

한국형 방사성 폐기물 처분장을 위한 환기시스템 전략

김 진 (인하대학교)
권상기 (한국원자력연구소)
윤찬훈 (인하대학교)

1. 서 론

지하공간의 개발은 광물채취, 운송 (도로 터널 및 지하철), 유류 비축기지 등의 목적 이외에도 그 사용 용도가 증가하고 있는 추세에 있다. 지질적 특성을 고려하여 부지만 잘 선정 되어진다면 지하공간은 암반이 가진 구조적, 화학적, 열적, 수리적 안정성을 통해 액체 혹은 기체상 연료로부터 독성 폐기물까지 다양한 물질들을 안전하게 저장할 수 있는 장소가 될 수 있다. 현재 원자력발전소내 임시 저장 능력이 수년 내에 한계에 이르는 방사성 폐기물의 경우 처분 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 일반적으로 지하 방사성 폐기물 처분장 개발은 다섯 단계로 이루어지는데 첫째, 부지특성화 작업 (방사성 처분장 부지의 적절성 평가) 둘째, 처분장 건설 (지표면 시설과 지하 공간 굴착 및 시설 시공), 셋째, 폐기물 처분장 운영 (폐기물을 받고 운반하고 저장하는 모든 활동) 넷째, 모니터링 (지하 시설의 유지관리 뿐 아니라 시스템이 예상대로 작동되는지를 확인하기 위하여 여러 가지 데이터를 모으고 분석) 다섯째, 폐쇄 (출구의 뒷채움 및 봉합, 폐기물 거치 갱도의 뒷채움)등이다. 단계별 소요 기간은 국가에 따라 약간의 차이를 보인다. 미국의 경우, 150년의 폐쇄 전 (pre-closure)기간을 가정한 설계가 이루어졌으며 이중 5-6 년은 초기건설 기간, 100년은 처분장 건설, 운영 및 운영 실패 확인 기간, 34년은 이미 저장된 폐기물의 복구 기간 (만약 필요하다면), 그리고 마지막으로 10년의 폐쇄 기간으로 나뉘어 진다 [OCRWM, 1999].

방사성 폐기물 중에서 중-저준위 폐기물과 초우라늄 폐기물(transuranic radioactive waste)은 저장용기에 압축시킨 다음 지하 굴착공간에 쌓아 놓을 수 있다. 사용후핵연료나 재처리를 통해 발생된 고준위 폐기물은 고도의 차폐 효과와 부패 방지 특성을 갖는 처분용기에 담겨진 후 지하 처분장의 처분터널 갱도 (disposal tunnel)에 거치된다. 폐기물의 저장 및 거치작업이 완료되면 일반적으로 그 공간의 입구는 봉인된다. 처분장 주위의 온도는 처분개념에 따라서 차이가 난다. 스웨덴, 핀란드, 일본을 포함한 대부분의 국가들처럼 벤토나이트 완충재의 사용을 고려하는 경우 완충재의 성능을 유지하기 위해 완충재에서의 온도가 100 °C를 초과하지 않도록 설계한다. 하지만 미국의 처분개념과 같이 완충재를 고려하지 않는 경우 저장갱도(storage drift) 주위의 온도가 150 °C를 초과하는 경우도 있다.

환기설계는 처분장 건설단계에서 뿐만 아니라 폐기물 운영단계에서의 작업 환경 및 위생 (호흡성

압반 분진, 디젤 흠(fume), 갱도주위의 고온, 사고시 발생 가능한 부유성 핵종분진, 유해가스 등), 안전(화재 방지 및 화재 발생시 공기 조절 등), 그리고 향후 처분장 환경(처분 용기를 부식, 퇴화시키고 방사성 핵종을 운반시킬 수 있는 지층 처분장 내의 물과 수분 제거)을 위해서 꼭 필요한 부분이다. 따라서 환기시스템은 위에 언급한 처분장 5 단계 중 부지특성화 단계를 제외한 나머지 4 단계를 포괄적으로 지원하므로, 방사성 폐기물 처분장의 개념설계에서 특히 중요하게 고려해야 할 부분이다.

2. 방사성폐기물 처분 개념

한국에는 현재 19기의 원자력 발전소가 가동 중에 있으며 2005년 6월 운영을 목표로 1기가 추가 건설 중에 있다. 중저준위 폐기물 발생량은 원전 1기당 연간 150 드림(드림당 200L) 정도로서 현재 61,000 드림이 원자력발전소 내에 보관중이다. 병원, 연구소, 산업 등으로부터 발생한 방사성 폐기물은 원자력환경기술원 내에 저장되어 있으며, 또한 6500 톤 이상의 사용후핵연료 역시 원자력발전소 내에 임시 저장되어 있다. 현 설비의 저장능력을 고려할 때 중-저준위 폐기물의 경우 2008-2014년 그리고 사용후핵연료의 경우 2006-2008년에 한계에 이를 것으로 예상된다. 원자력발전 운영을 책임지고 있는 한국수력원자력은 2008년까지 중-저준위 폐기물 처분장을 마련하고 1단계로 10만 드림에 대한 운영을 실시하며 이후 단계별로 80만 드림의 폐기물을 처분할 계획으로 있다. 고준위 폐기물의 경우 2016년 까지 중간저장시설(1단계 2000 톤, 최종 2만톤 용량)을 건설할 계획으로 있다.

2.1. 중-저준위 처분장 개념

중-저준위 폐기물의 육지처분은 1940년대 미국에서 천층 처분이 시도된 이래 다양한 처분방법이 제안되고 있지만 천층 처분과 동굴처분 방안이 주로 고려되고 있다. 천층 처분(shallow land burial)의 경우, 지표면에 트랜치(trench)를 파고 이곳에 폐기물을 넣은 후 콘크리트, 방수막과 같은 공학적 차단 방벽과 흙, 점토를 사용하여 유해물질의 유출을 차단하는 방식이다. 동굴처분 방식(rock cavity disposal)에서는 천연동굴, 광산 혹은 처분동굴에 폐기물을 처분하게 된다.

중-저준위 방사성폐기물 처분과 관련된 안전성 평가에서 주요하게 고려되고 있는 환기시스템 설계 관점의 주요사항으로는 동굴터널 관련 작업환경 및 인간거주환경 조성과 관련하여 라돈(Rn)에 대한 요건이 중요하게 검토되고 있고, 또한 중-저준위 폐기물의 약 40%를 차지하는 셀룰로오스 성분이 지하수와 반응하여 발생시키는 CH₄, CO₂, H₂S와 같은 비방사능 가스 그리고 처분된 폐기물 드림이 처분장 운영기간에 유입된 공기와 접촉하여 산화반응을 일으켜 발생시키는 가스 등이 있다. 또한 radiolysis 에 의한 가스 발생과 방사성 붕괴로 인한 가스 발생도 예상되고 있다 [황용수 등, 2001]. 따라서 폐기물을 처분한 이후 발생하게 되는 가스는 적절한 공기량을 필요한 곳에 정확히 분배시킬 수 있는 환기시스템에 의해 통제되도록 할 필요가 있다.

