터널과 지하공간, 한국암반역학회
Vol. 4, 1994, pp. 256~260

암반내 열집중을 고려한 고준위 폐기물 캐니스터의 배열설계

양형식[1] · 이춘우[2]

Array Design of HLW Canisters considering Thermal Concentrations

Hyung Sik Yang and Chun Woo Lee

ABSTRACT

HLW canister array was designed by FLLSSM program, considering the thermal concentration. Rock properties were chosen as those of granite, the most possible bedrock for the repository in Korea. It was shown that repository area and excavation volumes can be determined by the pitch or distance between canisters. Pitch can be reduced to 0.6 m assuming the tolerance temperature as 200℃. Thermal concentration was reduced as storage time for cooling the canister passed. After 10 years of storage the thermal problems seemed to be negligible.

1. 서 론

우리나라에서는 연간 230~270톤의 사용 후 핵연료가 발생하고 이중 중·저준위 폐기물은 연간 6,250드럼 정도이다. 방사성 폐기물이 계속 쌓여가고 있는데 현재 폐기물을 임시 저장하고 있는 발전소 내 저장시설은 거의 포화상태에 이르고 있다. 중·저준위 처분장도 문제이지만 멀지 않은 장래에 고준위 폐기물이나 반감기가 지난 장수명 폐기물 문제도 대두될 것이다. 고준위 방사성 폐기물의 처분방식으로는 지하 암반내에 보관하는 것이 가장 현실적인 것으로 판정되었고 여러 선진국들은 암반내 폐기물 처분장의 건설이나 연구를 위한 프로젝트를 수행하고 있다.

지하암반에 고준위 폐기물을 안전하게 처분하기 위해서는 암반의 열팽창, 탄성계수, 투수율 등을 포함한 역학적, 열적, 유체유동 특성 등에 관한 자료가 필요하다.

본 연구에서는 그 중에서도 방사성 폐기물 지하처분장을 설계할 때 캐니스터의 배열에 따른 열집중 현상을 수치해석하여 처분장에 소요되는 면적과 굴진장을 최소화하는 방안을 연구하였다. 폐기물 처분장의 지질 암체로는 우리나라의 경우 가장 잠재성이 높은 화강암을 선택하였으며 국내 화강암의 열적 특성을 고려하여 설계 입력 자료로 채택하였다.

2. 기초이론과 FLLSSM 프로그램

지속적으로 열이 발산되는 고체 매질 내의 열 전달식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial v}{\partial t} \qquad (1)$$

여기서 v는 온도이고 x, y, z는 온도가 계산될 좌표이며 t는 시간, α는 열확산계수로서

$$\alpha=\frac{k}{\rho C}$$

*1994년 12월 8일 접수
1) 정회원, 전남대학교 자원공학과 부교수
2) 학생회원, 전남대학교 자원공학과 석사과정
*이 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문연구과제 연구비 지원을 받아 이루어진 연구 결과의 일부임.
과제번호: 941-0800-018-2

로 정의되며 이때 k, ρ, C는 각각 매질의 열전도도, 밀도, 비열이다.

(1)식의 점열원에 대한 해는 Carlslaw와 Jaeger (1950)에 의해 구해지는데

$$v=\frac{Q}{8(\pi\alpha t)^{3/2}}\, e^{-[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]/4\alpha t} \qquad (2)$$

여기서 Q는 열강도, CρQ는 공급열이다.

(2)식의 적분에 의해 유한한 길이 2L의 열원에 대해서 구할 수 있다.

$$v=\frac{Q}{8(\pi\alpha t)^{3/2}}\int_{L}^{L} e^{-[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]/4\alpha t}\, dz' \qquad (3)$$

이를 적분하면

$$v=\frac{Q}{8\pi\alpha t}\, e^{-[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]/4\alpha t} \left[\mathrm{erf}\frac{z+L}{2\sqrt{\alpha t}}-\mathrm{erf}\frac{z-L}{2\sqrt{\alpha t}}\right] \qquad (4)$$

(4) 식에서 erf는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathrm{erf}\, z=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^z e^{-t^2}\, dt$$

연속적으로 발열하는 선형 발열원은 (4)식을 시간에 대해 적분하여 얻을 수 있다.

$$v=\int_0^t \frac{Q(t'+a)}{8\pi\alpha}\left[\mathrm{erf}\frac{z+L}{2\sqrt{\alpha t}}-\mathrm{erf}\frac{z-L}{2\sqrt{\alpha t}}\right] e^{-[(x-x')^2+(y-y')^2]/4\alpha(t-t')}\frac{dt'}{t-t'} \qquad (5)$$

t'는 적분변수이고 a는 원자로에서 빼낸 후 처분장에 처리할 때까지의 시간이다. 처음의 온도를 0으로 가정하였다. 처음 온도가 v_{r0}이면 시간 t에서의 온도는

$$v_t=v_{r0}+v \qquad (6)$$

이 된다.

(5)식을 무차원식으로 하면

$$v^*=\int_0^{t^*}\frac{Q^*(\zeta'+t'^*)}{t^*-t'^*}\left[\mathrm{erf}\left(\frac{z^*+1}{2\sqrt{t^*-t'^*}}\right)-\mathrm{erf}\left(\frac{z^*-1}{2\sqrt{t^*-t'^*}}\right)\right] e^{-[(x^*-x'^*)^2+(y^*-y'^*)^2]/4(t^*-t'^*)}\, dt'^* \qquad (7)$$

여기서 $v^*=\frac{v}{v_0}$, $t^*=\frac{t}{t_0}$ 는 무차원 온도와 시간이고 t'*는 적분변수이다. 또 $Q^*=\frac{Q}{Q_0}$ 는 무차원 열원이고, x*, y*, z*는 온도를 계산할 무차원 좌표이며, x'*, y'*, z'*는 선 열원의 무차원 좌표이다. 그리고 ζ는 사용 후 연료의 제거와 저장 사이의 무차원 경과시간이다.

