

원자력시설의 공기조화 시스템 고찰

Study on HVAC System in Nuclear Facility

백상열, 송웅섭, 오연우, 주용선, 홍권표
한국원자력연구소

요 약

원자력 시설의 공기조화 시스템은 일반시설의 공기조화 시스템에 비하여 더 안정되고 여유있게 설치 및 시공되어야 한다. 그 목적은 최적 작업환경유지, 오염 공기로부터의 작업자 보호, 외부배기로 인한 대기오염 방지 등이다. 낮은 공기오염조차 막는 것이 원자력시설의 안전한 운전을 위해 기본적인 것이다. 설계 시 시스템의 융통성을 갖는 설계가 필요한데 이는 나중에 시스템의 수정 보완 등을 고려할 때 중요하다. 본 논문에서는 원자력시설의 공기조화계통 설계에 고려해야 할 내용 및 외국시설에 대하여 검토하였는바, 원자력시설의 공기조화계통 설계에 활용될 수 있겠다.

Abstract

Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system in nuclear facility should be equipped and constructed more stable and allowable than that in common facility. The purpose of HVAC system is the maintenance of optimum working environment, the protection of worker against a contaminated air and the prevention of atmospheric contamination due to a outward ventilation, etc.. The basic scheme of a safety operation of nuclear facility is to prevent the atmospheric contamination even in low level. The adaptability of HVAC system should be taken into account in the design stage so that it is possible to modify the system which is in operation. In this study, the design requirements of HVAC system in nuclear facility and the HVAC systems in foreign countries are reviewed, and the results can be utilized in the design of HVAC system in nuclear facility.

1. 서 론

원자력 시설의 공기조화 시스템은 최적 작업환경유지, 오염 공기로부터의 작업자 보호, 외부배기로 인한 대기오염 방지 등의 목적이 있다. 원자력 시설의 공기조화 시스템의 기능적인 설계는 IAEA (International Atomic Energy Agency)의 Safety Series No. 17, U.S. NRC (Nuclear Regulatory Commission), Nuclear Air Cleaning Handbook 등에서 다루고 있으며, 환기 시스템의 기능적인 설계는 산업용 환기시스템, ASHRAE 핸드북 등 여러 참고서에서 다루어지고 있다. [1,2] 지극히 낮은 공기오염 조차도 막는 것이 원자력시설의 안전한 운전을 위해 기본적인 것이다. 또한 그것은 경제적인 운전에도 중요한 인자가 된다.

원자력시설의 공기 정화 시스템은 공기 중에 방사성물질에 대해서 확립되어 있는 MPC(Maximum Permissible Concentration)를 만족하기 위해 대단히 높은 포집효율로서 이루어진다.

일반 산업에서의 먼지, 화학 흡 등은 어떤 심각한 상태에 도달하기 전에 인간이 감지할 수 있으나, 원자력 시스템에서는 생명에 즉각적인 위험을 주는 레벨에서조차 방사능의 존재에 대하여 인간은 전혀 무감각이기 때문에 상황은 아주 다르다.

공기 중에 대부분의 화학적 오염에 대해 정해진 가장 낮은 허용한계 값(TLV : Threshold Limit Values)은 어떤 방사능 물질의 MPC보다 적어도 100배 이상이 더 높다. 정의에 의하면 이런 형태의 HEPA 필터는 0.3 μm 의 입자에 대하여 최소 99.97% 의 제거 효율을 가져야 한다.[3]

원래 설계 시 시스템의 융통성을 갖는 설계가 필요한데 이는 나중에 시스템의 수정 보완 등을 고려할 때 중요하다. 필터 하우징, 팬 및 댐퍼 등의 위치를 잘 고려해서 설치해야 만 유지 보수에 좋으며, 필터 등의 교체 시에 위험성을 줄일 수 있다.