2.2. 고준위 처분장 개념

장기적인 국가 전력개발 계획에 따르면 원자력발전소의 수명기간동안 발생될 사용후핵연료의 양은 총 36,000 tHM 으로 여기에는 경수로 발전소에서 발생하는 PWR 사용후핵연료가 20,000톤이며 중수로 발전소에서 발생하는 CANDU 사용후핵연료가 16,000톤이 될 것이다. 기존 PWR 사용후핵연료의 경우 연소도가 45,000 MWd/tHM 으로 40년 동안의 냉각기간을 거친 다음 처분하는 것이 고려되고 있다. 다양한 고준위 폐기물 처분 방안들 중에서 폐기물을 처분용기에 넣은 후 화강암과 같은

결정질 암반 또는 점토질 암반에 건설된 심부 지하처분장에 처분하는 방안이 가장 일반적인 방법이라 할 수 있다. 한국원자력연구소(KAERI)에서는 여러 가지 처분대안들 중에서 기술적인 측면에서의 평가를 통해 PWR과 CANDU 사용후핵연료를 분리된 지역에 처분하며 각 처분용기는 처분터널 바닥에 수직으로 굴착된 처분공에 거치되는 것을 기준 처분 개념으로 예비 선정한 바 있다[최종원 등, 1999]. 이러한 기준개념에 따라 지하 500미터에 위치하는 결정질 암반에 처분장을 건설하는 방안에 대해 미국 산디아 국립연구소와 공동연구를 통해 Figure 1과 같은 처분장의 전체 배치도를 작성하였다 [Kang et al., 2000].

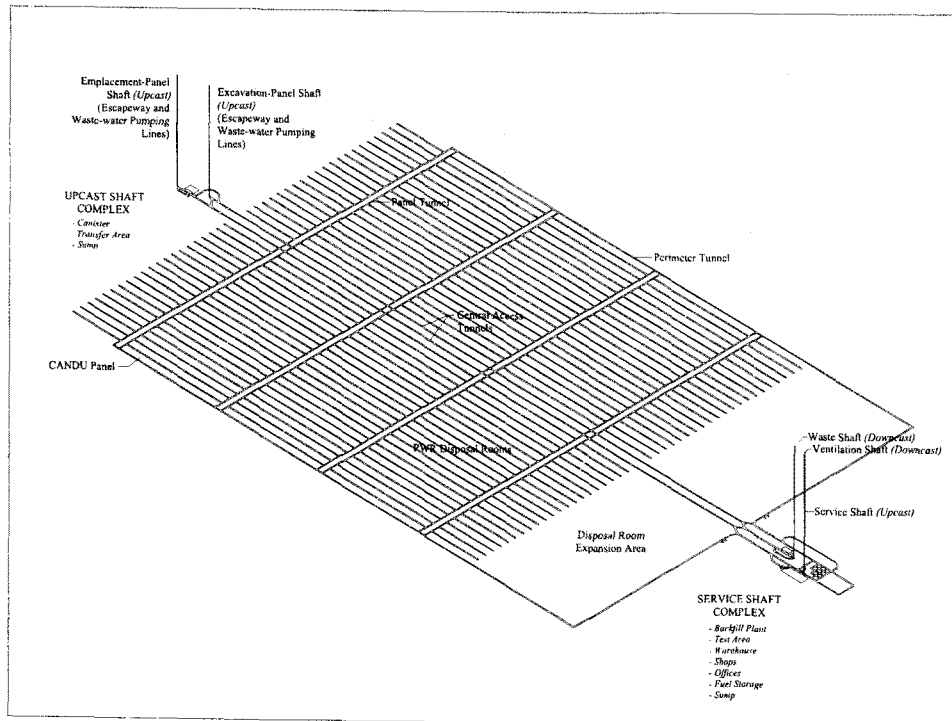


Figure 1. A conceptual layout for high-level radioactive waste repository

3. 중-저준위 방사성 폐기물 처분장을 위한 환기시스템 설계

3.1. 환기설계 기준 (Criteria)

중-저준위 방사성 폐기물 처분장 시설의 환기시스템은 처분장의 정상 운영기간 동안 작업원 및 장비에 적당한 환경을 제공할 수 있도록 설계된다. 뿐만 아니라 이것은 사고로 인한 잠재적 부유성 방사성 물질, 방사성 붕괴로 발생하는 가스, 화학반응으로 발생하는 유독가스, 지하 화재시의 흠 등을 차단할 수 있어야 하고 확산을 억제하며 흐름을 유도할 수 있도록 설계되어야 한다. 특히, 라돈 (Rn) 가스는 동굴처분시설의 경우 그 환기요건이 중요한 기준중의 하나이다. 라돈은 라듐-226의 붕괴로 발생하는 방사성 가스인데, 라듐이 화강암, 편마암, 석회암 등에서 일반적으로 발견되므로 라돈 가스는 대부분의 지하 암반층에서 발생할 수 있다고 볼 수 있다. 그런데 라돈이 계속 붕괴함에 따라 발생하는 부산물 (RDPs)은 전극을 띠게되고 이는 다시 주위의 부유성 분진에 쉽게 고착되어 방사성 부유 분진을 발생시킬 수 있다. 이 방사성 부유 분진은 작업자들의 건강에 심각한 영향을 끼칠 수 있으므로

반드시 허용기준치 이하로 유지되어야 한다.

이러한 모든 목표에 따른 환기시스템을 설계하기 위해 적용될 수 있는 주요 설계 기준은 다음과 같다:

- 폐기물 처분작업이 실시되는 구역과 처분장 건설 구역의 공기 회로는 각각 독립적으로 유지한다.
- 폐기물 건설을 위한 회로는 송기 시스템 (양 압력)으로 운영한다. (Figure 2)

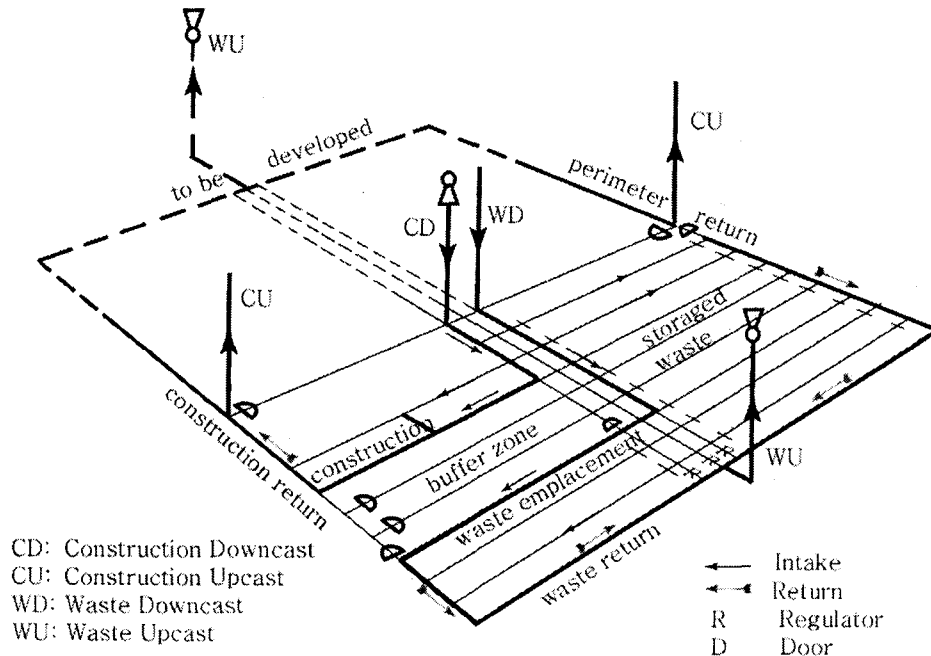


Figure 2. A conceptual layout for radioactive waste repository [McPherson, 1993]

- 폐기물 처분을 위한 회로는 흡기 시스템(음 압력)으로 운영한다. (Figure 2) (이러한 설계기법을 통해서 사고로 지하공간에 유출된 방사성 부유핵종은 처분을 위한 환기 회로 내에 갇히게 되므로 어떠한 경우에도 건설지역을 오염시키지 않도록 할 수 있다.)
- 앞, 뒤가 열린 갱도(open drifts)와 한쪽이 닫힌 공간 (rooms)에서 최소 공기속도 60 fpm을 유지한다(MSHA-30CFR75.326).

