

지하 동굴식 중-저준위 방사성 폐기물 처분장의 환기시스템 고찰

김영민, 권오상, 윤찬훈 (인하대학교)
권상기 (한국 원자력 연구소)
김진 (인하대학교 부교수)

1. 서론

국내에서 고려되고 있는 천층식과 동굴식 처분장 중에서 지하 동굴식 중-저준위 방사성 폐기물 처분장은 광산 및 지하터널과 같은 지하시설과 마찬가지로 폐쇄성과 고립성이라는 특성을 가진다. 또한 방사성 폐기물이라는 특성상 약 50년 이상 환경적 안정성이 유지되어야 하므로 적합한 환기시설 및 설비를 이용하여 처분장 내의 각 저장지역과 건설지역에 소요환기량을 적정하게 분배시킬 수 있어야 하고, 이를 위해 최적 환기시스템을 구축하고 장기적인 관리가 필요하다.

처분장의 최적 환기시스템 구축을 위한 환기 시뮬레이션을 위해서는 우선 대상이 되는 지하시설의 지형적인 구조를 파악하여야 한다. 그리고 통풍로를 중심으로 환기회로를 구성한다. 즉, 통풍로의 단면적, 길이, 거칠기, 단면형상 및 방해물에 따른 공기 저항치를 산출하고, 전체 시스템의 저항을 극복하여 건설 및 저장지역에 공기를 효율적으로 배분 가능한 팬을 선정한다. 그리고, 구성된 환기회로를 기본으로 팬 대수, 팬 위치등을 변화시키면서 환기시스템을 완성시키게 된다. 만약 주어진 지형 구조로 효율적인 환기가 어렵다면, 공기조절기(regulator)나 공기제어문(door)등을 적재적소에 배치를 시키거나, 새로운 통풍로(수직갱 & 사갱)를 추가하는 방법을 통해 문제점을 해결하게 된다. 그러므로 처분장의 설계단계에서부터 환기시스템을 고려하여 건설을 진행시키는 것이 매우 필요하다.

이에 본 연구에서는 외국의 지하 동굴식 중-저준위 방사성 폐기물 처분장들 중 대표적인 두 곳을 선정하여 이곳의 시스템 저항을 산출하였고, 최적의 환기회로 구성을 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 외국 처분장의 환기설계를 통해 한국형 지하 동굴식 중-저준위 방사성 폐기물 처분장에 적합한 환기시스템을 고찰하고자 하였다.

2. 중-저준위 방사성 폐기물 처분장의 환기시스템 필요성

지하 동굴식 처분장은 일반적으로 50~1,500m 심도에 위치하며, 새로운 동굴을 건설할 수도 있고, 기존의 광산이나 동굴을 변형할 수도 있다. 처분장의 운영은 동굴을 건설하고 폐기물 용기 처분한 후 충전재를 채우고 봉쇄하며 결국에 폐쇄할 수 있는 구조적으로 안정되고 반복적인 형태의 운영체계가 되어야 한다. 또한, 동굴처분의 기본원칙으로는 처분장 운영 및 비상사고시, 폐쇄 후에 방사능 누출 및 피폭량, 또는 이에 대한 예측량의 발생확률을 고려하여 설정된 허용치 이하를 유지하여야

한다는 방사능 방호원칙과, 환경과 자원의 이용 및 보호에 영향을 미치지 않을 정도까지 최소화시켜야 한다는 환경과 자원의 보호원칙이 있다(IAEA, 1985). 이와 같은 원칙에 따라 처분장내 오염물질을 허용치 이하로 유지시켜 내부 근로자를 보호하고, 환경에의 영향을 최소화 할 수 있는 최적의 환기시스템이 반드시 필요하다.

깊은 심도로 인한 각종 열적 문제와 처분 폐기물에서 발생하는 열에 의한 처분장 암반 온도의 상승을 억제해야 하는 고준위 방사성 폐기물 처분장의 환기시스템과는 달리, 중-저준위 처분장의 환기시스템은 폐기물의 발열특성에 대한 영향이 미비하여 시설내 방사능 오염 공기로부터의 작업자 피폭보호, 쾌적하고 안전한 작업환경유지, 취급장비의 배기로 인한 오염을 방지하는것에 주 목적을 둔다. 그리고 처분장의 정상 운영기간 동안 작업원 및 장비에 적당한 환경을 제공할 수 있도록 설계되어야 하며 사고로 인한 잠재적 부유성 방사성 물질, 방사성 붕괴로 발생하는 가스, 화학반응으로 발생하는 유독가스, 지하 화재시의 흠 등을 차단하고, 확산을 억제하면서 신선한 공기의 흐름을 유도할 수 있도록 설계되어야 한다[김 진 외, 2005].

향후 건설될 지하 동굴식 처분장은 천층식 처분장에 비하여 초기 건설비용이 비교적 많이 소요되므로 처분장 건설시 최적의 토목적, 환기시스템적 설계를 통해 굴착비용 및 환기기 운용비용을 저감시켜야 할 필요가 있다. 이를 위해서는 처분장의 기본설계 구조를 통하여 전체 시스템의 저항을 계산하고, 건설지역과 폐기물 저장 지역을 구분지어 소요환기량을 산출하며, 프로그램을 통한 시뮬레이션 작업을 수행해야 할 필요가 있다. 이러한 작업으로 도출된 최적의 공기회로를 토목적 설계에 접목시킨다면 방사성 폐기물 처분장 건설시 안전성과 효율성을 확보할 수 있을 것이다.

3. 지하 처분장 환기이론

3.1. 통풍로의 저항 및 압력손실

일반적인 환기 네트워크 분석은 지하 공간에서의 소요환기량을 선정한 후 설계상의 통풍로 단면적, 길이, 표면 거칠기등 관련되어지는 인자들을 고려하여 적재 적소에 신선한 공기를 공급하기 위한 선풍기를 선정함으로써 최적 환기 네트워크가 완성되어진다. 이러한 해석은 터널의 저항과 선풍기의 특성 곡선을 이용한 수치적인 해석으로 문제에 접근하여 해결하게 된다. 일단 지하 각각의 부분들에서 필요로 하는 공기량이 결정되면 선풍기와 기타 다른 환기 장치의 위치 설정을 위해서 이 공기량을 각각의 위치로 밀어내기 위한 압력을 결정하는 것이 필요하다.

