

Application of Cyclone to Removal of Hot Particulate in Hot Cell

Hot Cell 내의 고방사능 분진 제거를 위한 사이클론 적용 실험

Gye-Nam Kim, Sung-Yeol Lee, Hui-Jun Won, Chong-Hun Jung and Won-Zin Oh

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseung-Gu, Daejeon

kimsum@kaeri.re.kr

김계남, 이성열, 원휘준, 정종현, 오원진

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

(Received January 04, 2005 / Approved February 18, 2005)

ABSTRACT

The size and main ingredient of hot particulate generated during the nuclide experiment in hot cells of nuclear facilities were $0.5300 \mu\text{m}$ and UO_2 . A cyclone filter equipment which consists of a cyclone and Bag/HEPA filter was devised to remove hot particulate generated during the nuclide experiment in hot cells of nuclear facilities. The experimental conditions to maximize the collection efficiency of hot particulate were suggested through experiments done with the cyclone filter equipment. With the large size of simulated particulate, the collection efficiency of the particulate was high. When the size of simulated particulate was more than $5 \mu\text{m}$, the collection efficiency of the particulate was more than 80% and when the size of simulated particulate was less than $1.0 \mu\text{m}$, the collection efficiency decreased by less than 70%. If the inflow velocity of simulated particulate was increased, the collection efficiency of the particulate was also increased. When the inflow velocity of simulated particulate was more than 12m/sec, the collection efficiency was higher than 70%, but after 17 m/sec inflow velocity, no change observed. The collection efficiency of the simulated particulate can be enhanced with the length of vortex finder inside the chamber. With the length of vortex finder, 7.2cm, the observed collection efficiency of the particulate was the maximum. Moreover, when the sub-cone was attached under the cyclone, the collection efficiency of cyclone increased 2%. It was found that effect by attachment of sub-cone was not serious.

Key Words : hot particulate, cyclone, collection efficiency, velocity, size, vortex finder, sub-cone

요약

원자력시설 핫셀 (Hot Cell)내에서 핵종실험 시 발생하는 고방사능 분진(Hot Particulate)의

크기는 0.5300 μm 이고 주 핵종은 UO_2 였다. 핫셀 내의 고방사능 분진을 제거하기 위해 사이클론과 Bag/HEPA 필터로 구성된 장치를 고안하였고, 이 장치의 사이클론에 의해 고방사능 분진을 최대 포집할 수 있는 실험조건을 제시했다. 모의입자의 크기가 클수록 입자의 포집효율은 높았다. 모의입자의 크기가 5 μm 이상일 때, 입자의 포집효율은 80%보다 높았다. 모의입자의 크기가 1.0 μm 보다 작을 때, 포집효율은 70% 보다 작았다. 모의입자의 유입속도가 12 m/sec보다 클 때, 포집효율은 70%보다 높았다. 그러나 유입속도가 17 m/sec 보다 클 때 포집효율의 증가율은 크지 않았다. 모의입자의 포집효율은 Vortex Finder의 길이가 7.2 cm 이하일 때, 길이의 증가와 함께 높아졌지만 7.2 cm 이상일 때는 낮아지기 시작했다. 그러므로 Vortex Finder의 길이가 7.2 cm 일 때, 최대포집효율을 나타냈다. 사이클론 밑에 보조콘 부착 시 모든 속도 범위에서 약 평균 2% 정도 포집효율이 증가하므로 보조콘 부착효과가 크지 않았다.

중심단어 : 고방사능 분진, 사이클론, 포집효율, 유입속도, 입자크기, vortex finder, sub-cone

I. 서론

국내 원자력시설 가동 중 원자력 시설 및 관련 장치들이 방사능으로 오염될 수 있으므로 주기적으로 오염된 부분을 제염할 필요가 있다. 특히 원자력시설 핫셀(Hot Cell)에서는 사용후 핵연료의 산화환원 및 분쇄공정, 사용후 핵연료의 절단 및 분말화 공정, 균분리 공정, 사용후 핵연료 금속전환 공정 등을 수행하고 있으므로 핫셀 바닥면과 벽면 그리고 핫셀 내부에 있는 여러 장치표면들이 연구실험 과정에서 발생한 고방사능 분진과 고방사능 핵연료의 조사 등에 의해 오염되어 핫셀내의 방사능 준위가 높아지고 있다. 그러므로 핫셀내에서의 핵종실험을 원활히 수행하기 위해서는 주기적으로 핫셀 내부 표면과 장치표면에 오염된 고방사능 분진을 제거하여 핫셀 내의 방사능 준위를 낮추어야 한다. 한편, 표면에 단단히 고착된 고방사능 분진은 CO_2 Blasting, 초음파 PFC 제염, 플라즈마 제염 등과 같은 건식제염기술을 사용하여 제거효율을 높일 수 있다[1, 2]. 지금까지는 핫셀 내에서 실험 시 발생되어 내부 표면과 장치표면에 오염된 고방사능 분진을 알코올을 묻힌 휴지로 제거하거나 진공청소기로 흡수하는 방법을 사용해왔다. 알코올을 묻힌 휴지를 사용할 때, 폐기물량이 증가하며 진공청소기를 사용할 때 진공청소기에 사이클론이 부착되어있지 않아 필터가 단시간에 포화되며 핫셀 내