- 디젤장비를 사용하는 회로나 지역에서의 소요 환기량을 산출하기 위해서 다음과 같이 MSHA 방법을 사용할 수 있다:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

(MSHA-Policy Memorandum 81-19 MM)

Q_T = 총 소요 환기량.

Q_1 = 디젤 장비가 최고의 활동량을 가질 때 소요 환기량의 100%.

Q_2 = 디젤 장비가 다음으로 활동량을 가질 때 소요 환기량의 75%.

Q_n = 디젤 장비가 최소의 활동량을 가질 때 소요 환기량의 50%.

- 라돈 농도가 0.1 WL (1 WL은 약 200 pCi/l)을 초과하여 0.1-0.3 WL에 머무르면 매 3개월마다 한번씩 작업자의 호흡지역 (breathing zone)에서 농도측정이 이루어져야하고 0.3-0.5 WL에 머무

르게 되면 매 일주일마다 농도 측정이 이루어져야하며 적절한 환기조치가 따라야 한다 (MSHA-30CFR57.5037). 또한 공기의 음 압력 하에서 운영되는 저장지역 내에서는 라돈가스의 발생이 촉진될 수 있으므로 특별한 주의를 요한다.

• 예상 소요 환기량:

- 1) 모든 디젤 장비 : 125 cfm/hp.
- 2) 작업원 (어떤 시간이든지 가장 많이 활동하는 작업원 수를 적용) : 300 cfm/person.
최소 공기속도는 60 fpm 이며 공기속도는 일반적으로 다음을 초과하지 않는다:
 - 환기 수갱 (입기 혹은 배기) - 3000 fpm
 - 운반 수갱: 로프 가이드 경우 - 1400 fpm
 - 고착 가이드 경우 - 2000 fpm

지하 공간에서 요구되는 공기 질에 대한 기준의 경우 처분장 환경이 지하광산과 유사하기 때문에 미국의 방사성 폐기물 처분장이 적용했던 것처럼 미국 광산 안전-건강관리국(Mine Safety and Health Administration : MSHA)의 기준을 따를 수 있을 것으로 보인다.

3.2. 소요 환기량

3.1.에 정리된 환기설계 기준은 일반적으로 지하 폐기물처분 공간에서의 소요 환기량을 산출하는데 기본적으로 사용된다. 모든 갱도에서의 공기는 최소 공기 요구 속도나 디젤 장비를 사용할 경우 최소 소요 환기량에 의해서 결정되며 그 중에서 더 높은 쪽을 사용하게 된다. 이 소요 환기량은 일반적으로 처분장에서 발생하는 유독가스, 분진, 라돈 가스 등의 농도가 기준치를 초과하지 않을 만큼 충분한 공기량이 되지만 추후에도 이 농도 기준치에 부합되도록 환기량은 항상 조절되어야 한다. 지하 처분장 시설은 크게 건설지역과 폐기물 저장 지역 두 지역으로 나뉜다. 각 지역은 독립된 신선한 공기회로에 의해 환기 되는 게 필수적이므로 이 두 지역을 위한 소요 환기량은 각각 독립적으로 산출된다.

처분장 건설 동안의 소요 환기량은 사용되는 디젤 장비에 의해서 좌우된다. 소요 환기량을 산출하기 위해서 고려되는 장비는 현재 작동중인 장비와 곧 조달되고 사용될 장비가 포함된다. 그리고 누풍 (air leakage)을 위해서 10%의 예비 공기량이 첨가되어야 한다. Table 1은 미국의 Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) 경우에 처분장 건설 작업을 지원하기 위해서 요구된 소요 환기량 산출을 보여준다 [Subhash, 1987]. 폐기물 저장 및 거치 작업동안 건설지역에서의 환기량은 최소한의 환기를 유지 시켜 관리 활동만을 지원할 수 있도록 감소시킨다.

폐기물 처분 지역을 위한 소요 환기량은 건설지역과 비슷한 방법으로 결정된다 (Table 2). 다만 이 지역에서는 누풍 (air leakage)을 위한 10%의 예비 환기량을 필요로 하지 않는데 이는 처분지역의 공기가 항상 양 압력으로 유지되어 누풍이 일어날 확률이 없기 때문이다.

Table 1. Ventilation requirement for construction in WIPP

Equipment	Units on hands	Unit in use	HP each	Total HP	Design factor (%)	Design reqmt (cfm)	Remark
EIMCO985-T15 truck (10 ton)	3	3	185	185	1	23,125	
				185	0.75	17,344	
				185	0.5	11,563	
EIMCO913LHD (4.5 CY)	2	2	100	200	0.5	12,500	
Scissor lift truck	1	1	82	82	0.5	5,125	
KUBOTA-L245 tractor	4	3	25.5	76.5	0.5	4,781	
Compressor	1	1	68	68	0.5	4,250	
Lube truck	1	1	82	82	0.5	5,125	
Service truck	1	1	82	82	0.5	5,125	
Scaler	1	1	100	100	0.5	6,250	Estimated HP
Continuous miner (electric)	1	1	400	-	-	5,000	For cooling only
Forklift (10 ton)	1	1	82	82	0.5	5,125	Estimated HP
Subtotal equipment cfm reqmt						105,313	
Operating personnel		20		300 cfm each		6,000	
Shop & fuel station						20,000	
Construction air reqmt						131,313	
Provision for leakages (10%)						13,130	
Total						144,430	

Table 2. Ventilation requirement for waste storage in WIPP

	Units on Hands	Units in Use	HP Each	Total HP	Design Factor (%)	Air Requirement			Remark	
						CH Only	RH Only	CH+RH		
CH Storage	CH transporters	3	2	150	150	1.0	18,750		9,375	
	12,000 forklift	2	1	100	100	0.75	14,063		9,375	
	U/G STN. tractor	1	1	90	90	0.5	5,625		5,625	
	Personnel transport	1	1	50	50	0.5	3,125		3,125	
	EIMCO 913 LHD	1	1	100	100	0.5	6,250		6,250	
RH Storage	RH transporter	1	1	250	250	1.0		31,250	31,250	
	RH forklift (45T)	1	1	250	250	0.75		23,438	23,438	
	RH forklift (20T)	1	1	150	150	0.5		9,375	9,375	
	Personnel transport	1	1	50	50	0.5		3,125	3,125	
	Drill (Electric)									
Subtotal equipment						54,063	67,188	107,188		
Waste personnel		10-CH 10-RH 105-RH +CH					3,000	3,000	4,500	
Shop and fuel station						20,000	20,000	20,000		
Total						77,063	90,188	131,688		

