

조사후시험시설에서의 핫셀 배기포집시스템의 성능평가

황 용 화[†]

한국원자력연구원 조사시험부

Performance of the Exhaust Filtration System of Hot Cell at PIEF

Yong-Hwa Hwang[†]

PIE and Radwaste Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeok-dearo, Yuseong-gu, Daejeon, 305-353, Korea

(Received September 15, 2011; revision received October 26, 2011)

ABSTRACT: Radioactivity of high concentrations have existed in the handling nuclear materials in hot cell of PIEF(Post Irradiation Examination Facility). The exhaust filtration system was enabled to process cylindrical filters by using a manipulator in the hot cell. By establishing a double filtration system with two filters, backup protection against leakage or failure of the first is provided by the second filter. Additionally, this a arrangement is arrange intended to increase the total filtration efficiency. The result of the pressure drop changing in the air flow of the cylindrical and HEPA filters is observed by a curved line. A filtering efficiency of more than 99.99% to 0.3 μm particle appears in the upstream and downstream during the efficiency test on the HEPA filters. The V-pleats type had a lower pressure drop than the separator type. There was no damage during usage and was found to be suitable with high capacity of air volume. Therefore, by carrying out performance tests of the exhaust filtration system, efficiency and safety can be achieved.

Key words: HEPA filter(해과필터), V-pleats type, Cylindrical filter(원통형필터)

기 호 설 명

P	: percent penetration(%)	t	: thickness of bed, cm
η	: efficiency(%)	A	: gross screen area of all screens on inlet side or outlet side, whichever is smaller, cm^2
C_d	: Contents of downstream concentration	B	: total area of baffles, banks, margins of all screens, cm^2
C_u	: Contents of upstream concentration	K	: 변환상수($^{1/3.6} \times 10^3 \text{ cm}^3 \text{ h/m}^3 \text{ s}$)
C_{dop}	: concentration of DOP(gm/lit)	Q	: total cell volumetric airflow, m^3/h
η_g	: generator efficiency(%)	B_i	: background due to impurity iodine in charcoal
$DOP \text{ s.g.}$: DOP Specific Gravity(g/lit)		
f_{ai}	: air flow(cfm)		
T	: residence time, sec		

1. 서 론

조사후시험시설은 연구용 원자로에서 조사된 사
용후 핵연료, 노내 재료 및 핵연료봉 등 강력한 방

[†] Corresponding author

Tel.: +82+42-868-2494; fax: 042-868-2864

E-mail address: hyh@kaeri.re.kr

사능을 갖는 물질을 취급하고 있다. 그 중에서도 핫 셀은 고준위 핵물질에서 생성되는 방사성 부유분진, 유해가스 등을 내포하는 시설로 두꺼운 콘크리트 및 납 차폐체구조물로 되어 있다. 이런 오염물질들이 작업자의 피폭과 시설 내·외부로 오염시킬 우려도 염려된다. 따라서 이런 사고를 미연에 방지하기 위해서는 적절한 배기체의 고효율 포집장치가 필수적이다.⁽¹⁻²⁾ 차폐 셀 배기포집장치에 대한 효율 시험을 수행함으로써 방사능에 관련된 제반장치의 건전성을 파악하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 핫셀 배기계의 각형 해파필터(HEPA Filter) 및 원통필터(cylindrical) filter의 여재(media)선정 및 통과유량

해파(HEPA)필터의 소재는 Table 1과 같이 1 inch 당 4000 g 이상의 중방향 인장성과 다공량, 저압손의 여과특성을 갖고 있으며, Table 1의 여재를 사용하고 있다. 각형 해파필터는 610×610×292 (mm)의 크기로 V-type의 경우 42 m²의 여재 표면적에 3,400 m³/h의 유량과 원통필터는 시간당 300 m³/h의 유량특성을 갖고 있다.

2.2 필터의 형상 및 압력손실과 유량비교

세퍼레이트(separator) 타입의 해파필터는 틀 내부에 파형의 분리판을 중심으로 앞 및 뒤에 여재를 접어 넣어 접착제와 결합된 구조이다. V-pleats형의 패널구조는 하나의 연속평판에 약 19 mm인 얇고 폭이 좁은 플리트(shallow pleated fold)에 많은 양의 여재를 조밀성형으로 표면적을 확장하여 공기

저항을 최소로 한 형태이다. 필터여재의 지지물은 필터 판의 플레임 안쪽에 설치되어 있다. 두 가지 타입(세퍼레이트 및 V-pleats)의 모델에 대해 압손 및 통과유량을 비교하였다. 본 연구는 차폐 셀 내의 오염물질로부터 어떤 운전조건하에서도 외부누출을 차단할 수 있도록 배기포집장치에 대한 누설시험을 수행하여 요구효율이 유지되고 있는지를 조사하였다.