일반적으로 환기 시스템에서 공기의 흐름은 거의 정상 난류로 간주되어진다. 원형 통풍로에서 마찰손실을 계산하기 위한 이론식은 식 1에 의해 나타내어진다.

$$P = \frac{K L p Q^2}{A^3} \quad (\text{식 1})$$

P : 압력손실 [m]

L : 통풍로 길이 [m]

p : 주변장 길이 [m]

A : 단면적 [m²]

K : 마찰계수 [kg/m³]

Q : 공기량 [m³/s]

식 1은 다시 압력강하량은 공기량의 제곱에 비례하고 상수항은 통풍로의 저항으로 표시될 수 있다.(식 2)

$$P = R \cdot Q^2 \quad (\text{식 2})$$

P : 통풍로 압력(=압력손실) [N/m² = Pa]

R : 저항 [N.S²/m⁸]

Q : 유량 [m³/s]

결국, 통풍로의 압력손실과 저항은 실측을 통해 결정된 각 인자들의 조합으로 계산 가능하다(식 3, 4). 그리고, 결정된 P, Q 값을 통하여 통풍로의 저항곡선이 만들어지게 되며, 선풍기 특성곡선과 만나는 지점인 작동점을 연속근사법인 Hardy Cross Method를 이용하여 찾아내고 처분장 환기에 적절한 선풍기를 선정하게 된다(그림 1).

$$R = K(L + L_{eq}) \frac{p}{A^3} \left[\frac{NS^2}{m^8} \right] \quad (\text{식 3})$$

$$P = K(L + L_{eq}) \frac{p}{A^3} Q^2 [\text{Pa}] \quad (\text{식 4})$$

K : 표면의 거칠기 계수(Atkinson's friction factor) [kg/m³]

L : 통풍로연장 [m]

p : 주변장 [m]

A : 단면적 [m²]

Le : 등가 길이 [m]

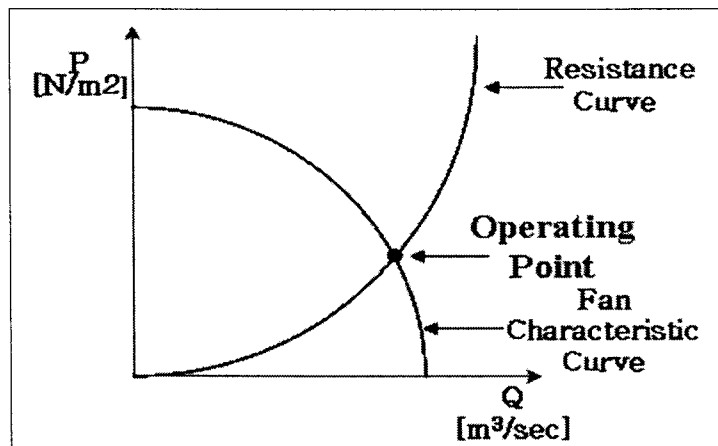


그림 1. Resistance Curve & Fan Characteristic Curve

표 1과 2에서는 처분장의 저항산정을 위해 적용된 등가길이와 마찰계수 값을 나타내고 있다. Equivalent Length의 경우 직각으로 꺾어지는 통풍로와 통풍로 내에 차량이 이동하는 경우에 비교적 값이 크며, 이러한 경우 통풍로의 저항 및 압력손실이 증가하게 되므로 적절한 공기량 분배를 위한 환기시뮬레이션은 필수적일 것이다.

표 1. Example of Equivalent Length

Source	ft	m	Source	ft	m
Bend, acute, round	3	1	Contraction, gradual	1	1
Bend, acute, sharp	150	45	Contraction, abrupt	10	3
Bend, right, round	1	1	Expansion, gradual	1	1
Bend, right, sharp	70	20	Expansion, abrupt	20	6
Bend, obtuse, round	1	1	Splitting, straight branch	30	10
Bend, obtuse, sharp	15	5	Junction, deflected branch(90°)	200	60
Doorway	70	20	Junction, straight branch	60	20
Overcast	65	20	Junction, deflected branch(90°)	30	10
Inlet	20	6	Mine car or skip(20% of airway area)	100	30
Discharge	65	20	Mine car or skip(40% of airway area)	500	150

표 2. Friction factor (referred to air density of 1.2kg/m³) and coefficients of friction (independent of air density)

Tunnel Situation	Friction factor, k (kg/m³)
Steel arched airways	
Smooth concrete all round	0.004
Bricked between arches all round	0.006
Concrete slabs or timber lagging between flanges all round	0.0075
Slabs or timber lagging between flanges to spring	0.009
Lagged behind arches	0.012
Arches poorly aligned, rough conditions	0.016
Shafts	
Smooth lined, unobstructed	0.003
Brick lined, unobstructed	0.004
Concrete lined, rope guides, pipe fittings	0.0065
Brick lined, rope guides, pipe fittings	0.0075
Unlined, well trimmed surface	0.01
Unlined, major irregularities removed	0.012
Unlined, mesh bolted	0.014
Tubbing lined, no fitting	0.007-0.014
Brick lined, two side buntons	0.018
Two side buntons, each with a tie girder	0.022

3.2. 환기회로 구성모델 및 시뮬레이션 프로그램

처분장 내에 적절한 공기분배를 위해서는 환기회로를 구성하여야 하는데 이는 처분장의 지형구조에 따라 직렬회로와 병렬회로가 조합된 형식으로 나타나게 된다(그림 2). 회로의 지형적 구조와 관련되어 통풍로 내 기류의 방향이 바뀌거나 나누어지는 지점에서 절점(node)들을 형성하고, 각 절점들을

연결한 branch 마다 각각의 압력, 저항, 공기량이 형성된다. 결국, 처분장 내 모든 회로의 공기량 분배는 직렬, 병렬, 혹은 그 조합으로 연결된 각 branch의 저항에 따라 달라지게 된다. 각 branch의 저항 값은 식 3에 의해 계산되어지고, 표 3의 방법으로 전체 처분장 시스템 저항이 결정된다.

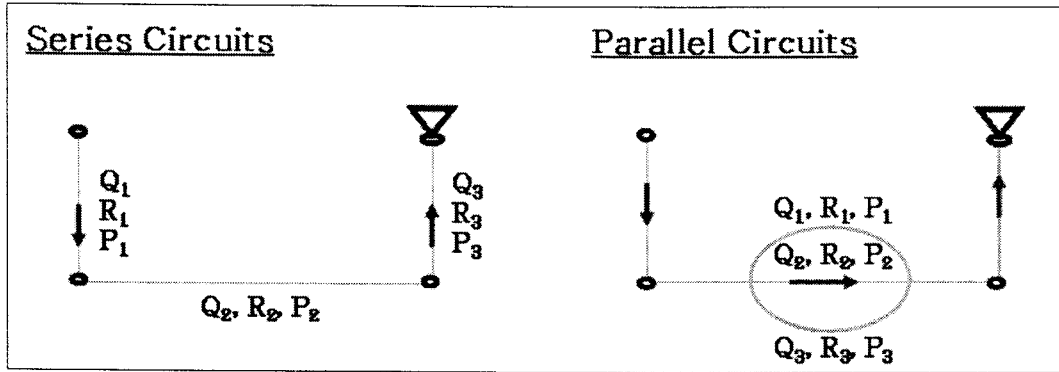


그림 2. Ventilation Circuits

표 3에서 보는 바와 같이 직렬과 병렬이 조합된 전체 회로에서 직렬회로보다 병렬회로의 구성이 많아지는 경우 전체 저항은 감소하게 되며, 처분장내 공기분배는 좀 더 수월하게 이루어 질 것이다. 이와 반대로 직렬회로의 구성이 많은 경우는 전체 시스템 저항이 증가하여 공기분배에 어려움이 발생할 것이다. 이와 같은 결과는 처분장내 주 선풍기의 배치에도 큰 영향을 주게 될 것이다. 선풍기를 직렬로 연결하게 되면 공기량의 변화는 없으나 선풍기의 압력을 증가시킬 수 있으며, 병렬로 연결하는 경우 압력의 증대효과는 볼 수 없으나 공기량을 증가시킬 수 있게된다.

