

조사후시험시설에서의 공기유동에 따른 부압유지와 공기여과장치의 성능
Control of negative pressure in air flow and air filtration performance at post
irradiation examination facility

황용화*, 이형권*, 민덕기*, 전용범*, 엄성호*, 오세용**

* 한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

** 충남대학교

대전광역시 유성구 궁동 220

요약

핵물질을 취급하는 조사후시험시설의 공기조화계통은 그 역할이 대단히 중요하다. 시설 내부를 구역별 적정환기횟수와 부압 상태를 유지해야 하며, 방사성 가스나 기체오염물질 등을 사전에 여과 처리하여 외부누출을 방지하고 주변환경 보호가 필연적이다. 공기조화장치는 오염확산을 막기 위해 시설내의 기압을 부압으로 유지시키고 있다. 또 고성능 해파 필터와 활성탄 필터도 주기적으로 효율시험이 실시되고, 아주 양호한 상태로 운전되고 있다. 이와 같은 조사후시험시설의 공기조화 및 여과계통의 운전경험을 통해 앞으로의 시설운용을 보다 효율적이고 안전하게 수행할 계획이다.

Abstract

Air conditioning system(ACS) of PIEF (post irradiation examination facility) treating nuclear materials is considerably important for human safety. It is essential that appropriate air renewal and negative pressure at each isolated zone in the facility must be continuously maintained by ACS, and radioactive gas or gaseous particle should be prevented from its spread by filtration treatment of ACS for environmental safety. Periodic performance test on HEPA & activated carbon filter was performed and the results showed that those filters are in reliable conditions, and details are described in this paper. It is expected that the know-how and experience accumulated during the operation of nuclear related ACS will be utilized as an useful informations for the safe operation of the ACS in nuclear facilities.

1. 서론

조사후시험시설은 연구용 원자로에서 조사된 사용후 핵연료, 노내 재료, 핵연료봉 등은 강력한 방사능을 갖고 있다. 이런 핵물질의 안전 및 건전성을 위한 시험을 수행할 때 시설에서 취급하는 핵

연료로부터 방사성 부유입자, 방사성 기체 등 오염물질이 종사자의 피폭과 시설 내·외부로 확산되어 주변환경의 오염이 우려된다. 이런 사고를 미연에 방지하기 위해서는 적절한 공기 유동분포를 유지하는 공조설비와 배기체 고효율 여과장치가 필연적이다.

2. 공기유동과 배출공기 여과성능

2.1 존별 공기유동과 부압조건

2.1.1 팬의 풍량측정

조사후시설의 흡기체 팬은 축류형(axial type)으로 팬 내부에 안내깃(guide vane)을 설치하여 손실된 정압을 보정하도록 하고 있다. 풍량 조절은 팬 후단과 덕트 사이에 설치된 댐퍼에 의해 조절하는 방식과 일부에서는 speed control을 이용하여 풍량을 가변 시키는 방법을 사용하고 있다. 시설 내로 흡입된 공기는 전치 및 중성능 필터로 분진을 제거하고 냉·난방 장치 및 가습 장치, 각종 제어장치를 통과하면서 적절한 항온·항습 조건을 갖추게 된다. 관리 및 제한구역(7-8000존)의 MUP(medium under pressure) 팬은 250mmAq의 정압이 요구된다. 또 금지구역(9000존)의 DUP(deep under pressure)는 300mmAq로 MUP에 비해 정압이 높아 고효율을 낼 수 있는 터보형 팬을 사용하고 있다. 팬의 풍량은 덕트의 길이와 지관의 굴곡에 따라 차이가 있으므로 년 1회 주기적으로 측정하여 설계 기준에 부합하는지를 기록하고 ANSI 규정에 따라 $\pm 10\%$ 범위 내에 들도록 하고 있다.