2.3 해파필터의 효율시험

해파필터의 성능시험에는 입자발생기 및 입자검출기(NUCON F-1000-DG, F-1000-DD)와 DOP(di-octyl phthalate)시료가 추적매질로 사용되었다. 입자발생기는 KOLAS 인증기관에 의해 교정된 기기(Table 2)를 사용하였으며, 400~460℃로 가열한 DOP 에어로졸(aerosol) 입자를 필터전단(upstream)에 급기공기와 균질하게 희석하여 필터여재에 통과시킨다.⁽³⁻⁷⁾ 공기유량은 설계유량의 ±10% 이내가 되도록 조절하고 필터뱅크(포집장치)의 전·후단과 검출기 사이에 연결된 유로(tube)를 통해 시료공기를 채취하여 입자검출기에서 광산란에 의한 투과율(1)을 측정하였다.

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

2.3 핫셀 배기용 침착활성탄필터의 구조 및 효율시험

방사선용 활성탄은 주로 야자탄을 사용하며 입도 분포에 따라 통기저항 및 흡착속도 등에 영향을 미치고, 세공의 표면적에 대단한 흡착력으로 요오드에 대해 충분한 포집성능을 갖고 있다. 여기서는 2

Table 1 Basic weight and water repellency of media

Basic Weight	89 g/m ²
Tensile	
MD	4000 gms/25.4 mm
CD	2200 gms/25.4 mm
Stiffness, MD	1000 mgs
Resistance	353 pa
Water Repellency	762 mm

Table 2 Calibration certificate of DOP detector

Environmental Condition : 21.1℃, 49.0% Relative Humidity		
Scale Linearity Check	Instrument Reading	Error
100.00×8	10.00×80	0.00%
10.00×8	1.00×80	0.00%
1.00×8	0.10×80	0.00%
0.10×8	0.01×80	0.00%
		(allowable±3%)

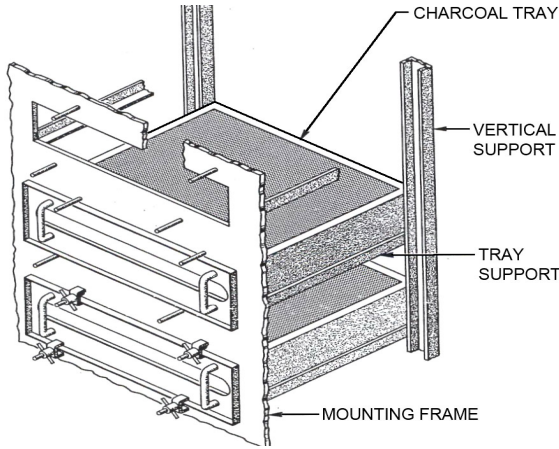


Fig. 1 Adsorber mounting frame with carbon trays.

Table 3 Calibration certificate of halide gas detector

Environmental Condition : 20.8°C, 48.4% Relative Humidity		
Reference(R-11)	Instrument Reading	Error
Log # 1007-00795-001 (192 PPB)	192 PPB	0.00%
Log # CC245856 (10.2 PPM)	10.2 PPM	0.00%

in(50.8 mm) 두께로 다공판과 금속판으로 둘러싸인 공간에 침착된 활성탄이 충전된 카드리지(Fig. 1) 타입의 흡착기 베드를 사용하였으며, 구조물로 우회 통과(bypassing) 등이 발생하지 않도록 성형 및 조립된 제품을 사용하였다. 배기가스는 흡착기 베드의 상류면으로 흡입되어 하류면으로 빠져나가는 구조로 흡착기 셀에서 가스가 흡착제와 접촉하는 체류시간은 식(2)를 이용하였다. 필터의 성능시험은 백그라운드의 유무에 따라 식(3) 및 식(4)를 선택해서 사용하고 채취된 시료의 계수율로 비교 측정하였다. 활성탄 가스 검출기는 Table 3과 같이 표준시료에 의해 교정된 기기를 사용하였다.