에서 포화된 필터의 교환이 어렵다. 또한, 고방사능의 고방사능 분진이 진공청소기 몸체 및 필터에 많은 부하를 주어 진공청소기의 수명이 단축되었다. 그러므로 핫셀 내에 발생한 고방사능 분진들을 제거하기 위해 사이클론, Bag Filter, 그리고 HEPA Filter로 구성된 새로운 고방사능 분진 처리장치의 개발이 필요하다. 이 장치 중 사이클론으로는 주로 직경 약 5 μm 이상의 고방사능 분진들을 제거하고 BAG/HEPA Filter로는 5 μm 이하의 입자들을 제거하고자 한다.

사이클론은 1800년말 이래 발생한 산업가스로부터 먼지입자를 제거하기 위해 또는 대기 샘플링을 위한 미립자를 포집하기 위해 널리 사용되어 왔고, 단 순설계와싼 유지비, 크기와 유속과 같은 광범위한 가동조건에의 적용성 등이 사이클론을 미립자 제거 장치로 가장 널리 사용하는 이유이다. 작은 사이클론들은 대기샘플링을 위해 대기오염 제어분야에서 미립자를 수집하기위해 사용된다. 반면에 큰 사이클론은 산업가스로부터 미립자를 제거하기 위해 사용된다[3-5].

본 연구에서는 원자력시설 핫셀 내에서 발생한 고방사능 분진을 제거하기 적합한 사이클론이 부착된 처리장치를 개발하였고 제작된 처리장치를 사용하여 사이클론에 의한 미립자 포집효율을 최대화할 수 있는 실험조건을 도출하고 사이클론의 포집효율을 높이기 위한 보조콘 부착시의 포집효율 증가율을 분석했다.

Table 1. Component of hot particulate generated in hot cells of nuclear facilities

제염대상연구시설명	고방사능 분진	배기체내의 고방사능 분진
DUPIC 핵연료제조시설	산화환원및분쇄공정: U ₃ O ₈ , PuO ₂ , CsO, RuO ₂ , Tc, 질카로이 등	SF절단/산화시: Cs, Ru, I, C Kr, Xe, T 등
SF 차세대관리시설	SF 분말화공정: U ₃ O ₈ , PuO ₂ , CsO, RuO ₂ , CsCl Tc, 질카로이	사용후핵연료 금속전환공정: I, Kr, Xe 등
군분리/화학전환시설	군분리공정: Mo, Tc, Ru, Sr, Zr, TRU(Am, Pu) 등	SF연소특성실험: Cs, Sr, Ru, I, Kr, Xe, 등
PIEF/IMEF 시험시설	사용후핵연료 절단시: TRU(Am, Pu), UO ₂ , Cs, Sr, Tc, 질카로이	금속폐기물 용융시: Cs, Ru, I, Sr 등

II. 고방사능 분진 오염특성 분석 및 사이클론 제작실험

가. 고방사능 분진의 오염특성 분석

한국원자력연구소 내의 연구시설 즉 DUPIC 핵연료제조시설, SF 차세대관리시설, 군분리/화학전환시설, PIEF/IMEF 시험시설 등이 있다. 각 원자력 연구시설이 운영하는 핫셀에서는 사용후 핵연료의 산화환원 및 분쇄공정, 사용후 핵연료의 절단 및 분말화공정, 군분리 공정, 사용후 핵연료 금속전환 공정 등을 수행하고 있으므로 핫셀 바닥면과 벽면 그리고 핫셀 내부에 있는 여러 장치의 표면은 연구시험 과정에서 발생한 고방사능 분진(고방사능 분진)과 고방사능 핵연료의 조사 등에 의해 오염되므로 주기적으로 핫셀 표면과 장치표면에 오염된 고방사능 분진을 제거해 주어야 한다. Table 1은 각 연구시설에서 사용하는 핫셀 내에 오염된 고방사능 분진의 성분과 건식 제염 시 발생하는 배기체내의 고방사능 분진의 성분이다.

