

The Development and Performance Evaluation of a Cyclone to Remove Hot Particulate from a Contaminated Hot Cell

Hot Cell 내에 오염된 고방사능분진 제거를 위한 사이클론 개발 및 성능평가

Gye-Nam Kim, Hui-Jun Won, Wang-Kyu Choi, Chong-Hun Jung, Won-Zin Oh and Jin-Ho Park

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

kimsum@kaeri.re.kr

김계남, 원휘준, 최왕규, 정종현, 오원진, 박진호

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

(Received March 10, 2006 / Approved July 10, 2006)

Abstract

The structural and contamination characteristics of hot cells at KAERI were investigated. The SEM results showed that the size of the hot particulate on the inner surface of the hot cell ranged from 0.2 to 10 μm . It was found that an inlet flow rate of 15 m/sec was suitable for this developed cyclone with a 49 mm optimum vortex finder length. The results showed that the collection efficiency was about 85% for 3 μm particles. The collection efficiency didn't show a sharp increase when the inlet flow rate was faster than 15m/sec. When the temperature of the inlet flow gas was increased, the collection efficiency of the cyclone was slightly decreased. The larger the vortex finder length was, the higher the pressure drop in the cyclone was. The cut size diameter decreased with an increment of the Reynolds number. It was established that the flow in the cyclone was a turbulent flow on the basis of the Reynolds number and this turbulent flow caused a pressure drop in the cyclone. $Stk_{50}^{1/2}$ decreased with increasing values of the Reynolds number and it gradually approached a constant value at a higher value of the Reynolds number. Namely, $Stk_{50}^{1/2}$ approached approximately 0.045 between 6000 and 8000 of the Reynolds number.

Key Words : cyclone, hot particulate, collection efficiency, cut size, Reynolds number

요 약

원자력연구소 핫셀의 구조와 오염특성이 조사되었다. SEM 측정결과 핫셀 내부에 부착된 고방사능 분진의 크기는 0.2~10 μm 이었다. 사이클론의 최적 Vortex finder의 길이는 49 mm이고, 모

의입자 유입속도는 15m/sec가 적합했다. 이때 3 μ m의 포집효율은 약 85%였다. 모의입자 유입속도가 15m/sec보다 빠를 때, 포집효율의 증가율은 크지 않았다. 유입가스의 온도가 증가할 때, 포집효율은 약간 감소했다. Vortex finder의 길이가 증가할수록 사이클론내의 압력강하는 커졌다. Cut size diameter는 Reynolds number의 증가와 함께 감소했다. 측정된 Reynolds number에 근거하면, 사이클론 내부는 난류이고 이 난류는 사이클론 내의 압력강하에 원인이 된다고 사료된다. $Stk_{50}^{1/2}$ 는 Re 값의 증가와 함께 감소하고, Re의 값이 커질 때에서 일정한 값에 수렴했다. 즉, 6000~8000의 Re에서 $Stk_{50}^{1/2}$ 는 약 0.045를 나타냈다.

중심단어 : 사이클론, 고방사능분진, 포집효율, cut size, Reynolds number

I. 서론

한국원자력연구소 조사재시험시설과 조사후시험시설의 핫셀(Hot cell)에서는 사용후 핵연료의 산화 환원 및 분쇄공정, 사용후 핵연료의 절단 및 분말화 공정, 균분리 공정, 사용후 핵연료 금속전환 공정 등을 수행하고 있다. 핫셀 바닥면과 벽면 그리고 핫셀 내부에 있는 여러 장치표면들이 핵연료시험 과정에서 발생한 고방사능 분진(Hot particulate)과 고방사능 핵연료의 조사 등에 의해 오염되어 핫셀 내의 방사능 준위가 높아지고 있다. 핫셀내에서 여러 가지 핵연료 시험을 원활히 수행하기 위해서는 주기적으로 핫셀 내부에 오염된 고방사능 분진을 제거하여 핫셀 내의 방사능 준위를 낮추어 주어야 한다.

핫셀 내부표면에 단단히 고착된 고방사능 분진은 CO₂ Blasting 제염, 초음파 PFC 제염, 프라즈마 제염 등과 같은 건식제염기술을 사용하여 제거효율을 높일 수 있다[1,2]. 또한, 핫셀 내에서 공정시험 또는 건식제염 시 발생하는 비고착성 고방사능 분진은 지금까지는 알코올을 묻힌 휴지로 닦아 내거나 진공청소기로 흡수 제거하는 방법을 사용해왔다. 알코올을 묻힌 휴지를 사용할 때, 많은 폐기물이 발생한다. 진공청소기를 사용할 때, 진공청소기 내에 설치된 필터가 단시간 내에 포화되며, 이 포화된 필터는 핫셀 내에서 Manipulator에 의한 교환이 어렵고, 고방사능 분진이 플라스틱으로 만든 진공청소기 몸체에 많은 방사능 부하를 주어 진공청소기의 수명이 짧았다. 그러므로 핫셀 내부에 부착된 고방사능 분진들을 효과

적으로 제거하고 장기간 사용할 수 있는 고방사능분진 제거장치의 개발이 필요하여 왔다. 고방사능분진 제거 장치는 미국 DOE에서도 효율적인 장치를 개발 및 특허화 했으며[3], 다른 원자력 선진 국가에서도 효과적인 고방사능분진 제거장치를 개발 중에 있다.