$$T = \frac{t(A - B)}{K \cdot Q} \quad (2)$$

$$\eta = (1 - p) \times 100 = \left(1 - \frac{C_d}{C_u}\right) \times 100 \quad (3)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{C_d}{C_u - B_i}\right) \times 100 \quad (4)$$

3. 실험결과

3.1 핫셀의 구조 및 필터효율시험방법

3.1.1 핫셀의 구조

핫셀은 Fig. 2와 같이 셀의 전단에 급기포트와 후단(하단)에 배기포트를 위치시켜 위에서 아래로 공기흐름이 이어진다. 이런 공기유동은 입자가 큰 방사능 분진들이 핫셀 바닥에 가라앉도록 하여 조금이라도 오염 확산을 줄이기 위해서다. 또, 셀 내는 외부대기압에 비해 $-15 \sim -25 \text{ mm H}_2\text{O}$ 의 부압유지로 오염공기가 핫셀 밖으로 누출되는 것을 차단하고 있다. 핫셀은 특성상 사람의 출입이 엄격히 금지되는 고방사능 구역이기 때문에 핫셀 내에서 이루어지는 모든 작업(필터의 설치, 운반 및 교체 등) 및 실험은 원격조종기(manipulate)에 의해서만 가능하다. 각각의 핫셀 내에는 하단 배기구에 수개의 필터 케이싱(Fig. 3)이 설치되어 있고 여기에 원통필터를 내장시켜 1차적 고농도 오염원을 제거하고 있다.

원통필터는 케이싱과 직접 접촉되는 필터의 가장자리부분에서 누설이 일어나지 않도록 방사능에 비

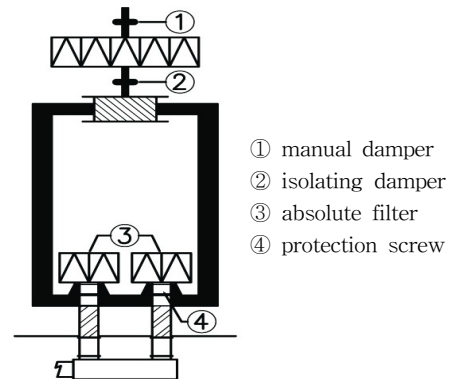


Fig. 2 Suction and discharge port of hot-cell.

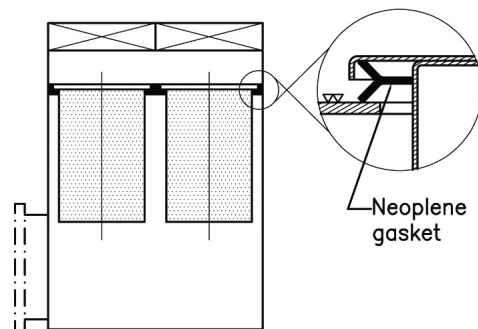


Fig. 3 Cross section of cylindrical filter and casing.

교적 강한 네오프렌 재질로 V형태의 가스켓을 성형하여 자중에 의해 케이싱과의 밀착되도록 하였다.

3.1.2 핫셀 배기 원통필터의 유량설정 및 차압 시험

원통필터($\Phi 245 \times 380 \text{ mm}$)는 핫셀 내에 장착 전에 초기유량($0 \text{ mmH}_2\text{O}$)부터 최종 교체점(시설 내 임의로 선정 및 초기차압의 2배 지점을 일반적인 교체지점으로 정하고 있음)으로 제시한 $50 \text{ mmH}_2\text{O}$ 까지 유량을 증가시켜본 결과 $450 \text{ m}^3/\text{h}$ 까지 통과 유량이 가능하였다. Fig. 4에서와 같이 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ 까지는 유량 및 차압곡선이 완만하게 진행되어, 필터 당 유량의 여유분을 감안하여 $20 \text{ mmH}_2\text{O}$ 의 차압에 근접한 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ 를 설계유량으로 정하였다. 그 이유로는 셀 내의 정격유량과 일치시킬 필요가 있으며, 분진에 의한 필터막힘(declogging)으로 인해 배기유량이 저하되면 필터파손 등의 손상으로 안전에 위협이 되는 문제점이 발생하기 때문이다. 더불어, 매니플레이트에서 작업 가능한 허용부피와 오염필터를 처리할 수 있는 운반하중 등 여러 요인을 고려하기 위해서다.⁽⁸⁾

