

기체 방사성물질 제거용 활성탄 내에서의 유속분포 결정시험

장 덕 원

전 력 연구 원

요 약

원자력발전소의 공조계에 설치되어 운영되는 기체 방사성물질 제거용 침착 활성탄 탭내에서 균일한 공기 유속분포가 유지되고 있는지를 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 본 실험에 사용되는 장비(Tester for Flow Distribution, 이하 TFD라 함)는 원자력 발전소에서 사용하는 침착 활성탄 필터(Adsorber)내의 흡착층을 모방하여 자체에서 제작하였으며, 시험조건들은 실제의 값을 기준으로 적용하였다. 각 위치에서의 보정된 용적 유속을 구하기 위해 자체에서 만든 "FLOWD"라는 계산프로그램을 사용하였으며, 입구 및 출구측 공간에 10" 간격으로 각 6개씩 유속 감지기를 설치하여 면속도를 구하였다. 각 지점에서의 면속도는 평균 0.24449m/s로 각 구간에서의 겉보기 면속도의 분포는 매우 균일한 값을 나타내었으며, 약 2% 이내의 편차로 활성탄 탭내에서의 공기의 흐름이 균일하게 통과함을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

원자력발전소, 관련연구소 및 동위원소를 사용하는 산업체등 방사성물질 취급 시설에서 기체 방사성물질 제거용으로 공조계에 사용되는 침착활성탄 흡착탑은 정상 가동시 또는 사고시 발생하는 방사성 유기요오드 같은 인체에 위협로운 방사성 기체를 제거하는 고 효율의 흡착 및 제거성능과 안전성이 요구되는 설비로써 설비의 요구조건을 만족시키기 위해서는 ASME AG-1, ASME N-509, N-510, ERDA 76-21, ASTM, ORNL, Reg. Guide 1.52, 1.140 등의 성능 및 품질 보증요건을 따라야 한다.

금번에 전력연구원에서 개발한 침착 활성탄 흡착탑도 관련된 조건을 만족시키기 위해

다양한 시험을 수행하였으며 본 논문에서는 제작된 흡착탑 내에서의 유속 분포가 균일하게 이루어지고 있는가를 확인하기 위한 시험 및 평가방법에 대해 기술하고자 한다. 모든 공학적 또는 비공학적 안전시스템에서 침착 활성탄 탑내의 유속분포는 평균 $\pm 20\%$ 를 넘지 않아야 한다. 따라서 흡착탑의 만족스러운 설계 및 운전을 위해서는 조건에 따른 유속분포를 시험하는 것이 매우 중요하다.

유속분포에 영향을 주는 인자로는 흡착제의 크기 및 형상, 흡착탑의 형태, 흡착층의 두께, 충전의 균일성 등 다양하지만 활성탄 흡착탑에 사용되는 입자의 크기 및 충전의 균일성이 가장 큰 영향을 준다. 그러므로 유속분포 시험은 흡착제의 크기, 입자크기의 분포, 충전밀도, 충전방법에 따른 영향을 검토하게 되므로 바람직한 흡착탑을 설계하는데 큰 도움이 된다.

본 시험에 사용되는 장비인 TFD는 원자력발전소에서 사용하는 침착활성탄 흡착탑내의 흡착층을 모방한 장비로 가능한 실제의 침착활성탄 필더의 제원에 따라 제작하였고 시험조건들은 실제의 값을 기준으로 삼았다. 이것은 시험에서 얻어지는 결과가 실제 장치의 성능을 평가하는 데 직접적으로 도움이 되기 위함이며 구체적인 시험과정 및 계산 절차는 다음에 언급하였다.

2. 시험장치구성

그림 1은 실제 활성탄 흡착을 이용한 침착 활성탄 흡착탑의 단면으로 여러겹의 흡착층으로 구성되어 있다. 그림 2는 침착 활성탄 필터의 한 흡착층을 본떠서 제작한 시험장치(TFD)의 단면을 나타낸 것으로 입구 및 출구측 공간(Plenum)의 중심선에 일정한 간격으로 유속센서(Hot Wire Type)를 설치하였다. 입구 및 출구측 공간의 폭은 실제 장치의 절반 크기로 설계하여 이를 통과하는 유속이 실제 흡착장치와 동일한 값이 되도록 하였다. 흡착층에서 활성탄의 깊이는 4"로 하였다. 일부 시험장치는 2" 깊이를 사용하고 있으나 발전소용 장치의 흡착층 깊이는 4"이기 때문에 이에 따라 깊이를 4"로 한 것이다. 흡착층(스크린)의 길이는 60"이며 높이는 6"로 제작하였다.