원자력시설 핫셀 내에서 사용후 핵연료시험 시 발생하는 고방사능 분진의 크기는 Table 2와 Fig. 1과 같이 주로 0.530 μm이다. 즉, DUPIC 산화환원 공정 시 발생하는 고방사능 분진의 크기는 1015 μm이며, 분쇄공정 시는 약 1 μm 이고, 사용후핵연료 절단, 파괴, 인장 시험시 발생하는 고방사능 분진의 크기는 주로 10 μm 이상이며 사용후 핵연료 피복관 주변에 부착된 고방사능 분진 크기는 0.52 μm 이다.

Table 2. Size of hot particulate according to process

핵연료시험 공정	고방사능 분진 크기	주핵종
사용후 핵연료	78 μm	UO ₂
산화환원공정	1015 μm	U ₃ O ₈ , UO ₂
분쇄공정	0.52 μm	U ₃ O ₈ , UO ₂
절단/파괴 공정	10300 μm	UO ₂ , 질카로이
피복관주변 CRUD	0.52 μm	Cs, Sr, U, Co, Fe, Mn

나. 사이클론 제작

사이클론의 8개 부분에 대해 사이클론의 몸체 반경(D)의 비로 표시하여 사이클론을 설계해왔고, 사이클론몸체 반경(D)과 사이클론 포집효율 50% 시의 유입 미립자직경과의 관계가 사이클론설계에 참조되어왔다[6, 7]. Table 3에서는 고효율 사이클론을 설계하기 위해 Stairmand가 제시한 각 부분에 대한 비율을 보여준다. 이 Stairmand 설계는 개발되어 온 표준 사이클론 설계의 한 예이며 시행오차연구를 통해 개발되었다[8, 9]. 제작한 사이클론의 치수는 Stairmand치수를 근거로 Table 3과 같이 결정했다. 단지 Vortex Finder는 고정시키지 않고 상하로 움직이도록 하여 실험을 통해 최적의 길이를 결정했다. 사이클론의 미립자 제거 성능을 실험하기위해 사이클론 앞부분에는 미립자를 투입할 수 있는 투입장치를 설치했고 사이클론 뒤쪽에는 진공 팬을 설치하여 미립자가 사이클론으로 유입하며 또한 유입속도가 변화될 수 있도록 하였다. 투입장치 앞에는 Anemometer(TESTO 4510, 풍속 0.2-60 m/sec, 온

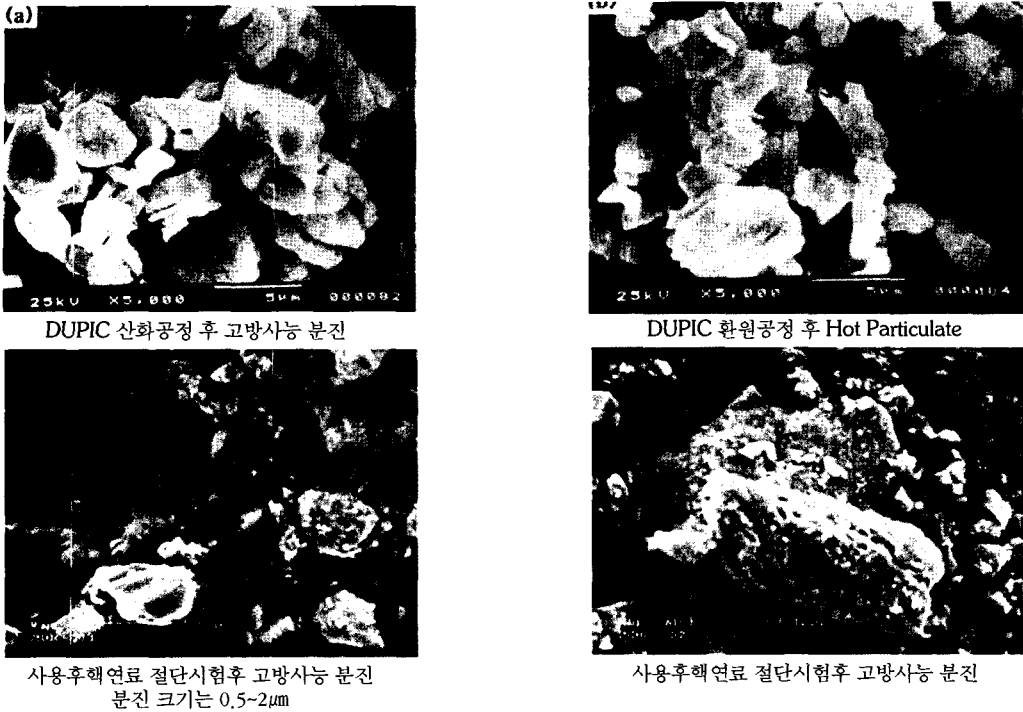


Fig.1. Size of hot particulate photographed by SEM

Table 3. Dimensions of Stairmand High-Efficiency Cyclone Design and Actual Cyclone Design