방사능의 문제 때문에 환기, 정화시스템의 수정, 보완 또는 재건에 드는 비용은 비방사능 시스템에서 수행되는 유사한 작업에 드는 비용의 5-10배가 소요된다. 초기 비용을 작게 하려고 만일 바람직한 이점들이 생략되고 어떤 요소, 장비 및 덕트에 제공되는 공간의 양과 질을 희생시킨다면 많은 운전비용과 유지비용이 든다. 그 시스템의 수명동안 운전 및 서비스 비용은 대개 그 시스템을 건설하기 위한 초기 비용을 훨씬 초과한다. 프리필터, बैं크 사이즈, 공기 유량 또는 다른 시스템 인자들의 여러 가지 조합에 의해서 HEPA 필터의 수명을 연장할 수 있으며, 그에 따라서 많은 경비를 절감할 수 있다.

2. 시스템 고려사항

가. Zoning

방사능 오염도에 따라 다음과 같은 4개의 Zone 으로 나누어진다.

- 1) Zone 1 : 청정 구역
- 2) Zone 2 : 때로 조금 오염되나 일반적으로 청정한 구역(working area)
- 3) Zone 3 : 자주 오염되는 구역, 접근이 제한됨(maintenance area)
- 4) Zone 4 : 정상적으로는 접근이 금지된 구역(hot cells, shielded enclosures, etc)

나. 실내 공기조건

흡입공기의 정화, 온도, 습도 및 분배가 공기조화의 항목들이다. 흡입공기는 일반 공기조화 시스템에서 안전한 건지에서 설계되는 것보다도 방사성물질 취급시설에서는 더욱 중요한데, 대기 등에 포함된 불순물을 걸러줌으로서 배기필터의 수명을 연장해 줄 수 있다.

방사성 배기가스 필터 시스템의 비용은 입구 공기의 순도에 달려있다. 흡입 공기의 온도, 습도 조절은 작업자에게 안락한 작업 환경을 제공하고, 기구, 장비 등에 좋은 분위기를 제공하기 위해 또한 요구되어진다.

3. 환기 시스템설계

가. 기본적 개념

환기시스템 설계 시 일반적인 두 가지 주요한 접근법은 다음과 같다. 공기 흐름방향은 청정 구역으로부터 공기 오염이 존재하거나 존재할 수 있는 지역으로 이루어져야 한다. 그래서 공기는 정상적으로 복도나 사무실에서 일반적인 실험실 구역, 휴음 후드 및 글러브 박스 또는 높은 방사

능 오염 셀로 흐르며 대개 필터 시스템을 거쳐서 대기로 나가게 된다. 오염 레벨의 차이가 있는 구역들에 대해서 환기 시스템을 분리하여야 한다.

복도와 사무실에서는 약 3 mm W.G. 의 플러스 압으로 유지 한다. 방사성 구역은 약 -3 mm W.G. 로 하며, 높은 오염 지역에서는 -8 ~ -25 mm W.G. 를 유지한다. 그러나 glove 박스와 같은 유량 체적이 작은 곳에서는 압력차를 -50 mm W.G. 까지 유지할 수도 있다. 송풍기는 대개 필터에서의 압력 손실 등을 고려해서 충분한 용량을 갖도록 한다.

나. 환기 구역 공기 변화

작업구역에서의 공기 변화는 기본적으로 요구되는 개인 피폭의 안전한 작업 레벨이 초과되지 않도록 충분히 공기를 바꾸어주는 것이다. 넓은 범위의 환기율이 시간당 회전수로 사용되고 있다. 여러 인자들 즉, 방의 사이즈 및 형상, 흡 벽장(cup boards)의 수와 모양, 사람 수 및 에어본 확산의 형태들이 모두 고려되어야만 한다. 그러나 넓은 범위의 방사능 실험실은 시간당 6 ~ 10 회의 환기 횟수를 갖는다. 방사능이 가장 많은 구역에서는 시간당 20회 이상의 환기 횟수를 갖기도 한다.

또한 중요한 것은 공기 흐름 패턴을 방해하는 요인들을 가능한 한 없도록 해주는데, 이것은 공기 정체 현상의 원인이 된다.

