

원자력발전소 공기조화계통 탄소흡착기 후단 HEPA필터 대신 Medium필터 적용성

Feasibility for the medium efficiency filter as a postfilter in the air cleaning unit

임혁순, 정대율, 변성철, 김성환

한수원 (신형원전개발센터)
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력 발전소의 공기조화계통은 정상운전중 또는 사고시 방출되는 방사성물질을 제거하고 소내·외 방사선 피폭을 관련 규정요건의 제한치 이내로 유지하기 위하여 활성탄 흡착기를 설치하여 사용하고 있다. 활성탄 흡착기 후단에 HEPA필터를 설치하여 활성탄 흡착기로부터 비산되는 활성탄 입자를 포집하고 전단의 HEPA필터 기능 상실시 미립자 제거를 위한 다중방호 기능을 수행하기 위하여 사용된다. 최근 개정된 R.G 1.52, 1.140에 설계 근거인 ASME N509-1989에서 원자력발전소의 공기조화계통의 활성탄흡착기 후단에 95% 이상의 여과효율을 갖는 Medium필터 사용이 가능하도록 개정 반영하였다. 따라서 본 논문에서는 주요 필터의 기능, 최근 개정된 관련 규제 및 코드요건, 및 탄소흡착기 후단에 HEPA필터 대신 Medium필터 적용성에 대하여 기술하고자 한다.

Abstract

The Air Cleaning Unit(ACU) is provided in a nuclear facility to filter the radioactive materials in gaseous effluents released from the facility during normal operation and during a postulated accident. The Air Cleaning Unit(ACU) consists of pre-HEPA filters, charcoal adsorber, post HEPA filters, fans, etc. The charcoal filters keep on-site dose and off-site effluents ALARA, consistent with regulatory requirements. The function of HEPA filter downstream of charcoal(carbon) adsorber in ACU is to catch potential radioactive carbon dust and to be a backup in the event of failure of upstream HEPA. Previous Regulatory Guide use only post HEPA filter of charcoal adsorber downstream but The Regulatory Guide of current revisions allows use of 95% dust spot efficiency filters in lieu of HEPA at the downstream of the carbon adsorber. In this paper is described that the background information of filters, Current Regulatory Guide of revised by the United States Nuclear Regulatory Commission and the feasibility for the medium efficiency filter as a carbon adsorber post filter in the Air Cleaning Unit.

1. 서 론

원자력 발전소의 공기조화계통은 정상 운전중 또는 사고시 방출되는 방사성물질을 제거하기 위하여 소내·외 방사선 피폭이 관련규정요건(10CFR20, 10CFR100)의 제한치 이내로 유지하기 위

하여 활성탄 흡착기를 설치하여 사용한다. 원자력 시설내에서 발생하는 방사성 기체 폐기물이나 오염된 공기는 시설내의 작업요원의 피폭을 야기 시키고, 외부로 유출되었을 경우, 대기오염을 초래할 수도 있어 원자력발전소의 공기조화계통은 매우 중요하다. 따라서 원자력발전소의 공기조화계통은 기기의 올바른 동작조건, 인원의 상주 및 출입을 위한 대기조건을 보증하기 위하여 각 기기실의 온도, 습도를 규정치 이내로 유지하고, 정상운전중 공기 정화 및 사고시 공기의 재순환 유지 하도록 설계되어 있다. 원자력발전소의 공기 조화계통은 USNRC R.G 1.52와 1.140에 따라 안전 및 비안전 관련 공기조화계통의 탄소흡착기(Charcol Absorber) 후단에 HEPA필터를 설치하여 탄소흡착기로부터 비산되는 활성탄 입자를 포집하고 전단의 HEPA 필터가 기능 상실시 다중방호 기능을 수행하기 위해 사용된다. 최근 개정된 R.G 1.52와 1.140에서 원자력발전소의 공기조화계통의 탄소흡착기 후단필터에 95% 이상의 여과 효율을 갖는 Medium필터 사용이 가능하도록 개정되었다. 따라서 본 논문에서는 최근 개정된 관련 규제요건, 국·내외 원자력발전소의 운전사례, 여과기의 주요기능 및 종류, 탄소흡착기 후단에 HEPA필터 대신 95%의 효율을 가진 Medium필터의 적용성에 대하여 기술하고자 한다.