Cyclone Part Name	Dimension Ratio (Dimension/D)	Actual Length (cm)
Cyclone Diameter, D	1.0	14.5
Gas Outlet Diameter, De	0.5	7.2
Inlet Hight, a	0.5	7.2
Inlet Width, b	0.2	2.9
Vortex Finder length, S	0.5	-
Upper Cyclone Hight, H	1.5	21.7
Lower Cyclone Hight, h	2.5	36.2
Dust Outlet Diameter	0.375	5.1

도-40-70 ℃, 습도0-100 % 측정)를 설치하여 유입속도를 측정했다.

모의입자로는 110 μ m의 크기를 가진 Al₂O₃와 TiO₂Shape Power를 사용하여 제거효율 측정 실험을 수행했다. Fig. 2는 고방사능 분진 처리장치의 설계도이며, 각 단위장치의 크기를 보여준다. 투입장치 안에 위치한 모의입자는 뒤쪽에 설치된 흡입펌프에 의해 사이클론 내로 유입된다. 유입된 모의입자는 사

이클론을 통과하며 사이클론 밑에 위치한 모의입자 포집장치에 대부분의 굵은 입자들이 제거된다. 사이클론에서 유출된 모의입자는 Fig. 2에서 보듯이 Bag Filter 하우징 밑으로 들어가 원통형 Bag Filter 중앙으로 유입된 후 원통형 필터 밖으로 퍼져나가며 미세 입자가 제거된다. Bag Filter 하우징 위쪽관으로 유출된 모의입자는 다시 HEPA Filter를 거치며 좀더 작은 미세입자가 제거된다.

Fig. 3은 제작된 고방사능 분진 처리장치이며, 재질은 SUS 304를 사용했고 단지 사이클론 앞 모의입자 유입부분은 투명 아크릴을 사용하여 모의입자의 유입 상태를 관찰할 수 있게 하였고 후미에는 진공펌프를 부착하여 모의입자를 흡입하였다. 이장치를 이용하여 사이클론에서 최대한으로 모의입자를 제거할 수 있는 최적실험조건을 아래의 실험을 통해 도출하였다.