표 3. Characteristic of Circuits

직렬연결	병렬연결
$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$	$R_{eq} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}}} \right)^2$

4. 외국의 중-저준위 방사성 폐기물 처분장시스템의 저항

4.1. WIPP(Waste Isolation Pilot Plant)의 시스템 저항

WIPP은 US방위 프로그램에서 발생하는 초 우라늄(Transuranic) 방사성 폐기물의 안전한 처리를 위해 위임된 연구소 및 처분시설이다. 이 지하구조물은 지표 650m 아래 층상 암염광상에 위치하고, 크게 SPDV(설계타당성) 조사영역, 실험 영역, 8개의 처분패널로 구성되는 TRU 처분영역등 세부분으로 구분되며, 총 175600m³의 처분용량으로 설계되었다[Subhash 1987]. 또한, 지상 구조물과 지하 구조물을 연결하고 자재와 폐기물의 운반, 환기, 작업자의 이동을 위해 4개의 수직갱이 설치되어 있다. 암염 수직갱(Salt Handling Shaft)은 주요 이동 통로로서의 역할을 담당하며, 입기 수직갱(Air Intake Shaft)과 배기 수직갱(Exhaust Shaft)은 환기를 위하여 설치된 수직갱이다. 폐기물 수직갱(Waste

Handling Shaft)은 방사성 폐기물의 운반을 위해 설치된 수직갱으로서 핵종 유출 방지를 위해서 입기로 작동 되어지도록 설정되어있다[Subhash, 1987].

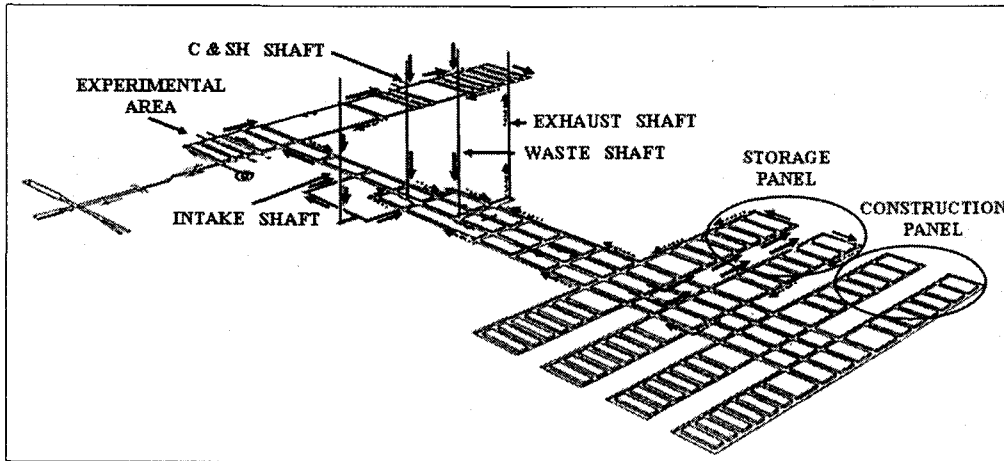


그림 3. Waste Isolation Pilot Plant

방사성 폐기물 처분장의 저항계산은 직렬 또는 병렬로 이루어진 각 branch의 저항 값을 구하여 합산함으로써 이루어진다. 특히, WIPP과 같은 방사성 폐기물 처분장의 저항산정을 위해서는 수직갱의 저항이 처분장 전체 저항의 80~90%에 달하므로 수직갱 저항계산에 정확성이 더욱 요구되어진다. WIPP의 4개의 수직갱은 지표면에서 지하 암염층을 통과하는 부분과 암염층을 지나서 처분장으로 내려오는 부분이 서로 다르게 시공된 점을 고려하여 마찰계수(K) 값과 Equivalent length(L_e) 값을 산정하였으며, 각 수직갱의 제원을 표 4에 나타내었다. 이에 따른 WIPP의 각 수직갱 저항값이 건설 및 암염운반 수직갱(Construction & Salt Handling Shaft)은 $0.02228[\text{kg}/\text{m}^7]$, 입기 수직갱(Air Intake Shaft)은 $0.0085[\text{kg}/\text{m}^7]$, 폐기물 수직갱(Waste Handling Shaft)은 $0.02559[\text{kg}/\text{m}^7]$, 배기 수직갱(Exhaust Shaft)은 0.00872 로 각각 산정되었다.

표 4. Shaft parameter

	C&SH Shaft	Waste Shaft	Exhaust Shaft	Intake Shaft
상층부	직경 : 10ft 길이 : 880ft 벽면 : steel casing lined	직경 : 19ft 길이 : 902ft 벽면 : concreted lined	직경 : 14ft 길이 : 908ft 벽면 : concreted lined	직경 : 14ft 길이 : 900ft 벽면 : concreted lined
하층부	직경 : 12ft 길이 : 1270ft 벽면 : concreted lined	직경 : 12ft 길이 : 1248ft 벽면 : wire-meshed	직경 : 15ft 길이 : 1242ft 벽면 : wire-meshed	직경 : 15ft 길이 : 1250ft 벽면 : wire-meshed

수직갱 이외에도 그림 5에서처럼 단면 A-A (저장고), B-B (공기유입 터널), C-C (배기 터널)등의 세 가지 형태로 지하 폐기물 저장 Panel이 시공된다.

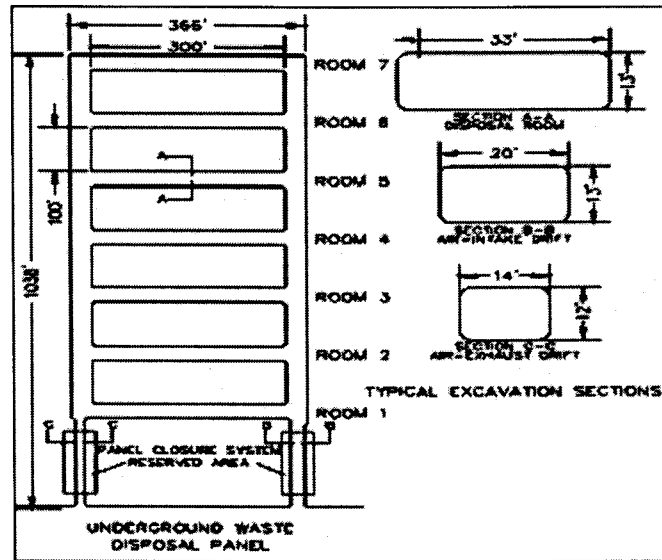


그림 4. Geometry of Repository Panel

따라서 수직갱 저항을 구할 때와 마찬가지로 K 값과 L_e 값을 선정하고, 건설되는 각 지점에서는 라이닝 (Lining) 작업으로 인한 Panel 벽면의 마찰계수 $0.004[\text{kg}/\text{m}^2]$ 을 선정하였다. 또한 L_e 값은 단면적의 형상변화 부분과 공기 유동방향이 변화하는 부분을 고려하여 선정하였다.

