

## 원자력시설의 제염해체 공정중 분진처리 성능평가

이 기원\*, 최 병선, 이 후근, 오 원진, 이 병직, 박 현수

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

원자력시설의 콘크리트 표면제염 및 절단을 효과적으로 수행하기 위해서는 먼저 방사성물질이 제염구역의 외부로 누출되지 않도록 작업구역을 비방사성 구역과 분리하고, 국부적으로 오염된 콘크리트 표면을 제염하는 기술, 해체 절단하는 기술 및 경제적인 방법으로 방사성물질의 확산을 최소화하는 분진제거 기술 등이 개발되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 원자력시설의 콘크리트 표면제염 및 절단시 발생하는 콘크리트 분진처리 필터시스템을 개발하기 위하여, 중량 및 고밀도 콘크리트 내부로의 세슘 및 스트론튬 핵종의 침투깊이 실험을 수행하였으며, 다중 사이클론을 이용하여 DOP 에어로졸 및 콘크리트 표면절단 장비인 scabblers에 의해 발생한 중량 및 고밀도 콘크리트 분진의 특성을 분석하고 포집효율 성능시험을 수행하였다. 또한 사이클론 성능평가 프로그램을 작성하여 사이클론의 포집효율을 예상하였으며 이를 실험값과 비교하였다.

### 1. 서 론

콘크리트 표면제염 및 재활용에 관한 국내외 연구동향은 주로 원자력시설의 제염해체시 콘크리트의 표면제염 및 절단, 비오염된 콘크리트의 재활용을 위한 기술 개발에 집중되고 있다. 국내의 경우에도 TRIGA Mark-III 연구로의 제염해체시에는 원자로 및 핫셀의 콘크리트 표면제염 및 절단공정이 매우 중요한 단계가 되며, 발생된 콘크리트 분진을 효과적으로 제거하는 분진처리 여과시스템이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 콘크리트 분진 발생량 및 입자 분포도를 예측하기 위하여 Cs 및 Sr을 대상으로 콘크리트 내부로의 침투깊이를 확인하기 위한 실험을 수행하였으며, scabblers에 의해 발생한 분진의 특성을 분석하였다. 또한 전체 여과계통의 부하를 줄이고, 한번 설치하면 반영구적으로 사용할 수 있는 사이클론을 prefilter로 적용하기 위해 다중 사이클론의 미

세분진에 대한 성능실험을 수행하였으며, 이를 예측할 수 있는 사이클론 성능평가 프로그램을 개발하였다.

## 2. 실험 및 프로그램 개요

### 2-1. 침투실험

0.1 mol/l~1 mol/l 농도의 세슘 및 스트론튬 용액내에 콘크리트 시편을 직육면체 형태로 만들어 집어넣고 최대 일주일동안 용액과 접촉하도록 하여 콘크리트 내부로 핵종이 침투되도록 하였다. 콘크리트 내부로 두 핵종의 침투깊이를 정확히 측정하기 위하여 콘크리트 시편 육면체중 다섯면은 에폭시 코팅을 하여 하나의 단면만이 용액과 접촉하도록 하였다. 일정기간 경과후 콘크리트 시편을 건조한 뒤에 다이아몬드 절단기를 사용하여 단면을 절단한 후 SEM-EDAX분석을 통하여 표면으로부터 내부로의 두 핵종의 침투깊이를 측정하였다. 내부로의 이온 침투깊이는 콘크리트 표면으로부터 일정간격에서 X-ray count수를 측정하여 구하였으며, 기기분석상 background를 보정하였다.

