

## A Study on Improvement of Test Method of Nuclear Power Plant ESF ACS by applying Regulatory Guide 1.52 (Rev.3)

### Reg. Guide 1.52(Rev.3)를 적용한 원전 ESF 공기정화계통 성능시험법 개선 연구

**Sook-Kyung Lee<sup>1)</sup>**, Kwangsin Kim, Soon Hwan Sohn, Kyu-Min Song, Kaewoo Lee, Jeong-Seo Park\*,

Byoung Ho Cho\*, Byeang Jea Yoo\*\*, Soon Joon Hong\*\*\* and Sun Haeng Kang\*\*\*\*

KEPCO Research Institute, 65 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-760

\* KHNP, 514 Kyema-Ri, Hongnong-Eup, Yonggwang-Gun, Jeonnam, 513-882

\*\* KPS, 514 Kyema-Ri, Hongnong-Eup, Yonggwang-Gun, Jeonnam, 513-882

\*\*\* FNC Tech. Co. Ltd. San 56-1, Shinrim 9-Dong, Kwanak-Gu, Seoul, 151-742

\*\*\*\* KFTL, 1110-23 Oryong-Dong, Buk-Gu, Gwangju, 500-480

**이숙경<sup>1)</sup>**, 김광신, 손순환, 송규민, 이계우, 박정서\*, 조병호\*, 유병재\*\*, 홍순준\*\*\*, 강선행\*\*\*\*

한국전력공사, 305-760 대전광역시 유성구 문지로 65

\* 한국수력원자력(주), 513-882 전남 영광군 홍농읍 계마리 514

\*\* 한전KPS(주), 513-882 전남 영광군 홍농읍 계마리 514

\*\*\* FNC(주), 151-742 서울 관악구 신림9동 산 56-1 서울대 135동 306호

\*\*\*\* 한국필터시험원, 500-480 광주시 북구 오룡동 1110-23

(Received September 24, 2010 / Revised October 12, 2010 / Approved October 16, 2010)

#### Abstract

U. S. NRC Regulation Guide 1.52 regulating ESF ACS in nuclear power plants has been revised to revision 3. To apply reduction of operability test time, allowance of alternative challenge agents for in-place leak test of HEPA filters, and upgrade of Methyl Iodide penetration acceptance criterion in activated carbon performance test suggested in Reg. Guide 1.52(Rev.3) on Yonggwang units 5 and 6 ESF ACSes, technical feasibility study was carried out with on-site experiments as well as experiments with a lab-scale model. It was confirmed that the moisture in the system returned to the level before the test in 1 or 4 days even though the moisture was removed during the operability test lasting more than 10 hours. Therefore, it is appropriate to perform monthly operability test in 15 minutes just long enough to check the operability of equipment. To change challenge material for in-place HEPA filter leak test, size of aerosol, production rate, and leak detection capability were compared for DOP and PAO. It was concluded that PAO can be substituted for DOP in nuclear power plants. The upgrade of Methyl Iodide penetration acceptance criterion from 0.175 % to 0.5 % in active carbon filter bed deeper than 4 inches was to conform to the change of activated carbon performance test method to ASTM D3803(1989). It was confirmed that Methyl Iodide penetration acceptance criterion of 0.5 % under 30 °C,

1) Corresponding Author. E-mail : sklee@kepcoco.kr

relative humidity 95 % condition was conservatively good enough for testing performance of active carbon in-situ. The licence change of Yonggwang units 5 and 6 has been completed based on this study.

**Key words** : Engineered Safety Feature, Atmosphere Cleanup System, Operability test, PAO, Activated Carbon, Methyl Iodide

## 요 약

공학적 안전설비 공기정화계통의 규제지침인 Reg. Guide 1.52(Rev.3)의 변경사항중 성능시험과 관련된 운전가능성 시험시간 단축, HEPA 필터 현장누설시험용 시험물질 변경 및 활성탄 성능시험 Methyl Iodide 투과허용을 상향 변경을 영광 5,6호기에 적용하고자, 모사실험장치와 현장 설비를 활용하여 기술적 타당성을 확인하는 실험을 수행하였다. 10시간 이상의 장시간 운전가능성 시험을 통해 계통내 습분을 제거하여도 시험후 1~4일만에 회복됨을 확인하여 운전가능성 시험은 기기적 운전가능성 점검에 적합한 매월 15분 이상의 시험을 수행하는 것이 타당함을 확인하였다. HEPA 필터 현장누설시험용 시험물질 변경을 위해 DOP와 PAO의 에어로졸 입자크기, 발생량, 누설인지도를 비교한 결과 PAO는 원전에서도 DOP 대체시험물질로 사용 가능함을 확인하였다. 베드깊이 4 인치 이상의 활성탄여과기에 대한 Methyl Iodide의 투과율 허용치가 0.175 %에서 0.5 %로 상향 변경된 것은, ASTM D3803(1989)으로의 활성탄 성능시험 방법 변경에 따른 것으로서, 30 ℃ 상대습도 95 %에서의 Methyl Iodide 투과허용율 0.5 %가 사용중 활성탄의 성능을 시험하기에 충분히 보수적인 시험방법임을 확인하였다. 본 실험 결과를 바탕으로 영광 5,6호기는 인허가변경을 완료하였다.