2.1.2 방사성구역의 실내측 부압조건

시설 각 구역별로 유동한 공기는 후 반드시 배기체 계통에서 정화과정을 거쳐야 만이 시설 외부로 배출되도록 되어 있다. 시설 내의 오염을 줄이기 위해서는 Table 1과 같이 규정된 조건으로 비방사능 구역에서 방사능 구역(관리, 제한, 금지구역) 순으로 공기흐름이 이어지는 전 공조(one-through) 방식으로 하고 있다(Fig. 1). 따라서 설정된 환기회수와 실내측 부압을 유지하기 위해서는 각 존(zone)에 따라 흡기 및 배기의 유량을 달리하고 있다. DUP는 MUP에 비해 상대적으로 고방사성 물질을 취급하기 때문에 오염이 가장 심한 구역으로 가장 높은 부압이 되도록 설정되어 있다. 이는 정압이 낮은 MUP 쪽에서 자연스럽게 정압이 높은 DUP 쪽으로 공기가 유동되어 오염공기의 역류를 방지할 수 있도록 하였다.¹⁾

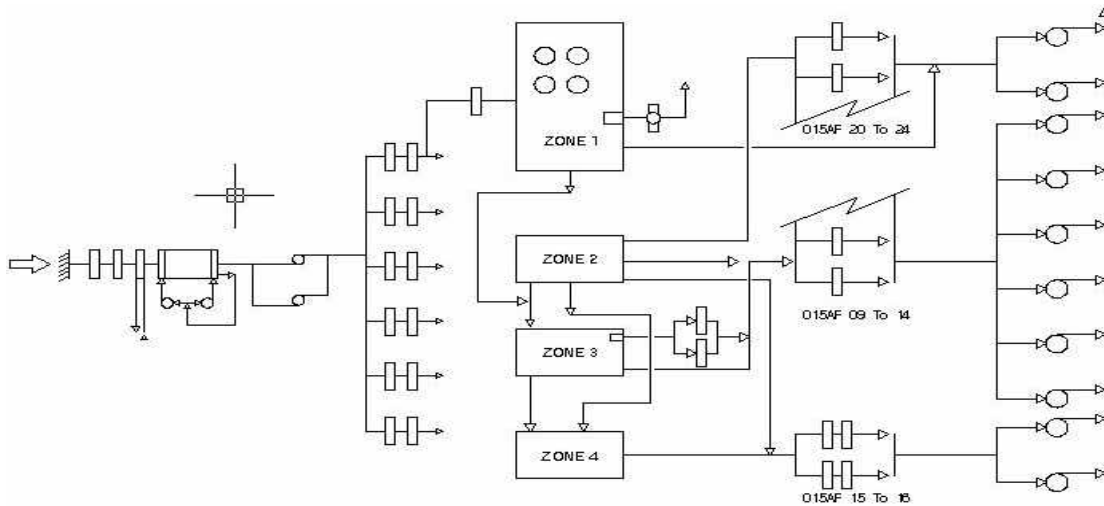


Fig. 1 Schematics diagram of air flow

2.2 배출공기 여과성능

2.2.1 공기여과장치

Table 1 각 구역의 환기회수 및 부압조건

performances required	press & unpressed	renewal/hour
	in the room pressure	
청정구역 (6000zone)	over pressure	≈3회 (at air outlet)
관리구역 (7000zone)	-3mmWg< ΔP <-5mmWg	>4회 (at air outlet)
제한구역 (8000zone)	-6mmWg< ΔP <-8mmWg	>5회 (at air outlet)
금지구역 (9000zone)	-15mmWg< ΔP <-25mmWg	>10회 (at air outlet)
glove box	25mmWg= ΔP	

핵연료를 취급하는 핫셀(hot cell)에는 핵료봉의 파괴 및 절단실험으로 배출된 핵분열물질로 공기 중에 고농도의 방사능이 존재하고 있다. 따라서 핫셀 전단필터를 통과한 공기는 핫셀 내의 원통형 필터와 후단의 2단 직렬로 연결된 필터(Fig. 2)를 지나면서 오염공기를 완전히 여과시킨다. 원통형 필터는 핫셀 내에 위치시키는데 그 이유는 원격조종기(manipulator)를 사용하여 오염된 필터를 안전하게 처리할 수 있도록 하기 위함이다. 특히 핫셀은 fig. 3과 같이 급기를 셀의 상부에 위치시키고 배기포트를 하부로 하여 1 m/s의 저속으로 서서히 공기를 유동시킨다. 이러면 방사능 분진미립자는 핫셀 바닥에 가라앉게 되어 오염확산을 막을 수 있다. 또 셀 내의 부압을 15-25mmWg로 유지하여 오염공기가 핫셀 밖으로 누출되지 못하게 하고 있다. 핵연료에서 생성되는 요오드(I131) 기체는 인체에 유해한 핵분열물질로 침착활성탄(activated charcoal)필터(Fig. 4)를 통해 여과된다.