### 2-2 사이클론 성능실험

다중 사이클론에 의한 DOP 에어로졸의 포집효율을 측정하기 위하여 DOP 발생기로부터 발생된 1 $\mu$ m이하의 에어로졸을 사이클론 입구에 주입하고 DOP 에어로졸 검출기를 사용하여 각 단으로부터 누출량을 측정하였으며, 콘크리트의 주 성분인 시멘트 원료(크기는 10 $\mu$ m 이상)를 대상으로 다중 사이클론에서 분진 포집효율을 측정하였다. 또한 하나로 건축시 사용되었던 중량 콘크리트와 고밀도 콘크리트에 대해서 Scabblor(Model : 미국 PENTEK사 제품, SQUIRREL-III)를 사용하여 표면을 절단하는 과정에서 발생하는 분진의 포집실험을 수행다.

### 2-3 프로그램 상관식

콘크리트 분진제거에 있어서 여과계통을 선정하는데 있어 사이클론의 성능을 미리 예상하여 효율적인 사이클론의 크기를 결정하는 것이 필요하다. 따라서 아래의 상관식들을 사용하여 프로그램을 작성하였으며, 이에 대한 흐름도를 Fig 1.에 나타냈다[1-3].

#### 1) 분율효율

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \left[ \frac{G \tau_i Q}{D_c^3} (n+1) \right]^{0.5/(n+1)} \right\}$$

$$\text{여기서, } \tau_i = \frac{\rho_p (d_p)^2}{(18\mu)}, \quad G = \frac{8 K_c^2}{K_a^2 K_b^2}, \quad n = 1 - \left[ 1 - \frac{(12D_c)^{0.14}}{2.5} \right] \left[ \frac{T+460}{530} \right]^{0.3}$$

#### 2) 총괄효율

$$\eta_T = \sum m_i \eta_i$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 콘크리트 내부로의 방사성핵종의 침투

Fig. 2은 1mol/l 용액에서 Cs 및 Sr 이온의 침투깊이를 측정한 결과인데 콘크리트 내부에 존재하는 세슘이온이 스트론튬보다 약간 많은 것으로 보이지만 침투깊이는 약 5~6mm로 거의 비슷하였다. 세슘의 경우 약 6mm에서 count수가 큰 것은 측정오차일 것으로 생각된다. Hanford의 핫셀 내부의 고강도 콘크리트내부로의 Cs-137 및 Sr-90의 침투깊이는 1.0 ~ 1.5 mm로 나타났고 스트론튬이 세슘보다 콘크리트내로 침투가 더 많이 된 것으로 나타났다. 이와 같이 침투깊이가 본 실험에서의 결과와 큰 차이가 나는 이유는 핫셀내 콘크리트 표면의 노출 분위기는 건조 또는 습윤 분위기이기 때문에 용액내에서의 핵종 이온의 확산속도가 낮기 때문으로 생각된다. 독일의 Gundremmingen 원자력발전소 노심내의 콘크리트 샘플을 채취하여 감마스펙트로미터로 분석한 결과[3], 콘크리트 내부로의 Cs-137의 침투깊이는 광범위하며 약 5mm깊이에서는 약 100 Bq/g을 보여 본 실험결과와 비슷하게 나타났는데 이러한 이유는 콘크리트가 노심내의 용액과 접촉하였기 때문으로 생각된다. 이와같이 방사성핵종의 침투깊이는 콘크리트의 특성 및 노출분위기와 접촉기간에 크게 지배를 받는다는 것을 알 수 있었다. 보통 Cs-137의 침투깊이가 큰 이유는 세슘은 보통 응축수나 세척수내에서 용해된 염 형태로 존재하며 세슘이온은 칼륨이나 나트륨이온보다도 알칼리성이므로 콘크리트내의 칼륨이나 나트륨과 이온교환되기 때문으로 해석하고 있다[4-6].