원자력연구소 조사재시험시설과 조사후시험시설의 핫셀 내부에 부착된 비고착성 고방사능분진을 제거하기 위해서는 먼저 핫셀내의 방사능 오염특성 및 핫셀 구조를 조사해야 한다. 즉 고방사능 분진의 종류, 크기, 방사선량 등을 측정 분석해야 하고, 오염특성에 적합하게 개발된 장치를 조사재시험시설과 조사후시험시설 핫셀 내에 넣기 위해 핫셀 출입구와 핫셀 연결문의 크기를 조사해야 한다. 또한, 핫셀에 투입된 장치의 작동은 Manipulator에 의해 수행되어야 하므로 Manipulator의 작업범위도 조사해야 한다.

본 연구에서는 원자력연구소 핫셀 내부에 오염된 고방사능분진의 오염특성 및 핫셀구조를 조사한 후 이에 적합한 규모 및 제거효율을 가진 사이클론을 개발하고, 개발한 사이클론에 대한 Vortex finder 길이, 유입속도, 온도, 압력 등의 변화에 따른 분진제거 성능평가시험을 수행했다.

II. 연구소 핫셀 구조 및 오염특성조사

가. 핫셀 구조 조사

개발된 고방사능분진 제거장치는 한국원자력연구소 조사재 시험시설의 핫셀내에 투입하여 오염된 핫셀 내부표면과 핫셀내에 위치한 많은 시험장치의 오

염된 표면으로부터 고방사능분진을 제거할 계획이다. 조사재 시험시설의 지하에는 11개의 핫셀들이 위치한다. 조사재시험시설은 핵연료 및 원자력 재료의 조사특성을 시험하는 시설이며 1994년부터 정상운영에 들어가 조사된 핵연료 및 원자력 재료에 대한 시험을 수행하고 있다. 연료시험용 핫셀 (M1, M2, M3, M4)에서는 조사장치 (Capsule)와 연료체 (Fuel bundle)의 해체, 조사 시편의 가공 그리고 핵연료의 비파괴 및 파괴시험을 수행하고 있다. 재료시험용 핫셀 (M5a, M5b)에서는 조사재료 (Irradiated materials)의 기계적 특성시험과 물성 특성시험을 수행하며, 시험항목으로는 충격시험, 인장시험, 파괴인성시험, 피로시험, 열처리시험, 열팽창율시험 등이다. 그리고 이 핫셀에 연이어 설치된 납핫셀 (M7)에서는 조직시험과 경도시험 그리고 밀도측정 등을 수행하고 있다. 다용도 연구용 핫셀 (M6a, M6b)은 현재 DUPIC 핵연료 개발을 위한 실험시설로 활용하고 있으며, 사용후 PWR 핵연료를 이용한 DUPIC 핵연료 제조연구를 수행하고 있다.

조사재시험시설의 M4셀은 많은 핵연료시험장비가 보관되어 있어 방사능이 상당히 높은 곳으로 고방

사능분진을 주기적으로 제거해야할 지역 중의 하나이다. 개발된 장치를 M4셀에 투입시키기 위해서는 먼저 M1셀의 뒷문(1m x 1m)를 통과한 후 Fig. 1처럼 크레인을 이용하여 셀과 셀의 연결문(1m x 0.8m)을 통과해야 하므로 장치의 크기가 1m x 0.8m 보다 작아야 한다. 한편, 핫셀에 투입된 고방사능분진 제거장치를 핫셀 간에서 이동시킬 때 핫셀 천장에 설치한 크레인을 사용해야 한다. 크레인의 드는 힘은 3톤이므로 개발될 장치의 무게는 3톤 이하 여야 한다. 개발된 장치를 사용하여 핫셀 내부표면에 부착된 분진에 대한 제거작업을 수행할 때 Manipulator를 이용해야 한다. Manipulator의 드는 힘은 20kg이고, 잡아당길 수 있는 힘은 8 kg이며, 로버트 손은 두 손가락으로 구성되어 있기 때문에 고방사능분진장치의 세부부품의 설계는 Manipulator에 의한 작업조건에 적합해야 한다.

나. 핫셀내부 고방사능분진 오염특성 조사

한국원자력연구소 조사재시험시설의 핫셀내에서 사용후핵연료 시험시 발생하는 고방사능분진의 크기를 SEM(Scanning electron microscope)으로 찍은 사진은 김계남 등[4]의 논문 및 Fig.2와 같다. 즉, DUPIC(Direct Use of spent PWR Fuel In CANDU reactors) 산화환원 공정 시 발생하는 고방사능분진의 크기는 5~15 μm이며, 분쇄공정 시는 0.2~2μm 이고, 사용후핵연료 절단, 파괴, 인장 시험 시 발생하는 고방사능분진의 크기는 주로 1~20μm이며, 피복관 주변 CRUD의 크기는 0.2~2μm 이다. 분석결과 핫셀 내부표면에 오염된 고방사능분진의 주요 크기는 0.2~10μm이었고, 고방사능분진의 주 핵종은 UO₂, U₃O₈, 질카로이 등이었다. 핫셀내부표면에 부착된 고방사