4.2. SFR(Slutforvar for Reaktoravfall)의 시스템 저항

그림 6의 SFR은 세계에서 단 하나 뿐인 해저 동굴 처분방식의 방폐장으로, 스웨덴 포스마크 지역의 발틱 해안 지하 60m에 위치하고 있다. SFR의 부대시설로는 2개의 진입동굴과 4개의 저준위 폐기물 처분동굴, 1개의 중준위 폐기물 처분 silo로 이루어져있으며, 폐기물 처분 용량의 증대에 따라 동굴의 추가 건설이 가능하도록 설계되어 있다. 중준위 폐기물 처분 silo는 수직으로 뚫은 암반 수갱에 자리잡은 높이 53m, 직경 27.5m 처분 용량 $18,500\text{m}^3$ 의 원통형 콘크리트 구조물로, 암반 벽과 구조물 사이의 틈은 평균 1.2m의 벤토나이트로 뒷채움 되어 있다. 4개의 폐기물 처분동굴 중에 BMA(Rock vault for intermediate-level wastes)는 콘크리트 모듈과 철제 드럼에 담긴 중준위 방사성 폐기물을 영구처분하며, 1BTF·2BTF(Concrete tank repositories) 2개의 터널은 콘크리트 탱크에 담긴 저준위 방사성 폐기물을 영구 처분하는 곳이며, 나머지 BLA(Rock vault for low-level wastes) 터널은 컨테이너에 담긴 저준위 방사성 폐기물을 영구 처분하게 된다. 이러한 SFR의 총처분용량은 $60,000\text{m}^3$ 으로 2 단계 증설을 거쳐 $90,000\text{m}^3$ 으로 증설될 예정이다[Maria Wikström, 1999].

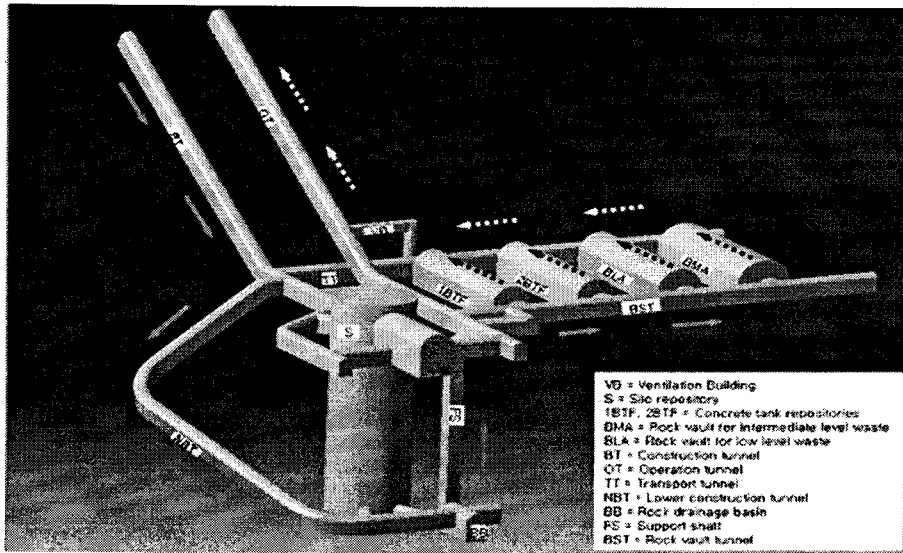


그림 5. Slutforvar for Reaktoravfall

표 5는 환기회로에서 SFR의 각 Branch의 저항계산을 위한 구성요소에 대한 제원을 나타내고 있다. 이러한 SFR과 같은 처분방식의 방폐장에서 가장 크게 고려해야 할 사항은 환기회로가 수갱이 아닌 사갱으로 이루어진 것과 대단면의 형상을 가진 구조물이라는 것이다. 특히, SFR에서의 BMA, BTF 과 같은 터널형 폐기처분장의 경우에는 대단면의 터널부를 가지게 되므로 저항 산정시 저항값의 감소와 함께 환기속도의 저하로 인해 환기량의 과 설계의 원인이 될 수 있다. 그러나, 이 문제는 폐기물 처분시 터널의 내부에 콘크리트 벽이 둘러 싸여 있고 폐기물이 적재되어 감에 따라 터널의 단면이 줄어드는 효과에 의해 해소될 수 있다. 즉, 터널 내부에 폐기물의 구간 별 적재를 위한 콘크리트 컴파트먼트의 존재와 터널 내 폐기물의 적재 및 뒷채움에 의해 환기로는 실제 존재하는 터널 단면보다 작게 되는데, 이는 SFR 환기시스템 설계시 컴파트먼트가 차지하는 면적을 터널 단면에서 제외하는 방법을 사용함으로써 해결할 수 있다[강병무, 1991].

표 5. Dimension of tunnels and caverns (SFR)

Components		W(m)	H(m)	A(m ²)
Construction tunnel		8.5	6.6	48
Operation tunnel		8.7	7.9	63
Central tunnel		11.0	10.2	125.5
		8.7	11.3	91.6
Lower construction tunnel		8.5	6.4	48
Rock vault tunnel		10.0	9.2	84.3
Concrete tank repositories	BTF	14.7	9.5	125.8
Rock vault for low-level wastes	BLA	14.7	12.7	172.4
Rock vault for intermediate-level wastes	BMA	19.6	16.5	298
Silo repository	Silo	30.0*	69.0	

그 결과로서, SFR의 사갱부분인 건설터널(Construction Tunnel) 과 운영터널(Operation Tunnel)은 각각 $0.00575[N \cdot S^2/m^8]$, $0.00102[N \cdot S^2/m^8]$ 으로 계산되어진다. 또한, 대단면 형상을 가지는 BTF1

은 $0.01276[N \cdot S2/m^8]$, BTF2는 $0.01263[N \cdot S2/m^8]$, BLA는 $0.00522[N \cdot S2/m^8]$, BMA는 $0.00079[N \cdot S2/m^8]$ 로 각각의 저항값이 산정되었다.

4.3. WIPP과 SFR의 전체 시스템 저항 비교

WIPP과 SFR의 전체 시스템 저항은 앞에서 구한 주요구조물의 저항과 함께 각 Branch의 저항값이 합산되어 계산되어진다. 산정된 각 Branch의 저항값을 사용하여 직렬과 병렬로 연결된 환기회로는 일반적으로 매우 복잡한 형태를 나타내는데 이를 Canonical Form으로 나타내면 간결한 형태의 회로로 변형시켜 볼 수 있어 전체시스템을 한 눈에 볼 수 있는 장점이 있다. 그림 6과 그림 7은 각각 WIPP과 SFR처분장의 Canonical Form으로 변환하여 나타낸 그림이고, WIPP이 SFR에 비해서 확연하게 병렬구조를 많이 가지고 있음을 알 수 있다.

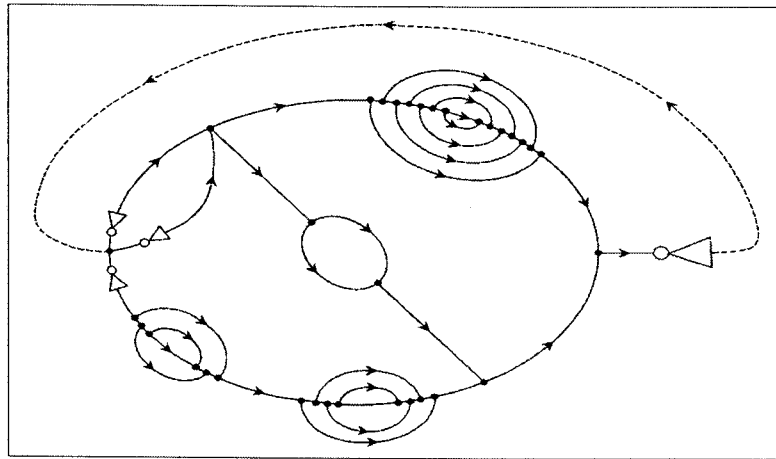


그림 6. Canonical Form (WIPP)