Fig. 2 HEPA filter casing.

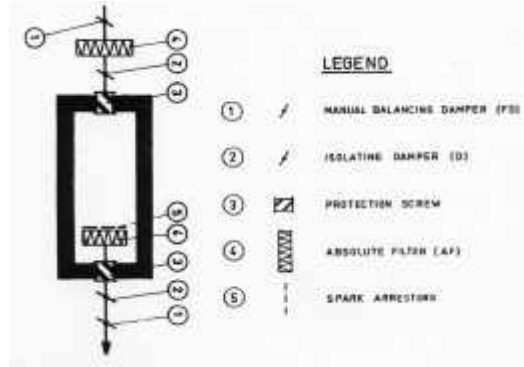


Fig. 3 air supply & exhaust diagram of hot-cell

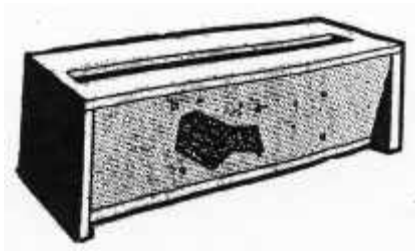


Fig. 4 activated charcoal filter cartridge

필터매질 혹은 공기 여과장치의 필터 유닛 시험은 배기체 계통에서 필터매질, 가스켓, 하우스 지지체와 주름필터의 차폐 상태 등에 중점을 두고 분기별로 시험을 실시하고 있다. 또 방사성 핵소필터의 현장 누설시험은 입자 발생기 튜브를 시험필터 전단 덕트에 연결하고 상·하류측의 시료채취 튜브를 입자계수기와 연결하고 여과계통의 건전성, 필터의 손상(핀홀, 크랙, 가스켓 손상 등), 설치에 따른 누출 등의 점검을 주목적으로 한다. 여기서 D.O.P 99.95% 이상의 효율이 요구되며 누설율(1)과 침착활성탄필터의 효율(2)을 아래 식으로 계산할 수 있다. ²⁾

$$P = \frac{C_d}{C_u} \times 100 \quad (1)$$

$$E = 1 - \frac{C_d}{C_u - B} \quad (2)$$

2.2.2 해파(HEPA) 필터의 수명

해파필터는 여과효율이 0.3 μ m 입자 기준으로 99.97 % 이상인 고성능 필터로서 필터의 차압은 교체시기와 밀접한 관계가 있다. 필터는 사용 장소와 목적에 따라 기본적으로 차압을 미리 설정하여 설계되는데 필터메이저는 신필터를 장착했을 때의 초기차압과 정격 유량에서 측정된 교체 예정차압과의 관계가 2배의 집진부하를 나타내는 50mmWg에 이르렀을 때 해파필터를 교체하도록 권장하고 있다. 그러나 필터의 제작사양은 100mmWg 이상에서도 견딜 수 있도록 설계되기 때문에 구조적인 손상이나 필터의 오염도에 따른 효율저하가 적으면 일반적으로 권장차압 이상으로