III. 미립자 제거효율실험

가. 크기에 따른 미립자 제거효율 도출 실험
사이클론으로 제거할 수 있는 미립자의 크기의 한

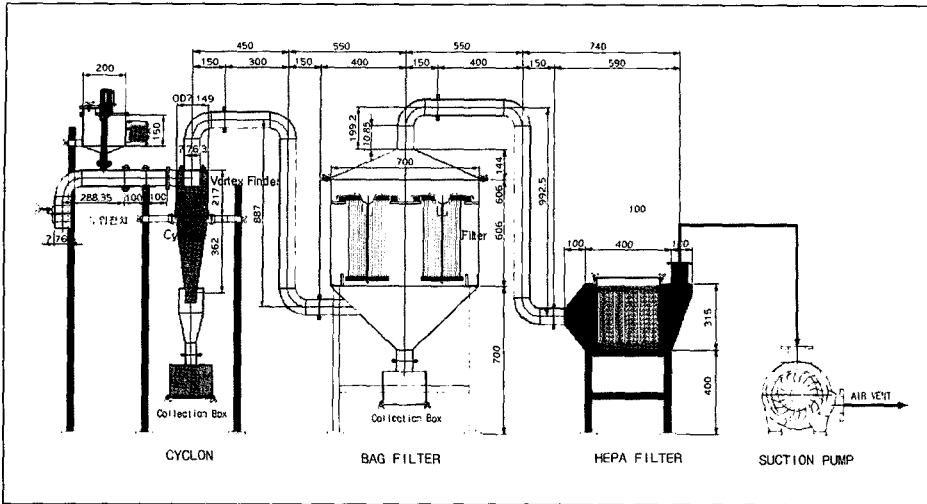


Fig.2. Schematic diagram of hot particulate treatment equipment

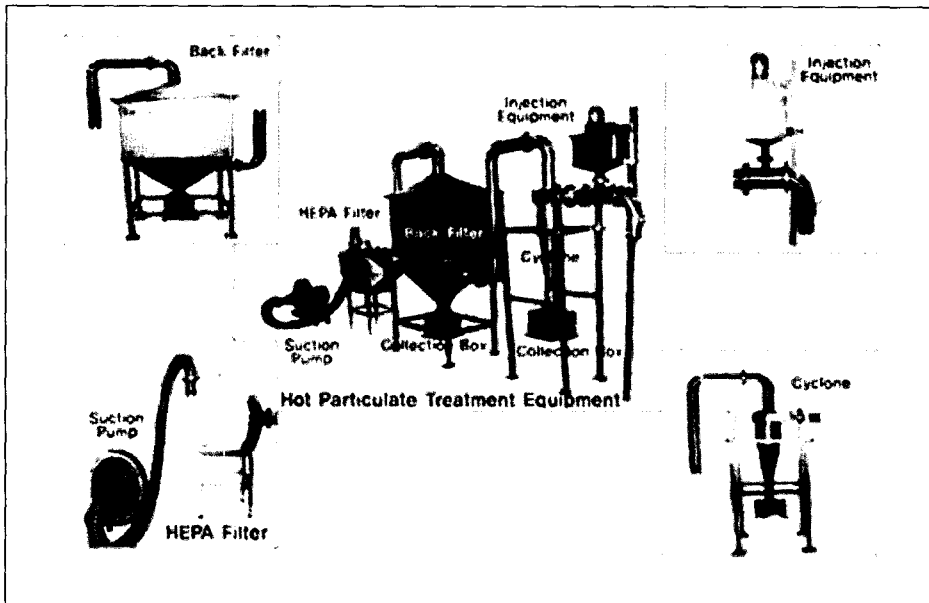


Fig. 3. Hot particulate treatment equipment manufactured

계는 보통 110 μm 이다. 본 실험을 통해 제작된 사이클론이 최적으로 제거할 수 있는 미립자의 크기를 선정한다. 모의입자 유입속도 15 m/sec, Vortex Finder 길이 7.2 cm로 고정시킨다. 110 μm 의 크기를 가진 Al_2O_3 와 TiO_2 Shape Powder를 사용하여 제거효율 측정 실험을 수행했다. 모의 입자는 순도 99.99% 이고 평균 1, 2.5, 5, 10 μm 크기의 Al_2O_3 (MW=101.98)와 TiO_2 (MW=79.9) 모의입자를 사용했다. 차례로

각 모의입자에 대한 제거효율을 측정하여 입도별 제거효율을 도실했다. 이때, 각 모의입자 질량은 0.1 mg 정밀도를 가진 밸런스 측정했다. 100g의 모의입자를 사이클론에 유입시키고 사이클론을 통과 시 포집박스 내에 포집된 모의입자질량을 측정하여 모의입자 제거효율을 산정했다. 진공 팬은 Fig. 3과 같이 사이클론과 필터 후미에 설치하여 모의입자 투입장치로부터 투입되는 모의입자를 흡수한다. 유입공기

속도를 측정하기 위해 Anemometer를 단위장치를 잇는 연결관에 부착하여 연결관을 통과하는 모의입자의 속도를 측정했다.

한편, 앞에서 제시한 모의입자의 크기는 평균값이므로 실제 오염입자 제거 시에 약간의 오차는 있으리라 사료되며, 실제 오염물질은 UO_2 (MW=270)는 모의입자 Al_2O_3 와 TiO_2 보다 분자량이 크므로 아래 식 [10]에 의하면, 미립자의 분자량(ρ)이 클수록 포집효율이 높아지므로 실제 오염물질에 대한 사이클론의 제거효율은 증가하리라 예측된다. 여기서, d_{50} 은 포집효율 50% 시의 미립자 직경, Q는 유입속도, z는 사이클론 코어의 길이이며, Vt는 미립자 접선속도이다.

나. 미립자 최적 유입속도 결정 실험

사이클론 실험 시 모의입자의 유입속도는 보통 1020 m/sec이다. 앞의 실험에서 선정된 크기의 모의입자를 사용하여 Vortex Finder 길이가 7.2 cm로 조절한 후, 0.75 KW진공펌프를 사용하여 투입장치로부터 모의 입자 유입속도를 10, 12, 15, 17, 20 m/sec로 변화시키며 사이클론을 통과시켰을 때 사이클론

$$d_{50} = \left\{ \frac{9\rho Q}{\pi z \rho Vt^{2max}} \right\}^{1/2}$$

미립자 포집박스에 포집된 모의입자의 질량을 측정하여 유입속도별 포집효율을 측정하였다. 모의입자 유입속도에 따른 포집효율을 경향을 분석하고 최적의 모의입자 유입속도를 도출한다.

다. 최적 Vortex Finder 길이 결정 실험

사이클론 설계 시 권장되는 Vortex Finder의 길이는 보통 0.5D이며 본 사이클론에서는 7.25 cm에 해당한다. 앞의 실험에서 선정된 크기의 모의입자를 선정된 유입속도로 사이클론에 유입시켰다. Vortex Finder의 길이를 4, 6, 7.2, 10, 13 cm로 변화시키며 사이클론 미립자 포집박스에 포집된 모의입자의 질량을 측정하여 각 Vortex Finder의 길이에 대한 포집효율을 측정하였다. 측정결과를 분석하여 높은 포집효율을 보이는 Vortex Finder 길이를 선정한다.