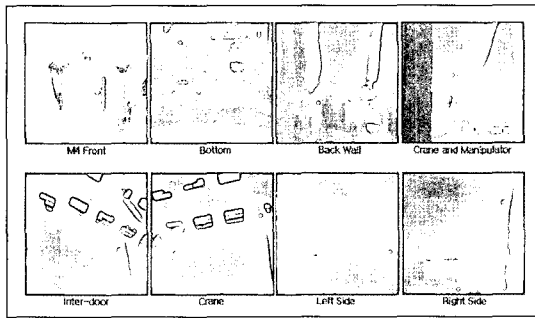


Fig. 1. IMEF Hot cell view

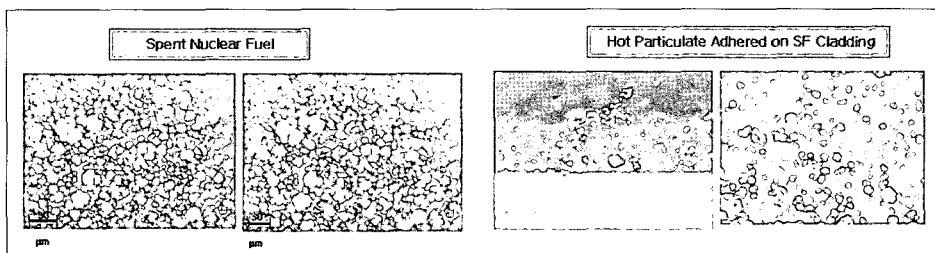


Fig. 2. SEM pictures for size of hot particulate generated on respectively process in hot cell

능분진의 성분을 분석하기 위해 핫셀에서 0.5 × 0.5cm 크기로 Smearing하여 EDS로 성분 분석결과 주핵종 외에 Cs-137, Cs-134, Ru-106, Ce-144, Eu-154의 방사성핵종이 검출되었다. 핫셀내부의 표면오염도는 핫셀내의 고방사능물질을 샘플링하여 베타감마인 경우 MCA로 측정된 결과 약 4 × 10⁵ ~ 4 × 10⁷ Bq/cm²이었고, 알파인 경우 Scintillator HP380A로 측정된 결과 2 × 10³ ~ 2 × 10⁵ Bq/cm²이었다 (Table 1).

III. 사이클론 설계 및 제작

산업시설에서 발생된 미세분진을 제거하기 위해 보통 사이클론을 사용해 왔다. 대형 사이클론은 산업가스로부터 미립자를 제거하기 위해 사용되어 왔고, 소형 사이클론들은 대기샘플링을 위해 대기오염 제어분야에서 미립자를 포집하기 위해 사용되어 왔다 [5-기]. 사이클론설계는 보통 사이클론의 몸체 반경(D)에 대한 비로 표시한다. 산업용 사이클론은 5μm 이상의 분진을 제거대상으로 하며 Stairmand는 시행오차 연구를 통해 분진제거효율이 높은 사이클론의 각 부분에 대한 비를 제시했다[8]. 이 Stairmand의 설계는 표준 사이클론 설계의 한 예가 되었다[9-11]. 최근

에, Zhu 등[12]은 1μm의 미세분진을 50%이상 제거 가능한 소형 사이클론을 설계 제작하였다. 앞에서 조사했듯이 핫셀내부 표면 및 시험장치 표면에 오염된 고방사능분진의 크기는 0.2 ~ 10μm이었다. 본 연구에서는 Zhu 등이 제시한 비를 근거로 Fig. 3과같이 사이클론 각 부분의 비를 정하였다. 단지 Vortex Finder는 0.5 ~ 1.0D내에서 길이 조절이 가능하도록 제작한 다음, 최종 Vortex Finder 길이는 분진제거실험 결과를 통하여 1μm의 미세분진을 최대로 제거할 수 있을 때의 값으로 정하였다. 사이클론으로 유입된 고방사능분진은 포집박스에서 1 μm이상의 고방사능분진이 제거된 후 필터로 유입되고 필터에서 0.3 μm이상의 분진이 제거된다.

또한 앞에서 기술한 것처럼 고방사능분진 제거장치의 크기는 1 × 0.8 m 이하여야 하며, 진공펌프는 분진을 10 ~ 20 m/sec의 속도로 유입할 수 있는 용량을 사용해야 한다. 사이클론의 재질 및 성능은 2 × 10⁵ Bq/cm²의 알파방사능을 견딜 수 있는 STS 304를 사용했고, 핫셀내부에 발생된 고방사능분진을 85%이상 제거할 수 있는 성능을 가져야 한다. 사이클론 포집박스는 핫셀 내에서 Manipulator로 부착 및 탈착이 가능하도록 서랍식으로 제작하였다. Bag/HEPA 필터는 0.3 μm의 분진을 95%이상 제거할 수 있고 Manipulator로 교체 가능하도록 서랍형 카드리지로 만들었다. 사이클론 Vortex finder의 길이는 1μm의 미세분진을 60%이상 제거할 수 있도록 제작된 장치에 의한 시험을 통해 결정했다. 고방사능분진 제거장치 무게는 핫셀 내의 크레인으로 이동 가능하도록 3톤 이하가 되도록 설계 제작했다. 고방사능 분진 제거장치의 설계제약조건은 Table 2와 같다.