**중심단어** : 공학적 안전설비, 공기정화계통, 운전가능성시험, PAO, 활성탄, Methyl Iodide

## I. 서 론

원자력발전소 공학적 안전설비(Engineered Safety Feature; 이하 ESF) 공기정화계통은 가상 설계기준 사고시 작동하여 사고 후 환경으로 방출되는 방사능 양을 저감하고, 핵연료 저장 및 취급 지역, 방사능을 함유하는 지역의 격리, 그리고 사고조건하에서 주 제어실 거주 및 접근을 보장하기 위한 방호설비로서, 일반적으로 습분분리기, 전기가열기, 전단 필터, high-efficiency particulate air(이하 HEPA) 필터, 활성탄 흡착기, 그리고 후단 HEPA 필터로 구성되어 있다. 한국 표준형 원전의 ESF 공기정화계통은 각 호기별로 주 제어실 공기조화계통, 연료건물 비상배기계통, 비상노심냉각계통 기기실 배기정화계통의 세 계통에 각각 이중으로 설치되어 있다. ESF 공기정화계통은 미국 NRC Reg. Guide(이하 RG) 1.52 요건에 의거하여 매월 10시간 이상의 운전가능성 시험과 18개월 주기의 활성탄 성능시험 및 전체 또는 부분품 교체시의 누설시험을 통해 관리되고 있다[1,2].

31일 주기의 정기시험인 운전가능성 시험에 있어서 공기정

화계통의 특성상 시험 중 화학물질이나 먼지가 유입되면 내부 필터 계통의 성능이 저하되므로 시험조건에 맞는 일정 수립이 쉽지 않고, 시험시간이 운전원 근무시간인 8시간을 넘기게 되어 시험의 인계인수에 따른 인적 실수 유발 가능성이 있다. 한편 HEPA 필터의 누설 시험물질인 DOP(Dioctyl Phthalate)는 HEPA 필터로 포집하기 가장 어려운 크기인 0.3  $\mu\text{m}$  크기에서의 에어로졸 형성 능력이 뛰어나 오랫동안 누설 시험물질로 사용되어 왔으나, 발암의심물질로 밝혀져 시험시 계통을 통하여 공기중으로 유입된 DOP에 노출되는 주 제어실 운전원과 시험원들의 건강문제가 대두될 수 있다.

미국 Reg. Guide(이하 RG) 1.52는 Rev.2(1978)에서 2001년에 Rev.3로 개정되었는데, 성능시험과 관련하여 매월 10시간 이상으로 정해져 있던 운전가능성 시험의 시험시간이 매월 15분 이상으로 단축된 점, 현장누설시험용 시험물질을 보다 안전한 물질로 대체할 수 있게 허용한 점, 활성탄 성능시험 변경에 따라 <sup>131I</sup> 투과허용율을 0.175 %에서 0.5 %로 변경한 점 등이 주요 개정 내용으로 포함되어 있다[3]. 본 연구는 관련 실험과 문헌조사를 통해 영광 5,6호기 공학적안전설비

공기정화계통 시험방법 개선을 위해 RG 1.52(Rev.3) 개정의 기술적 타당성을 확인하고 변경내용을 영광 5,6호기에 적용하고자 수행하였다[4].

## II. 연구방법

기술적 타당성 확인을 위해 실험이 필요한 부분은 현장실험과 모사실험을 병행하여 수행하였고, 기타 ESF 공기정화계통 운영 현황, 해외 적용사례, 방사선영향평가 사례, 활성탄 성능시험 변천 사례 등은 문헌조사로 수행하였다[5,6,7].

### 가. ESF 공기정화계통 현황 파악 및 실험장치 제작

영광 5,6호기의 ESF 공기정화계통 운영 현황을 검토하고, 계통 중 영광 6호기 주 제어실 공기정화계통을 정밀 실시한 결과를 바탕으로 CFD(Computational Fluid Dynamics) 분석을 통해 영광 5,6호기 주 제어실 공기정화계통 대비 필터 유동 단면적을 1/9로 축소하여 제작한 원전 공학적인 안전설비 공기정화계통 모사실험장치를 본 실험에 사용하였다[8,9,10,11]. 모사실험장치의 정격 송풍기 유량은 2,000 CFM, 운전 압력은 10" W.G., 입구 및 출구관 크기는 직경 10"이며 활성탄 필터 베드 깊이는 4"로 하였다. 활성탄 캐니스터는 4개 설치하였고, 캐니스터로 흐르는 유로를 각기 조절할 수 있도록 각 배관마다 유량조절장치를 설치하였다.

### 나. 활성탄 습분탈착 실험

ESF 공기정화계통 운전가능성시험을 현행과 같이 10시간 수행하는 이유는 기기의 운전가능성 확인 및 계통 내 누적되어 있는 수분을 없애주는 목적을 달성하기 위해서이다[1]. 미국의 경우 장시간 운전가능성시험을 통해 계통내 수분을 조절한다는 개념이 실제 운전경험으로 사실이 아님을 확인하여 RG 1.52 개정에 포함시켰다는 의견이 있으나, 이를 실험으로 증빙한 자료는 없었다[12]. 계통내 수분을 가장 많이 보유하고 있는 것은 물리적 흡착능이 강한 활성탄이다. 따라서 실제로 10시간의 시험을 통해 활성탄의 수분이 원하는 만큼 제거되는지, 습분탈착은 어느 시간대에 많이 일어나는지, 활성탄의 수분제거 상태가 언제까지 지속되는지를 확인하기 위한 실험을 수행하였다[13]. 활성탄 습분탈착 관련으로 현장의 빈 캐니스터를 활용한 실험, 모사실험장치 캐니스터를 활용한 실험 및 현장 운전가능성시험 시험기간 전후의 계통내 온습도 측정의 세 가지 실험을 수행하였다.