흡착장치를 흐르는 매질은 공기를 사용하였고 출구쪽에 설치한 송풍기(Blower) 및 조절판(Damper)에 의하여 균일한 흐름이 형성되도록 하였으며, 시험장치를 통과하는 전체의 평균유속을 측정할 수 있도록 유속센서(Vane Type) 하나를 출구측 관의 중심에 설치하였다. 한편 주어진 조건하에서 활성탄 층을 통한 압력강하를 알아보기 위하여 층

전층의 입구 및 출구측 공간 끝 부분에 압력 측정용 구멍을 뚫어 양단의 압력차를 측정하였다.

유속분포를 알아보기 위하여 입구 및 출구측 공간에 10" 간격 (그림 1의 B1 - B6 및 A2 - A7)으로 유속센서(Hot Wire Type)를 장착하여 각 지점의 유속을 측정할 수 있도록 하였으며 각 유속센서의 위치는 최대유속을 주는 지점으로 조절하여 설치하였다. 본 장치에서 유속은 m/s의 단위로 측정된다.

3. 유속 결정

가. 평균유속 및 전체유속의 결정

시험과정에서 약간의 유속변화가 발생하기 때문에 계산에 사용된 유속은 일정시간 동안(흐름이 정상상태가 된 후에 1분 간격으로 10분 동안) 측정된 값들을 평균하여 사용하였다. 시험 초기에 흡착층을 통한 전체 유속은 시험조건에 명시된 "흡착층을 통과하는 겔보기 면속도(Superficial Surface Velocity)"로 부터 구하여 조절하였다. 출구관의 중심에서 측정된 유속은 평균유속이 아니고 출구관내의 최대유속, V_{max} (Maximum Flow Rate)이다. 따라서 정하여진 흡착층의 겔보기 면속도에 따라 요구되는 평균유속을 결정하고 이에 맞는 유속으로 조절해야 한다.

관내의 흐름이 층류(Laminar Flow)일 때 평균유속(V_{av})은 최대유속(V_{max})의 1/2이지만, 레이놀드(Reynolds)수가 10,000 이상인 난류의 경우는 49/60으로 알려져 있다. 아래의 계산은 실제의 원자력용 흡착장치에서 요구되는 겔보기 면속도인 35.4 ft/m (0.180 m/s)을 기준으로 본 시험장치내의 출구 평균유속(V_{av})을 결정한 결과이다.

$$\text{출구관의 내부직경} = 0.106 \text{ m}$$

$$\text{출구관의 단면적} = 8.825 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{스크린의 단면적} = 0.232 \text{ m}^2$$

$$V_{av} = 0.180 \times 0.232 / (8.825 \times 10^{-3}) = 4.732 \text{ m/s} \quad (1)$$

이 유속에서 출구 관내는 난류가 형성됨으로 출구측에서 센서에 의하여 나타나는 최대유속은 5.794 m/s로 결정된다. 본 실험은 상기 조건하에서 수행하였다.

나. 입구 및 출구측 공간에서 유속의 측정

입구 및 출구측 공간(10")에 설치된 유속센서(Hot Wire Type)에 의하여 각 지점의 유속이 측정된다. 그림 1에서 입구측 B1 - B6, 출구측 A2 - A7은 센서가 설치된 위치를 나타내고 있다. 센서에 의하여 측정된 유속은 선속도이기 때문에 통과면적(입구 및 출구측 공간의 단면적은 $8.092 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 임)으로 나누어 용적유속을 구하여야 한다. I_2 / CH_4 제거 시스템에서 면속도를 직접 측정하기 어렵기 때문에 입구 및 출구측 공간에서 측정된 유속의 차이와 통과면적(두 위치 사이의 통과면적은 0.0387 m^2 임)으로부터 겉보기 면속도를 계산하는 것이 좋다. 입구측으로 유입된 공기의 일부는 활성탄이 충전된 흡착층을 통하여 출구측 공간으로 흐르게 된다. 흡착층을 통한 압력구배가 공간내의 압력변화에 비하여 상당히 크기 때문에 흡착층을 통과하는 흐름은 면에 수직이 될 것이다. 시험장치의 각 부분의 흐름은 압력변화(또는 밀도의 변화)를 무시할 경우 다음과 같이 연속방정식을 만족하여야 한다.

$$V_{B2} - V_{B3} = V_{A3} - V_{A2} \quad (2)$$

식 (2)의 차이값은 지점 2-3 사이의 충전층을 흐르는 용적유속($V_{2,3}$)이 된다. 한편, 흡착층을 통과하는 전체 유속은 연속식에 따라 어느 위치에서나 일정하여야 하므로 각 위치에서 입구 및 출구측 공간을 통과하는 유속의 합은 원칙적으로 일정하여야 한다.

$$V_2 = V_3 = \dots = V_6 = V_7 \quad (3)$$

여기서 $V_2 = V_{B2} + V_{A2}$ 이다.

