

멀티플 고성능 공기필터의 현장 누설시험

In-place Leak Testing of Multiple HEPA Filter

이형권, 홍권표, 전용범, 민덕기, 박광준, 양송열, 이은표, 황용화, 서항석, 김길수, 권형문.

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

멀티플 고성능 공기필터뱅크의 현장 누설시험을 수행하였다. 시험결과 풍량이 31,500 CMH와 22,800 CMH 필터뱅크에서, 각 위치별 누설율이 0.015 ~ 0.036 %로 나타나 Reg. Guide 1.14 합격기준인 0.05 %를 만족한다는 것을 확인하였다. 누설시험이 까다로운 멀티플 고성능필터뱅크의 누설시험기술을 확보함으로써 앞으로 원자력시설 공기정화시스템의 안전성 검증에 기여할 수 있을 것이다.

Abstract

In-place leak test for the filter banks with multiple high efficiency particulate air(HEPA) filters was carried in KAERI. As a result of the test, in the air flow capacity of 31,500 CMH and 22,800 CMH, penetration rate appeared to be 0.015 ~ 0.036 %. These values satisfy the Regulatory Guide 1.14 reference, 0.05%. Although test has a complicated procedure, the testing technique was established by KAERI, and will be contributed to the safety inspection of ventilation system in nuclear facilities in the future.

1. 서론

원자력시설의 공기정화시스템에서 사용되는 고성능필터의 설치방법은 대략적으로 두 가지 방법이 있다. 첫째 방법은 한 개의 필터뱅크 안에 1개 또는 2~5개의 필터를 장착하여 사용하는 것이다. 이러한 방법이 일반적으로 가장 많이 사용되며 필터교체, 유지보수 및 현장누설시험 등이 매우 편리하다. 또한 예비용 필터뱅크를 경제적으로 확보할 수 있어 비상시 대처가 용이하다. 둘째로는 필터뱅크의 설치면적이 협소할 경우 한 개의 필터뱅크속에 다수의 고성능필터를 가로와 세로로 몇 단씩 배열하여 사용하는 방법이 있다. 이 방법은 필터의 설치공간이 적게 소요되는 장점도 있지만 필터의 손상 또는 효율저하로 인해 누설율이 기준치에 부적합하였을 때 모든 필터에 대하여 각각 누설여부를 검사하거나, 또는 누설원인이 불분명 할 때 전체의 필터를 교체해야하는 단점이 있다. 그리고 필터뱅크의 풍량이 첫째 방법에 비해 월등히 많으므로 현장누설

시험 조건이 까다로우며, 다량의 DOP 에어로졸 주입이 요구된다. DOP 에어로졸 주입이 많을 경우에는 필터여재에 막힘 현상을 초래하여 필터의 수명에 영향을 끼친다.

고성능필터의 현장 누설시험 목적은 필터의 운반, 저장 또는 필터를 설치할 때 손상으로 인한 필터 자체의 결함을 확인할 뿐만 아니라 필터뱅크의 결함 등을 종합적으로 확인하기 위한 것이다. 이와 관련하여 원자력시설 공기정화시스템의 안전성을 확보하고 시스템에 대한 건전성을 검증하기 위하여 31,500 CMH와 22,800 CMH 풍량의 Multiple HEPA filter bank에 대한 현장 누설 시험을 수행하게 되었다.

2. 시험방법

가. 시험장치

고성능필터의 현장 누설시험장치는 검출기와 에어로졸발생기로 구성된다. 에어로졸 발생기는 콜드 에어로졸발생기와 가열 에어로졸 발생기가 있다.

검출기는 한 대로 필터뱅크의 상류측과 하류측의 샘플농도를 번갈아 가면서 측정하여 필터의 누설율을 구하며, ANSI/ASME N510 규정에 의하면 DOP 검출기는 측정감도가 최소한 10^5 인 것을 사용하여야 한다. DOP 에어로졸 발생기는 입자 발생능력이 $3.0 \mu\text{m}$ 의 크기를 갖는 입자의 수가 99 %, $0.7 \mu\text{m}$ 의 입자가 50 %, $0.4 \mu\text{m}$ 크기의 입자가 10 % 이하이어야 한다.^[1]