3.3. 미국 WIPP의 경우 환기 시스템과 시설 예

WIPP는 미국 에너지성 (Department of Energy)이 군사방위와 관련된 초 우라늄 방사성 폐기물의 안전한 처분을 위한 지질 처분장의 개발을 위해 실시한 프로젝트이다. 이 시설은 미국 Nevada 주 Calsbad 근처 Delaware 분지에 위치해 있으며 1980년 대 초 건설이 시작된 이후 처분장으로서의 타당성 확인을 위한 연구, 평가 작업 및 인허가 과정을 거치고 2001년부터 실제 처분장 운영에 들어갔다. WIPP 지하 시설은 지하 650m 까지 연결되는 4 개의 수직갱에 의해서 운용 된다 (Figure 3) : 1) 건설 및 암염 취급 수직갱 (C&SH Shaft; 직경 12 ft), 2) 폐기물 수직갱 (Waste Shaft; 이 수직갱을 통해서 폐기물을 지하 저장소까지 하강 운반시키고, 환기는 수직갱 위에서 아래쪽으로 적은 량의 공기만 흐름; 직경 19 ft), 3) 배기 수직갱 (Exhaust Shaft; 오염된 공기의 배출로인 return과 연결된 주 환기 수직갱; 직경 14 ft), 4) 입기 수직갱 (Intake Shaft; 신선한 공기를 입기시키는 주 환기 수직갱; 직경 14 ft).

환기 시스템의 지상 설비는 우선 수직갱 마다 병렬로 연결된 3개의 축류 주 선풍기 (centrifugal main fans; 450 kw or 600 hp/대), 병렬로 연결된 2개의 똑같은 HEPA (High Efficiency Particulate Arrestor) 필터 조립체 (각각은 필터 모드에서 50%의 환기량 능력을 갖춤), 선풍기 댐퍼 (damper)와 분리막 (isolation), 필터 바이패스 설비 등으로 이루어진다 [Subhash, 1986]. HEPA 필터 자체의 정화 효율은 일반적으로 0.3 마이크론 보다 크거나 같은 입자를 99.7% 제거한다.

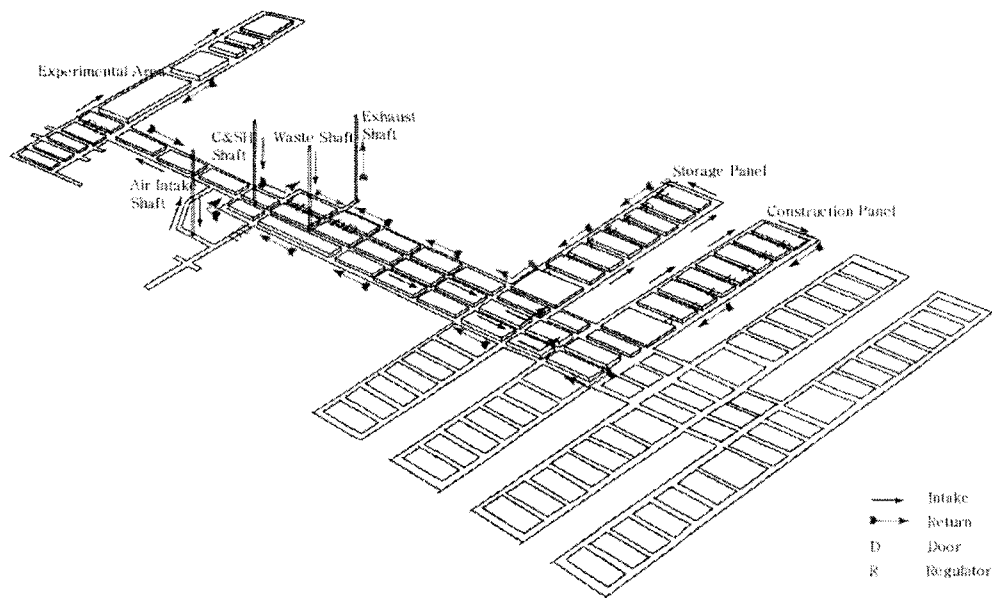


Figure 3. WIPP ventilation system with four shafts

WIPP 환기 시스템은 최대 환기량 335,000cfm 로 처분장에 공기를 공급한다. 또한 주요 작업 지역에 충분한 공기를 공급하기 위해서 공급된 공기는 건설작업을 수행하는 조와 처분작업 조 사이에 재분배 되는데 이것은 지하에서 사용되는 승압 선풍기 (booster fans), 공기 문 (doors), 공기 조절기 (regulators) 등과 같은 환기 시설 및 설비를 사용하여 조절될 수 있다. Table 3 은 두 교대조를 위한 계획된 환기량 분배를 보여준다.

Table 3. Airflow rate for storage and construction shifts

	Storage shift (cfm)	Construction shift (cfm)
Waste shaft and waste shaft station area	50,000	50,000
Waste storage area	132,000	55,000
Construction area	55,000	145,000
Experimental area	85,000	85,000
Total airflow rate	322,000	335,000

처분장 건설과 폐기물 운반 및 저장이 분리된 근무 조에 의해서 운영되기 때문에, 사용할 수 있는 공기의 양을 효과적으로 사용하기 위해서 환기제어기들이 각 근무조에 따라 재조정된다. 그렇게 함으로써 공급되는 공기의 대부분이 특정 근무조의 특정 작업 지역에 재분배 될 수 있도록 하였다.

HEPA 필터모드는 방사성 모니터링 시스템에 의해서 처분장 내의 부유 방사성 입자 농도가 미리 설정해 놓은 농도보다 높게 측정할 때 자동적으로 작동하게 되어있다. 배기 수직갱을 통과한 공기는 3개의 필터모드용 축류 선풍기중 (175 kw or 235 hp/대) 1개와 연결되어 있는 2개의 필터 조립체를 통과한다 (Figure 4). 필터모드 작동 동안의 공기량은 60,000 cfm 까지 감소되는데 이는 주 선풍기들 (main fans)이 꺼지고 예비 되어 있는 작은 용량의 필터모드용 선풍기가 작동하게 되기 때문이다. 이 시스템은 감소된 배기 환기량 안에서 부유 방사성 오염물질이 배기구를 통해 대기로 빠져 나가기 전에 제거해 줄 수 있다. 배기 수직갱을 통과한 감소된 공기는 배기 선풍기와 덕트에 설치된 분리막 (isolation)과 분리 댐퍼에 의해서 HEPA 필터까지 돌려지므로 필터 되지 않은 공기가 대기로 새나는 일이 발생하지 않게 된다 (Figure 4). 필터모드 작동 동안에는 처분장 건설 지역의 승압 선풍기 (booster)들은 모두 꺼지고 감소된 공기가 처분 지역을 통해 유지된다.