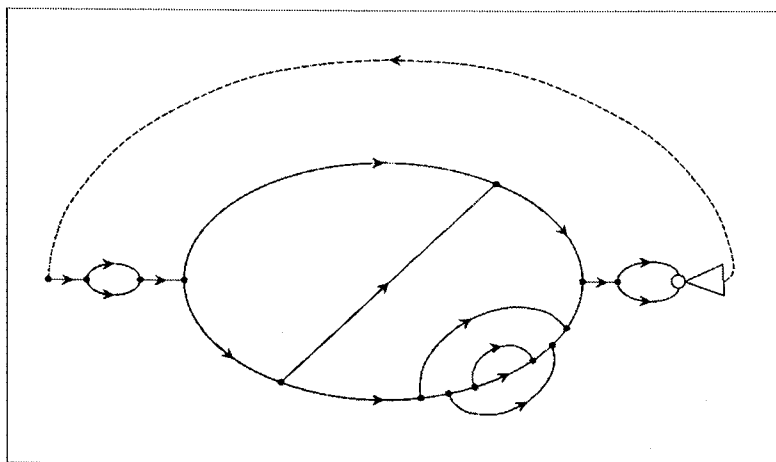


그림 7. Canonical Form of SFR

그림 6과 7의 Canonical Form을 표 3의 식에 의해 계산하면 결국 그림 8과 같이 diagonal branch를 포함하는 구조를 형성하게 되고 그 저항값은 다음과 같은 식 5에 의해 계산되어진다.

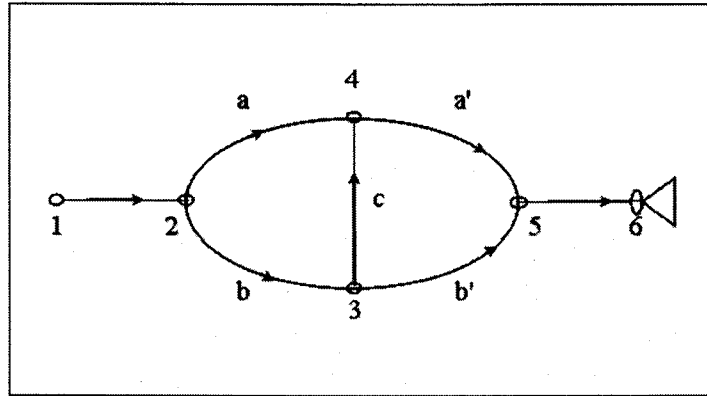


그림 8. Diagonal Ventilation System

$$\begin{aligned}
 X &= \sqrt{\frac{R_c}{R_a} + \frac{R_b}{R_a}} (1 + Y)^2 \\
 Y &= \sqrt{\frac{R_c}{R_{b'}} + \frac{R_{a'}}{R_{b'}}} (X + 1)^2 \\
 R &= \frac{R_a X^2 + R_{a'} (X + 1)^2}{(X + Y + 1)^2}
 \end{aligned} \tag{식 5}$$

$R_a, R_{a'}$: a, a' branch에서의 저항값 [$N \cdot S^2/m^8$]

$R_b, R_{b'}$: b, b' branch에서의 저항값 [$N \cdot S^2/m^8$]

R_c : c branch에서의 저항값 [$N \cdot S^2/m^8$]

X, Y : 상수

R : Diagonal ventilation system내의 총 저항값 [$N \cdot S^2/m^8$]

WIPP과 SFR의 저항값 계산결과, WIPP의 전체 시스템 저항값은 $0.01141[N \cdot S^2/m^8]$ 으로 계산되었고, SFR의 전체 시스템 저항값은 $0.02047[N \cdot S^2/m^8]$ 로 산정되었다. 즉, 두 처분장 구조물의 전체 시스템 저항값은 병렬구조를 더 많이 갖는 WIPP이 병렬구조를 더 적게 갖는 SFR보다 적게 나타났다. 하지만 전체규모와 터널 단면적이 크게 다른 두 시스템의 총 저항을 단순 비교하는 것은 문제가 있으므로, 각 시스템의 단위 길이당 과 단위 부피당 저항값을 계산해보았다. 전체 시스템의 단위 길이당 저항값은 SFR이 $2.568 \times 10^{-6} [N \cdot S^2/m^8]$, WIPP은 $1.5755 \times 10^{-6} [N \cdot S^2/m^8]$ 으로 계산되어졌고, 단위 부피당 저항값은 SFR이 $5.170 \times 10^{-8} [N \cdot S^2/m^8]$, WIPP은 $2.752 \times 10^{-8} [N \cdot S^2/m^8]$ 으로 계산되어졌다. 따라서 전체적으로 시스템 저항값의 측면에서 병렬구조의 WIPP이 대단면 구조의 SFR보다 적은 결과를 보였다.

위와 같은 결과를 통하여 전체 시스템 저항 계산시 병렬회로가 많은 경우 전체 저항치는 감소하게 됨을 알 수 있었으며, 향후 건설될 한국형 지하 동굴식 중-저준위 처분장 설계시 효율적인 환기시스템 마련을 위해 병렬회로의 구성이 절실히 필요하다고 판단된다.

5. WIPP과 SFR의 환기 시뮬레이션 및 비교

본 논문에서는 두가지 외국의 중-저준위 방사성 폐기물 처분장의 지형구조를 기본으로 환기회로를 구성하고 각 brach의 저항을 산정하여, 주 선풍기 결정을 통한 최적의 환기시스템을 구축하기 위해, Hardy Cross Method를 주된 알고리즘으로 하는 V-net PC 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 프로그램은 이미 미국의 Yucca Mountain Exploratory 프로젝트에서 타당성을 검증받았으며 [Yucca Mountain Project, 2002], 수 많은 복잡한 환기 네트워크를 가진 지하 구조물의 환기능력 평가에 이용되어왔다.

5.1. WIPP의 환기 시뮬레이션

5.1.1. 소요환기량 산정

WIPP 처분장은 크게 실험 구역, 건설 구역, 폐기물 처분 구역으로 나뉘며 각각의 독립적인 환기 회로에 의해 공기가 배분되므로 이 구역들을 위한 각각의 소요 환기량을 산출해야만 한다. 또한 처분장으로의 폐기물 수송을 위한 폐기물 수직갱(Waste Shaft)에도 잠재적인 방사성 입자의 유출이 예상되므로 적절한 양의 공기가 필수적으로 공급되어야 한다. 처분장과 같은 지하 환경에서 요구되는 공기질의 결정에 대한 기준은 미국 광산 안전-관리국(Mine Safety and Health Administration : MSHA)의 기준을 따른다. 폐기물처분 공간과 지하광산의 환경이 유사하기 때문이다. 모든 갱도에서의 공기는 최소 공기 요구 속도나 디젤 장비를 사용할 경우 최소 소요 환기량에 의해서 결정되며 안전율을 고려하여 그 중에서 더 높은 쪽을 사용하게 된다. 현재 WIPP에서는 모든 갱도와 공간에서의 최소 공기 속도를 60ft/min으로 하고 있으며, 환기 수갱은 3000ft/min, 운반수갱에서 로프 가이드가 있는 경우 1400ft/min, 고착 가이드가 있는 경우는 2000ft/min을 초과하지 않는다. 표 6에는 MSHA의 기준을 토대로 누풍률(air leakage)을 고려한 소요 환기량을 나타내고 있다. [Subhash, 1987].