2. 원자력 발전소의 공기조화계통

2.1 기능

원자력 발전소의 공기조화계통은 공기중 방사성 물질의 제한 및 청정을 유지하기 위한 설비로 구성되며 다음의 세가지 기능을 발휘할 수 있어야 한다.

- 1) 시설내부로 공급되는 공기의 여과기능으로 공급되는 공기중의 부유물을 제거할수 있어야 한다
- 2) 시설내부의 공기분배 및 환기 구역구분 기능으로 시설내부의 공기는 오염 가능성이 낮은 청정 구역과 방사성 물질의 운반등으로 오염가능성이 높은 지역과 방사성 물질등이 저장되는 지역의 세가지 구분되는데 시설내부의 공기는 오염 가능성이 낮은 구역에서 높은 구역으로 흐르도록 하여야 하며 시설내부의 공기 정체 및 역류를 방지하여 오염물질의 시설내 축적 및 확산을 방지할 수 있어야 한다.
- 3) 시설내부의 공기를 여과하여 배기시키는 기능으로 오염정도에 따라 여과의 여부를 결정하며 만약 배출되는 공기중에 규정값 이상의 방사능 핵종이 검출되었을 경우, 반드시 규정수치 이하로 여과하여 배기 시킬수 있어야 한다.

2.2 계통구성

안전성 및 비안전성 관련 공기조화계통은 송풍계통, 덕트계통, 배기계통 및 방사능 감시계통으로 구성되어 있다.

1) 송풍계통

송풍계통은 송풍기, 열교환기, 가습기 및 필터 등으로 구성되어 있으며, 시설내의 적합한 근무분위기 제공과 외부에서 흡입되는 공기내에 혼합되어 있는 부유물질의 제거한다.

2) 덕트계통

시설내에 공급된 공기를 각 구역에 분배하는 기능을 하며 시설내에서 발생하는 공기중에 방사성 물질의 확산을 방지하기 위하여 환기구역을 구분하여 공기의 흐름을 방사성 오염도가 낮은 지역에서 높은 지역으로 유도하며 역류가 일어나지 않도록 한다.

3) 배기계통

공기배기계통은 필터, 흡착용 및 배기용 팬으로 구성되어 있으며 정상운전계통과 비상 운전계통으로 구분되어 있다. 시설내에서 발생하는 방사성 오염공기를 허용방출 기준치 이내로 여과하여 시설밖으로 배기시켜 대중 및 환경에 방사성 오염의 영향을 줄인다.

4) 감시계통

시설내의 작업요원, 운전요원 및 일반대중에게 방사능 혹은 공기 입자량이 기준치 이상을 초과하지 않음을 확증하는데 필요하므로 방사능 감시계통은 일반적인 방사능 환경 및 방사능 입자의 농도 등을 적절히 감시한다. 특히, 환경으로 방출되는 배기공기는 대기오염과 직접적으로 관련된 사항으로 제한치 값 초과이전에 경보 설정치에서 배기계통 댐퍼를 격리시킨다.

3. 국내 및 해외원전의 공기조화계통 설계현황

3.1 국내원전

공기조화계통의 안전성/비안전성 관련 탄소흡착기의 전후단에 HEPA필터 설치한 발전소는 고리 2~4호기, 월성 1~4호기, 영광 1~6호기 및 울진 3~6호기이며 탄소흡착기의 전단에만 HEPA필터를 설치한 발전소는 고리 1호기 및 울진 1,2호기 이다.

3.2 해외원전(Post 필터를 설치하지 않는 발전소)

Plant	Utility	Reactor Type	Commercial Operating Date
Arkansas Nuclear One	Energy Operation Inc.	PWR	Unit 1 12/74 Unit 2 3/80
Crystal River 3	Florida Power Corp.	PWR	3/77
Diablo Canyon	Pacific Gas & Electric Co.	PWR	Unit 1 5/85 Unit 2 3/86
Davis Basse	First Energy	PWR	7/78
Salem	Public Service Gas & Electric	PWR	Unit 1 6/77 Unit 2 10/81

4. 공기여과기

원자력발전소의 공기조화계통에 사용되는 주요 공기여과기는 다음과 같다.