ESF 공기정화계통 운전가능성시험 후 및 다음 운전가능성시험 전의 활성탄 수분함량을 현장 계통에서 확인하기 위한

실험 대상은 활성탄 교체주기가 임박하여 빈 캐니스터가 많았던 영광 6호기 연료건물비상배기계통 B계열을 선정하였다. 8개의 빈 캐니스터에 실험용 캐니스터로 표시한 후, 신탄을 장전하고, 여분의 신탄을 대조구 시료로서 함께 채취하였다. 10시간 운전가능성시험 후 시료 4개를 채취하고, 다시 신탄을 채운 후 15분간 운전하여 15분 운전 시료를 4개 확보하였다. 초기 장착 후 시료 채취하지 않은 나머지 4개의 캐니스터는 다음 시험 시작하기 전에 시료를 채취하였다.

모사실험장치에서 활성탄 캐니스터를 이용한 실험용 활성탄은 국내 원자력등급 제품(NAC)이고, 실험시 가슴기와 유량조절장치를 이용하여 활성탄의 수분함량 및 운전시간을 조절하며 실험하였다.

현장 및 모사 실험에서 활성탄 수분 분석은 ASTM D 2867에 의거하여 활성탄을 150 °C에서 3시간 건조하고, 건조 전후의 무게차로 수분함유량을 측정하였다. 수분량 측정 저울은 ED6202S-CW(Satorius), 건조오븐은 FO-450M(Jeio tech)을 사용하였다.

운전가능성 시험기간 및 전후시기의 계통내 온습도 변화를 확인하기 위하여 영광 6호기 주 제어실 ESF 공기정화계통 A계열 활성탄뱅크 전, 후단에 데이터 기록용 온습도계(TR-72U, T&D)를 장착하여, ESF 공기정화계통 운전가능성 시험의 시험 전부터 시험 후 일정기간까지 온도와 상대습도의 변화추이를 측정하였다. 사용한 온습도계의 정확도는 25 °C에서 ±5 % RH이고 분해능은 1 % RH이다. 온습도계를 활성탄뱅크 전, 후단 문 안쪽으로 부착하고, 2분 간격으로 측정 및 기록되도록 설정하였다. 정확한 측정 확인을 위해 활성탄뱅크 외부에 설치되어 있는 space heater의 온습도계와 화재방호용 온도계 측정값을 같은 간격으로 함께 기록하였다. 운전가능성시험이 끝난 후에도 수일간 교란 없이 계속 온습도를 측정하였고, 계획된 측정이 끝난 후 온·습도계를 수거하여 데이터를 분석하였다. 비교를 위해 4회의 현장 온습도 측정 실험을 추가하였다.

### 다. DOP 대체시험물질 비교실험

HEPA 필터 시험에는 0.3 μm 크기의 DOP 단분산 시험으로 수행되는 필터 성능 시험(KEPIC-MH FC 5000)과 현장설치 후 정격유량 ±10 %에서 DOP 다분산 시험으로 수행되는 누설시험이 있다.

이번 연구에서는 HEPA 필터 누설 시험물질로 지금까지 사용해왔으나 발암물질로 밝혀진 DOP와 이의 대체시험물질로 일반 산업계에서 가장 많이 사용되고 있는 PAO(Poly Alpha Olefin)의 특성을 비교 확인하여 PAO가 원전의 HEPA

필터 누설시험물질로 적합한지를 검증하고자 하였다[14].

DOP와 PAO 에어로졸 입자 크기별 분포는 에어로졸 발생기(SN-5, NUCON)에서 발생하는 입자를 입자계수기(model 2400, MetOne)를 이용하여 0.3, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0 μm 등 총 6 채널로 구분하여 측정하였다. 에어로졸 농도 측정은 1,500 CFM에서 상기 에어로졸 발생기에 압력별(20~45 psig, 5 psig 간격)로 발생하는 DOP와 PAO의 농도를 측정하여 비교하였다. 모사장치에 유량조절장치가 있는 바이패스관을 설치하여 인위적인 누설조건을 만들어 에어로졸 발생기(SN-5) 및 검출기(F-1000-DD, NUCON)를 사용하여 DOP와 PAO의 누설인지력을 비교하였고, 소형 모사장치의 실험결과를 대형 원전에 적용 가능함을 확인하기 위하여 현장실험도 수행하였다. 다만 ESF 계통에서 직접 실험을 수행하기는 곤란하므로, ESF 공기정화계통과 구성이 동일하면서 주요 계통에서 멀리 떨어져 있는 영광 6호기 비상운전지원실 보충공기정화기(TSC Makeup ACU, 6-628-M-AU01)에서 비교실험을 수행하였다[15].