표 6. Ventilation requirement for WIPP

Area	Storage Shift (cfm)	Construction Shift (cfm)
Experimental Area	85,000	85,000
Construction/Development Area	55,000	145,000
Waste Storage Area	145,000	55,000
Waste Shaft	50,000	50,000
Total	335,000	335,000

처분장에서는 건설과 처분이 동시에 이루어지지 않으며 약간의 시간차를 두어 진행된다. 그리고 건설시와 처분시에 각 지역의 공기량에는 차이가 발생하지만, 실험 구역과 폐기물 수직갱에는 일정한 양의 공기가 공급된다.

5.1.2. 환기 시뮬레이션

WIPP의 환기 시뮬레이션은 크게 실험구역과 저장구역 공사구역 3부분으로 나누어 실행되며, 3개의 입기갱과 1개의 배기갱으로 환기가 이루어진다. 일단 산정된 소요환기량과 4장에서 계산된 환기회로의 전체 저항과의 관계에서 회로에 압력강하가 발생된다. 이를 토대로 적정 팬을 선택하여야

하지만, WIPP 처분장에 정확히 맞는 팬 데이터와 특성곡선의 부재로 인하여 기존에 보유하고 있는 팬 데이터와 특성치의 조합으로 V-net PC를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. WIPP에서는 각 구역마다 환기를 담당하는 수직갱이 있어 서로 분리된 3가지 형태의 환기회로를 가진다. 적정 팬의 선택을 위하여, 분리된 회로에 소요 환기량을 적용시켜 각 구역의 적정 팬을 결정한다. 분리된 회로는 1개의 배기 수직갱을 공유하고 있으며, 결합된 회로에서 효과는 적지만, 회로 간의 유기적인 상호 유동이 있을 수 있기 때문에 세심한 고려가 필요하다. 표 7은 WIPP에서 사용한 팬의 특성치이다.

표 7. Fan Data (WIPP)

Ventilation shaft		Waste/Construction shaft		Exhaust shaft	
Q[m ³ /s]	P[kPa]	Q[m ³ /s]	P[kPa]	Q[m ³ /s]	P[kPa]
5.67	2.365	9.44	2.092	20.83	3.490
11.33	2.473	14.16	1.992	31.25	3.430
18.00	2.471	28.32	2.490	41.67	3.300
27.00	2.364	37.75	2.989	52.08	3.120
30.34	2.147	42.47	2.889	62.50	2.880
32.67	2.032	51.91	2.740	72.92	2.620
36.00	2.020	56.63	2.441	83.33	2.300
40.67	1.135	60.07	1.694		

최적 환기 시뮬레이션을 위해 선정된 팬으로 4개의 수직갱 운용방법을 조합하였다. 단 방사성 폐기물의 특성상, 저장지역에는 항상 음압을 유지하여야 하므로 배기 수직갱의 배기용 팬은 고정시켜 시뮬레이션 하였다. 먼저 입기 수직갱과 배기 수직갱에 팬을 도입한 결과 실험구역에는 99,460 cfm으로 충분한 공기량을 만족하지만, 폐기물 저장지역과 건설지역에는 소요환기량의 10% 밖에 만족하지 못한다. 따라서 더 많은 양의 공기량을 확보하기 위해 배기 수직갱에 팬을 직렬 혹은 병렬로 연결하여 확장을 시도하였으나, 수직갱의 위치와 저장지역 및 처분지역까지의 거리로 인하여 통풍로의 저항이 급격히 증가되는 결과를 낳았다. 즉, 많은 수의 보조팬과 공기조절기가 필요하게 되어 오히려 환기효율을 저감시키게 된다. 따라서 추가로 암염수직갱 같은 신선외기를 내부로 도입할 수 있는 환기회로를 적용하여 총 2개의 입기회로를 확보하여 시뮬레이션 하였다. 그 결과 첫 번째 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 실험 구역에는 충분한 환기가 가능하나 저장 지역과 건설 지역에는 소요환기량의 70~80% 밖에 만족시키지 못하였다. 따라서 WIPP의 최적 환기를 위해서는 모든 수직갱을 환기회로로 사용하여야 한다는 결론에 도달하였다. 배기 수직갱에 배기팬을 가동하고 나머지 3개의 수직갱을 입기갱으로 한 경우 그림 9와 같은 환기회로가 구성된다. 3개의 입기갱으로부터 신선한 공기가 저장지역, 건설지역 및 실험지역으로 고르게 분배되고 있으며, 특히 저장지역에서는 음압의 유지가 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다.

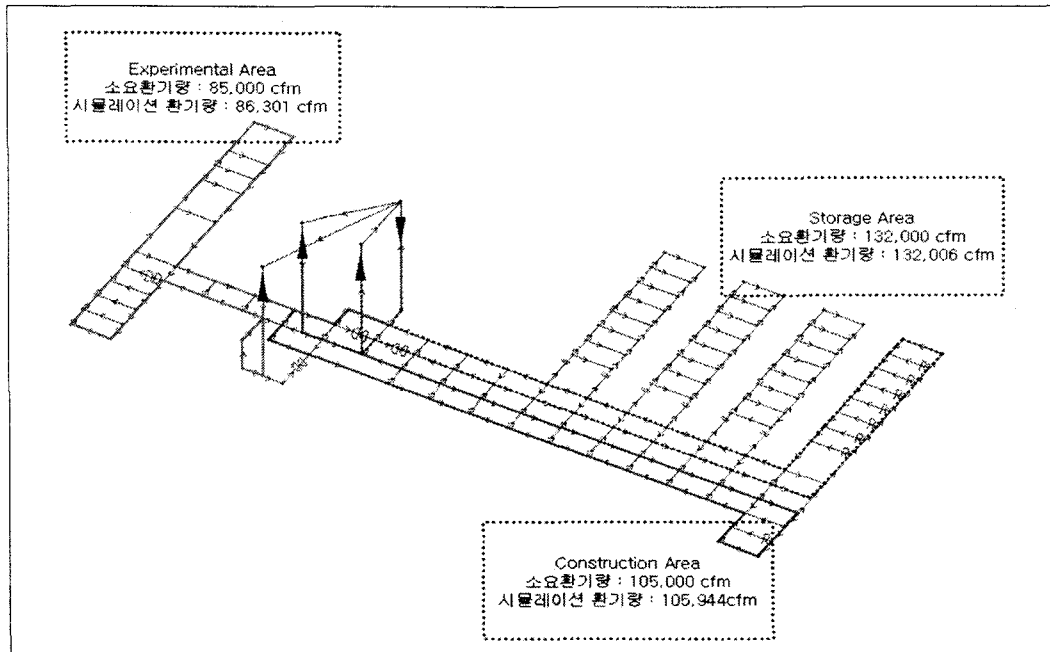


그림 9. Schematic of Simulation Result (WIPP)

저장, 건설, 실험지역에서 각각 132,006 cfm, 105,944 cfm, 86,301 cfm 으로 모든 지역에서 소요환기량을 충족시키는 결과를 얻었다(표 8). 이와 같은 결과는 수직갱에 모두 동일한 팬으로 적용되었을 때 보다 효율적이고 최적화된 환기설비라고 판단된다. 실제 WIPP에 적용된 팬의 전력이 450kW이며, 시뮬레이션 한 결과 책정된 값은 371kW로서 다소 작은 수치를 얻었으나, 이는 실제 현장에서 팬과 함께 설치되는 필터의 저항효과를 감안하였을 때 비교적 적절한 설계가 이루어졌다고 판단된다.