4.1 거친필터 및 전치필터(Roughing Filter/Pre-Filter)

원자력 발전소의 공기조화 설비에 설치되는 거치른 필터는 그 목적상 크게 2가지로 구분된다. 첫째, 제어실과 같은 비방사선 지역의 공기조화 또는 재순환 계통이나, 소내 여러 지역의 외부공기 공급계통에 설치되어 건물내의 설비에 먼지가 끼여 손상 또는 수명이 저하되는 것을 방지하고, 공기정화 배출계통에 설치된 각종 여과기의 수명을 간접적으로 연장시키기 위한 목적으로 설치되는데, 이에 사용되는 거치른 필터는 주로 효율이 60%이상인 그룹-II 또는 그룹-III에 속하는 필터이다.

표1. ASHRAE 52-68항에 의한 여과기 분류

그룹	효율	여과기 형식	입자수량제거 시험에 의한 효율(%)	입자제거 무게비율 시험에 의한 효율(%)
I	저	충돌점착형 (Viscous Impingment Type)	<20	40~80
II	중	건성여과지 연장형 (Extended Medium, Dry Type)	20~60	80~85
III	고	건성여과지 연장형 (Extended Medium, Dry Type)	60~98	96~99
HEPA	최고	건성여과지 연장형 (Extended Medium, Dry Type)	100	100

표2. 공기여과기의 입자크기별 여과능력

그룹	효율	입자크기에 대한 제거효율			
		0.3 μ m	1.0 μ m	5.0 μ m	10.0 μ m
I	저	0 ~ 2	10 ~ 30	40 ~ 70	90 ~ 98
II	중	10 ~ 40	40 ~ 70	85 ~ 95	98 ~ 99
III	고	45 ~ 85	75 ~ 99	99 ~ 99.9	99.9
HEPA	최고	최고99.97%이상	최고99.99%이상	100%	100%

둘째로, 방사선 지역이나 비상 환기계통에서 공기정화 장치실의 고효율 필터 전단에 설치하여, 고효율 필터의 수명을 연장하기 위한 목적으로 사용되는 경우, 이는 그룹-III에 속하는 고효율의 거치필터를 전치필터로 사용한다. 전치필터를 설치하지 않고 고효율 필터 단독으로만 설치되었을 경우와 전치필터를 설치한 경우에서, 고효율 필터의 수명이 전치필터를 설치한 경우에 약 2배 이상으로 증가된다.