Table 1. Measurement results on radioactive contamination in hot cell

Measurement Factor	Measurement Results
Hot Particulate Size	0.2 ~ 10 μm (SEM)
Nuclide	UO ₂ , U ²³⁵ , Zircaloy
Location	Inner surface of Hot cell & Surfacen process equipment in hot cell
Surface Contamination Level	β · γ: 4 × 10 ⁵ ~ 4 × 10 ⁷ Bq/cm ² (MCA) γ: 2 × 10 ³ ~ 2 × 10 ⁵ Bq/cm ² (Scintillator HP380A)

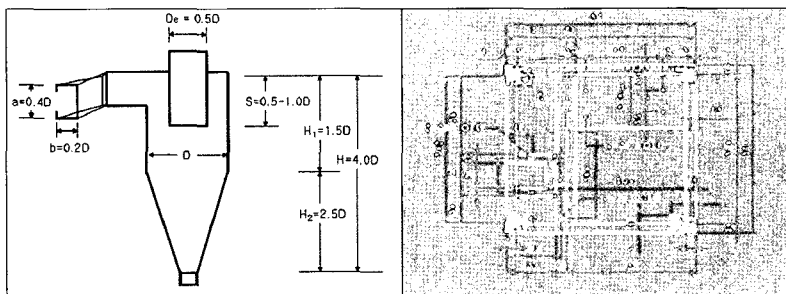


Fig. 3. Size ratio of cyclone and plane diagram of hot particulate removal equipment

실제 고방사능 분진제거장치를 연구소 핫셀에 넣기 위해 핫셀의 구조특성 및 방사능오염특성을 조사하고, 장치가 핫셀에 들어가 이동 될 수 있도록 핫셀 뒷문 투입구와 연결문 크기 및 크레인과 Manipulator의 특성 등을 고려하여 그 크기를 이전 장치[4]의 약

Table 2. Hot particulate removal equipment design condition Element

Element	Design condition
Equipment size	below 1x0.8 m
Suction velocity	10 ~ 20m/sec
Particulate component	UO ₂ , U ₂ O ₈
Equipment weight	below 3ton
Collection box	Operation by Manipulator
Bag/HEPA filter	Exchange by Manipulator
Removal efficiency of Cyclone	over 60 % of 1 μ m
Manipulator operation	Lift:20kg, Catch:8kg
Equipment material	Stable in α activity 2x10 ³ Bq/cm ²

1/20으로 축소하고 구조도 변경하였다. 제작한 고방사능 분진제거장치는 이전장치와는 달리 핫셀 내의 Manipulator로 작동할 수 있게 제작하였다. 위의 설계 제약 조건에 따라 설계된 고방사능분진제거장치의 구조는 Fig. 4와 같이 사이클론, 포집박스, 필터 케이스, 진공펌프 등으로 구성되어있고 장치크기는 70x55x55cm이다. Fig. 5는 Manipulator로 탈부착할 수 있는 사이클론 포집박스의 3차원 설계도다. 장치로 흡입된 고방사능분진의 약 85%를 사이클론 포집박스에서 제거해주므로 Bag/HEPA 필터의 교환 시기를 연장시킬 수 있다. Fig. 6은 Manipulator로 작동 가능한 서랍식 3차원 Bag/HEPA 필터 설계도다. 또한 Fig. 7은 앞의 3차원 설계도에 따라 제작한 고효율의 사이클론을 포함한 고방사능분진제거장치이다. 제작된 고방사능분진제거장치에 의한 핫셀내에서의 1회 작업시간은 20 ~ 30 분이며, 작업회