### 3-2. 다중 사이클론의 성능시험

주입공기 유속 및 DOP농도에 따른 포집효율을 측정한 결과, Fig. 3.에 나타난 바와 같이 최적 유입속도는 17m/sec이었다. 그리고 각 단의 사이클론에서 DOP 에어로졸의 포집효율을 살펴보면 1단에서 가장 높고 4단에서 가장 낮은 투과율을 나타내었다. 또한 DOP 농도변화에 따른 투과율은 DOP농도가 증가함에 따라 각 단에서 투과율이 증가하는 것으로 나타났다. 콘크리트의 주 성분인 시멘트 원료(크기는 10 $\mu$ m 이상)를 대상으로 다중 사이클론에서 분진 포집효율을 측정하였으며 이를 Fig. 4.에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 시멘트 분진의 경우 10 $\mu$ m크기 이상이므로 1단의 사이클론에서 90.8%정도가 포집되고 2단에서 7.0%, 3단에서 0.5%, 4단 사이클론을 사용하면 시멘트 분진의 경우 거의 포집되는 것으로 보인다. 그리고 사이클론의 3단과 4단에 포집된 시멘트 분진의 입자분포 누적량과 입자 분포도를 coulter multisizer(Coulter Electronics Limited, 영국)를 사용하여 측정하였으며 이를 각각 Fig. 5.에 나타내었다. 이 그림에서 보면 3단 사이클론에 포집된 시멘트 분진의 경우 10 $\mu$ m 이하의 분진이 가장 높은 분포도를 나타내고 10 $\mu$ m 이상의 분진의 경우 70 $\mu$ m 크기까지 증가하여 분포하는 것으로 보여지는 데 이것은 포집된 시멘트 분진의 cogulation에 의해서 크기가 커지기 때문으로 생각된다. 그러나 4단 사이클론에서 포집된 시멘트 분진의 경우 3단의 경우와는 약간 다르게 나타났는데, 10 $\mu$ m 이하의 분진 분포도가 3단에 포집된 분진에 비해 더 적게 나타났다. 이러한 현상은 차후 연구를 통해 규명되어야 할 것

으로 보여진다. Scabblar에 의한 중량 콘크리트와 고밀도 콘크리트의 입자분포도는 Fig. 6과 같으며, 이 그림에서 보는 바와 같이 중량 및 고밀도 콘크리트의 표면절단시 발생하는 콘크리트 입자는 70 mesh( $210\mu\text{m}$ )이상이 대부분이고 200( $74\mu\text{m}$ ), 300( $46\mu\text{m}$ ), 400mesh( $37\mu\text{m}$ ) 순으로 입자분포도가 감소되는것을 보이고 있다. 이 결과로 부터 Scabblar를 사용하여 중량 콘크리트와 고밀도 콘크리트의 표면을 절단할 경우 발생하는 분진은 거의 같은 크기와 분포도를 보이고 있는 것으로 여겨진다. 그러나 100 mesh 부근에서 200 mesh 보다 낮은 분포도를 보이고 있는 것은 콘크리트의 표면을 충격하는 scabblar의 연마특성 때문인 것으로 보여진다. 또한 동일 시료중 400 mesh 이하의 입자에 대한 입자분포 누적량 및 입자분포도를 coulter multisizer에 의해서 측정하였으며 이를 Fig. 7.에 각각 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 고밀도콘크리트로부터 표면절단시 발생된  $40\mu\text{m}$  크기이하의 입자는  $20\sim 30\mu\text{m}$  크기가 가장 넓게 분포되는 것으로 나타났으며 중량콘크리트의 경우 입자크기는 고밀도콘크리트에 비하여 약간 적은 크기 분포를 가진 것으로 나타났다. Scabblar에서 배출된 중량 콘크리트와 고밀도 콘크리트의 배출 입자를 수집하여 다중 사이클론에 통과시킨 후 각 단의 포집효율을 중량으로 측정하여 Fig. 8.에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 1단에서 포집효율을 보면 중량 콘크리트가 고밀도 콘크리트에 비해 포집효율이 더 우수하게 나타났고 2단에서 포집효율은 고밀도 콘크리트의 포집효율이 더 우수한 것으로 보여지고 나머지 3, 4단의 사이클론에서는 매우 낮은 포집효율을 보이고 있다. 이와같이 콘크리트의 scabbling 공정시 배출되는 분진을 제거하기 위해서는 4단의 사이클론을 사용하면 거의 모두 분진을 제거할 수 있는 것으로 보여진다.