3.1.3 핫셀 배기 각형필터의 차압변화 및 구조 특성

$610 \times 610 \times 292(\text{mm})$ 크기의 $1,700 \text{ m}^3/\text{h}(1000 \text{ cfm})$ 분리판(separator)형 및 $3,400 \text{ m}^3/\text{h}(2000 \text{ cfm})$ V-pleats형의 모델에 대해 배기유량에 따른 차압변화를 관찰하였다. Fig. 5에서와 같이 V-pleats형과 분리판형을 비교해 보면 차압에 차이가 있음을 알 수 있었다.

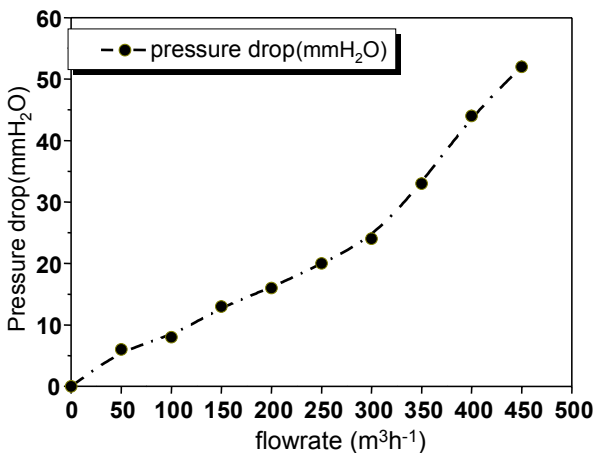


Fig. 4 Pressure drop of cylindrical filter.

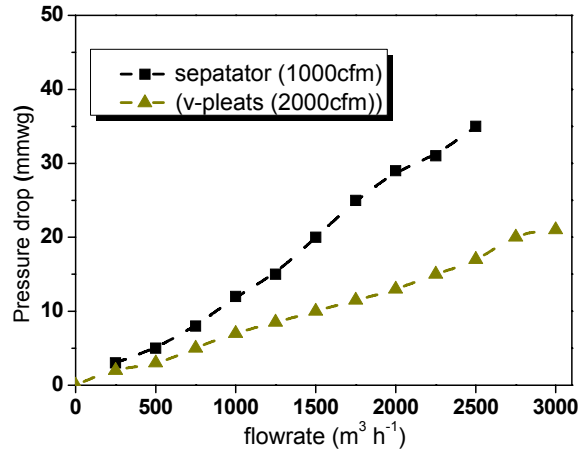


Fig. 5 Comparison of the differential pressure drop according to flow-rate changes (separator and v-pleats type HEPA filter).

핫셀 배기 포집장치로는 Fig. 4에 의해 2000 cfm 의 다풍량, 저압손의 필터가 핫셀에 적절한 것으로 판단되었고, 신뢰성 확보를 위해 최종적으로 V-pleats형을 선택하였다. V-pleats형의 구조특성을 보면 여재는 주름들에 감싸여 배열되고, 지지대(support)는 외곽틀(frame)에 고정되어 있다. 1주기(24개월)⁽⁹⁾부터 2주기 이상 사용 중 무작위로 여러 개를 선정하여 육안점검을 통한 결과에서도 구동장치에서 전달되는 미세 진동 및 충격에도 비틀림이나 찌그러짐 등 파손 위험이 거의 발생하지 않았다. 또한, 분리판형에 비해 유효단면적이 상대적으로 크고, 여과속도도 낮아져 사용수명이 연장될 것으로 사료된다. 원자력계통의 시설에서는 사용수명 및 안전성을 고려하여 다풍량, 저압손 타입을 선호하는 경향이 있으며 방폐물 저감효과도 기대된다.