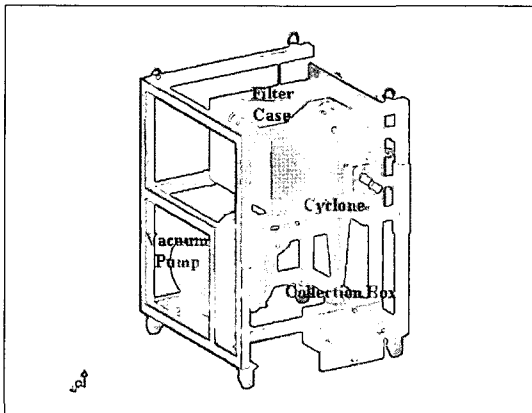


Fig. 4. Design diagram of hot particulate removal equipment

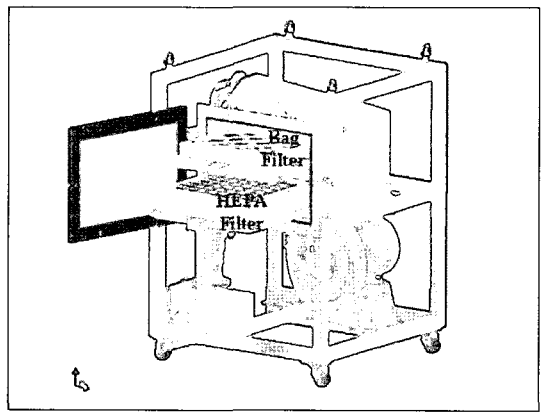


Fig. 6. Bag & HEPA filter of equipment

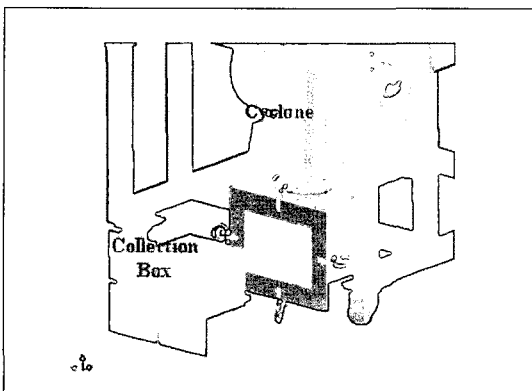


Fig. 5. Collection box of cyclone

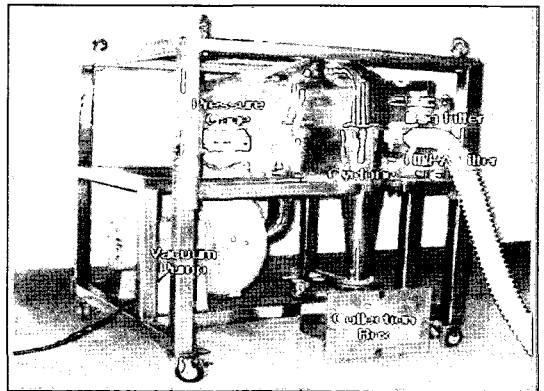


Fig. 7. Manufactured hot particulate removal equipment

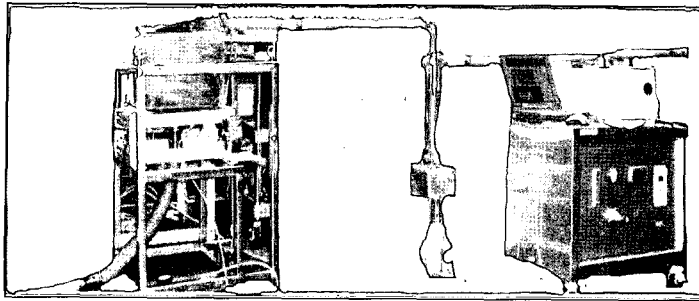


Fig. 8. Equipment outline for removal of mock particulate

수는 한 달에 2~3번이고 장치의 수명은 10년 이상으로 예상하고 있다. 제거된 고방사능분진은 고준위 용 방사성폐기물포장용기에 담아 제거한다.

IV. 사이클론 최적성능 평가 실험

앞에서 핫셀 내부에 분포한 고방사능분진의 크기가 0.2~10 μm이므로 0.3, 1, 2.5, 5, 10 μm 크기의 Al₂O₃와 TiO₂ 모의입자를 사용하여 제작된 사이클론 장치를 이용하여 사이클론의 미립자 포집성능을 측정했다. 사이클론의 포집효율을 측정하기 위해 Fig. 8과 같이 Aerodynamic particle sizer model 3310을 사용하여 입도별 농도를 측정하였다. 1, 2.5, 5, 10 μm 크기의 모의입자를 동등한 질량으로 섞은 후 Fig. 9와 같이 약 150 g을 10분 동안 Particle mixing device feeder를 사용하여 사이클론과 연결된 관내부로 투입했다. 사이클론과 연결된 앞쪽과 뒤쪽 파이프의 중앙 내부에 시료 측정관을 설치하여 시료를 채취하고 채취된 시료를 Aerodynamic particle sizer를 통과시켜 입도별 농도를 측정했다. 또한 모의입자의 유입속도는 Anemometer로 측정했다.

Stairmand[8]는 최적 Vortex finder의 길이로 S/D=0.5를 제시했고 Zhu[12] 등은 소규모 사이클론의 경우 최적 Vortex finder의 길이로 S/D=1을 제시했다 위의 값에 근거하여, Vortex finder 길이를 2.8cm, 4.9cm, 7.5cm로 정하여 각각의 길이에 대한 사이클론의 모의 입자 포집효율을 측정했다. 처음에 Vortex finder 길이를 2.8cm로 고정하고, 진공펌프를 조절하여 모의입자 유입속도를 8, 12, 15, 18, 20

m/sec로 변화시켰다. 사이클론 전, 후에서 모의입자를 채취하여 입도별 농도를 분석하였다. 이 분석결과를 사용하여 사이클론의 입도별/유입속도별 포집효율을 계산하였다. 다음으로 Vortex finder 길이를 4.9cm와 7.5cm로 변화시켜 각각에 대한 포집효율을 측정했다. 포집효율 측정결과를 분석하여 높은 포집효율을 보이는 Vortex finder 길이를 최종 길이로 결정했다.