다. 흡입 환기(Inlet Ventilation)

흡입공기 중의 먼지를 줄임으로서 방사능 물질의 배출을 줄이는 것이 여러 면에서 중요하며, 흡입 환기 프랜트 룸은 건물 밖 또는 청정 구역에 위치해야 한다. 기후조건에 따라서 흡입 공기의 조절이 요구된다.

라. 배기 환기(Exhaust Ventilation)

실험실 환기 시스템은 기본적으로 사람을 보호하기 위해 설계되기 때문에 사용자는 흡입 특성보다 배기 특성에 훨씬 많은 고려를 해야 한다. 요구되는 공기량을 계산하는 데 있어 여유를 갖도록 하며, 배기량이 만족되는지를 점검하는 것은 중요하다. 대부분 단순한 댐퍼에 의해서 밸런스가 이루어진다.

방사능 작업구역의 배기시스템은 예비용 팬 과 모터가 구비되어야 한다. 모든 팬들은 기능이 부적절하거나 멈추었을 때, 볼 수 있거나 들을 수 있는 경보 시스템을 갖고 있어야 한다. 배기공기 굴뚝은 인접한 건물에 오염을 주지 않고 개인에게 상당한 피폭을 주지 않도록 해야만 한다. 덕트의 모양과 풍량은 덕트 내부에 방사능 먼지의 축적을 막을 수 있어야 한다.

4. 국외 시설의 공기조화 시스템

세계 여러 나라의 원자력시설 공기조화 시스템의 기본개념으로서, 오염정도가 낮은 지역으로부터 오염이 많이 된 지역으로의 부압유지, 흡, 배기 필터의 설치 및 경보장치 등의 개념은 같다. 그러나 환기 횟수, 부압정도 등에는 상당한 차이가 있다.[4,5]

오염방지를 위해서 HEPA 필터(99.97 %)와 차콜 필터를 이용해서 방사성 분진과 아이오다인을 제거하고 있다.

핫셀의 프리필터 또는 고효율 필터의 이용에 따른 여러 문제점들 - 필터를 통한 압력손실, 화재시 필터의 파괴와 스모크 입자들에 의한 필터의 막힘, 필터의 방사성 물질로부터 초래되는 문제점들의 처리 등 -을 경감하기 위해 물로 씻는 배기 벤티레이션 시스템이 이용되기도 했다.[6] 또한 원자력시설의 벤티레이션 시스템의 사고 시에 대한 컴퓨터 코드를 개발하는 등 여러 가지 문제점들을 분석 보완해 가고 있다.[7]

가. 미국

1970년에 완성된 웨스팅하우스 프로토늄 연료 개발 연구실(Westinghouse Plutonium Fuels

Development Laboratory)의 경우 사무실은 완전히 분리된 Zone 으로 자체의 에어 핸들링 시스템으로 공급되고 있으며, 에어록(Air Lock)으로 프랜트 지역과 분리하고 있다.

프랜트 지역은 6개의 압력 Zone 으로 나누어져 있으며, 화학공정 실험실이 최고의 부압으로 유지되고 있다. 건물의 중심부로 공기의 흐름이 설계되어 있으며, 공기 유량은 매 시간 거의 8회를 완전히 바꾸어 줄 수 있는 양이다.

시설로부터 배기되는 공기 또는 방으로 다시 재순환 되는 공기는 모두 최소 두 단의 고성능 필터(Absolute Filters)를 통하게 되어있다. 이 필터들은 설치 후에 DOP 테스트를 하며, 글러브박스에는 입구에 고성능 필터가 설치되며 배기 덕트에 또 다른 필터가 설치된다. 필터 교환은 비닐백에 의한 기술(Bagging Technique)에 의해 교환된다.

실험실 입구에 중앙 경보 판넬이 설치되어 있으며, 정상적인 작업시간 동안 작업자에 의해 모니터 된다. 경보 판넬의 축소판이 경비실에 설치되어 있어서 자리를 비울 때나 주말 동안에도 계속적으로 감시된다. 또한 로칼(Local) 경보 판넬들이 설치되어 있는데, 정상 운전 시에는 흐린 불빛을 갖는 일련의 표시가 되어진 진열창으로 구성되어 있다. 어떤 경보 상태에서는 부저가 울리면서 밝은 빛을 발한다. 부저는 끌 수 있으나 불빛은 경보 상태가 고쳐진 후에야 꺼지게 된다.