표 8. Result of Simulation

Site	소요환기량	시뮬레이션 환기량	비고
저장지역	132,000 cfm	132,006 cfm	Regulator 7, Door 1
건설지역	105,000 cfm	105,944 cfm	Regulator 1, Door 1
실험지역	85,000 cfm	86,301 cfm	Door 2

5.2. SFR의 환기 시뮬레이션

5.2.1. 소요환기량 산정

SFR과 같은 동굴방식의 폐기물 처분장은 지반 층의 안정성이 높은 화강암질 암반이 처분부지로 선정되므로 암반에서 붕괴되는 라돈가스 및 폐기물 운반차량에서 발생하는 연소 산화물등이 환기량을 결정하는 주요 설계인자가 된다. 특히 라돈가스는 붕괴하면서 전기적인 성질을 띠며 이는 처분갱도에 부유하는 입자에 흡착하여 방사성 에어로졸을 만들어 인체에 치명적인 영향을 미치게 되므로 물리적인 양이 적다하더라도 주의 깊게 고려하여야 한다. SSI(The Swedish Radiation Protection Authority)에서 측정된 SFR 처분장의 라돈가스 농도는 30~290 Bq/m³ 으로 이는 ICRP(Commission on Radiological Protection)에서 제시한 기존주택의 라돈 권고치인 200Bq/m³ 에 상회하며, 소요환기량 산정시에 고려대상이 된다. 또한 SFR의 환기량 산정에 지배적인 영향을 미치는 인자는 디젤 장비

를 사용하는 폐기물 운반차량의 연소 산화물로 갱도환기는 미국 광산 안전-건강 관리국(Mine Safety and Health Administration : MSHA)의 기준에 따라 모든 갱도 내의 최소 공기속도를 60 ft/min 으로 유지하도록 설정한다[Peter M. Hanke, 1987]. 처분 지역에서는 디젤 장비의 사용에 의한 소요환기량을 주된 환기량으로 선정하며, 이 때 디젤 장비는 현재 사용하는 것뿐만 아니라 가까운 미래에 사용될 것도 고려해야한다. MSHA 에 기준한 설계 기준을 SFR 에 적용시켰을 때 전체 회로의 환기량은 244,969 cfm 이며, 여기에 누풍률(air leakage)을 고려한다면, 총 소요환기량은 264,000 cfm 로 정해진다.

5.2.2. SFR의 환기 시뮬레이션

SFR은 두 개의 사갱이 입기갱과 배기갱의 역할을 하여 환기가 이루어지며, WIPP 처분장과는 다르게 처분장의 건설이 완료되고 난 후에 처분이 이루어진다는 특성 때문에 환기적인 측면에서 매우 다른 양상을 보인다. 특히 해저의 위치 특성으로 인해 수직갱을 건설하지 못한다는 점은 주목할 만한 점이다. silo 와 터널 처분장 지역을 고려하여 소요환기량을 책정하고 WIPP에서와 마찬가지로 전체 시스템의 저항을 극복하기 위한 압력을 산출하여 적정 팬을 선택하였다.

처분장 내의 저장지역에 음압을 형성시켜 오염물질이 확산되는것을 방지하기 위하여 Operation Tunnel에 배기식 팬을 설치하였다. 1대의 배기 팬을 선정하고, 환기 시뮬레이션을 통해 터널 처분장 지역과 silo의 소요환기량을 분석하였다. 분석 결과, 터널 처분장 지역과 silo에서 소요환기량의 약 50~60% 가량만이 만족되었으므로 동일한 팬 하나를 추가하고 병렬회로를 구성하였다. 그림 10에서와 같이 배기팬 2대를 병렬로 연결하고 시뮬레이션을 실행한 결과 두 개의 환기 필요지역에 각각 148,300 cfm, 158,000 cfm의 공기량이 배분됨으로써 소요환기량에 만족하는 결과를 얻었다. SFR에서 사용한 fan data는 미국 Yucca mountain 프로젝트에 사용한 팬 데이터를 사용하였으며, 팬 특성치를 표 9에 나타내었다.

표 9. Fan Data (SFR)

Fan data	
Quantity[m ³ /s]	Pressure[kPa]
9.44	2.092
14.16	1.992
28.32	2.490
37.75	2.989
42.47	2.889
51.91	2.740
56.63	2.441
60.07	1.694

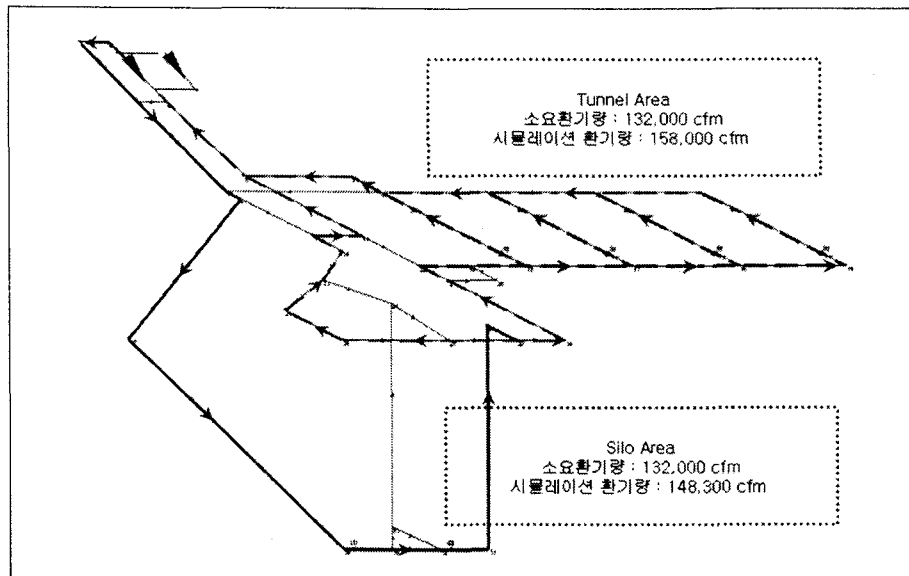


그림 10. Schematic of Simulation Result (SFR)

5.3. 시뮬레이션 결과 비교

WIPP의 폐기물 처분규모는 175,600 m³ 로 SFR의 처분 용량 60,000 m³의 약 3배 가량의 차이를 보인다. 환기 방식에서도 WIPP은 3개의 수직갱을 사용하여 외기가 입기되고 1개의 수직갱을 통해 배기되는데, SFR은 2개의 사갱을 통하여 공기가 입·배기된다. 고준위에 비하여 중-저준위 방사성 폐기물 처분장의 경우 심도가 크게 깊지 않으므로 수직갱 보다는 사갱을 이용한 폐기물의 운반이 타당할 것이다. 그러나 사갱의 경우 경사각(14도 이하)이 필요하므로 수직갱에 비해 굴진길이가 크게 증가하게 되어 큰 공기저항을 유발시킬 뿐만 아니라 굴착 지점에 대한 선택이 제한된다. 수직갱의 경우 사갱에 비해 저항값이 크지만 굴착 지점에 대한 제한성이 적으며, 환기 회로망 설계시 다양한 시도가 가능한 이점이 있다.

WIPP과 SFR은 규모, 환기방식 및 폐기물의 처리방식에서 큰 차이를 보이므로 정확한 비교는 어려우나 폐기물 처리용량당 환기비용으로 표 10과 같이 비교하여 보았다.