라. 사이클론에 보조콘 부착 후 실험

사이클론의 포집효율을 증가시키기 위해 사이클론과 미립자 포집박스 사이에 제작한 보조콘을 Fig. 4와 같이 부착하여 사이클론에서 나온 모의입자가 다시 사이클론으로 유입되는 것을 방지하였다. 2.5 μ m 크기의 모의입자를 사용하여 Vortex Finder 길이가 7.2 cm일 때, 모의입자 유입속도를 5, 7, 10, 13, 15 m/sec로 변화시키며, 각 유입속도에 대한 모의입자 포집효율을 측정하였다. 그래서 보조콘이 포집효율에 미치는 영향과 유입속도가 보조콘 부착 시의 포집효율에 미치는 영향을 분석하였다.

III. 결과 및 토의

가. 포집 가능 최적 미립자크기 도출 실험

1 μ m로부터 10 μ m까지의 크기가 다른 미립자를 사이클론에 유입시켰을 때, 사이클론 포집기에서의 포집효율은 Fig. 5와 같았다. 이때, Vortex Finder 길이는 7.2cm이고, 미립자의 유입속도는 15 m/sec로 일정하게 했다. 실험결과 Kim 등(2001)에 의한 실험 결과와 마찬가지로 미립자의 크기가 클수록 포집효율은 증가했다[11]. 즉, 모의입자 크기가 1 μ m이상일 때 포집효율은 70 % 이상으로 나타났고, 5 μ m이상일 때 포집효율은 80 % 이상으로 나타났다. 또한, 모의입

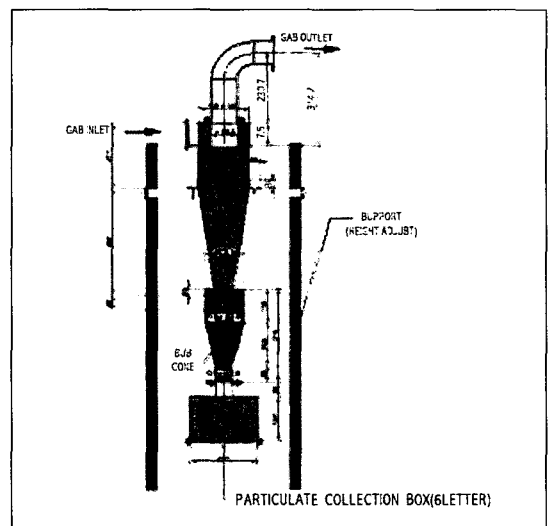


Fig. 4. Cyclone attaching sub cone above particulate collection box

자의 크기가 2.5 μm 보다 작아질 때 포집효율은 좀더 큰 비율로 감소하는 것으로 나타났다. 2.5 μm 의 모의 입자를 사용했을 때, 포집효율은 77.5%로 나타났다. 아래의 실험에서는 매개변수에 대한 포집효율의 영향을 크게 하기 위해 2.5 μm 모의입자를 사용했다.

나. 미립자 최적 유입속도 결정 실험

앞의 실험에서 선정된 2.5 μm 크기의 모의입자를 사용하여 Vortex Finder 길이가 7.2 cm일 때, 모의 입자 유입속도를 10, 12, 15, 17, 20 m/sec로 변화시켰을 때, 모의 입자 포집효율을 측정했고, 포집효율은 Fig. 6과 같았다. Kessler과 Leith(1991)[12], Zhu와 Lee(1999)[13], Kim과 Lee(1990)[14] 등이 제시한 것처럼 미립자의 유입속도는 포집효율에 상당한 영향을 미쳤다. 즉, 모의입자의 유입속도가 빨라질수록 포집효율은 증가했다. 모의입자유입속도가 12 m/sec 이상일 때, 포집효율은 70% 이상이 되었다. 그러나 유입속도가 17 m/sec 이상일 때, 포집효율의 증가가 둔화되는 것으로 나타났다. 그러므로 본 연구의 실험에서는 유입속도가 너무 빠르지 않고 포집효율도 적당한 15 m/sec를 사용했다.