3.1.4 핫셀 배기 포집장치의 효율특성 조사

현장 효율시험에서는 광산란계수기(particle counter, NUCON F-1000-DD)(Fig. 7) 및 시료 발생장치(ATI TDA-5B, NUCON F-1000-DG)를 이용하였다. 필터뱅크(포집장치) 전단에 식(5)에 의한 추적가스 분무는 필터뱅크의 급기공기구 덕트 직경의 10배 전단(Fig. 6)에 설치된 시료 주입구를 통해서 $0.3 \mu\text{m}$ 크기의 DOP 에어로졸 스모그(smog)를 분무하여 통과공기와 혼합(air-aerosol mixing)이 최적의 상태로 필터를 통과하게 된다. 필터후단의 투과율에 따라 효율이 달라지는데 이러한 거동은 기공발생 및 필터매질의 결합유무를 판별하는데 매우

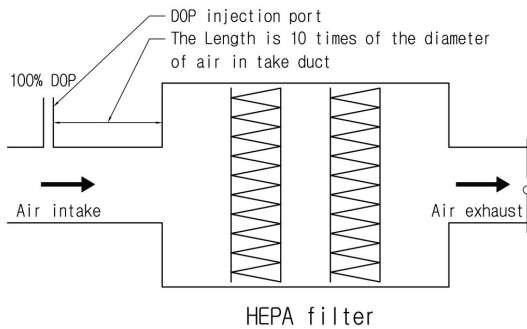


Fig. 6 Location of DOP injection port.



Fig. 7 DOP aerosol detector.

유용한 실험이 되었다. 핫셀 배기체의 필터뱅크 내부에 필터를 2단 직렬로 배열하여, 1단 전처리 필터에서 방사성 분진 물질을 포집하고, 메카니즘 파손 및 효율저하를 대비해서 후단(2단)에서 2중으로 포집이 수행되기 때문에 방사성물질의 누출을 최소화할 수 있었다. 필터뱅크 당 필터 전·후단에 대해 10회 연속 측정된 평균값이 50×10^2 정도로 나타났고, 필터를 통과한 후단에서는 10×10^{-2} 의 투과로 99.99% 이상의 여과효율이 측정되었다. ANSI 및 Reg. gui-

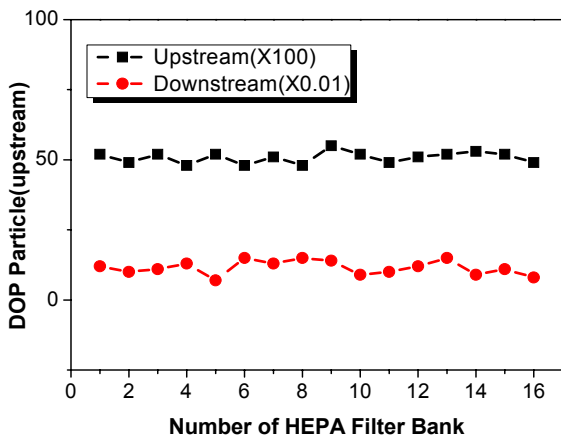


Fig. 8 DOP particle figures(upstream and downstream per filter bank).

de^(5, 9-10)에서는 0.05% 미만의 누설율을 유지하도록 요구하고 있으나, 16대의 배기필터뱅크 각각에 대한 현장시험 결과에서는 99.99%(Fig. 8) 이상의 효율을 나타내어 고성능을 유지하고 있음을 알 수 있었다.

$$DOP\ flow = \frac{f_{air} \times C_{dop}}{\eta_g \times DOPs.g.} \quad (5)$$

3.2 침착활성탄(activated charcoal) 필터의 흡착성능

침착활성탄의 흡착성능은 흡착기 셀에 대한 필터 내의 공기풍속, 풍화(weathering) 지속시간 및 요오드의 함량에 따라 효율이 점차 저하되는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾ 침착활성탄필터의 방사성 흡착효율은 I¹³¹과 같은 관련된 물질을 공기 및 가스의 흐름으로부터 제거하는 능력을 측정하는 것으로 상온의 평균 온·습도(22±3°C, 50~60%RH 내외)에서 50 mm (2 inch) 베드(bed)당 필터 층 내로 0.25초의 체류시간⁽⁸⁾을 지나 통과되도록 하였다. 현장 누설시험장비는 할라이드(halide) 가스측정장비(1000-HG)와 펄스형 가스발생 제너레이터(1000-HG)를 사용하였다. 연속형 및 펄스형 제너레이터 중 펄스형을 사용한 이유는 방사성요오드(I¹³¹) 제거용 침착활성탄의 경우, 추적가스(R-11)를 적정이상 연속 주입하게 되면 활성탄 내의 기공층이 포화되어 포집효율이 현저히 저하된다. 더 나아가 필터자체의 기능을 상실하게 될 가능성이 크기 때문에 펄스주입으로 용량 조절이 가능하고 기기의 조작이 간편하기 때문