### 3-3. 이론값과 실험값의 비교

Fig. 9.에 Scabblar에 의해서 발생한 콘크리트 분진에 대한 각 단에서의 포집효율과 이론값을 나타냈다. 그림에서 실험값이 이론값보다 낮게 나타나는데 이는 사이클론의 재분출에 의한 영향으로 침전되었던 분진이 재도약에 의하여 다른 단으로 이동했기 때문일 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

1. 콘크리트 내부로 침투되는 방사성핵종은 주로 Cs-137, Sr-90 및 Co-60으로서 침투깊이는  $\text{Cs} \geq \text{Sr} > \text{Co}$ 의 순이며 최대 약 5mm정도로 추정된다.
2. Cs 및 Sr 용액내에서 고밀도콘크리트 및 중량콘크리트 내부로의 침투깊이를 측정한 결과 침투깊이는 약 5~6mm로 거의 비슷하였다.
3. 다중 사이클론을 사용하여 DOP 에어로졸의 유속 및 농도에 따른 포집효율을 측정한 결과 최적 유입속도는 17m/sec이었으며 prefilter로 사이클론을 사용할 경우 다중 사이클론이 필요하다.
4. 다중 사이클론을 이용하여  $10\mu\text{m}$ 크기 이상의 시멘트 분진 포집효율을 측정한 결과 1단에서 90.8%정도가 포집되며 4단 사이클론을 사용하면 거의 포집되었다.

5. Scabblar를 사용하여 중량 콘크리트와 고밀도 콘크리트의 표면절단시 발생하는 분진은 거의 같은 크기와 분포도를 보였으며, 다중 사이클론을 이용하여 scabblar에서 배출된 배출입자의 포집효율을 측정된 결과 4단의 사이클론을 사용하면 거의 모두 분진을 제거할 수 있었다.
6. 사이클론 포집효율 실험값이 이론값보다 낮게 나타났는데 재분출에 의한 영향으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Kalen, B. and Zenz, F. A. AIChE Symposium Ser., Vol. 70, No. 137, 1974, p388.
2. Leith, D. and Licht, W. AIChE Symposium Ser., Vol. 68, No. 126, 1972, p126.
3. Leith, D. and Mehta, D. Atm. Environ. Vol. 7, 1973, p. 527.
4. W. Ebeling, B. Boedeker and K. Rose, K. H, Schaller, "Decontamination of Concrete, with Particular Reference to Flame Scarfing", Decommissioning of Nuclear power plants, published by Graham & Trotman Ltd. for the commission of the European communities, pp 161-176, 1984.
5. K. Andersson, B. Torstentelt and B. Allard, "Sorption and Diffusion Studies of Cs and I in Concrete, KBS-TR-83-13, stockholm, sweden, 1983.
6. B. Allard, L. Eliasson and S. Hogland, K. Andersson, "Sorption of Cs, I and Actinides in Concrete Systems, KBS-TR-84-15, stockholm, Sweden, 1984.

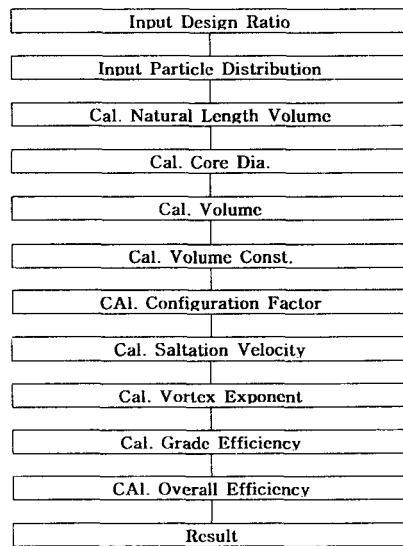


Fig. 1. The program flowchart of the cyclone efficiency evaluation.