표 10. Comparison of Simulation Result

	WIPP	SFR
처분 용량	175,600 m ³	60,000 m ³
시뮬레이션 환기량	324,251 cfm	306,300 cfm
Operating cost	177,521,400원/year	62,940,600원/year
Operating cost / 처분 용량	1,011원/ m ³ year	1,049원/ m ³ year

최적 환기 시뮬레이션 결과, WIPP 환기시스템의 선풍기 작동비용이 SFR 보다 큰 값을 가지게 되지만 이것만으로는 환기측면에서 두 시스템이 좋고 나쁨을 판단하기가 어렵다. 보다 효과적인 비교를 위해서 폐기물의 처분 용량 당 작동비용을 산정한 결과 WIPP은 1,011원/ m³ year, SFR은 1,049원/

m^3 year으로 비슷한 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 첫째, 4장에 언급했던 전체 시스템 저항값이 SFR 보다 WIPP의 경우가 더 작았기 때문이다. WIPP이 규모와 처리용량이 SFR에 비하여 약 3배가량 크지만, 환기회로상 병렬연결이 많아 전체 시스템 저항이 작아져 처분용량당 작동비용이 작게 산출된 것이다. 하지만, 만약 대단면 구조의 SFR이 보다 더 많은 병렬회로를 갖는다면 시스템 저항이 WIPP 보다 작아질 수 있다.

두 번째, 두 처분장의 폐기물 처분 방식이 크게 작용한 것으로 사료된다. WIPP은 폐기물이 한 패널에 채워지고 채워진 패널은 뒷채움되어 전체적인 환기 시스템에서 공기의 흐름이 차단되므로 저항으로써의 역할을 하지 못하게 된다. 따라서 환기회로에서 채워진 패널은 고려되지 않으며, 결국 전체적인 회로의 저항 감소를 가져오기 때문에 작동비용의 절감효과를 가져오게 된다. 반면 SFR의 경우는 4개의 터널과 1개의 사일로에 폐기물의 종류에 따라 분리되어 동시에 처분이 이루어지게 되므로 폐기물의 처리 및 관리에는 유용할 지 모르나 환기라는 측면에서 볼 때 저항의 증가를 초래하므로, WIPP과 비교했을 때 높은 작동비용이 책정되게 된다.

셋째, 환기 방식에 의한 차이로 볼 수 있다. SFR의 경우는 해저 암반에 위치한 처분장이므로 수직갱의 굴착이 용이하지 않다. 따라서 사갱을 이용한 갱도 환기를 할 수 밖에 없는데, 수직갱에 의한 환기보다 공기의 유동이 원활히 이루어지지 않는 것은 확실하다. 수직갱에 의한 환기가 이루어지는 WIPP 처분장은 계절에 따라 공기의 온도 및 압력차에 의한 자연 환기력으로 기계적 환기의 효과를 극대화 시킬 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 한국형 중-저준위 방사성 폐기물 처분장의 최적 환기시스템 설계를 위해 외국의 처분장들 중 대표적인 두 곳인 미국의 WIPP과 스웨덴의 SFR을 선정하여, 두 곳의 시스템 저항을 산출하여 비교하였고 V-net PC를 이용하여 환기시뮬레이션을 수행하였다. 도출된 결과는 간략히 다음과 같다.

1. WIPP과 SFR의 저항값 계산결과, WIPP의 전체 시스템 저항값은 $0.01141[N \cdot S2/m^8]$ 으로 계산되었고, SFR의 전체 시스템 저항값은 $0.02047[N \cdot S2/m^8]$ 로 산정되었다. 즉, 두 처분장 구조물의 전체 시스템 저항값은 규모가 큰 WIPP이 규모가 작은 SFR보다 적게 나타났다. 이는 WIPP의 경우 전체 환기회로 내에 병렬회로 구성이 SFR보다 많아 결과적으로 전체 시스템의 저항을 감소시키는 효과를 가져왔다.
2. WIPP 내부의 필요 환기지역의 소요환기량 및 팬의 산정을 통한 최적 환기시뮬레이션 결과, 4개의 수직갱(Intake, Exhaust, C&SH, Waste Shaft)을 이용하여 3대의 입기팬(45kW, 90kW, 90.5kW)과 1대의 배기팬(144kW)으로 저장, 건설, 실험지역의 환기량이 각각 132,006 cfm, 105,944 cfm, 86,301 cfm으로 공기의 적절한 분배가 가능하였다. SFR의 경우 역시 배기팬 2대(41.7kW)를 병렬로 연결하고 시뮬레이션을 실행한 결과 두 개의 환기 필요지역에 각각 148,300 cfm, 158,000 cfm의 공기량이 배분됨으로써 소요환기량을 만족하는 결과를 얻었다.
3. 두 처분장의 폐기물 처분용량 당 선풍기 작동비용을 산정한 결과 WIPP은 1,011원/ m^3 year, SFR은 1,049원/ m^3 year으로 비슷한 결과를 보인다. 즉, 보다 더 많은 병렬회로를 가지는 처분장이 환기 효율적 측면에서 유리하다고 사료된다. 이러한 결과를 통해 SFR과 같이 수직갱이 포함되지 않은 대단면 터널 처분장에서는 보다 더 많은 병렬회로를 이용하고 전체 시스템의 저항을 낮추어 환기효율을 증가시켜야 할 것이다.

방사성 폐기물의 위험성으로 인해 방사성 물질의 처분에 대한 관심이 고조되고 있는 현실에서 한국형 지하 동굴식 중-저준위 방사성 폐기물 처분장 건설시 최적 환기시스템의 적용은 절실히 필요한 과정이라 할 수 있다. 최적 환기 시뮬레이션을 통한 처분장의 설계 및 시공단계에의 적용으로 방사성 폐기물 처분의 위험성을 최소화 시키는 노력을 지속하여야 할 것이다.

■ 참고문헌 ■

1. International Atomic Energy Agency, Acceptance Criteria for Disposal of Radioactive Wastes in Shallow Ground and Rock Cavities, Safety Series No.71, IAEA, Vienna 1985.
2. Jin Kim, Sang-Ki Kwon, "Ventilation System Strategy for a Prospective Korean Radioactive Waste Repository", Journal of the Korean Radioactive Waste Society Vol.3(2), P.135~14, 2005.
3. McPherson, M. J., "Subsurface Ventilation and Environmental Engineering", Chapman & Hall, 131(1993).
4. McPherson, M. J., "The Resistance to Airflow of Mine Shafts", (1987).
5. Office of Civilian Radioactive Waste Management (OCRWM), "Yucca Mountain Project; Yucca Mountain Science and Engineering Report", DOE, USA(2002).
6. Subhash, C. S., "Ventilation Evaluation for the WIPP Underground Facility, Waste Isolation Pilot Plant", DOE, USA(1986).
7. Subhash, C. S., Modification of the Ventilation System at WIPP, Proceedings of the 3rd Mine Ventilation Symposium, 377(1987).
8. Maria Wikström, Radioactive Waste Management In Sweden, Experiences And Plans, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management co, Stockholm, Sweden, 1999.
9. 강병무, "방사성폐기물 동굴처분과 지하시험시설", 한국지구시스템공학회, 74-89, 1991.
10. Peter M. Hanke., Summary Report of First and Foreign High-Level Waste Repository Concepts, Willowbrook, IL, 1987.