현장누설시험 수행전 예비시험인 공기유량 용량시험, 공기유량 분배시험, 공기-에어로졸 혼합균일성시험 및 HEPA 필터 현장누설시험 등 관련 실험은 영광 5,6호기 시험절차서를 기준으로 시험 물질을 바꾸어가며 실험하였다.

**라. 활성탄 성능시험 <sup>131</sup>I 투과허용율 변경 검토**

영광 5,6호기의 활성탄 성능시험이 이미 ASTM D3803 (1989)에 의해 수행되고 있었으므로[16], 시험법 변경에 따른 투과허용율 변화가 성능 확인에 미치는 영향을 문헌적으로 조사, 검토하였다.

**III. 결과 및 고찰**

**가. 영광 5,6호기 ESF 공기정화계통 운영 현황**

영광 5,6호기의 ESF 공기정화계통은 Table 1과 같이 각 호기별로 주제어실 공기조화계통, 비상노심냉각계통 기기실 배기정화계통, 연료건물 비상배기계통의 세 계통에 각각 이중으로 설치되어 있다[5]. 성능시험과 관련하여 현재 적용중인 규제요건은 RG 1.52(Rev.2)에 의거한 매일 10시간 이상

**Table 1. ESF ACSes of Korean Standard NPP's[5].**

NPPs	Systems Items	MCR	ECCS Equipment Room	Fuel Building
Yonggwang #5,6	ACS Components	S-P-H-C-H/2 train 100 % Fan × 2 100 % Filter × 2	S-P-H-C-H/2 train 100 % Fan × 2 100 % Filter × 2	S-P-H-C-H/2 train 100 % Fan × 2 100 % Filter × 2
	Flow rate	12,000 CFM	6,000 CFM	5,000 CFM

※ S: Moisture separator, P: Pre filter, H: HEPA filter, C: Charcoal filter

의 운전가능성시험, DOP를 이용한 HEPA 필터 현장누설시험이 적용되고 있으며, 18개월 주기로 ASTM D3803(1989)에 의한 활성탄 성능시험을 수행하나 <sup>131</sup>I 투과허용율은 0.175 %를 적용하고 있었다.

**나. 활성탄 습분탈착**

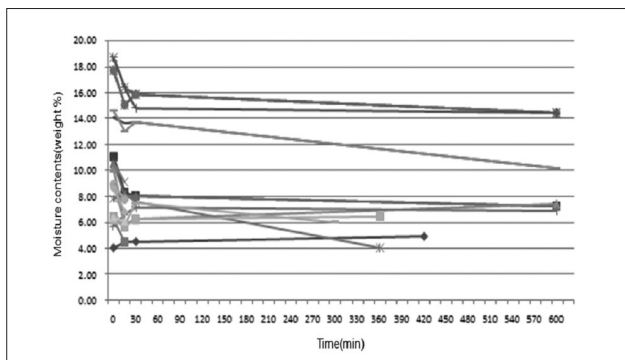
운전가능성시험과 습분탈착과의 관계를 확인하기 위해 영광 6호기 연료건물 비상배기계통 B계열 활성탄 캐니스터를 활용하여 운전가능성시험 전, 15분후, 10시간후 및 다음 시험 직전의 활성탄내 수분함량 분석 결과를 Table 2에 제시하였다[13]. 10시간의 운전가능성시험 총시간에 비해 활성탄의 초기 수분탈착률이 높았으며 다음 시험전 활성탄 시료를 분석한 결과, 현장의 활성탄 수분함량이 시험전 수준으로 회복되어 있음을 확인하였다.

원전 ESF 공기정화계통 모사실험장치 가동후 시간대별 습분 탈착량을 측정한 결과, Fig. 1에서 보는 바와 같이 초기 습분 탈착정도가 높게 나타났으며 운전가능성시험 30분 이후 10시간까지 탈착되는 정도는 미미한 것으로 판명되었다. 따라서 습분 탈착이 운전가능성시험 초기에 많이 일어나고 습분 탈착에 미치는 시간의 효과가 미미하므로 운전가능성시험이 단축되어도 활성탄의 습분 탈착효과에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있다.

영광 6호기 주제어실 ESF 공기정화계통 A계열에서 10시간 운전가능성시험 전,후를 포함하여 공기정화계통 내부 공기의 온도 및 습도 복원과정을 측정하였다. Fig. 2 (a)의 측정

**Table 2. Moisture desorption in on-site tests[13].**

sample	moisture contents (weight %)	
	Test 1	Test 2
New carbon	5.90	5.73
After 15 minutes	4.84	4.60
After 10 hours	3.45	3.45
Just before the next test	4.85	4.73



**Fig. 1. Moisture desorption on the simulator[13].**



결과를 보면 한 세트의 운전가능성시험이 끝난 후 온도는 상대습도에 비해 급격히 22~23 ℃로 복귀하고 있다. 상대습도는 활성탄 후단의 경우 24시간 이내에 다시 시험전 측정값 수준으로 회복하였으며, 활성탄 전단의 경우는 3.5일에 걸쳐 서서히 복귀되는 양상을 보였다. 온도의 경우도 전단에 비해 활성탄 후단이 더 빨리 복귀하는 경향을 보였는데, 이는 활성탄흡착기의 완충효과에 기인한 것으로 판단된다. 운전가능성 시험기간 중 현장의 온·습도를 측정된 결과로 판단할 수 있는 점은 시험기간 동안은 계통내 상대습도가 낮아지더라도 시험 후 몇 일 내로 원상복귀 한다는 점이다. 운전가능성 시험을 전후한 공기정화계통내 온습도 경향 확인을 위해 2008년 8월 4차례의 추가실험을 수행하였다(Fig. 2 (b)~(e)). 3월 실험에서는 외기의 온도가 계통내 온도보다 낮았기 때문에 운전가능성시험 수행 동안 히터가 켜져 있어도 오히려 계통으로 유입되는 공기의 온도가 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 8월 실험에서는 유입되는 공기의 온도가 높게 나타났다. 그러나 운전가능성시험 후 계통내 상대습도의 경향