사용되기도 한다. 그러나 방사성시설에서는 안전도를 고려하여 50-65mmWg 이내의 정상 차압으로 운용되고 있다. 핫셀 내부의 배기구에는 필터케이싱(Fig. 5)이 설치되어 그 속에 원통형 필터가 내장되고(Fig. 6), 필터 윗 부분에 있는 v-형상의 네오프렌 가스켓이 자중으로 케이싱과 밀착되어 차폐된다. Fig. 7에서 보여 주듯이 원통형 필터는 유량의 상승에 따라 초기차압이 거의 선형적으로 올라가는 것을 볼 수 있다. 핫셀 후단의 배기필터 내부 지지재는 알루미늄 박판 또는 플라스틱을 파형으로 절곡하여 여과재 사이에 삽입하여 힘을 분산시키는 세퍼레이터 타입과 여과재 시트를 얇은 주름모양으로 조밀하게 성형하여 여과 면적을 훨씬 넓은 v-pleats 타입으로 나뉘어 진다. Fig. 8 그림의 v-pleats 타입은 여과재 주름틀을 감싸고 있는 지지대는 외곽틀에 고정되어 배열되므로 비틀림이나 찌그러짐 등의 파손 위험이 거의 발생하지 않고 대용량의 풍량에 적합하다. 세퍼레이터 타입보다 1.5배 이상의 여과재가 더 필요하기 때문에 고가이나 사용수명이 훨씬 연장되고 유지보수비용면에서 효과적이다. 따라서 고체 폐기물량이 반감되므로 방사성 시설에서는 선호도가 높다. 두 방식 모두 진동과 충격에 잘 견디어야 하고 특히 누설의 위험성이 높은 패킹부분에서의 기밀성을 요구하고 있다.³⁾ v-pleats 타입에서 8열의 중성능 필터와 16열의 해파 필터의 주름판을 비교해 보면 Fig. 9과 같이 유량에 다른 초기차압이 후자의 필터가 공기 흐름과 차압이 원만하고 안정적임을 알 수 있었다. 또 Fig. 10에서는 v-pleats 타입은 세퍼레이터 타입보다 훨씬 긴 수명과 차압이 낮음을 보여주고 있다.

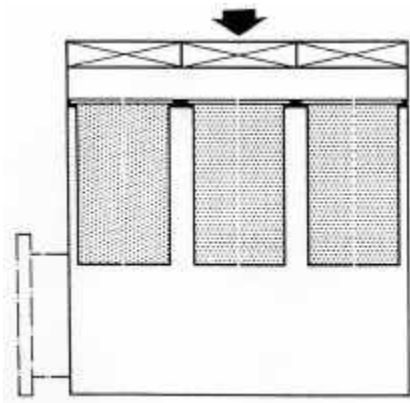


Fig. 5 cylindrical filter casing of hot-cell exhaust



Fig. 6 cylindrical filter of hot-cell exhaust

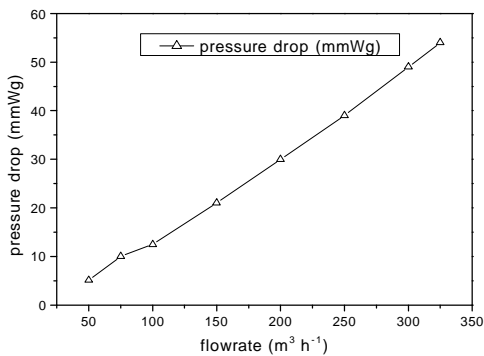


Fig. 7 Pressure drop of cylindrical filter

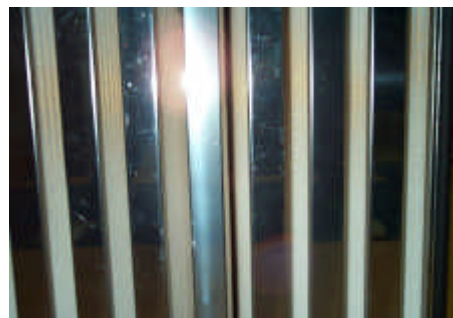


Fig. 8 v-pleats type filter

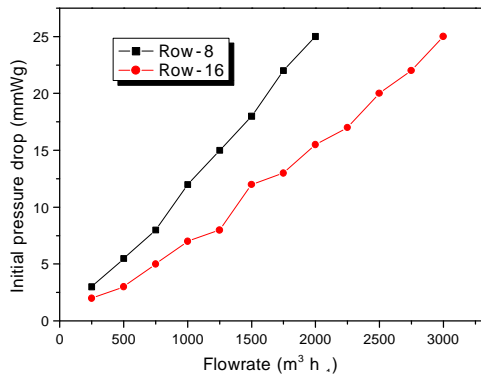


Fig. 9 Comparison between 8 and 16 row v-pleats type HEPA filter at initial pressure