다. 겉보기 면속도의 계산

먼저 입구 및 출구측 공간의 각 위치에서 측정된 선속도를 계산의 기본자료로 이용하여 각 지점의 용적유속을 계산한다. 그러나 시험의 오차나 공간의 끝부분(B₁, A₇ 위치)에서 흐름의 불규칙성 때문에 직접 측정값을 이용할 수 없기 때문에 적절히 보정할 필요가 있다. 본 계산과정에서는 Parish et al.의 방법에 따라 유속을 보정하고 면속도의 분포를 구하였다. 먼저 각 지점에서 입구 및 출구측 용적유속의 합을 구하고, 전 지점의 값들을 평균하여 전체 용적유속(V_{av})으로 하고 입구측의 첫 위치(B₁)와 출구측의 끝 위치(A₇)에서의 유속은 전체 용적유속이라고 가정한다.

이 두 지점은 흐름의 급격한 변화로 실제 측정된 유속이 맞지 않기 때문에 연속식을 이용하여 보정하는 것이 타당하다고 보며, 전체 용적유속에서 각 지점의 출구측 공간의

용적 유속을 감하여 입구측 용적유속을 계산한다. 이러한 보정과정은 흡착장치내의 모든 위치에서 연속식을 만족시킬 수 있게 된다.

다음은 계산된 입구측의 용적유속을 공간의 위치에 따라 함수관계를 나타낸 것으로 이 때 사용하는 함수는 2차 함수가 적당하다고 알려져 있다.

$$V = ax^2 + bx + c \quad (4)$$

여기서 상수들 a, b, c는 곡선보정(Curve Fitting)에 의한 최소자승법에 의하여 결정되어진다. 흡착층을 통과하는 겉보기 면속도(V)는 공간의 유속 미분치 (dV/dx)에 비례하므로 각 지점에서의 면속도는 식 (4)를 미분하여 구한다.

$$v = \text{Constant} (dV/dx) = \text{Constant} (2ax + b) \quad (5)$$

만일 상수 a 가 0이 되면 선속도 v는 위치에 관계없이 일정하다는 것을 의미하며, 흡착층 전체에 균일한 흐름이 형성된다는 것을 말한다. 식 (5)의 Constant는 시험장치의 제원에 의하여 결정할 수 있다. 여기서는 음의 값을 갖는 흡착층 높이의 역수이다.

4. 시험결과 및 고찰

계산 프로그램 “FLOWD”는 입구 및 출구측 공간의 각 위치에서 측정된 유속을 입력시켜 전체 용적유속과 각 위치에서 보정된 용적유속을 구할 수 있도록 되어 있다. 그 다음 보정된 입구측 용적유속을 2차 함수로 나타내고, 각 구간(Segment)의 중간 위치에서 미분을 하여 각 구간(Segment)을 통한 겉보기 면속도를 구하였다. 면속도의 평균값을 계산한 뒤 각 위치에서의 편차(%)를 나타낼 수 있도록 하였으며, 이러한 계산결과는 흡착층을 통과하는 공기가 얼마나 균일하게 지나가고 있는가를 판단할 수 있게 한다. 그림 3은 본 시험장치로 측정된 하나의 결과를 이용하여 얻어진 용적유속(보정치)과 구하여진 2차 함수로부터 계산(곡선)된 것을 나타낸 것으로서 만족스러운 일치를 보이고 있다. 그림 4는 각 구간에서의 겉보기 면속도의 분포를 나타낸 것으로서 평균 0.24449m/s(표 1 참조)의 고른 면속도 분포를 나타내어 매우 만족할 만한 결과를 얻었으며 약 2% 이내의 편차로 공기의 흐름이 균일하게 통과하고 있음을 보여주어 금번에 개발한 활성탄의 유속 분포 측정 시험은 성공적으로 수행되어 원자력발전소의 공기 정화계통에 사용되는 활성탄 흡착탑의 국산화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 참고문헌