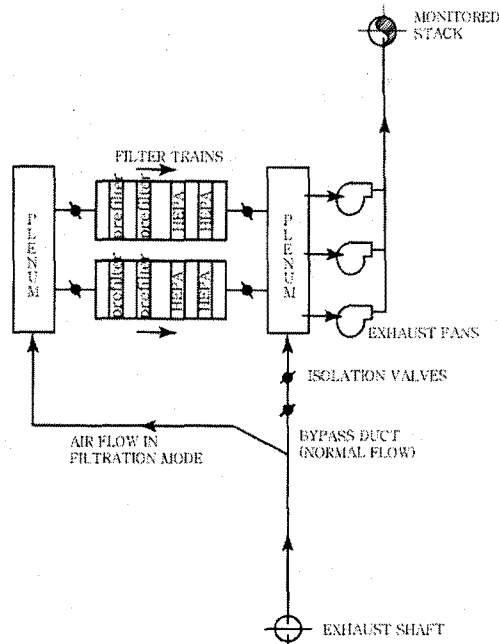


Figure 4. Filtration system at surface

4. 고준위 폐기물 처분장을 위한 환기 시스템 설계

4.1. 환기 기준 및 요구량

고준위 폐기물 처분장을 위한 환기 설계 기준 및 요구량은 기본적으로 중-저준위 폐기물 처분장의 개념 환기 시스템을 수립하는 것과 거의 비슷하다. 또한, 미국의 고준위 폐기물을 저장/처분하기 위한 처분장 후보부지로 현재 개발 중에 있는 Yucca Mountain Site에서 기준 및 요구량으로 사용된 다음의 조례 및 연방 법령들은 한국형 고준위 처분장의 설계를 위한 주요 기준 및 요구량을 결정하는 참고자료로 활용 할 수 있을 것이다.

- 10CFR60, "고준위 방사성 폐기물을 지층 처분장에 처분하기".
- 10CFR20, "방사 (radiation)에 대한 보호 기준".
- 29CFR1910, "직업 안전 및 건강 기준".
- 29CFR1926, "건설 안전 및 건강을 위한 기준".
- 40CFR197, "고준위 폐기물의 관리 및 처분을 위한 방사능의 환경적 보호".

고준위 처분장에서도 소요환기량은 일반적으로 중-저준위 처분장과 마찬가지로 계산된다. 또한 고준위 처분장에서의 환기도 두개의 독립적으로 분리된 그리고 계속적으로 작동하는 환기 시스템에 의해서 공급되는데, 하나는 건설 지역에 공기를 공급하고 다른 하나는 폐기물 안치 지역 작업에 공기를 공급한다. 이 두 환기 시스템 사이의 연결은 받침벽 (bulkheads)과 이중문 (double doors)으로 이루어진다. 고준위 처분장에서 발생하는 라돈 가스를 위해서는 중-저준위 처분장과 같은 기준이 적용될 수 있지만 고준위 처분장의 경우 처분장 내에 열원을 가지고 있고 또한 이것은 공기의 부력효과로 인한 큰 자연환기 압력을 일으킬 수 있으므로 보다 신중한 라돈 가스 농도 기준치가 필요할 것이다.

고준위 폐기물은 폐기물의 전도 및 복사열에 의해 갱도내의 공기를 가열시키기 때문에 (완충재 사용 유무에 따라 100 ° C 이하 ~150 ° C), 고준위 폐기물 처분장 시스템은 위에 언급된 것들과 더불어 필요에 따라 저치갱도의 공기 냉각 조건을 요구 한다. 이 공기냉각은 적절한 환기로 가능하지만 경우에 따라서는 냉각시스템이 필요할 수 도 있다. Table 4 는 Yucca Mountain Site에서 사용되는 온도 기준을 보여준다 [OCRWM, 2002]. 냉각시스템이 배제된 경우 계산된 소요 환기량은 제시된 온도기준을 충족해야 하며 그렇지 않을 경우 환기량 조절이 필요하다. 그런데 고준위 처분장에서 소요 환기량은 공기온도에 의존하고 공기온도는 다시 흐르는 공기량에 의해 지배되므로 온도에 따른 일반적 소요 환기량을 제시하기는 매우 어려운 문제이다. 그러므로 특정 처분장 내에 발생하는 열과 환기 공기량에 따른 공기 온도 변화를 계산해서 특정 처분장 소요 공기량을 산출하고 조정해야 한다.

Table 4. Proposed temperature criteria in Yucca Mountain Site

Item	Temperature
Human access maximum temperature	48 ° C
Human full shift occupation (8 hours)	25 ° C
Instruments, monitoring equipment, and remote access equipment limit	50 ° C

4.2. 폐기물 거치 갱도의 환기

거치 갱도를 위한 환기 요구량은 거치 갱도에서 행해지는 활동에 따라 변화된다. 거치 활동 이전까지는 환기를 통해서 건설 작업자에게 적절한 환경을 제공하기 위해서 신선한 공기를 공급하고 분진 농도 수준을 조절한다. 폐기물 거치 작업 동안에는 거치 갱도 내의 온도가 장비 운영에 적절한 범위 이내에 있도록 환기를 통해 유지되어야 한다 (Table 3). 처분공 안에 완충재와 함께 폐기물을 거치한 후에는 환기를 통해서 일반적으로 발생하는 열의 약 70%를 제거해야 한다 (예를 들면, 100°C의 온도를 70% 제거하고 나면 30°C 가 됨). 거치 갱도에서의 환기량은 예기치 않은 비상사태와 같은 상황의 요구에 대응하기 위해 조절될 수 있어야 한다. 이러한 급격한 환기량 변화 요구를 위해 고준위 처분장에는 중-저준위 처분장에는 없는 환기용 승갱도 (raise: Figure 5)가 필요하며 이 승갱도에 설치된 공기조절기나 거치 갱도에 설치된 공기문에 의해서 이 환기량 변화의 조절이 가능하다. 한편, 지표위에 있는 주 선풍기의 총 공기량을 변화시킴으로써도 환기량 변화가 성취될 수 있다.

4.3. 거치 갱도내의 열전달 모델

거치 갱도내의 공기 온도는 고준위 폐기물의 방사성 붕괴에 의한 암반 온도 증가로 인해 시간이 지남에 따라 증가하게 된다. 그러므로 폐쇄전 (pre-closure) 기간 동안 강제 환기와 자연 환기 상황에서 거치 갱도내의 열적특성을 예측하는데 사용될 수 있는 수치모델을 개발할 필요가 있고 이런 모델링은 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics; CFD)을 사용해서 수행될 수 있다. 일정한 환기에 의한 열 제거량은 주위의 완충재를 포함하는 암반에서 발생하는 열전도 (thermal conduction), 열대류 (thermal convection), 열복사 (thermal radiation)를 분석함으로써 결정될 수 있다. 개발된 모델을 이용하여 폐쇄전 기간 동안의 환기가 거치갱도 내에서의 열적특성에 어떤 영향을 끼치는지 시뮬레이션 (simulation)할 수 있고 이것은 그 갱도에서의 온도와 열 제거량을 산출할 수 있다. 열제거에 의한 냉각시간을 결정하는데 요구되는 요소들은 거치판넬 (emplacement panel)에 분포되는 공기분배량, 판넬 입구와 거치갱도 (emplacement drift) 주위의 암반온도, 판넬 입구의 공기온도 등이 있다. 일단 이것들이 결정되면 모델을 이용하여 냉각시간을 계산할 수 있다. 한편 처분용기를 수평으로 배치할 것인지 수직으로 배치 할 것인지에 따라서도 강제환기를 고려한 냉각시간이 크게 차이가 날 수 있으므로 이에 대한 분석도 필요하다.