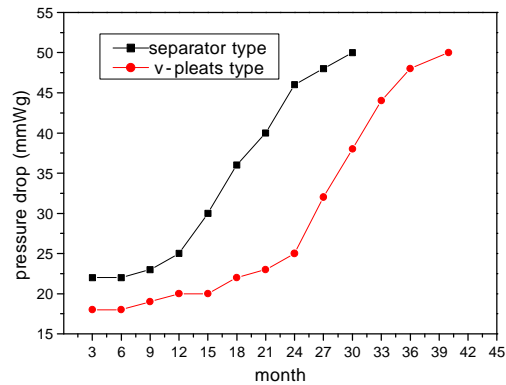


Fig. 10 HEPA filter life of separator and v-pleats type.

2.2.3 필터뱅크의 차압점검 및 시험주기

조사후시험시설의 배기체에는 방사성 해파필터가 제한(amber) 및 관리구역(green zone), 분석시설(fume hood), 금지구역(red zone), 핫셀 흡, 배기필터, 납셀 등 각각의 필터 뱅크로 나누어져 있다. 필터뱅크에서 시험필터를 중심으로 상·하류측에 튜브를 연결하여 차압을 읽을 수 있다. 마노메타상의 초기압손은 보통 18-25mmWg 이하를 나타내고 실제로는 사용시간이 경과하면서 차압이 거의 평형으로 진행되다가 어느 시기에 도달하면 서서히 변화를 보이기 시작한다. 예정교체차압 부근에서는 급격한 마노메타의 상승을 보이고 이때가 필터 교체를 알리는 신호로 여과 상태는 포화에 이르게된다. 이 차압 이상으로 사용하게 되면 배기 유량이 허용범위 내를 벗어나게 되고 각 존별 부압을 유지하기가 어렵다. 더 이상 사용시는 동력손실 및 핀홀(Pin hole)의 발생으로 효율 저하 및 필터 손상으로 이어진다. ANSI N-509 및 N510 규정의 점검주기 및 시험방법에 따라 18개월 단위로 누설시험이 이어진다. 또 필터교체와 구조물 수리 등 환기계통과 관련 있는 지역에서 도장작업 또는 화학성분이 방출되었을 때도 재시험을 하고 있다.

2.2.4 해파필터 및 필터 케이싱의 외관검사

운반 중에 손상이 되었을 지도 모를 예비 해파필터에 대한 여과재의 손상, 차폐재(sealing) 및 외곽틀 등을 조사하여 성능검사 이전에 불량품을 제거하여 필터의 기준 성능을 보증하고 있다. 또 필터의 치수, 직각도 등의 허용치를 검사하여 설치 시 발생할 가능성이 있는 문제점을 예방하는데 있다. 신틸터를 장착하기 전 필터프레임(frame)의 비틀림, 여과재의 배열상태 및 파손유무, 외곽틀과 여과재의 접촉제 경화정도 및 균열여부 등을 점검하고 있다. 또 필터 케이싱은 분기별로 점검되고 있다.

- (가) 필터프레임의 용접부위 균열여부.
- (나) 하우징(housing)의 표면손상.
- (다) 댐퍼깃의 손상 및 작동상태.

- (라) 크램핑(clamping) 장치의 조임 상태.
- (마) 운반 및 진동 등의 제반 원인에 의한 재질손상여부.
- (바) 설치 시 부품과의 연결상태.
- (사) 여과재 표면의 배열 구성이 불규칙하게 어긋나 있는지 확인.
- (아) 관통부위의 가스켓 압축여부.
- (자) 프레임과 필터하우징 사이의 밀폐상태.
- (차) 가스켓(gasket)의 압축 및 노후상태.