1. USAEC Regulatory Guide 1.52, June 1973
2. Branch Technical Position - ETSB No. 11-2 "Design, Testing and Maintenance Criteria for Normal Ventilation Exhaust System Air Filtration and Adsorption Units of Light-water-Cooled Nuclear Power Reactor Plants" 11.3 of NUREG 075/087, USNRC, 1975
3. Parish, H., "CVI Technical Note No. 26", 1972
4. Parish, H., Muhlenhaupt, R.C, and Vogelhuber, "An Experimental Investigation of the Relationship between Bed Packing and Flow Distribution", 14th ERDA Air Cleaning Conf.

표 1. 각 지점에서의 면속도

Point	V(I)	VCAL	VF(I)*	Error(%)*
.00000	.05981	.05808	.24056	-1.60575
.25400	.04691	.04877	.24213	-.96345
.50800	.03759	.03940	.24370	-.32115
.76200	.03057	.02997	.24527	.32115
1.01600	.02218	.02047	.24684	.96345
1.27000	.01184	.01092	.24841	1.60575
1.52400	.00000	.00130	.00000	.00000
Mean Values	.02984	.02984	.24449	.96345

* Valves of each segment of the bed

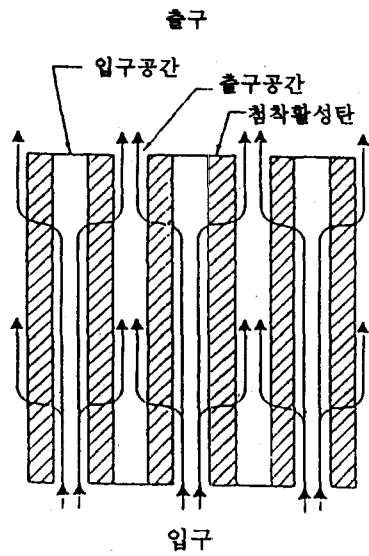


그림 1. 침착 활성탄 단면도

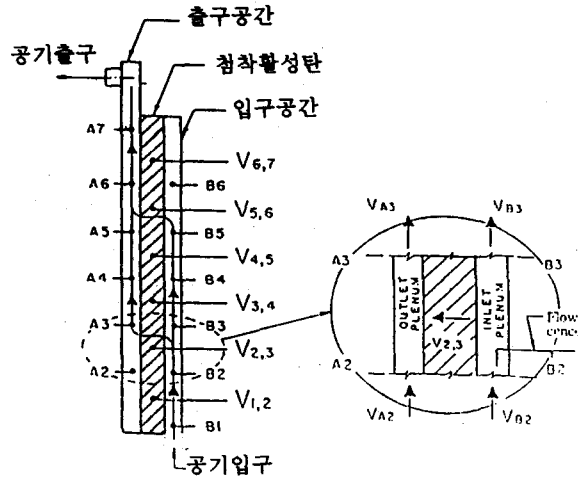


그림 2. 장치의 단면도

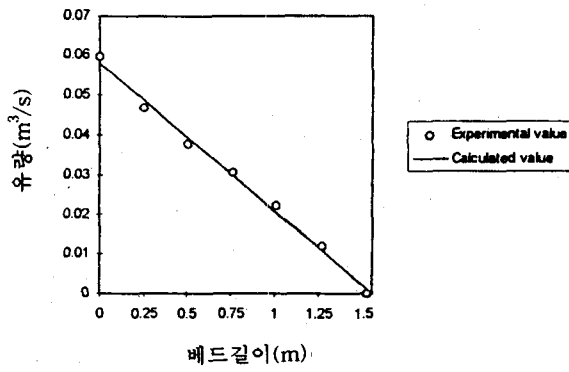


그림 3. 베드 길이에 따른 유량의 변화곡선

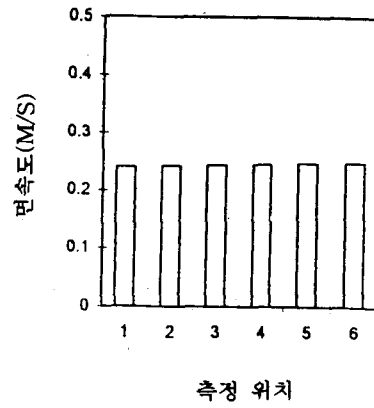


그림 4. 면속도 분포