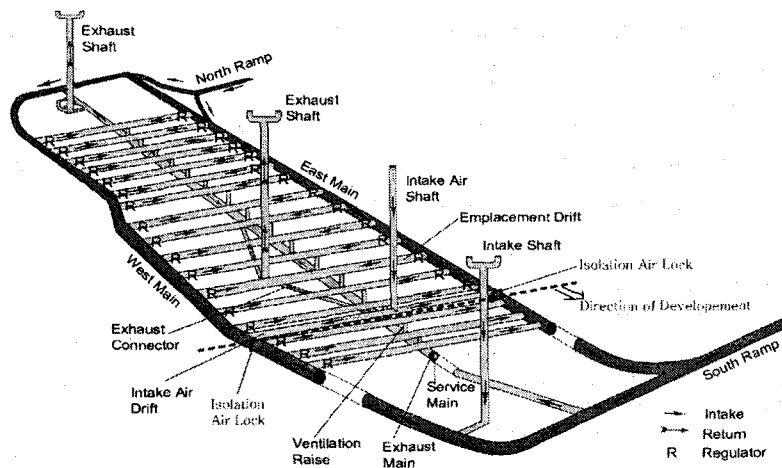


Figure 5. Conceptual design of the Yucca Mountain repository

4.4. 미국 Yucca Mountain Site에서의 환기 시스템과 시설 예

Yucca Mountain Site는 미국 Nevada주의 사막에 위치한다. 현재 Yucca Mountain Site는 북쪽 램프, 동쪽 메인, 남쪽 램프를 포함하는 (Figure 4) Exploratory Studies Facility (ESF)만 건설된 상태이고 나머지 여러 개의 수직갱을 포함하는 저장지역 전체는 대략 2010년 경부터 약 30-40년간에 걸쳐서 건설 완료될 예정이다. Figure 5 는 Yucca Mountain 처분장의 개념설계를 설명해 주고 있으며, 주 갱도 (main drift), 수직갱 (shaft), 램프 (ramp)등이 그림에 표시되어 있다.

역시 이곳에서도 건설과 저장 활동은 각각 독립적인 환기회로에 의해서 서로 분리될 예정이다. 그 각각은 자체 환기 시스템과 램프 접근로를 확보하고 있으며, HEPA 필터 시스템을 설치하여 만약의 방사성 핵종 유출의 경우 부유분진을 제거하게 된다. 처분장을 운영하는 동안 지하 갱도 개발은 폐기물 거치 활동을 방해하지 않으며 계속해서 진행 되도록 하고 두 활동의 분리는 임시 벽 (isolation air locks)을 사용해서 유지 될 것이다 (Figure 4).

입기 수직갱과 램프를 통해서 들어온 신선한 공기는 동쪽과 서쪽 주 갱도로 분배된다. 주 갱도로 들어온 공기는 거치 갱도로 유입되고 다시 이 갱도의 중앙에 위치한 배기 승갱도로 흘러 들어간다. 거치 갱도 반까지 양쪽 방향으로 유입되는 공기량은 공기 조절기를 사용하여 조절된다. 거치 갱도에서 폐기물에 의해 가열된 공기는 거치갱도 중간쯤에 있는 환기 승갱도를 통해 거치 갱도를 빠져나가 주 배기 갱도 (exhaust main)의 배기 쪽으로 들어가게 된다. 주 배기 갱도로 들어간 공기는 배기 연결 갱도를 지나고 배기 환기 수직갱을 통해서 지표면으로 나오게 된다. 각 배기 수직갱 끝 지표면에는 필터가 장착된 이중 배기 선풍기가 작동해서 안치 지역 보다 주 배기 지역 쪽에 더 큰 음 환기압 (negative ventilation pressure)을 유지시킴으로 거치 갱도에서 주 배기 갱도로 공기가 재 유입되는 것을 막을 수 있다. 또한 이 주 선풍기는 처분장내 열 제거 요구량이 시간에 따라 변할 수 있으므로 공기량을 언제든지 조절할 수 있다.

Table 5와 6 은 Yucca Mountain 처분장의 예정된 지하 환기 시스템의 시설과 각 지역에서의 환기 속도를 보여준다 [OCRWM, 2002]. 한편, Yucca Mountain Site 환기 시스템은 처분장 지층으로부터 침윤하는 수분을 충분히 제거할 수 있도록 설계되어 있다.

Table 5. Proposed ventilation facility description in Yucca Mountain

Item	Detail
Number of ventilation fans per exhaust shaft	2
Total electrical power for exhaust fans	10,000 HP

Table 6. Proposed ventilation airflow rate and velocity in Yucca Mountain

	Airflow rate/velocity		Air velocity
Exhaust shaft	800 to 850 m ³ /s	Minimum	1 m/s
Emplacement drift (70 % heat removal)	15 m ³ /s per each	Haulage mains and ramps	6 m/s
Emplacement drift (blasting cooling)	47 m ³ /s per each	Exhaust main	8 m/s
Intake and exhaust shafts	20 m/s	Intake and exhaust shaft accesses	8 m/s

5. 환기회로 모델링과 회로 내에서의 공기 열역학

5.1. 환기회로를 위한 Hardy Cross 해석법

일단 각 전략지역에서의 소요 환기량이 결정되면 고정된 환기량을 필요로하는 지역에 적절한 선풍기 용량으로 공기를 분배하기 위해서 환기회로 모델링이 수행되어야 한다. 환기회로를 해석하는데 있어서 주된 과정은 회로 전체에 걸친 공기압력의 분배나 혹은 공기량의 분배에 기초를 둔다. 하지만 지하 환기 시스템과 같은 폐쇄회로 시스템에서는 공기량을 기초로 한 분석이 더 편리하다. 전 회로에 걸친 공기량 분배는 회로내의 각 branch 저항에 따라 달라진다. 전략적 지역 (회로 모델에서는 branch로 명시)에서의 소요 환기량은 저항 방정식을 기초로 간단히 계산될 수 있다.

Atkinson은 공기량의 초기값을 임의로 주고 수많은 수정을 통해서 그것의 실제 값으로 조정해 나가는 연속 근사법을 최초로 제시했고 환기회로 해석을 위해 컴퓨터 프로그램에서 가장 널리 사용되는 해석법은 Hardy Cross에 의해서 개발되었다. Hardy Cross에 의하면 환기 회로 내의 주어진 branch에서 실제 환기량, Q , 값은 우선 모르는 것으로 하고 만약 그 값이 실제의 값 (Figure 6)에서 선풍기 특성곡선과 터널 저항곡선이 만나는 선풍기 작동점 (working point)에서 ΔQ 만큼 작은 Q_a 라고 가정한다면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$Q = Q_a + \Delta Q \quad (1)$$

이 문제는 이제 Figure 6에서 보는 바와 같이 ΔQ 값을 찾는 것이 된다. 그리고 Atkinson의 자승법칙을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$P = R(Q_a + \Delta Q)^2 \quad (2)$$

대부분의 지하 환기 시스템에서는 Hardy Cross 수정법이 연속근사법으로 사용되고 있고 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta Q = \frac{-\sum(RQ_a|Q_a| - P_f - NVP)}{\sum(2R|Q_a| + S_f)} \quad (3)$$

여기서 P_f 와 NVP 는 각각 mesh 안에 존재하는 선풍기압과 자연환기압을 표시하고 S_f 는 선풍기를 위한 $P-Q$ 특성곡선의 기울기이다.