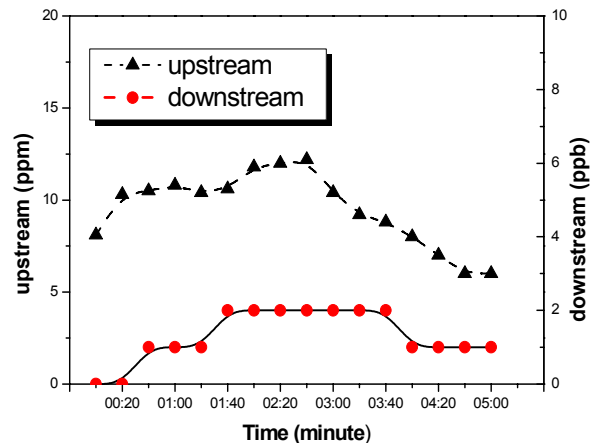


Fig. 9 Result from halide leak test of adsorber bank.

이다. 가스측정 장비는 305분간의 안정화 수행시간을 거친 후 추적가스를 주입하여 약 5분 동안 측정하였다.⁽⁹⁾ 상류측 농도(upstream concentration)가 10012 ppm 범위를 유지하는 상태에서 동시에 하류측(downstream stream)의 누설을 측정하였다. 그 결과, Fig. 9과 같이 0 ppb에서부터 최대 2 ppb 이내로 나타났고 기준효율⁽⁹⁻¹⁰⁾보다 높은 99.95% 이상의 효율이 유지되어 누설이 거의 일어나지 않는다고 볼 수 있었다. 현장누설시험(field leak test)은 주변부(background)의 농도에 의해 효율의 정확도에 영향이 미칠 수 있어 측정된 경험치 요구된다고 사료된다.⁽⁸⁾

4. 결 론

조사후시험시설에서의 공기포집장치는 시설 내의 방사능 부유입자와 유독가스제거하기 위해서는 ASME AG-1에 따른 계통인수시험이 선행되어야 할 필요가 있었다. 필터시험을 통해 고준위 방사성 시설에서는 원자력용 필터를 선정하는 것이 안전성 확보 및 방폐물 저감차원에서 매우 중요하다고 판단되었다. 차후에는 해파 및 침착활성탄필터에 대한 성능검증체계를 정착할 필요성이 있었으며, 필터의 설계, 제작 및 설치 등의 전 과정의 데이터를 도출하여 효율유지와 시험절차에 간편하게 적용하기 위한 개선사항에 반영하고자 하였다. 포집효율 시험에서는 99.99% 이상의 효율이 유지되고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Hwang, Y. H., 1999, Design and operating technique for ventilating system of irradiated materials examination facility, KAERI/TR-1387/99.
2. ANSI/ASME(American national standard/American society of mechanical engineers) N45.2.6., 1978, Qualifications of inspection, examination, and testing personnel for nuclear power plants, New York, pp. 2-5.
3. ASME-AG-1, 2003, American society of mechanical engineers, code on nuclear air and gas treatment, ASME AG-1, New York, pp. 386-387.
4. Burchsted, C. A., 1976, Nuclear Air Cleaning Handbook (ERDA 76-21), design, construction, and testing of high efficiency air cleaning system for nuclear application., Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, pp. 187-200.
5. ANSI(American national standard) N-509, 1989, Nuclear power plant air cleaning units and components, New York, pp. 29-32.
6. ASME(American society of mechanical engineers)-AG-1, 2003, code on nuclear air and gas treatment, New York, pp. 298-300.
7. Burgess, W. A., 1989, Ventilation for control of the work environment(HVAC Control of Work), New York, pp. 313-315.
8. Hwang, Y. H., 1997, Field test of radioactive high efficiency filter and filter exchange techniques of fuel cycle examination facility, KAERI/TR-943/98, pp. 13-20.
9. Regulatory guide 1.14, 2001, Design, inspection, and testing criteria for air filtration and adsorption units of normal atmosphere cleanup systems in light-water-cooled nuclear power plants, pp. 4-14.
10. ANSI/ASME(American national standard/American society of mechanical engineers) N510-1980, 1980, Testing of nuclear air cleaning systems, New York, NY. pp. 10-13.