한편, 유입기체의 온도를 50℃와 75℃로 상승시킨 후의 온도상승에 따른 포집효율의 변화를 분석했다. 다음으로 압력계를 사용하여 가스 유입속도에 따른 사이클론내부에서의 압력강하와 Cut size diameter의 변화를 분석했다. 개발된 사이클론 내의 Reynolds number를 계산하여 사이클론내의 흐름이 층류(Laminar flow)인지 난류(Turbulent flow)인지를 분석하였고, Stokes number와 Reynolds number의 상관관계를 조사했다.

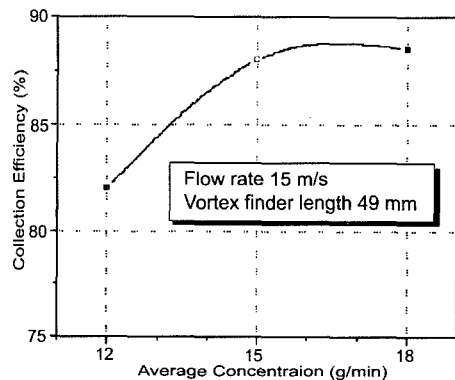


Fig. 9. Measured collection efficiency along average concentration of particle injected through feeder

V. 결과 및 고찰

1 μ m로부터 10 μ m까지의 크기가 다른 미립자를 사이클론에 유입시켰을 때, 사이클론 포집기에서의 포집효율은 Fig. 10, 11, 12와 같았다. Fig. 10은 Vortex finder 길이가 2.8cm일 때의 모의입자 유입속도별 포집효율을 보여준다. 모의입자 유입속도가 커질수록 포집효율이 높아진다. 그러나 15m/sec 이상일 때 포집효율의 증가속도는 둔화됨을 알 수 있다. 한편 15m/sec에서 1 μ m의 모의입자를 약 45%포집하는 것으로 나타났다. Fig. 11은 Vortex finder 길이가 4.9cm일 때의 모의입자 유입속도별 포집효율을 보여준다. 모의입자 유입속도가 커질수록 포집효율이 높아지지만 15m/sec 이상일 때 포집효율의 증가속도는 매우 둔화됨을 알 수 있다. 한편 15m/sec에서 1 μ m의 모의입자를 약 65%, 3 μ m의 모의입자를 약 85%

포집하는 것으로 나타났고, 5 μ m 이상의 모의입자는 90%이상 포집하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 12는 Vortex finder 길이가 7.5cm일 때의 모의입자 유입속도별 포집효율을 보여준다. 모의입자 유입속도가 커질수록 포집효율이 높아지지만 15m/sec 이상일 때 포집효율의 증가속도는 둔화됨을 알 수 있다. 15m/sec에서 1 μ m의 모의입자를 약 58%포집하는 것으로 나타났다. 이것은 Vortex finder 길이가 4.9cm일 때의 포집효율보다 작은 값이다. 그러므로 Vortex finder 길이가 4.9cm일 때 포집효율이 가장 높으므로 최적 길이임을 알 수 있다.

사이클론에 유입하는 기체의 온도를 50 $^{\circ}$ C와 75 $^{\circ}$ C로 상승시켰을 때의 사이클론의 포집효율을 측정할 결과는 Fig. 13과 같다. 실선은 75 $^{\circ}$ C 시의 결과이며 점선은 50 $^{\circ}$ C의 결과이다. 75 $^{\circ}$ C 시의 포집효율은 50 $^{\circ}$ C의 포집효율 보다 낮다. 그러나 50 $^{\circ}$ C에서의 포집효