은 다양하게 나타나 운전가능성시험을 10시간 수행하는 것이 계통내 수분제거에 전혀 영향이 없다는 것을 확인할 수 있었다. 오히려 외기의 온·습도 조건이 계통내 온·습도를 좌우한다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 운전가능성시험을 10시간 이상 수행하여 공기정화계통내 상대습도를 낮게 유지한다는 이론은 근거가 없음을 확인할 수 있었다[13].

**다. HEPA 필터 현장누설 시험물질 변경**

DOP는 1980년대에 발암의심물질로 구분되어 취급, 관리 및 저장에 주의가 필요하므로 RG 1.52(Rev.3)은 HEPA 필터의 현장누설시험 대체시험물질 사용 요건을 다음과 같이 제시하고 있다[2].

- ① 에어로졸 입자 크기가 비슷한 물질(ASME AG-1의 TA-1130)
- ② 누설시험 수행시 DOP와 비슷한 결과를 보이는 물질
- ③ 검출하한, 측정 민감도 및 정확성이 DOP와 유사한 물질
- ④ HEPA 필터 혹은 공기정화계통 구성 기기에 열화를 일으

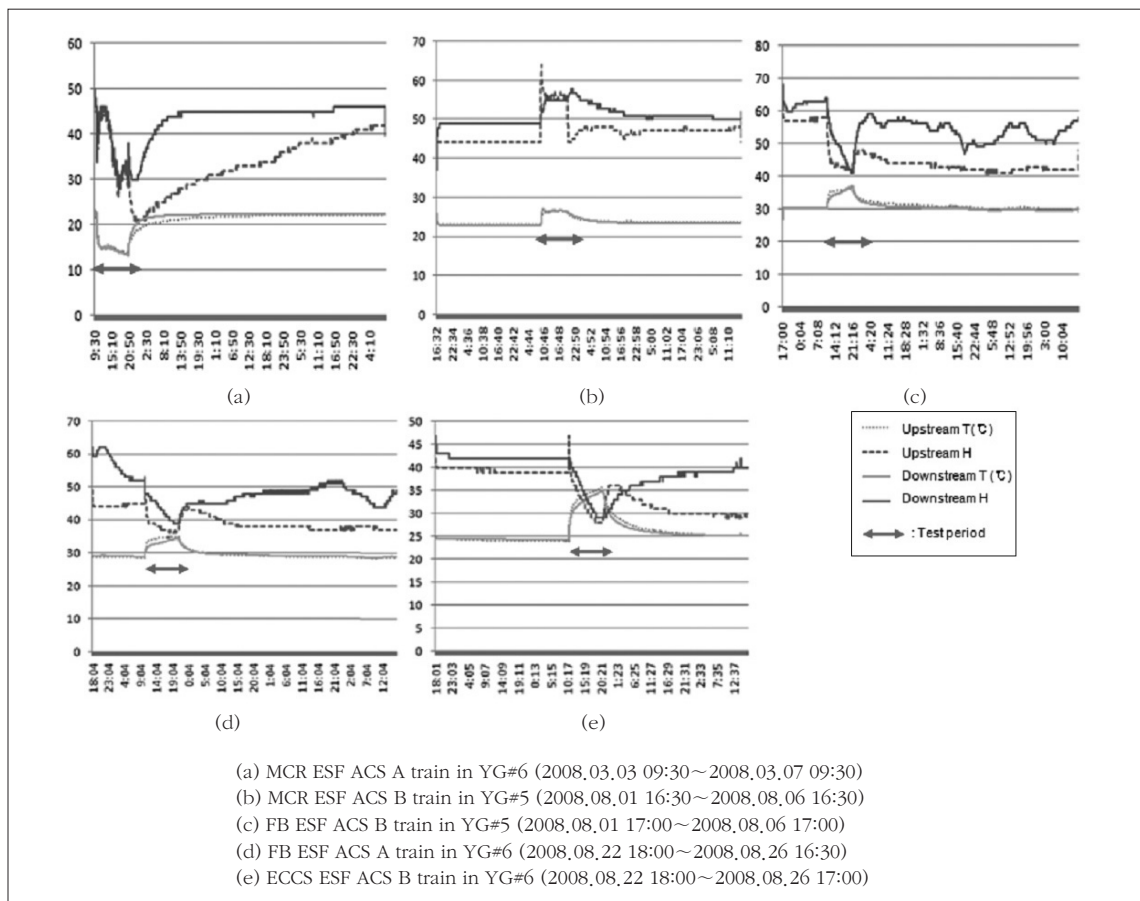


Fig. 2. Change of temperature and RH during the operability test[13].