DOP 에어로졸 발생기는 필터뱅크의 풍량이 소량인 경우 콜드 에어로졸 발생기를 사용하며 대용량일 경우는 가열 에어로졸 발생기를 사용한다. 콜드 에어로졸 발생기는 Laskin 노즐과 Slit 노즐을 가진 두 가지 형태를 주로 사용한다. Laskin 노즐형태의 에어로졸발생기는 자체에서 제작하거나 상품화된 것을 사용하며, 노즐 한 개당 사용할 수 있는 필터의 풍량은 500 cfm 이다.^[2] Slit 노즐의 용량은 Laskin 노즐의 8배이며 소형으로 취급이 간편하여 주로 많이 사용하고 있다. 가열 에어로졸 발생기는 대용량의 필터뱅크에 사용하도록 제작되어 많은 에어로졸을 발생하지만 히터로 시약을 가열하여 에어로졸을 발생시킴으로서 가열되는 시간이 많이 소요되며, 또한 다른 필터뱅크를 시험할 때, 발생기가 냉각될 때까지 기다려야 하는 단점이 있다.^[3] 금번에 고성능필터의 현장 누설시험을 수행한 필터 뱅크는 풍량이 대용량이므로 가열 에어로졸 발생기를 사용하여 시험을 수행하였다.

나. 시험 방법

고성능필터의 현장누설시험에서 시험을 수행하기 위한 선행조건은 필터뱅크의 풍량측정, 필터뱅크의 육안검사, DOP 에어로졸과 공기의 혼합성시험 및 유효한 시료채취수 선정 등이다. 풍량측정과 육안검사는 필터뱅크에 공기의 유량이 기준치에 적합하게 유통하는가를 측정하고 필터뱅크의 결함유무 검사하며 기준 풍량상태에서 필터의 차압을 측정하는 것이다. DOP 에어로졸과 공기가 균일하게 혼합되도록 하기 위해서는 DOP 주입구 위치를 덕트직경의 10배 거리 이상으로 이격한다. 만약 필터뱅크의 구조상 덕트길이가 짧아 유효거리를 확보하지 못하였을 때는 Baffle plate를 사용하여 균일한 시료를 채취할 수 있도록 해야한다.

멀티플 고성능필터뱅크의 누설시험 시료채취 위치는 일반적으로 사용하는 필터뱅크보다 많은 위치에서 시료를 채취하여야 한다. 그 이유는 다량의 필터가 뱅크안에 장전되어 있으므로 한곳에서 기준치를 초과하는 누설이 발생하여도 전체적인 누설율은 기준치에 적합하게 판정되는 경우도 있다. 그러므로 주사시험(Scan test)을 수행하는 조건과 유사하게 시료채취수를 선정하고 시험을 수행하여야 필터의 건전성을 검증할 수 있다. 시료채취의 위치는 ANSI/ASME 510의 공기-에어로졸 균질성시험 규정에 의하여 각 필터의 중앙에서 시료를 채취한다. 균질성시험 규정에서는 필터뱅크의 풍량이 16,000 CMH 이하이면 필터 전체면적을 10등분으로 나누어 각 면적의 중앙에서 채취하고 16,000 CMH 이상일 경우는 각 필터의 중앙에서 시료를 채취하도록 되어 있다.

Fig.1은 멀티플 고성능필터뱅크에 대한 현장누설시험 개략도를 나타낸 것으로 시험절차는 다음과 같다.

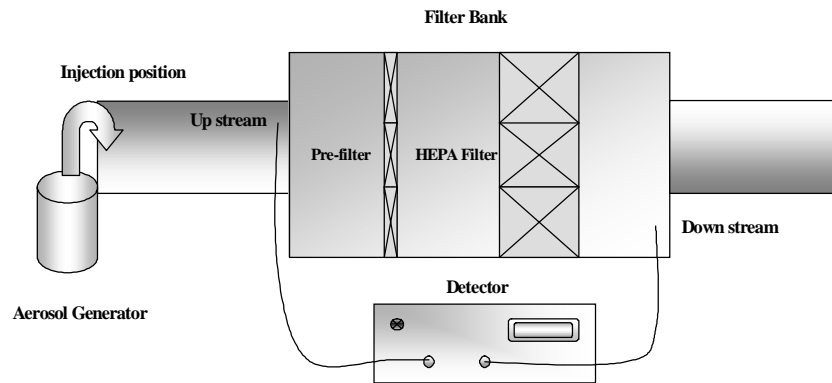


Fig.1. Schematic diagram of in-place leak testing for multiple HEPA filter bank.