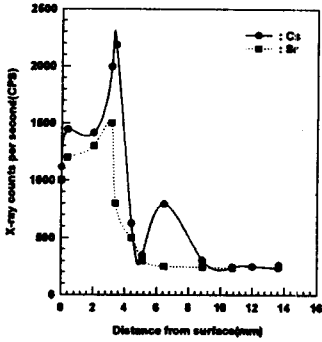


Fig. 2. Penetration in heavy concrete of Ca and Sr

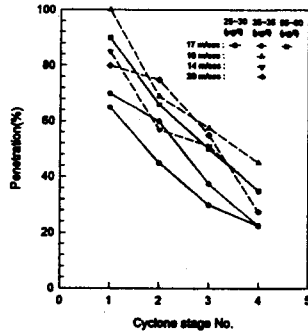


Fig. 3. Effect of inlet velocity on the penetration percent of DOP vapor at each stage in multi-cyclone at variation inlet concentration.

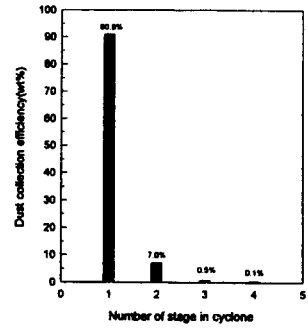


Fig. 4. Collection efficiency of cement powder at each stage in the multi-cyclone.

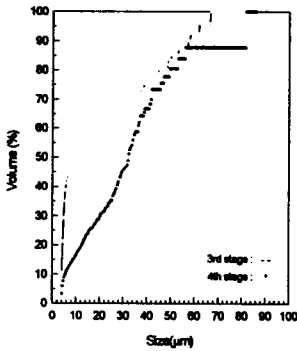


Fig. 5. Cumulative size distribution of cement powder collected at the 3rd & 4th stage in multi-cyclone.

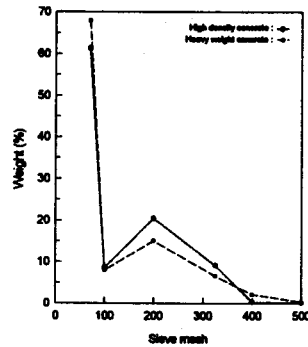


Fig. 6. Particle size distribution of concrete powders generated from scabbling operation with the high-density and heavy-weight concrete.

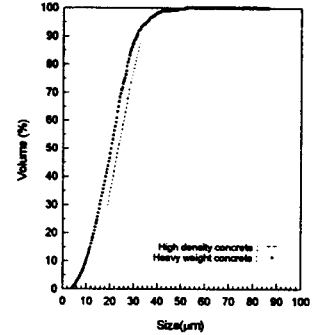


Fig. 7. Cumulative size distribution of concrete powder below 400 mesh generated from scabbling operation with high-density concrete and heavy weight concrete.

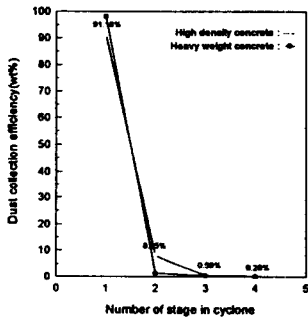


Fig. 8. Collection efficiency in the multi-cyclone for high density concrete and heavy weight concrete dust generated from scabbling operation.

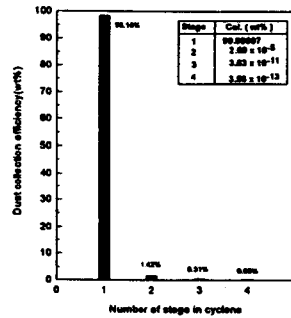


Fig. 9. Comparison experimental and theoretical results for collection efficiency.