으키지 않는 물질

- ⑤ 미국 환경보호국(EPA)의 “Toxic Substance Control Act(TSCA)” 수록 물질

DOP 다분산 시험시 ASME AG-1과 KEPIC MH (MHD 시험절차 TA 1130 용어정의)에서 요구하는 DOP의 광산란 입자 크기 분포는 아래와 같다.

- 지름 0.4 μm 미만 10 %, 지름 0.7 μm 미만 50 %, 지름 3.0 μm 미만 99 %

DOP와 PAO의 입자 크기 분포실험 결과를 Table 3에 나타내었으며, DOP와 PAO의 발생 입자수 분포는 유사하며 상기 기준에도 적합하였다[14].

또한 Fig. 3에서와 같이 모사실험장치에서 바이패스관을 이용하여 채널별로 다른 누설을 인위적으로 설정하여 실시한 누설인지도 실험에서도 DOP와 PAO는 유사한 인지도를 나타내었다[14].

영광 6호기 비상운전지원설 보충공기정화기에서의 현장 실험은 총 17세트의 시험을 각 세트당 2~3회 측정하여 결과를 비교하였다[15]. 현장계통 실험에서도 HEPA 필터뱅크의 누설이 있는 경우와 누설이 없는 경우 모두 DOP와 PAO는 실험실에서 모사실험장치로 실험한 결과와 유사한 경향을 보였다. 즉 DOP와 PAO가 누설이 있는 경우와 누설이 없는 경우를 동일하게 판명하였다. 현장시험중 Fig. 4와 같이 시험 측정점을 바뀌가며 여러 가지 조건을 변화하여 실험한 결과를 Table 4에 나타내었는데, DOP 및 PAO의 시험물질 변화보다 필터 클램프 구조, 상류/하류 샘플링 위치, Manifold 형태, 계측기의 영향이 누설 측정값에 미치는 영향이 더 크다는 점이 도출되었다. 즉,

**Table 3. Number of produced particles of DOP and PAO.**

Challenge aerosol	number of particles by size					
	0,3 μm	0,5 μm	1,0 μm	3,0 μm	5,0 μm	10,0 μm
DOP	15,622,9	54,645,9	124,897,5	11,089,8	374,1	0
PAO	17,719,5	60,467,7	124,383,7	8,840,1	274,3	0

DOP와 PAO 시험물질의 변화가 미치는 영향은 미소하므로, HEPA필터 현장누설시험 시험물질로서 PAO를 DOP 대신 사용하는데 실질적인 문제는 없을 것이며, 시험원, 운전원 등 작업종사자의 건강 보전에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

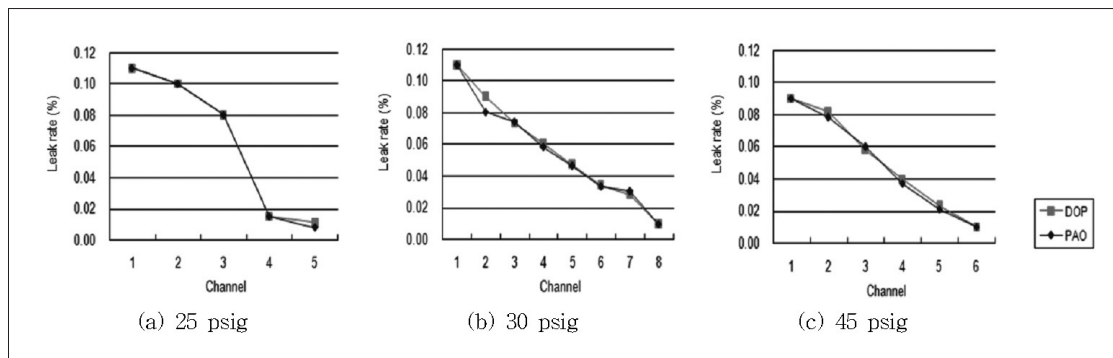
**다. 활성탄 성능시험 투과허용율 기준 변경**

공기정화계통내 사용중 활성탄의 성능확인시험은 NRC GL 99-02를 통해 종전의 ANSI N 509(1976) 기준에 의한 상대습도 70 % 분석에서 ASTM D 3803(1989)의 상대습도 95 %에서의 분석으로 변경되었다. RG 1.52 개정시 활성탄 성능시험 투과허용율 변경 사항을 Table 5에 표시하였다.

상대습도 90 % 이하에서는 습도 변화에 따른 Methyl Iodide 투과율의 변화가 매우 완만한 반면 상대습도 95 % 이상에서는 투과율의 변화가 매우 급격하게 일어나므로[2], RG