1) 예비 및 시험 준비사항

- (가) 검출기의 Field calibration을 수행한다. 사무실에서 공기의 농도를 측정하였을 때 "0.01" Range에서 "10" 이상을 읽어야 하며, 또한 담배연기를 이용하여 Field calibration 실시할 때는 "1" Range에서 "100" 이상 읽어야 한다.
- (나) 필터뱅크 상류측에 에어로졸 발생기를 설치하고, 시료주입구 라인을 덕트에 연결한다.
- (다) 검출기를 설치하고 상류측과 하류측에 샘플채취라인을 연결한다. 이때 샘플채취라인은 상류측과 하류측의 길이가 같아야 하며 9 m를 초과하지 말아야 한다.

2) DOP 에어로졸 발생기 가동절차

- (가) Pressure valve 를 "VENT" 위치로 돌려 용기의 압력을 제거한다.
- (나) Fill Port를 통해 DOP를 적당하게 채운다.
- (다) Pressure valve를 On시켜 압축공기(400~800 kPa)를 공급한다. 여기서 "Flow"밸브 또는 "Vapor" 밸브를 열지 않는다.
- (라) Main power를 On 시킨다.
- (마) Heat switch를 On 시킨다.
- (바) 시험 준비가 끝났을 때 Flow 밸브를 서서히 돌린다.
- (사) 측정된 필터뱅크의 공기량으로 시료 주입량을 계산하며 식은 다음과 같다.

$$DOP\ Flow = \frac{Airflow \times Concentration\ of\ DOP}{Generator\ Efficiency \times DOP\ Specific\ Gravity}$$

3) 검출기 가동절차

- (가) Main Power 스위치를 켜다.
- (나) CAL. LIGHT와 SPAN을 " 0,0,0 " 에 놓고 TEST/CAL. 스위치를 CAL.로 위치한다.
- (다) AUTO/ MANUAL 스위치를 MANUAL로 놓고 UP/DOWN 스위치를 사용하여 메터에서 읽음값이 " 0.01 "이 되도록 한다.
- (라) ZERO Range를 사용하여 " 0 " 점을 조정한다.
- (마) 계측기를 5분 동안 안정시킨 후에 다시 " 0 " 점을 조정한다.
- (바) " 0.01 " Range에서 지시값이 "100" 이 되도록 CAL. LIGHT Range를 조정한다.

- (사) Range를 " 0.1 " 에 놓으며, 메터에서 읽음값은 " 10 " 을 읽어야 한다.
- (아) 다시 CAL. LIGHT Range를 조정하여 " 100 "을 읽도록 한다.
- (자) Range를 " 1.0 " 에 놓으며, 이때에도 읽음값은 " 10 "이어야 한다
- (차) 모든 Range에 대하여 이 절차를 수행하며 오차는 ±10% 이내 이어야 한다
- (카) " 100 " Range의 읽음값이 " 10 "일 때 " 10 " Range로 돌리면 메터의 눈금은 "100"을 읽어야 하며 오차는 ±10% 이내이다.
- (타) linearity check가 완성되면 AUTO/MANUAL 스위치를 AUTO로 전환시키고, ZERO control을 사용하여 " 0.01 " Range에서 " 0 "점을 조정한다.

4) 시험

- (가) 에어로졸발생기와 검출기의 가동준비가 완료되면 계산된 DOP 유량을 조정하여 에어로졸을 분사시킨다.
- (나) UP STREAM/CLEAR/DOWN STREAM스위치를 UP STREAM으로 전환시키고 상류측의 값을 읽는다.
- (다) 검출기는 상류측 입자수의 다소에 따라서 Range는 자동으로 전환되며, 시험자는 메터에 지시된 값을 읽는다. 만약 DOP의 농도가 부족하면 DOP 분사를 증가하여 분사하거나 SPAN을 조절하여 요구값을 얻는다.
- (라) 상류측 측정이 완료되면 광학챔버를 퍼지시키기 위하여 스위치를 CLEAR로 전환시킨다.
- (마) 퍼지가 완료되면 ZERO control를 이용하여 다시 " 0 "점을 조정한다.
- (바) UP STREAM/CLEAR/DOWN STREAM스위치를 DOWN STREAM으로 전환시키고 하류측의 값을 읽는다.
- (사) 하류측값을 측정한 후에 UP STREAM/CLEAR/DOWN STREAM스위치를 UP STREAM으로 전환시켜 상류측의 값이 일정한지 확인한다.