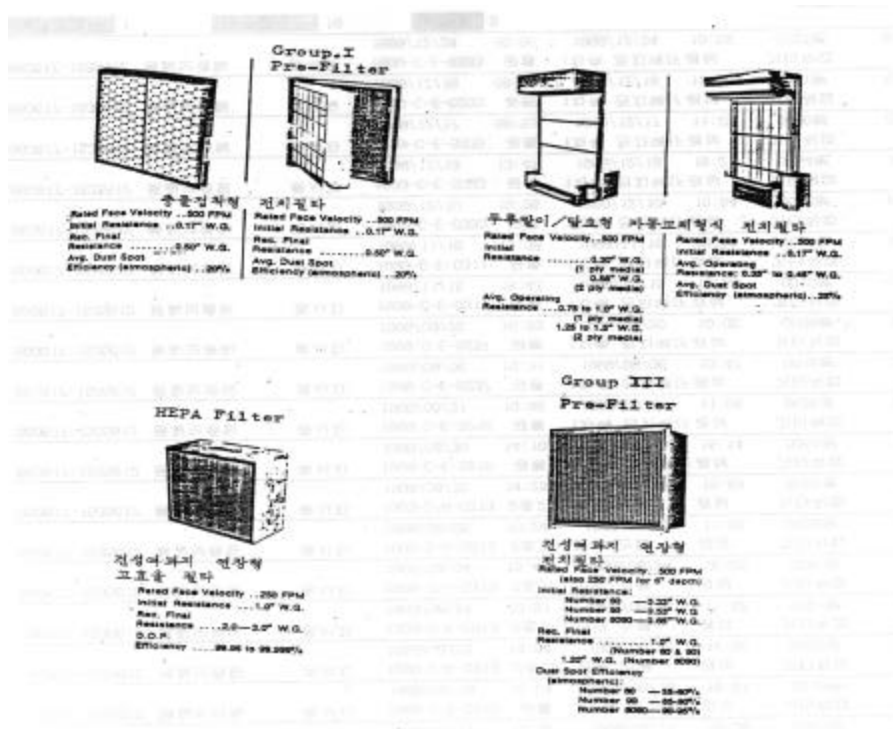


그림1. 여과기의 종류 및 형태

4.2 고효율필터(HEPA Filter)

고효율 필터는 마이크론 단위 이하의 입자를 99.97% 이상의 최고효율로 정화시킬 수 있는 가장 경제적이고 신뢰성이 있으며, 성능이 우수한 공기 여과기이다. 고효율 필터란, 건식여과 표면 연장형의 사용후 폐기 방식으로 0.3 μ m 입자를 최소한 99.97%이상 제거할 수 있는 필터이며, 정상 설계 유량에서 초기여과기 저항이 최고 1.0 in W.G이내이고, 견고한 케이스 내에 최대로 여과표면을 연장시킨 필터로 정의된다. 고효율 필터는 성능에 따라 세가지로 분류된다. ① “Type-A”는

정격 유량에서만 일괄적으로 99.97%이상의 효율을 가지는 것이고, ② “Type-B”는 정격유량과 정격유량의 20%유량에서 필터케이스와 여과지 접촉부분에까지 완성품의 성능이 시험, 보증된 것이며, ③”Type-C”는 대충 훑어보는 방식의 스캐닝 시험(Scanning Test)만 수행한 것으로, 원자력 발전소에서는 사용되지 않으나, 청결을 요하는 특수용도의 실내 또는 작업장 같은 곳에 사용되고 있다. “Type-A”는 재순환 계통의 공기정화 계통에 사용하는 것이 바람직하며, ”Type-B” 필터는 완벽하게 품질이 보증되는데, 특히 원자력 발전소의 안전관련 계통과 공기정화배출 계통에 고효율 필터로 사용된다.

4.3 활성탄 필터(Charcol Absorber Filter)

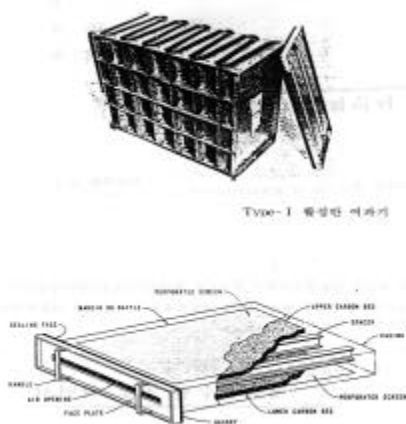
4.3.1 개요

원자력 발전소의 공기정화 및 가스정화에 있어서 주관점은 방사능 옥소의 여과로, 인체의 갑상선에 집적되는 특성관계로 공중과 종사자의 심각한 방사선 장애가 야기된다. 방사선 옥소는 원소 ($^{131}\text{I}_2$)나합성 유기물($\text{CH}_3^{131}\text{I}$)상태로 공기중에 존재하므로 이들을 정화시키기 위한 가장 적합한 여과체는 활성탄 필터이다. 활성탄은 초기단계로 코코넛 껍질, 땅콩껍질, 나무, 역청탄 또는 아스팔트로 숯을 만들고, 이 숯을 증기가열로 유기물을 제거한 후 흡착표면적을 최대로 크게 하여 활성화시킨다. 이 활성화된 숯의 표면적은 1그램당 700~1800 m^2 이나 되는 매우 큰 표면적을 갖게된다. 이 활성탄을 다시 유기화합 방사능 옥소를 제거할 수 있는 특성을 가지도록 I_2 , KI 또는 트리에틸렌다이아민(TEDA)에 화학처리(Impregnate)시켜서 완성된 제품으로 생산하여 사용된다. 이 활성탄의 성능은 활성탄 시료채취 시험에 의해 결정되고 요구되는 활성탄의 성능은 RDT M16-1과 ANSI N509에 의해 시료채취 시험되었을 때 최소한 99%이상의 효율을 가져야 한다.