**Table 4. Comparison of leak detection capability (from HEPA filter in-place leak test)[15].**

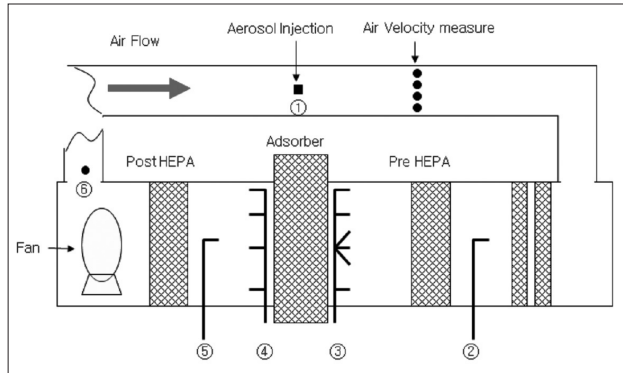
Set No.	object	injection point	up stream	down stream	challenge material	leak(avg.)
1	Pre-HEPA	1	2	3	PAO	0,053
2	Pre-HEPA	1	2	4	PAO	0,010
3	Post-HEPA	4	5	6	PAO	0,050
4	Post-HEPA	4	5	6	DOP	0,100
5	Post-HEPA	4	5	6	DOP	0,110
6	Post-HEPA	3	5	6	DOP	0,090
7	Post-HEPA	3	5	6	PAO	0,070
8	Pre-HEPA	1	2	5	DOP	0,125
9	Pre-HEPA	1	2	5	PAO	0,098
10	Pre-HEPA	1	2	3	PAO	0,025
11	Pre-HEPA	1	2	5	PAO	0,014
12	Pre-HEPA	1	2	3	DOP	0,028
13	Pre-HEPA	1	2	5	DOP	0,013
14	Post-HEPA	4	5	6	PAO	0,022
15	Post-HEPA	4	5	6	PAO	0,018
16	Post-HEPA	4	5	6	DOP	0,032
17	Post-HEPA	4	5	6	DOP	0,039



**Fig. 3. Leak rate of DOP/PAO at different pressures[14].**

**Table 5. Change of <sup>131</sup>I penetration acceptance criterion for activated carbon performance test on ESF atmosphere cleanup systems[1,2].**

Bed depth	Max. Assigned Credit for Activated Carbon Decontamination Efficiencies		<sup>131</sup> I Penetration Acceptance Criterion for Representative Sample	remarks
2inches	Elemental Iodine,	95 %	≤1 % (ANSI N509-1976)	RG 1.52 (Rev. 2) (RH 70 %)
4 inches or greater		99 %	≤0.175 % (ANSI N509-1976)	
2inches	Elemental Iodine,	95 %	≤2.5 % (ASTM D-3803-1989)	RG 1.52 (Rev. 3) (RH 95 %)
4 inches or greater		99 %	≤0.5 % (ASTM D-3803-1989)	



**Fig. 4. Injection points in on-site experiments (①~⑥ : injection point) [15].**

1.52 개정 내용중 투과허용율이 0.175 %에서 0.5 %로 바뀐 것은 기준이 완화된 것이 아니라 오히려 강화된 기준이나, 영광 5,6호기는 현재 시험 방법과 허용기준이 일치하지 않고 있었다. RG 1.52(Rev.3)의 활성탄 투과율에 대한 시험 방법과 허용 기준이 이미 Reg. Guide 1.52(Rev.2) 보다 강화된 사항이므로 현재의 투과 허용율 0.175 %를 0.5 %로 변경하여 실험방법과 투과 허용율을 일치시켜야 한다.

보수적인 투과 허용율을 적용할 경우 활성탄 성능시험 실패 빈도가 증가하고 이에 따라 폐기된 활성탄은 불필요한 방사성폐기물로 처분되게 된다. 투과 허용율을 0.175 %에서 0.5 %로 변경하여도 계통내 방사성 요오드를 포집하는 활성탄의 성능을 충분히 보장할 수 있으므로, 이 변경이 발전소의 안전에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다[7].

#### IV. 결 론

원전 공학적안전설비 공기정화계통 관련 규제요건인 RG 1.52의 개정사항에 대한 기술적 확인실험을 통하여 영광 5,6호기에 대한 적용가능성을 평가하였다. 실험 결과 31일 주기 정기시험인 10시간의 운전가능성 시험으로 계통내 수분 건조도를 다음 시험시기까지 유지한다는 개념은 사실이 아님을 확인하였다. 따라서 운전가능성시험은 계통 내 수분 제거 의미를 상실하게 되므로 기계적 성능 시험에 필요한

15분 이상이 적절함을 실험적으로 확인하였다[13].

HEPA 필터 현장누설시험에 사용되어온 시험물질 DOP의 PAO로의 대체가능성을 확인한 결과, PAO의 입자 크기, 농도별 발생빈도가 DOP와 거의 유사하고 기준에 적합하며, 모사실험장치 및 현장에서 누설인지도를 비교 실험한 결과도 우수하여 원전 HEPA 필터에 대한 누설시험에 PAO를 이용하여도 HEPA 필터의 성능 확인이 가능한 것으로 판단되고, 이에 따라 시험물질 변경으로 인한 입자 방사성 물질의 누출 증가 가능성은 없다.

영광 5,6호기의 활성탄 성능시험방법과 <sup>131</sup>I 투과허용율을 일치시키기 위해 시험법과 투과허용율의 관계를 조사하여, ASTM D3803(1989)의 활성탄 성능시험법이 ASME N509(1979) 보다 강화된 기준임을 확인하였다.

상기 연구결과 및 문헌정보로 수집한 해외 적용 사례 및 방사선영향평가 사례 등을 바탕으로 한국수력원자력(주) 영광 5,6호기에서 신청한 인허가변경이 승인되어 현재 적용되고 있다[7].