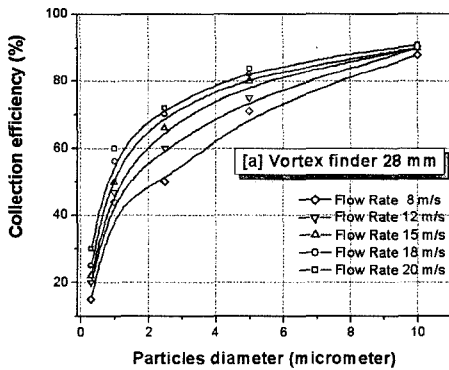


Fig. 10 Measured collection efficiency of cyclone on vortex finder 28mm

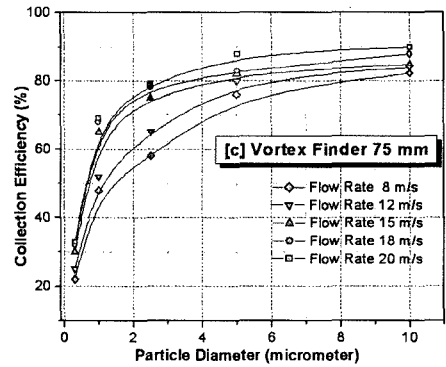


Fig. 12. Measured collection efficiency of cyclone on vortex finder 75mm

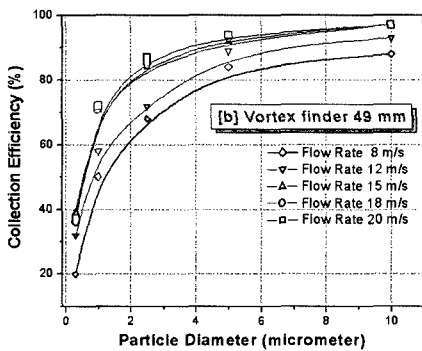


Fig. 11. Measured Collection efficiency of cyclone on vortex finder 49mm

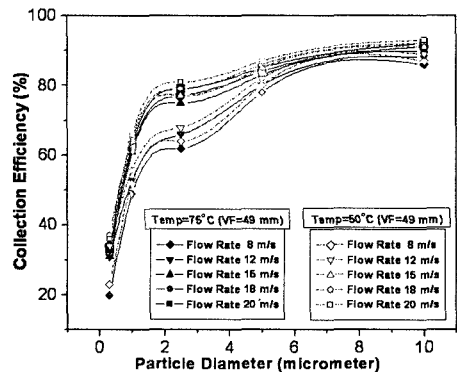


Fig. 13. Measured collection efficiency as a function of temperature and particle size

율은 상온에서의 포집효율보다 낮다. 즉, 온도의 상승과 함께 사이클론의 포집효율은 미세하게 낮아진다. 또한, 미세 입자에서의 포집효율이 작기 때문에, 중간입자(2~4 μm)에서의 포집효율이 온도에 의한 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. Fig. 14는 사이클론내의 압력강하를 보여준다. 모의입자 유입속도의 증가에 따라 압력강하는 증가하며, Vortex finder의 길이가 커질수록 압력강하는 증가한다. 사이클론에서 일반적으로 허락되는 압력강하 20~25cm[13]보다는 작은 것으로 나타났다. 차후에 사이클론 내부표면을 좀 더 매끄럽게 만들어 마찰을 줄이면, 압력강하를 좀 더 줄일 수 있다고 사료된다.

Fig. 15는 개발한 사이클론의 Vortex finder의 길이를 달리하며 포집시험을 실시할 때, 각 유입속도에 대한 모의입자 Cut size diameter를 나타낸다. 여기

서, Cut size diameter는 50%효율로 제거된 입자의 직경을 말한다. Cut size diameter는 Vortex finder 길이에 영향을 받으며, 모의입자의 유입속도가 클수록 작아졌다. 한편, 개발된 사이클론의 Stokes number가 Reynolds number에 미치는 영향을 조사했다. Reynolds number와 Stokes number의 방정식은 아래와 같다.

$$Re = \frac{\rho_g VD}{\mu}$$

$$Stk_{50} = \frac{C\rho_p d_{50}^2 V}{18\mu D}$$

여기서 ρ_g 는 공기밀도이고, V는 유입속도이며, D는 Vortex finder의 직경이고, μ 는 공기점성도이며, C는 Cunningham slip correction이고, ρ_p 는 모의입

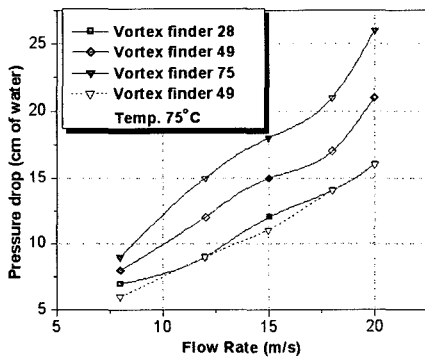


Fig. 14. Pressure drop of the cyclone at different inlet flow rate

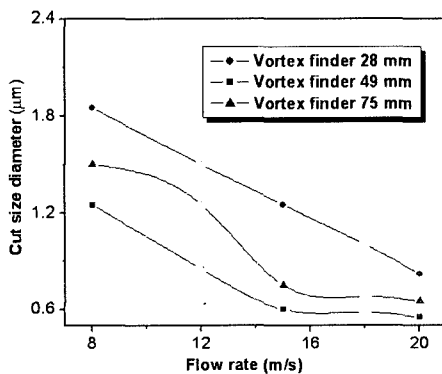


Fig. 15. Cut size diameter of the cyclone at different inlet flow rate

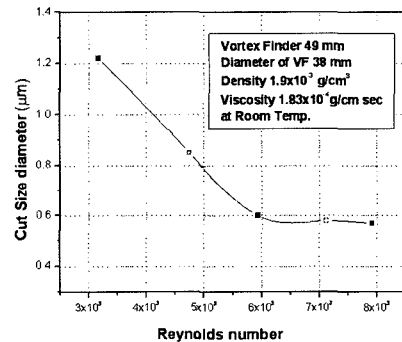


Fig. 16. Cut size diameter of the cyclone versus Reynolds number

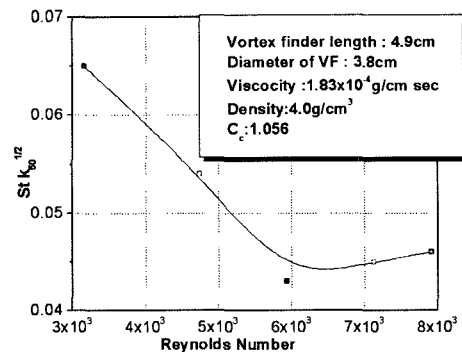


Fig. 17. Correlation between Stokes number and Reynolds number.

