있다면 아마 드라이아이스 snow jet를 이용한 코팅 성능의 해석도 가능할 것으로 본다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 드라이아이스 snow cleaning의 세정력은 드라이아이스 snow가 오염원을 때리는 충격(impact power)이 다른 어떤 요인보다도 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 드라이아이스 snow의 막 세정 기구는 드라이아이스 snow 충격으로 먼저 오염물의 표면이 손상되고 균열이 생기게 되어 오염물을 제거하는 것으로 보아 일반적인 화학세정과는 다른 경로를 밝음을 밝힐 수 있었다.

본 연구를 통해 세정력을 Hutchings 식의 세정면적 $1m^2$ 를 세정하는데 필요한 드라이아이스의 총질량 kg을 나타내는 Q_c 와 beam 또는 plume의 집중도를 나타내는 무차원수, 즉 focus coefficient β 로 표현할 수 있었다. 이 결과를 드라이아이스 세정법 끼리는 물론이고 직접 다른 세정방법의 세정속도와 비교하는데도 이용할 수 있었다. 실험의 결과 이산화탄소의 공급 속도는 Q_c 와 focus coefficient β 에 영향이 없음을 알게 되었다. 또 Q_c 는 운반기체 유량이 많고 노즐의 길이가 늘어나면 감소하고, 노즐-기판 거리가 늘어나고, 코팅 두께가 두꺼울수록 증가하였다. 한편 focus coefficient β 는 본 실험의 영역에서는 운반기체 유량에 영향을 받지 않았으나 실제 낮은 유량에서는 영향을 미칠 것으로 사료된다. 이 값은 노즐 tip까지 aerosol jet의 plume의 모양이 갖춰질 때까지만 변하고 그 plume의 모습이 확정된 downstream에서는 관계가 없는 것으로 드러났다. 따라서 막 두께 및 막의 aging과는 관계가 없으며, 본 연구의 실험영역에서는 오직 노즐-기판 거리와 노즐

길이에 관계함을 알게 되었다. Q_c 와 β 의 이런 상반된 그러나 교차점점이 가능한 관계를 이용하여 막의 특성을 분석하는 데도 본 방법은 손쉬운 수단이 될 수 있음을 암시한다. 한편으로 노즐 길이, 노즐-기판 간 거리 등 Hutchings plot(r vs. $\ln m$)에서 기울기가 달라 노즐-기판거리, 노즐 길이 등의 경우처럼 서로 다른 값에서 직선이 교차하게 되는 경우 대체로 유일한 한점에서 만나는 경향이 발견되었다. 유독 한점에서만 만나려하는 이유는 알 수 없지만 다만 교차하는 이유는 impact area (scar area)를 늘리는 경향과 억제하는 경향이 이들 변수에 존재하기 때문으로 판단되며 운전 상 매우 중요한 점으로 판단된다.

감사의 말씀

본 연구는 수원대학교 환경청정기술연구센터(RRC)의 2003년 연구비 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Sherman, Carbon Dioxide Snow Cleaning, in Particles on Surfaces 5&6: Detection, Adhesion and Removal, Ed. by Mittal, K.L., VSP, 1999, pp221-237.
- [2] S. Kashu, E. Fuchita, T. Manabe, and C. Hayashi, Deposition of Ultra Fine Particles Using a Gas Jet, Jap. J. Appl. Phys., 23(1984), L910-912.
- [3] W.H. Whitlock, W.R. Weltmer Jr. and J.D. Clark, Apparatus and Method for Removing Minute Particles from a Substrate, US Patent 4806171, 1989.
- [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] R. Sherman and W. Whitlock, The Removal of Hydrocarbon and Silicon Grease Stains from Silicon Wafers, J. Vac. Sci. Technol. B8(1990)

- 563-567.
- [6] R. Sherman, J. Grob and W. Whitlock, Dry Surface Cleaning Using CO₂ Snow, J. Vac. Sci. Technol. B9(1991) 1970-1977.
- [7] R. Sherman and D. Hirt and R. Vane, Surface Cleaning with the Carbon Dioxide Snow Jet, J. Vac. Sci. Technol. A 12(1994) 1876-1881.
- [8] E.A. Hill, Carbon Dioxide Snow Examination and Experimentation, Precision Cleaning, Feb 1994, 36-39.
- [9] C.N. Yoon, H.T. Kim, S.G. Kim and B.H. Min, Removal of Surface Contaminants by Cryogenic Aerosol Jets, Korean J. of Chem. Eng., 16(1999), 96-103.
- [10] R.C. Miller III, Fundamental Study of Carbon Dioxide Blasting: An Experimental and Numerical Analysis of Surface Cleaning by a Particle-Laden Turbulent Jet, Ph.D. Dissertation Michigan Technological University, 1994.
- [11] P.H. Shipway and I.M. Hutchings, "Influence of Nozzle Roughness on Conditions in a Gas-Blasting Erosion Rig, Wear 162-164(1994), 148-158.
- [12] R.I. Trezona and I.M. Hutchings, Resistance of Paint Coatings to Multiple Solid Particle Impact: Effect of Coating Thickness and Substrate Materials, Progress in Organic Coatings 41(2001), 85-92.