그 밖에 알곤 국립 연구소에서 운영하고 있는 핵연료 처리시설(FCF)의 알곤 셀의 경우는 부압이 -3 in. W.G.로 유지되고 있으며, HFEF(Hot Fuel Examination Facility) 에서는 -0.75 ~ -4 in. W.G.로 유지하고 있다.[9]

나. 캐나다

캐나다의 초크리버 연구소 조사후시험시설의 공기 조화 시스템을 살펴보기로 한다.

셀의 작업구역으로 공기가 공급되며, 공기 흡입 팬이 고장 시 셀의 작업구역에 알람으로 통보해 주고 있으며, 셀의 작업구역과 메인 판넬에 빨간 불빛이 들어온다. 인지버튼으로 알람을 끄며, 불빛은 팬이 다시 가동될 때 까지 켜있게 된다.

각 셀의 공기는 셀 내의 러핑(Roughing)필터에서 1차로 여과되고 팬 직전의 필터 बैं크를 통해서 배출된다. 부압은 -8 ~ -10 mm W.G.로 유지되며 시간당 약 30회의 환기를 하게 되어있다.

다. 일본

일본 원자력 연구소 조사후시험시설은 16개의 배기라인으로 구성된 환기시스템이 최소 2회 이상의 셀 체적을 환기시킨다. 시설의 공기흐름 패턴은 낮은 오염지역에서 높은 오염지역으로 흐르도록 되어있다.

셀 공기는 프리 필터를 통해 서비스 구역에서 들어오며 플레임 트랩(Flame Trap), 프리 필터 및 2단의 고성능 필터로 구성된 셀 배기 필터 유닛을 통하여 배출된다.[10]

각 셀은 -20 mm W.G. 로 유지되며 알파-감마 셀은 -40 mm W.G.의 압력으로 된다.

라. 이탈리아

이탈리아 카사시아(CASACCIA) 원자력 센터의 알파 감마 실험실(ALPHA - GAMMA RADIO METALLURGY LABORATORY)의 경우에도 타 시설과 비슷한 개념이다.

비상시에 세심한 배려를 하고 있는데 3 대의 배기 팬 중 한 대는 노말이고 두 번째 것은 스텐바이이며, 세 번째 것은 배터리에 의해 공급된다.

첫 번째, 두 번째 팬이 비상 파워 시스템과 연결되어 있다. 그러나 동력 공급을 위해 비상발전기를 가동하는 시간이 50 초가 걸리므로 전기가 나갔을 경우에 연속적인 가동을 보장하기 위하여 세 번째의 배기 팬을 가졌다.

각 구역의 환기횟수와 부압은 표 1 과 같다.

Table 1. Underpressure and Renewals per Hour of Casaccia Hot Laboratory

	Air Changes/h	Pressure in mm of water
Green areas (offices, cold change rooms, etc)	2 to 4	0
Yellow areas (operating areas, radiochemistry and special examination laboratories, assembling room, etc)	5 to 8	-3 to -5
Red areas (hot storage, loading area, etc)	8 to 10	-10 to -15
Red areas (hot cells, decontamination room)	20 to 30	-25 to -40

마. 프랑스

프랑스 LECA 의 경우 전 건물이 공기조화 및 환기가 되는데, 흡·배기 쪽 모두 고성능 필터를 쓰고 있으며 굴뚝의 높이는 30 m 이다. 환기 횟수는 전 층에 대하여 시간당 1회이며 각 셀에 대해서는 50 회로 수행되고 있다. 셀 및 제한구역으로부터의 배기는 메인 필터를 거치기 전에 첫 단의 필터를 통하게 된다.[11]

5. 검토 결과 및 고찰

공기조화 시스템을 이용하는 것은 일반시설이나, 방사능물질 취급 시설이나 모두 같다. 그러나 원자력시설에서는 일반 시설과는 달리 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

가. 한번 공기조화 시킨 공기는 다시 이용하지 않는 Once-Through 시스템을 채택하고 있으며, 환기횟수는 시간당 6-10회, 많게는 20회를 갖는다. 각국의 시설의 환기횟수는 표 2와 같다.