자 밀도이고, d_{50} 은 Cut size diameter이다. Fig. 16에서 Cut size diameter는 Reynolds number 증가 시 감소함을 알 수 있다. 이것은 포집효율은 Reynolds number 증가 시 증가함을 의미한다. 사이클론내의 흐름은 Reynolds number에 근거하면 난류에 해당되며, 이 난류는 사이클론내의 압력강하를 유도한다. Fig. 17은 Stokes number과 Reynolds number 사이의 상관관계를 보여준다. $Stk_{50}^{1/2}$ 는 Moore와 McFarland가 제시한 것[14,15]처럼 Re 값의 증가 시 감소했고, 높은 Re의 값에서는 일정한 값에 접근했다. 즉, Re가 6000~8000일 때, $Stk_{50}^{1/2}$ 는 0.045에 수렴했다.

V. 결론

원자력연구소 핫셀 내의 내부 표면에 부착된 고방사능분진을 제거하기에 적합한 사이클론을 제작하고 성능평가실험을 수행했다. 개발된 장치는 핫셀 내에 투입할 수 있는 크기로 제작했고 Manipulator에 의해 작동 가능토록 했다. 핫셀 내에 오염된 Hot particulate을 샘플링하여 SEM으로 측정한 결과 크기는 0.2~10 μ m이었다. 개발된 사이클론에 대한 성능평가실험결과는 다음과 같다. Vortex finder 길이가 4.9cm일 때 사이클론의 포집효율이 가장 높았다. 사이클론은 3 μ m를 15m/sec 이상의 유입속도에서 모의 입자의 약 85%를 포집하는 것으로 나타났다. Vortex finder의 길이가 커질수록 사이클론내의 압력강하는 증가했다. 온도의 상승과 함께 사이클론의 포집효율은 미세하게 낮아졌다. Cut size diameter는 Vortex finder 길이에 영향을 받으며, 모의입자의 유입속도가 클수록 작아졌다. 사이클론내의 흐름은 Reynolds number에 근거하면 난류에 해당되며, 이 난류는 사이클론내의 압력강하에 원인을 제공했다. Re 값의 증가 시 $Stk_{50}^{1/2}$ 는 감소했고, Re가 6000~8000일 때, $Stk_{50}^{1/2}$ 는 0.045에 수렴했다.

참고 문헌

[1] Korea Atomic Energy Research Institute,

"Decontamination Technology Development for Nuclear Research Facilities", KAERI/RR-2416/2003(2003)

- [2] Korea Atomic Energy Research Institute. "Development of High-Level Radioactive Waste Treatment and Conversion Technologies", KAERI/RR- 2131/2000(2003)
- [3] T. R. Bench. Compact Cyclone Filter Train for Radiological and Hazardous Environments. Agency of the United States Government, Docket No. S-84,479(1998)
- [4] G. N. kim, S. Y. Lee, H. J. Won, C. H. Jung and W. Z. Oh, "Application of Cyclone to Removal of Hot Particulate in Hot Cell," J. of the Korean Radioactive Waste Society, 3(1), pp.67-75(2005).
- [5] H. T. Kim, Y. Zhu, W. C. Hinds, and K. W. Lee, "Experimental Study Virtual Cyclones as Particle Concentrators," Journal of Aerosol Science, 33, pp. 721-733(2002).
- [6] W. C. Hinds, Aerosol Technology : Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles, 2nd Ed., Wiley Press, New York,(1999)
- [7] B. T. Chen, H. C. Yeh, and M. A. Rivero, "Use of Two Virtual Impactors in Series as an Aerosol Generator", Journal of Aerosol Science, 19, pp. 137-146(1998)
- [8] C. J. Stairmand, "The design and performance of cyclone separators, Trans. Instn. Chem. Engrs. 29, pp. 356-383(1951).
- [9] W. B. Smith, R. R. Wilson and D. B.Harris, "A five-stage cyclone system for in-situ sampling". Environ. Sci. technol. 13, pp. 1387-1392(1979).
- [10] R. Jackson, Mechanical Equipment for Removing Grit and Dust from Gases, Cheney and Sons, Banbury Press, England(1963).
- [11] J. Dirgo, and D. Leith, "Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results

with Theoretical Predictions", *Aerosol Science and Technology*, 4, pp. 401-415(1985)

- [12] Y. Zhu, and K. W. Lee, "Experimental Study on Small Cyclones Operating at High Flowrates, *Journal of Aerosol Science*, 30(10), pp. 1303-1325(1999).
- [13] T. Jaroszczyk, and T. Ptak, "Experimental study of aerosol separation using a minicyclone," *Power and Bulksolid Confer(10th Annual)*, pp. 611-622(1985).
- [14] M. E. Moor, "Characterization of sampling cyclones. M.S. Thesis," Texas A&M University, College Station, TX. (1986).
- [15] M. E. Moore and A. R. Am. McFarland, "Design of stairmand-type sampling cyclones," *Hyg. Assoc. J.* 51, pp. 151-159(1990).