2.2.5 활성탄 필터의 흡착성능 및 효율시험

활성탄 필터의 방사성 흡착효율은 ICH3과 같은 관련된 물질을 공기유동과 가스의 흐름으로부터 제거하는 능력을 측정하는 것이고, 요오드 농도, 카본 내의 불순물, 활성탄의 크기, 가스체류 시간(가스 체류시간의 증가에 따른 효율상승, 공기속도와 흡착베드에서의 가스와 공기 사이의 접촉시간), 흡착베드를 통과하는 공기 유속, 온도와 상대습도 등에 효율이 좌우된다. 또 고순도 저회분 활성탄이 방사성 제거에 일반적으로 사용되고 효율은 방사성 추적요오드와 메틸요오드를 사용하여 랩테스팅으로 결정하게 된다. 저온(21℃)과 상승된 온도(82℃)에서 요오드와 메탈요오드와 상대습도 70%와 95% 이상에 대한 최저 효율은 RTD M 16-1과 ANSI N-509에서 기술하고 있다. 상온상의 온도와 상대습도에서 활성탄 필터의 필터 층 내로 유입되는 통과속도는 0.3m/s(0.16s)에서 공기의 유량은 분당 225m³/h이고, 0.2m/s(0.25s)에서는 150m³/h로 체류시간을 늘리기 위해 후자의 방법을 택하고 있다. 활성탄필터의 현장검사시 누설시험은 1000-HD, HG와 프레온 11을 이용한 실험에서 5분 동안 측정된 상류측 농도는 8-12ppm으로 나타나고 하류측은 0에서 지속되다가 30초 후 2.5ppb에서 5분 후에는 5ppb 정도로 나타났다. 기준효율 99.5%보다 높은 99.95% 이상의 효율을 유지하고 있음을 알 수 있었다.

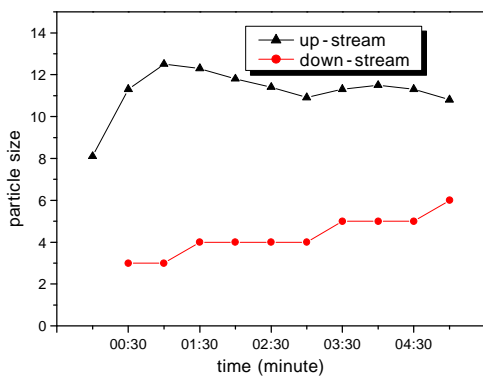


Fig. 11 efficiency test Charcoal filter in up and down-stream

3. 결론

조사후시험시설에서의 공기조화설비는 주기적인 팬의 유량측정 및 실내측 부압측정, 공기여과 장치의 성능시험 등으로 정상적인 시설운전을 유지하고 있다. 특히 시설내의 방사능 부유입자와 유독가스를 제거하는 것을 주목적으로 시험장치를 효율적으로 운용하는 기술이 요구된다. 최근에는 저 압손, 고효율, 박형 필터의 사용증가에 따라 여기에 대응하는 필터 여과효율 측정기술이 무엇보다 중요하다. 할라이드(halide)가스를 이용한 침적활성탄 필터와 D.O.P 해파필터의 누설시험은 특성상 백그라운드(background)의 영향을 많이 받게 되어 성능시험을 실시할 때마다 측정값에 차이를 보이므로 현장시험(field test)에는 많은 경험이 요구되고 있다. 정확한 데이터를 얻기 위해서는 사전에 실내환기를 충분히 하여 주위의 영향을 최소화 한 상태에서 수 차례 측정된 평균 값을 채택하고 있다. 배기체 공기여과장치는 기기 상태가 양호하고 여과효율이 기대이상으로 좋은 결과와 성능측정평가 기술의 향상이 이루어지고 있다고 사료된다.

참고문헌

1. Hwang, Y. H., 1999, KAERI/TR-1387/99, Design & Operation Technology of Ventilating System for Irradiated Materials Examination Facility, pp.17
2. C.A. Burchsted. Nuclear Air Cleaning Handbook (ERDA 76-21), pp198-205
3. Hwang, Y. H., 1997, KAERI/TR-943/98 Field Test of Radioactive High Efficiency Filter and Filter Exchange Techniques of fuel Cycle Examination Facility, pp. 13-20