Table 2 . Comparison of Underpressure and Renewals per Hour.

	ORNL	JAPAN	FRANCE S.G.N.	KAERI P.I.E	CANADA	ENGLAND
부압	-25 mm W.G.	-5 ~ -30 mm W.G.	-15 ~ -25 mm W.G.	-15 ~ -25 mm W.G.	-8 ~ -10 mm W.G.	-25 mm W.G.
시간당환기횟수	6회	20-40회	10회 이상	28-42회	30회	-

나. 방사능 오염 레벨에 따라서 4개의 구역(청정구역, 관리구역, 제한구역, 금지구역)으로 나누어져 있으며, 각 구역 간에 부압을 유지하여야 한다. 즉 복도와 사무실에서는 약 3 mm W.G.의 양압으로, 방사능구역은 대개 -3 mm W.G. ~ -25 mm W.G.의 부압으로 유지하여야 한다.

다. 대기오염방지를 위하여 0.3 μm 입자에 대해 최소 99.97 %의 효율을 갖는 HAPA필터를 오염정도에 따라서 여러 단으로 설치하여야 하며 아이오다인을 사용하는 곳에서는 적어도 99 %의 효율을 갖는 Charcoal 필터를 사용해야 한다. 각 필터의 성능검사는 제작당시에 실시함은 물론, 사용 전 필터케이싱에 장착 후 누설시험을 실시해야 한다.

라. 방사성물질 취급시설의 공기조화 시스템에는 예비용 팬 및 필터 시스템 등이 구비되어야 한다.

다. 많은 풍량의 처리 등에 따른 운영비가 막대 하므로, 외기량을 줄이는 방안 및 HEAT PIPE 열교환기 설치 등으로 폐열 회수를 통하여 많은 운영비 절감을 기대할 수 있겠다.

참 고 문 헌

1. U.S. NRC, Regulatory Guide 3.12, "General Design for Ventilation System of Plutonium Processing and Fuel Fabrication Plants." (1973.8)
2. U.S. NRC, Regulatory Guide 3.32, "General Design Guide for Ventilation Systems for Fuel Processing Plants." (1975.9)
3. Samuel B. Steinberg, "Control of Airborne Particles." (1985.6)
4. L.T. Corbin et al., "Design and Construction of ORNL High Radiation-Level Analytical Laboratory." 11th Hot Lab Proc., ANS, pp.3-10 (1963)
5. P.E. Brown et al., "A New Chemical α , β , γ Active Handling Facility Conceptual Aspects." UKAEA, U.K.
6. Edward Stearns, "A Water-Washed Exhaust Ventilation System for Hot Cells." Proc. 15th Conf. on Remote Syst. Technol. pp.281-282 (1967)
7. R.W. Andrae et al., "Investigation of Air Cleaning System Response to Accident Conditions." 16th DOE Nuclear Cleaning Conf., pp.1142-1164 (1985)
8. C. Cesarano et al., "The Alpha-gamma Radiometallurgy Laboratory at CASACCIA Nuclear Center-Design and Construction." Proc. 19th Conf. on Remote Syst. Technol., pp.145-152 (1971)
9. E.W. Landow and P.R. Hirsh, "Design of the Hot Fuel Examination Facility Argon System." Proc. 17th Conf. on Remote Syst. Technol. pp.196-200 (1969)
10. W.E. Unger et al., "Transuranium Processing Facility Design." 10th Hot Lab Proc. ANS, pp.3-10 (1962)
11. C. Brebant et al., "LECA-Irradiated Fuel Study Laboratory." 11th Hot Lab Proc. ANS, pp.17-32 (1963.11)