다. 최적 Vortex Finder 길이 결정 실험

모의입자의 크기가 2.5 μm 이며 유입속도가 15 m/sec일 때, 최적의 Vortex Finder의 길이를 선정하는 실험을 수행했다. Lim 등(2004)에 의하면 Vortex Finder의 모양과 직경에 따라 포집효율이 다르다. 즉

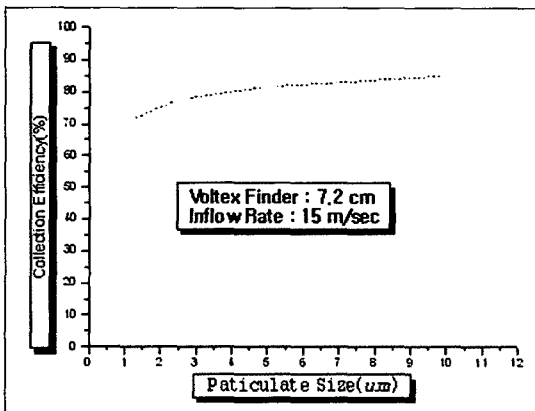


Fig. 5. Collection efficiency of cyclone versus particulate size

직경이 작을 때 그리고 실린더 보다 큰 모양일 때 효율이 약간 증가했다[15]. 본 논문에서는 Vortex Finder의 길이를 4, 6, 7.2, 10, 13 cm로 변화시키며 포집효율을 측정하였다. 측정결과 포집효율은 Fig. 7과 같이 Vortex Finder의 길이를 사이클론 내부로 4, 6, 7.2 cm로 증가시키며 따라 포집효율도 증가했다. 그러나 7.2 cm를 넘어 10, 13 cm로 Vortex Finder 길이를 증가시켰을 때, 포집효율은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 그러므로 Vortex Finder 길이가 7.2 cm일 때 최대의 포집효율을 나타냈다.

라. 사이클론에 보조콘 부착 후 실험

사이클론 과 미립자 수집기 사이에 보조콘을 설치했을 때, 보조콘에 의한 포집효율의 증가율을 측정했다. Fig. 8과 같이 2.5 μm 크기의 모의입자를 사용하여 Vortex Finder 길이가 7.2 cm일 때, 모의입자 유입속도를 5, 7, 10, 13, 15 m/sec로 변화시켰을 때, 보조콘 부착 시 모든 속도 범위에서 약 평균 2% 정도 포집효율이 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 보조콘 부착 효과는 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

위의 고방사능분진 처리장치를 원자력 연구시설 핫셀에 적용 시 개선되어야할 부분은 다음과 같다. 핫셀의 장치 투입구의 크기가 1x1 m이므로 Bag/HEPA 필터의 크기를 축소해야 하며, 사이클론 밑에 부착된 고방사능 분진 포집장치는 원거리에서 Manipulator(로버트팔)로 탈부착 가능하게 단순화시켜야 한다. Bag/HEPA 필터는 카트리지 형태로 만들

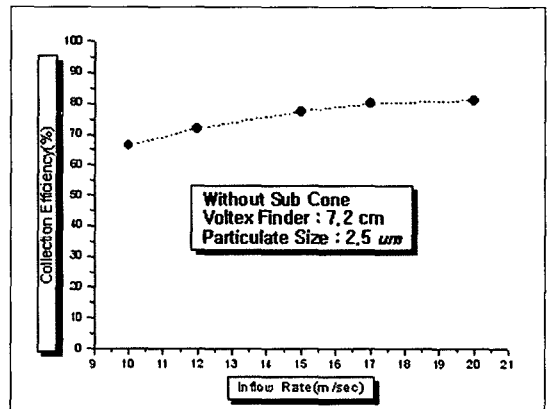


Fig. 6. Collection efficiency of cyclone versus inflow rate of particulate

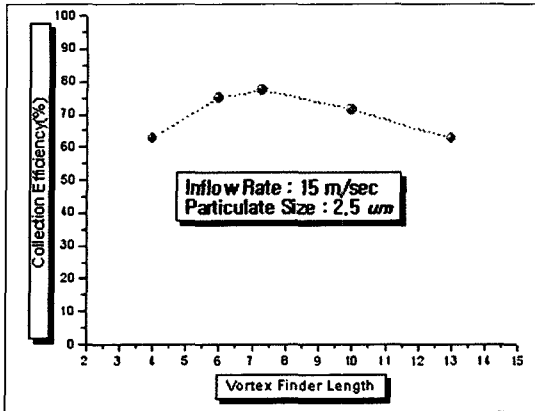


Fig. 7. Collection efficiency of cyclone versus vortex finder length

어 교환이 쉽게 해야 하고 재질도 방사능에 강한 것을 사용해야 한다. 고방사능분진 처리장치의 핫셀 내에서의 사용빈도가 작기 때문에 필터의 교환으로 인한 2차폐기물 생성량은 작고, 미립자가 고방사능분진이고 핫셀 내에서 작업하기 위해 장치의 단순화가 필요하므로 필터에 Back Washing 장치를 부착하지 않는 것이 타당하리라 사료된다. 한편, 모의실험 결과 1 μm를 사이클론에서 70% 이상 제거 가능하므로, 실제 고방사능 분진 0.5300 μm에 대해 대부분의 제거는 가능하리라 사료된다.