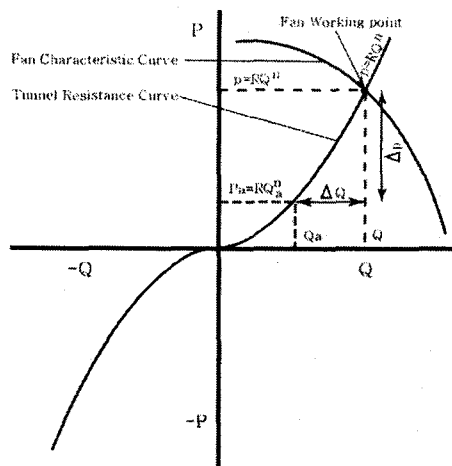


Figure 6. Fan working point described by the intersection of fan characteristic curve and tunnel resistance curve

5.2. 환기 시뮬레이션 패키지를 이용한 회로의 모델

환기 회로를 모델링하기 위한 대부분의 컴퓨터 프로그램은 mesh 선택 과정과 위에서 설명한 Hardy Cross 방법에 기초한다. 이런 프로그램을 사용하면 어떤 총체적 환기 시스템도 개략도로 표시될 수 있고 개략도에서 branch는 단일 환기로 (airway)로도 사용할 수 있고, 단일 환기로 처럼 간주될 수 있는 서로 연결된 통로의 집단을 위해서도 사용할 수 있다. 시스템 전체에 걸쳐 오직 공기의 흐름에 기여할 수 있는 환기회로만 회로 개략도에 나타난다. 그러므로 일반적으로 누기가 거의 없는 봉쇄지역, 공기의 정체를 일으키는 막다른 통로, 덕트와 보조 선풍기를 사용하여 지역 환기법을 사용해야 하는 곳은 회로에 표시될 필요가 없다 (지역 환기를 하는 지역은 CFD를 사용하거나 시뮬레이션 패키지의 다른 기술을 사용해야 하지만 본 논문에서는 언급 하지 않음). 한편, 수직갱의 꼭대기와 지표면의 어떤 열린 구멍들도 지표면의 기압 흡수 (pressure sink) 역할을 위해서 서로 연결돼야 한다 (Figure 7). 각 branch들이 연결되는 점은 분기점 (junction) 혹은 절점 (node)이라 한다. 입력 파일은 회로의 지형적 구조와 관련된 데이터 (실제로 이것은 그곳의 저항값을 계산하는데 사용됨)와 "from" 과 "to" 로 정의되는 각 branch의 위치가 주를 이룬다. 또한 이 파일은 각 branch의 2가지 입력타입을 포함하는데 하나는 고정저항 (fixed resistance) 값 혹은 고정 공기량 (fixed airflow) 값이고, 다른 하나는 branch 저항에 관한 정보이다. 우선 첫 번째 입력 타입은 측정된 공기량 값과 공기압강하 값으로부터 정의된다. 두 번째 입력 타입은 환기회로의 마찰계수, 지형, 공기충격 압력손실 (air shock loss) 등으로부터 계산되어 진다. 또 하나의 중요한 입력 파일은 회로내에 각 선풍기의 압력과 공기량의 관계로 표시되는 선풍기 특성곡선 데이터를 입력하여 특정 선풍기를 원하는 특정 지역에 위치시킬 수 있다. 많은 선풍기 특성곡선을 위해 압력과 공기량 좌표를 저장해서 사용하는 선풍기 데이터 뱅크가 사용될 수 있다.

일단 환기회로 모델이 완성이 되면 환기제어, 환기량 분배, 주 선풍기 전기모터 용량 등과 같은 환기 설계가 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 수행될 수 있다. 회로 해석의 또 하나의 중요한 역할은 환기 시설의 크기를 정하는 것이다. 예를 들면 시스템에서 필요한 환기 수직갱의 최소 숫자, 전체 소요 환기량을 공급하기 위해 요구되는 직렬 혹은 병렬로 연결된 선풍기의 최소 숫자 등이 환기 설계를 위해서 결정돼야 한다. 또한 가장 경제적인 환기 수직갱의 직경도 결정되어야 한다.

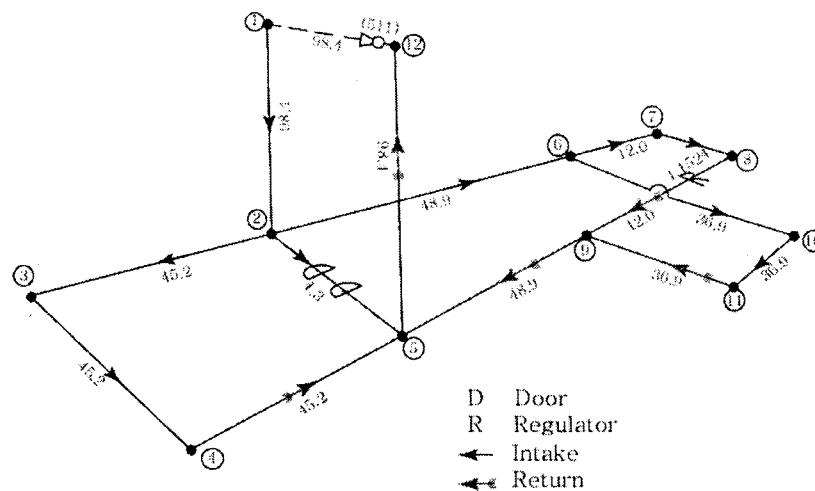


Figure 7. Modeled schematic diagram for simple ventilation network system

5.3. 환기회로 내에서 공기의 건습구 특성 및 열역학적 특성 예측

이미 개설된 환기회로 내의 수직갱, 사갱, 공기통로 등을 따라 주어진 간격에서 공기의 건습구 특성, 열역학적 특성, 열 응력 지수 (heat stress index) 등의 변화를 미리 예측해서 알리는 것은 처분장 건설과 운영에 매우 중요하다. 공기 통로의 길이는 유한요소로 분할되고 분할된 각 길이 내에서 상호 작용하는 수치적 절차들이 방사성 폐기물, 공기 유동체, 암반 표면 사이의 열 균형을 맞추기 위해서 적용되며 정확한 예측을 위해 갱도 굴착 후 유지기간 (airway age) 까지가 고려되어야 한다. 또한 암반 표면이 습한지 건조한지 여부와 증발/응축 과정도 고려되어야 하고 갱도의 고도 변화에 따른 공기압 변화도 이에 따른 건구, 습구 온도 변화로 조절 돼야 한다. 그리고 지열뿐 만 아니라 기계류나 폐기물로부터 방출되는 인공 열원도 고려되어야 한다.

5.4. 환기 모니터링 시스템과 실시간 환기 시뮬레이션

환기시스템의 작동은 지표와 지하 통제소에서 지속적으로 모니터링 되어야 한다. 모니터링 시스템의 목표는 세 가지로 압축 된다: 1) 저장 지역과 건설 지역에서의 작업환경을 지속적으로 측정하는 것, 2) 화재나 방사성 물질과 관련된 사고를 미리 경고하는 것, 3) 사고 시에 인원을 철수하는 것, 저장 지역에서 필터를 거친 배출공기의 방향을 수정하는 것, 비상 구조반을 급파하는 것과 같은 방재 통제를 위한 적당한 조치를 집행할 수 있는 것 등이 있다.