본 연구결과를 통해 원전 ESF 공기정화계통의 시험을 합리적, 효율적으로 수행할 수 있게 되었고, 운전원 부담 및 시험시간 설정 부담이 경감하였다. 또한 공기정화계통 내부 건전성이 제고되고 필터 사용량이 절감되어 방사성폐기물 발생량이 저감되는 효과도 기대된다. 본 연구결과는 추가 연구를 통해 전 원전 확대 적용이 가능하며, 공학적안전계통 외 RG 1.140의 적용을 받는 비안전계통 공기정화계통에도 적용할 수 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국수력원자력(주) 협약과제로 시행되었으며, 영광 제3발전소, 한전전력연구원, FNC(주)가 공동으로 연구하였고, 한국필터시험원이 제3차 검증시험에 참여하였다.

#### 참고문헌

[1] USNRC, Regulatory Guide 1.52 Rev.2, Design, Inspection, and Testing Criteria for Air Filtration and Adsorption Units of Post-Accident Engineered-Safety-Feature Atmosphere Cleanup Systems in Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants (1978).  
 [2] USNRC, Regulatory Guide 1.52 Rev.3, Design, Inspection, and Testing Criteria for Air Filtration and Adsorption Units of Post-Accident Engineered-

- Safety-Feature Atmosphere Cleanup Systems in Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants (2001).
- [3] 정승영, 전제근, 송민철, 김홍태, "신원전 적용을 위한 공기조화설비 HEPA필터 및 활성탄흡착기 성능시험요건", 2008 한국방사성폐기물학회 춘계학술대회 논문요약집, pp.75-76, 서울대학교 (2008).
- [4] S. K. Lee, K. Kim, S. H. Sohn, "An Introduction to Optimization Study for the Operation of Engineered Safety Feature Atmosphere Cleanup Systems in Nuclear Power Plants in Korea", 2010 The 18th WiN Global Annual Conference, pp.207-208, Busan (2010).
- [5] 이숙경, 이계우, 방선영, 김광신, 김경숙, 이갑복, 송규민, 손순환, 장순현, 박정서, 이대현, 박병록, 하태연, 임종권, 최덕수, 조병호, 전 원전 공학적안전설비 공기정화계통 설비 및 운영현황 분석 보고서, 한국전력공사 전력연구원, '07전력연-단0747, TM.S04.R2007.0747 (2007).
- [6] 이숙경, 손순환, 김경숙, 송규민, 김광신, 이갑복, 방선영, 이병철, 홍순준, 원전 공학적안전설비 공기정화계통 규제지침 변경 해외 적용사례 분석보고서, 한국전력공사 전력연구원, '08전력연-단0349, TM.S04.R2008.0349 (2008).
- [7] 이숙경, 손순환, 김광신, 김경숙, 송규민, 이갑복, 이계우, 원전 공학적안전설비 공기정화계통 규제지침 변경시 방사선환경영향평가에 미치는 영향 분석보고서, 한국전력공사 전력연구원, '08전력연-단1213, TM.S04.R2008.1213 (2008).
- [8] 이숙경, 방선영, 이계우, 이갑복, 김광신, 김경숙, 송규민, 손순환, 영광5,6호기 ESF 공기정화계통 모사실험장치 설계 타당성 확인을 위한 내부유동 비교평가 보고서 '07전력연-단0984, TM.S14.P2007.0984 (2007).
- [9] S. J. Hong, H. G. Ahn, B. C. Lee, S. K. Lee, S. H. Sohn, "Design of Small Test Facility for Engineering Safety Feature Air Clean-up System", Korean Nuclear Society Autumn Meeting, pp.531-532 (2007).
- [10] 이숙경, 김광신, 손순환, 홍순준, 강선행, "원전 공학적 안전설비 공기정화계통 모사실험장치의 설계, 제작 및 검증", 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문요약집, pp.407-408, 부산 (2010).
- [11] 이숙경, 김광신, 손순환, 홍순준, 강선행, "원자력 등급 ESF 공기정화계통 시뮬레이터 제작 및 활용", 방사성 폐기물학회, 발간중 (2010).
- [12] Deep Ghosh, Meeting Summary of NHUG 2008 Winter Meeting Held at Hyatt Hotel, Savannah, Georgia, USA, January 16-18 (2008).
- [13] S. K. Lee, K. Kim, S. H. Sohn, J. C. Bae, J. S. Park, J. G. Lim, B. H. Cho, S. J. Hong, "Reassessment of ESF Atmosphere Cleanup System's Moisture Control with 10-hour Operability Test", Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Pyeong Chang (2008).
- [14] S. K. Lee, K. Kim, S. H. Sohn, J. C. Bae, J. S. Park, B. H. Cho, B. J. Yu, S. J. Hong, S. H. Kang, "A Study on Replacement of HEPA Filter In-place Leak Test challenge Agent from DOP to PAO in NPP", Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Pyeong Chang (2008).
- [15] S. K. Lee, K. Kim, K. S. Kim, K. M. Song, K. W. Lee, B. W. Ko, G. B. Lee, S. Y. Bang, S. H. Sohn, "Optimization of the HEPA Filter In-place Leak Test of Engineered Safety Feature Atmosphere Cleanup Systems in Nuclear Power Plants", 2009 BIEN 2009: INWES Asian Network, p.278, Busan (2009).
- [16] ASTM D 3803-1991, Standard Test Method for Nuclear-Grade Activated Carbon (Reapproved 2004).