5) 누설율 계산

고성능필터의 누설율 계산은 각 Range에서 측정된 상류측과 하류측의 값으로 계산되며 식은 다음과 같다. ^[1]

$$P = \frac{C_d}{C_u} \times 100$$

$$CE = 100 - [100 \times \frac{C_d}{C_u}]$$

P : Percent penetration(%)

C_d : Downstream concentration

C_u : Upstream concentration

CE : Contact efficiency(%)

3. 시험 및 결과

고성능필터의 누설시험을 수행하기 위해서는 계산된 DOP 에어로졸을 분사시키고 필터뱅크의 상류측 농도를 측정하여 시험조건을 수립한다. 상류측 DOP 농도가 적게 검출될 경우, 필터의 누설율 평가가 곤란하므로 적정량의 DOP 농도가 상류측에 검출되어야만 한다. 이 시험에서 필터뱅크의 풍량이 다풍량이므로 다량의 DOP 에어로졸이 분사되어야만 유효한 시료를 채취할 수 있다. 그러므로 본 시험에서는 에어로졸 발생량이 많은 가열 에어로졸 발생기를 이용하여 시험조건에 적합한 DOP 농도를 설정한 다음 예비시험을 수행하였다. 1차 예비시험결과 누설율이

0.05% 이상으로 나타나 Reg guide 1.14 규정에 부적합하였다. 예비시험 결과에서 부적합사항에 대한 원인을 규명하기 위하여 각각의 고성능필터에 대한 육안검사를 실시하였다. 그 결과 몇 개의 필터에서 여재손상이 발견되어 이를 교체하고 2차로 예비시험을 수행하였다. 2차 시험결과도 기준치에 부적합한 것으로 판명되었으며, 누설원인을 규명하기 위하여 각 필터마다 주사시험을 수행하였다. 주사시험 결과 고성능필터 자체에는 결함이 없었으며 필터 가스켓부분에서 누설이 발견되었다. 누설이 크게 나타난 고성능필터 몇 개를 분리하여 확인한 결과 가스켓에는 손상이 없었으며 가스켓의 압착불량으로 판명되었다. 1, 2차 예비시험을 통하여 고성능필터뱅크의 누설원인에 대한 모든 조치를 완료한 상태에서 본시험을 수행하였으며 시험결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Results of in-place leak testing for HEPA filter

시험위치	31,500 CMH bank		22,800 CMH bank		비고
	누설율	효율	누설율	효율	
1	0.027	99.973	0.019	99.981	
2	0.027	99.973	0.023	99.977	
3	0.022	99.978	0.026	99.974	
4	0.036	99.964	0.028	99.972	
5	0.036	99.964	0.028	99.972	
6	0.029	99.971	0.028	99.972	
7	0.015	99.985	0.026	99.974	
8	0.019	99.981	0.026	99.974	
9	0.016	99.994	0.024	99.976	
10	0.028	99.972	0.021	99.979	
11	0.033	99.967	0.022	99.978	
12	0.018	99.982	0.022	99.978	

시험결과 31,500 CMH 용량의 필터뱅크에서는 누설율이 0.015 ~ 0.036 %이며, 22,800 CMH 필터뱅크에서는 0.019 ~ 0.028 %로 나타나 판정기준인 0.05 % 이하를 모두 만족하여 고성능필터뱅크의 안전성 및 건전성을 검증하였다.

4. 결론

멀티플 고성능필터뱅크의 DOP 현장 누설시험을 성공적으로 수행하였다. 시험결과 누설율은 31,500 CMH 용량의 필터뱅크에서 누설율이 0.015 ~ 0.036 %이며, 22,800 CMH 필터뱅크에서는 0.019 ~ 0.028 %로 나타났다. 두 개의 필터뱅크 모두 고성능필터의 누설율 판정기준인 0.05 % 이하로 나타나 방사성 공기여과시스템을 안전하게 사용할 수 있다는 신뢰성을 검증하였다.

일반 고성능필터뱅크 보다 현장 누설시험이 까다로운 멀티플 고성능필터뱅크의 누설시험기술을 축적함으로써 앞으로 원자력분야 공기정화시스템의 안전성 및 건전성을 입증하는데 공헌할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진중인 기관고유사업의 일환으로 추진하였으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B. J. Kovach, "NUCON Aerosol Detector F-1000-DD Model F Operation and Maintenance Manual", NUCON International Inc., 1992
- [2] C. A. Burchsted, J. E. Kahn "Nuclear Air Cleaning Handbook " Oak Ridge National Laboratory, P192-193, 1976.
- [3] 이형권 외, "In-place Leak Test for HEPA Filter Using Emery 3004 Aerosol", 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, 2002.