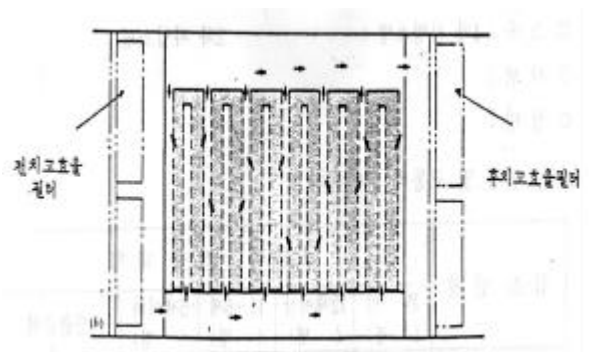
4.3.2 활성탄 여과기의 종류

활성탄 여과기는 여과기 형틀의 구조에 따라 3가지 형태로 분류된다.

- ① Type-I 여과기 : 초기 원자력 발전소에서 사용하던 형태로 최소 요구치인 활성탄 베드 두께가 25mm이고 주름잡는 형식으로 제작된 여과기로 최근에는 거의 사용되지 않는다.
- ② Type-II 여과기 : 상자형(Tray-Type)으로 활성탄 베드 두께가 50mm로 크기는 표준화되어 생산되고 있다. 고리 1호기에 설치된 활성탄 여과기군이 이 형식이다.
- ③ Type-III 여과기 : 이 형식은 주로 활성탄 베드 두께가 50mm로 여과기 장치실에 영구적으로 활성탄 케이스를 설치한 것으로 고리 2호기와 3,4호기 등에 이 형식이 설치되어 있다.



TYPE-II 활성탄 여과기



TYPE-III 활성탄 여과기

그림2. 활성탄 여과기의 종류

5. 탄소흡착기 후단 HEPA필터 대신 Medium필터 적용성

5.1 규제요건

1) USNRC R.G 1.52-1978(안전성 관련)

공기조화계통의 탄소흡착기 후단에 HEPA필터를 설치하여, 탄소흡착기로부터 비산되는 활성탄 입자를 포집하고 전단의 HEPA필터가 기능상실시 미립자를 제거하는 다중방호기능을 갖는다.

2) USNRC R.G 1.140-1978(비안전성 관련)

탄소흡착기 후단에 활성탄 입자를 포집하기 위하여 HEPA 필터 설치를 권고하였다.

3) EPRI-URD, Chapter 9

주제어실 지역 및 TSC 지역의 공기정화기는 Prefilter, HEPA 필터 및 송풍기로 구성되어야 하며 관련요건은 ASME N509와 해당 URNRC 규제지침서를 따른다고 명시되어 있다.

4) EUR-2001.3(Rev.B)

탄소흡착기가 설치된 공기조화계통 전단에 HEPA필터 설치를 명시하였다.

5.2 코드요건

1) ASME N509-1976 및 1980

탄소흡착기 후단에 설치될 후단필터(Postfilter)의 관련요건이 기술되어 있지 않다.

2) ASME N509-1989

ASME N509-1980의 개정판으로 원자력발전소의 탄소흡착기 후단에 95% 이상의 분진 제거 효율을 가진 Medium 필터를 안전성관련 공기조화계통에는 Post Medium필터 및 HEPA 필터를 설치해야 하며, 비안전성관련 계통에는 Postfilter를 고려하여야 한다.

5.3 Medium필터 적용성 검토

1) 관련 규제 및 코드 요건측면

원자력발전소의 공기조화계통은 USNRC R.G 1.52-1978 및 R.G 1.140-1979 요건에 따른 것으로 설계근거인 ASME N509-1976에서는 탄소흡착기 후단의 후단필터에 관련된 내용이 언급되어 있지 않았다. 그러나 ASME N509-1989에서 공기조화계통의 탄소흡착기 후단에 95% 이상의 여과효율을 갖는 Medium필터 사용이 가능하도록 개정되고, 최근 개정된 R.G 1.52-2001(Rev.3) 및 1.140-2001(Rev.2)에 안전 및 비안전성 관련 공기조화계통의 탄소흡착기 후단에 HEPA 필터 또는, ASME N509-1989 Section 5.3에 명시된 Medium필터 효율을 갖는 필터 설치로 개정되어 탄소흡착기 후단에 HEPA필터 대신 Medium필터 사용이 가능하도록 개정되었다.