IV. 결론

본 연구에서는 원자력시설 핫셀 내에서 발생된 고방사능 분진의 오염특성을 조사하고 이 고방사능 분진을 제거하기 적합한 사이클론필터 처리장치를 고안했다. 고안된 장치를 사용하여 사이클론에 의한 미립자 포집효율을 최대화할 수 있는 실험조건을 도출했다. 핫셀 내에서 발생된 고방사능 분진의 크기는 0.5300 μm이고 주 핵종은 UO₂였다. 사이클론에 투입한 모의입자의 크기가 클수록 사이클론의 포집효율은 증가했다. 모의입자의 크기가 5 μm 이상일 때 포집효율은 80% 이상으로 나타났다. 또한, 모의입자의 크기가 2.5 μm보다 작아질 때 포집효율은 좀더 큰 비율로 감소하는 것으로 나타났다. 모의입자 유입속도가 12 m/sec 이상일 때, 포집효율은 70% 이상이 되었고 유입속도가 빨라질수록 포집효율은 증

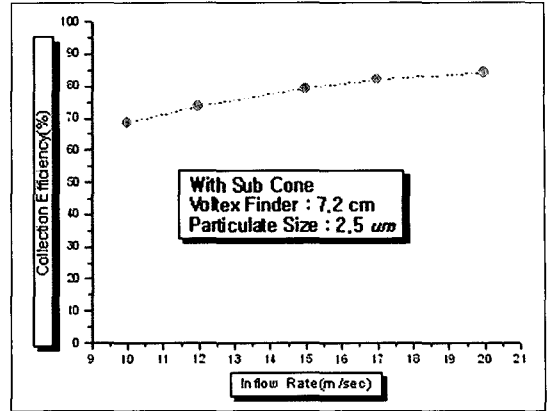


Fig. 8. Collection efficiency of cyclone with sub-cone versus particulate

가했다. 그러나 유입속도가 17 m/sec 이상일 때, 포집효율의 증가가 둔화되는 것으로 나타났다. Vortex Finder의 길이를 증가시키기에 따라 포집효율도 증가했지만 Vortex Finder 길이를 7.2 cm 이상 증가시켰을 때, 포집효율은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 포집효율은 Vortex Finder 길이가 7.2 cm일 때 최대임을 알 수 있었다. 사이클론 하부에 보조콘 부착 시 모든 속도 범위에서 약 평균 2% 정도 포집효율이 증가하여 보조콘 부착 효과는 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

사사

본 연구는 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다

References

1. W.J. Oh, G.N. Kim and H.J. Won, Decontamination Technology Development for Nuclear Research Facilities, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/RR-2416 (2003)
2. W.J. Oh, G.N. Kim and H.J. Won, Development of High-Level Radioactive Waste Treatment and Conversion Technologies, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/RR-2131 (2000)
3. 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)
4. W.C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*, 2nd Ed., Wiley, New York(1999)
 5. 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)
 6. L.C. Kenny and R.A. Gussman, "Characterization and modeling of a family of cyclone aerosol preseparator", *Journal of Aerosol Science*, 26, pp. S777-S778(1995)
 7. G. Liden and A. Gudmundsson, "Semi-empirical modeling to generalize the dependence of cyclone collection efficiency on operating conditions and cyclone design", *Journal of Aerosol Science*, 28, pp. 853-874(1997)
 8. R. Jackson, "Mechanical Equipment for Removing Grit and Dust from Gases". Cheney and Sons, Banbury, England(1963)
 9. J. Dirgo and D. Leith, "Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions", *Aerosol Science and Technology*, 4, pp.401-415(1985)
 10. D. L. Iozia and D. Leith, "Effect Cyclone Dimension on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency", *Aerosol Science and Technology*, 10, pp. 491-500(1989).
 11. H.T. Kim, K.W. Lee and M.R. Kuhlman, "Exploratory Design Modifications for Enhancing Cyclone Performance", *Journal of Aerosol Science*, 32, pp. 1135-1146(2001).
 12. M. Kessler and D. Leith, "Flow Measurement and Efficiency Modeling of Cyclones for Particle Collection", 15, pp. 8-18(1991).
 13. 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).
 14. J.C. Kim and K.W. Lee, "Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones, *Aerosol Science and Technology*, 12, pp. 1003-1015(1990).
 15. K.S. Lim, H.S. Kim, and K.W. Lee, "Characteristics of the Collection Efficiency for a Cyclone with Different Vortex Finder Shapes", *Journal of Aerosol Science*, 35, pp. 743-754(2004).