한편, 대기압, 건-습구 (psychrometric) 데이터 역시 처분장에 설치된 기후 측정소로부터 지속적으로 수집되어야 한다. 극단적 계절별 기후 변화는 환기시스템에 큰 영향을 줄 수 있는 자연환기압력 변화를 초래할 수 있기 때문이다. 이전의 대기압, 건-습구 온도, 상대습도 등의 데이터를 수집하고 저장한 기후 측정소는 모니터링 시스템에 연속 실시간 데이터를 공급함으로써 다음 자연환기 계산을 하기 위해 업그레이드 되어야하고 이 데이터는 궁극적으로 전 환기시스템의 원거리 통제에 사용될 것이다 (Figure 8).

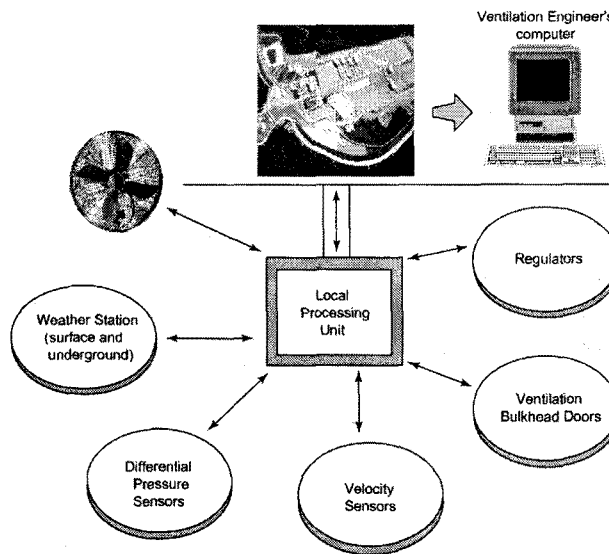


Figure 8. Relationship between all system components

5.5. 화재 시뮬레이션 및 비상 방재 시스템

화재와 같은 열적 불안정은 환기압력 분배를 현저히 변화시키고 이에 따라 전 처분장 시스템의 환기가 달라진다. 그리고 이는 다시 연기를 예측하기 힘든 패턴으로 움직이게 할 수도 있다. 그러므로 이런 열적 불안정 영향권 아래에서 처분장 지하 환기시스템의 이론적 분석을 수행할 필요가 있다. 공기로를 따라 공기량의 에너지 균형을 맞추기 위해서 화재에 의한 열전달 수학적 모델이 만들어져야 한다. 그리고, 물의 증발과 증기의 응축과정 계산에 의해 환기회로 분석과 컴퓨터 프로그램으로의 통합이 필요하며, 결국 어떤 순간에 주어진 초기조건을 기초로 해서 지하처분장 전체에 걸쳐 온도, 공기량, 흠/가스 농도, 습도 분포를 예측할 수 있게 된다. 또한, 방사성 폐기물 처분장의 비상사태 상황의 경우를 위한 훈련 프로그램이 개발되어야 한다. 즉, 처분장 작업원이 환기시스템을 잘 숙지하고 있어야 하고 화재시 신선한 공기를 얻기 위해서 어느 방향으로 가야할지에 대한 결정 훈련은 이 훈련 프로그램의 중요한 부분이 될 것이며, 역 방향 환기는 화재 및 비상사태 상황에 최고의 해결 방안이 될 수 있으므로 처분장의 모든 구역에서 역 방향 환기가 가능하도록 환기시스템 설계에 고려하여야 할 것이다.

이와 같은 환기 모니터링 시스템, 화재 시뮬레이션, 비상시 훈련 프로그램, 그리고 적절한 처분장 방재시설 및 설비 등의 개발은 비상시 환기계획과 화재 진압을 위해서 강력한 도구가 될 것으로 기대된다.

6. 결론 및 고찰

중-저준위 및 고준위 방사성폐기물 처분장의 안전한 건설, 운영을 위해서는 처분장의 특성, 폐기물의 특성, 처분장 심도 및 크기, 처분장 건설 및 운영기간 등을 고려한 적절한 환기시스템이 반드시 고려되어야 한다. 이를 위해서는 공기속도 및 환기량을 포함한 각종 환기설계 기준의 설정이 요구된다. 본 연구에서는 미국 Yucca Mountain 과 WIPP 에서의 실제 지하 처분장에서의 환기 설계를 위해 적용된 기준들과 환기 시스템에 대해 검토하여 향후 국내 기준의 설정에 참고가 될 수 있도록 하였다.

1. 지하 방사성폐기물 처분장 환기시스템을 설계하는데 있어 주된 기본 개념은 폐기물 처분작업과 처분장 건설을 위한 공기 순환 회로를 각각 독립적으로 유지함으로써 처분작업이 실시되고 있는 구역에서 발생한 사고로 인해 지하공간에 유출될 수 있는 방사성 부유핵종이 환기 회로 내에 갇혀 어떠한 경우에도 건설 작업이 실시되고 있는 지역을 오염시키지 않도록 해야 한다는 것이다. 이를 위해 처분구역에서는 흡기 시스템이 적용되어야 할 것이며 교대조에 따라 환기량을 조절할 수 있도록 하여야 한다.
2. 환기시스템은 지하 방사성 폐기물 처분장 개발의 중요한 요소인 처분장 건설, 폐기물 처분장 운영, 모니터링, 폐쇄 단계를 포괄적으로 지원하고, 이에 따라 성공적 처분장 설계를 위해서는 처분장의 배치 및 굴착작업과 운영에 따른 소요 환기량, 온도 및 수분영향, 자연환기 그리고 화재와 같은 비상사태 등을 고려한 환기-방재 시스템이 제시되어야 한다. 이를 위해서는 폐기물에서 발생하는 열과 지열 등을 고려한 환기 시뮬레이션을 통해 소요 환기량과 최소 공기속도를 제공할 수 있는 적절한 환기 설비가 설계되어야 하며 처분장내에서 승압선풍기, 공기조절기, 공기문을 적절하게 배치함으로써 효과적이며 안전하게 이루어질 수 있도록 해야 할 것이다.

■ 참고문헌 ■

1. 최종원, 강철형, 권상기, 최영성, “고준위폐기물 심지층 처분시스템 예비개념 선정을 위한 기술성 평가”, KAERI/TR-1361/99.
2. 황용수, 이성희, 한경원, 이연명, “중저준위 방사성폐기물 처분장 안전성 분석 관련 연구”, KAERI/TR-1743/2001.
3. Kang, C. H. et al., Preliminary Conceptual Design and Performance Assessment of a Deep Geological Repository for High-Level Waste in the Republic of Korea, KAERI –SANDIA final report(2000).
4. McPherson, M. J., Subsurface Ventilation and Environmental Engineering, Chapman & Hall, 131(1993).
5. Office of Civilian Radioactive Waste Management (OCRWM), “Reference Design Description for a Geologic Repository”, DOE, USA(1999).
6. Office of Civilian Radioactive Waste Management (OCRWM), “Yucca Mountain Project; Yucca Mountain Science and Engineering Report”, DOE, USA(2002).
7. Subhash, C. S., “Ventilation Evaluation for the WIPP Underground Facility, Waste Isolation Pilot Plant”, DOE, USA(1986).
8. Subhash, C. S., Modification of the Ventilation System at WIPP, Proceedings of the 3rd Mine Ventilation Symposium, 377(1987).