2) 방사선 방호측면

탄소흡착기 후단 HEPA필터의 주요 기능은 탄소흡착기로부터 유입되는 활성탄 입자를 포집하는 것으로 ASME N509 요건에 따라 제작된 탄소흡착기로부터 발생하는 활성탄 입자는 일반적으로 5~10 microns의 크기를 가지므로 Medium Postfilter(95%, 0.3 microns)에 의해서도 충분히 제거가 가능하여 방사선 방호측면에서 유사한 동일한 효과가 있다.

3) 유지보수 측면

공기조화계통의 필터는 초기 2~3배의 압력강하에 도달시 필터를 교체하며 여과되는 물질은 탄소흡착기로부터 분리되는 활성탄 입자로 필터 교체시기는 두 형태의 필터가 유사하다. 또한, HEPA 필터는 ASME N510 요건에 따라 주기적으로 성능시험을 수행 해야 하나 Medium필터를 적용할 경우에는 관련 시험이 불필요 하다.

5.4 개선효과

1) 경제성 향상

원자력발전소의 안전성/비안전성 공기조화계통의 활성탄흡착기 후단에 HEPA필터 대신 Medium필터를 적용할 경우 1개호기의 필터 교체에 따른 소용비용이 대략 7억원 정도로 현재 운전중인 원전 및 건설중인 원전에 적용시 대체 비용절감효과가 상당히 클 것으로 사료된다

계 통	HEPA Filter 설치갯수(호기별)	비용 절감액 (호기별: 만원)
Control Room Area HVAC System	8	6000
Fuel Handling Area HAVC System	8	6000
Auxiliary Building Controled Area HAVC System	72	54000
Containment Purge System	4	3000
Compound Building HVAC System	4	3000
합계	96	72,000

○ 적용가격(2001. 1월 기준) : HEPA필터 400,000원/개, Medium 필터 150,000원/개

2) 유지 보수성 향상

HEPA필터는 ASME N509 요건에 따라 주기적으로 성능시험을 수행해야 하나 Medium필터를 적용할 경우에는 관련시험이 불필요하여 유지관리 측면에 발전소 보수성이 향상 된다.

6. 결 론

현재 가동중 또는 건설중인 국내·외 원전 대다수가 USNRC R.G 1.52-1978(Rev.2), R.G1.140-1979(Rev.1)에 따라 공기조화계통의 활성탄 흡착기 후단에 HEPA필터를 채택하여 사용하여 왔다. 그러나, 탄소흡착기로부터 발생하는 활성탄 입자(5~10 microns)를 HEPA필터 대신 Medium필터(95%, 0.3microns)로 대체 사용할 경우에도 활성탄 입자를 충분히 제거가 가능하고 방사선 방호측면에서 유사한 효과가 있어 Medium필터 사용이 가능하도록 관련규제 요건이 개정되었다. 따라서, 원자력발전소 공기조화계통의 탄소흡착기 후단에 HEPA필터 대신 Medium필터를 적용할 경우 경제성 향상, ASME N509 요건에 따라 주기적으로 성능시험이 불필요하여 발전소의 유지보수성이 크게 향상 될 것으로 기대된다.

7. 참고문헌

1. USNRC R.G 1.52, 1.140-2001.(원자력발전소 공기조화계통 설계, 검사, 시험)
2. ASME N509-1989.(원자력발전소 공기조화계통 및 기기)
3. ASHRAE 52-68(여과기 분류)
4. 한수원, S&L社 해외자문 보고서
Applicability of Medium Efficiency Filter as a Carbon Adsorption Postfilter for Air Cleaning Unit (E-64-002, '00.1)
5. Nuclear Air Cleaning Handbook, W-7405-ENG-26, ORNL
6. 한수원, 표준경수로 계통설비. 끝.