FLLSSM(Finite Length Line Source Superposition Model)은 (7)식을 프로그래밍한 것으로 발열원이 되는 HLW 캐니스터를 선형으로 가정하고 각각의 캐니스터에 의해 유기되는 열을 중첩하여 처분장의 임의점의 온도를 계산할 수 있도록 한 프로그램이다.

3. 설계온도와 입력자료 및 설계모델의 결정

3.1 설계온도

방사성 폐기물 지하저장소 설계를 위해서는 방사성 폐기물의 열 하중에 따라 암석물성이 변화하는 양상을 파악할 필요가 있다. 폐기장 설계의 기준 온도로는 현저한 물성 변화가 있거나 예측이 곤란해지는 온도를 들 수 있다. 우리나라 화강암의 열특성은 석재의 개발이나 고온암체의 개발 등과 관련하여 몇몇 연구결과가 보고되어 있다(신희순, 정소걸, 1991, 여인욱, 전용원, 1992, 이기형 외, 1990). 여와 전(1992)에 의하면 포천 화강암, 김제 화강암 및 상주 화강암의 경우 200℃와 300℃ 사이에 탄성계수와 압축강도 등의 변화가 비교적 심한 것으로 나타났고 이같은 결과는 외국의 경우와도 유사하다(Heuze 등, 1983). 따라서 본 연구에서는 허용 최고온도를 250℃ 이상으로 보고 안전율을 고려하여 200℃로 가정하였다.

3.2 입력자료

현재 우리나라의 화강암에 대한 실험을 실시하고 있는 중이어서 여기서는 기발표된 문헌에서 200℃ 내외에서의 물성값들을 택하여 입력자료로 하였다.

Table 1. Selected physical properties of granite.

	Symbol	Granite			
		British unit		SI unit	
Thermal conductivity	k	3.632	btu/hr ft °F	2.135	J/m sec deg
Density	ρ	165.6	lb/ft^3	2650	kg/cm^3
Specific heat	c	0.71	btu/lb °F	921	J/kg deg
Maximum permissible temperature	v_0	392.0	°F	200	°C
Thermal diffusivity	α	0.031	ft^2/hr	8.74×10^{-7}	m^2/sec

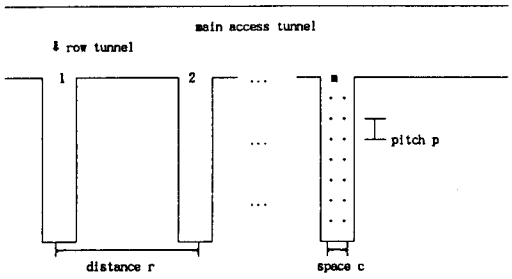

Fig. 1. Array of HLW repository

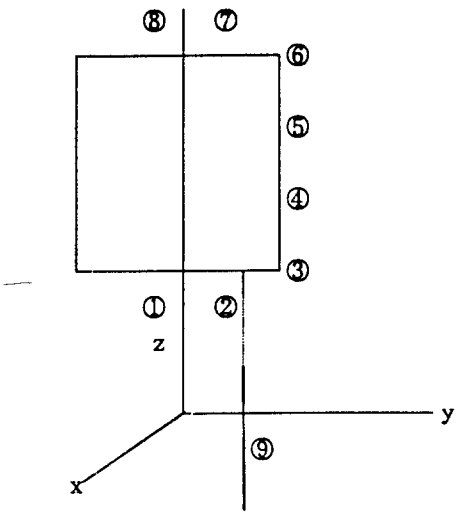

Fig. 2. Calculating position in repository room and canister

채택된 입력자료들은 Table 1과 같다.

3.3 모델

처분장의 일반배열은 주통행 터널(main access tunnel)로부터 저장터널(row tunnel)을 m개 굴착하고 각 저장터널에는 두 열로 수직하부공을 천공한 뒤에 캐니스터를 배치하는 것으로 하였다. 이때 저장터널의 간격을 r, 캐니스터의 열 간격을 c, 캐니스터 사이의 거리(pitch)를 p로 하였다(Fig. 1).

계산에 사용된 모델은 Fig. 2와 같다. 저장터널의 천정부(A), 벽면과의 경계(B), 바닥 중앙부(C), 벽면(D), 캐니스터 공 중심(E) 등을 계산점으로 하였다.

3.4 열집중에 영향을 미치는 변수

Fig. 1에서 열 간격 r은 인접하는 터널과 터널 사이의 응력집중을 피하기 위한 거리를 확보하는 선에서 결정되어야 한다. 캐니스터 줄 간격 c는 터널의 폭에 의해 결정될 것이며 캐니스터 사이의 간격 p는 c보다 적게 해야 할 것이다. 열간격보다 멀수록 열집중은 적어지나 최근접거리가 c이므로 이보다 더 멀 필요는 없게 된다.

처분장의 면적은

$$A=(m-1)\,r\times\frac{n}{2m}\,p=\frac{n}{2}\,\frac{m-1}{m}\,rp \qquad (8)$$

으로 되는데, 여기서 n은 캐니스터의 총수이고 m이 큰 수일 때는 $\frac{(m-1)}{m}$ 이 1에 수렴하게 된다. 따라서 c의 크기는 처분장의 면적에 직접적으로 비례하게 된다.

한편 굴진장은 처분장 터널의 총연장에 주통행 터널의 길이를 더한 값으로 된다.

$$L=\frac{n}{2m}\,pm+(m-1)\,r=\frac{n}{2}\,p+(m-1)\,r \qquad (9)$$

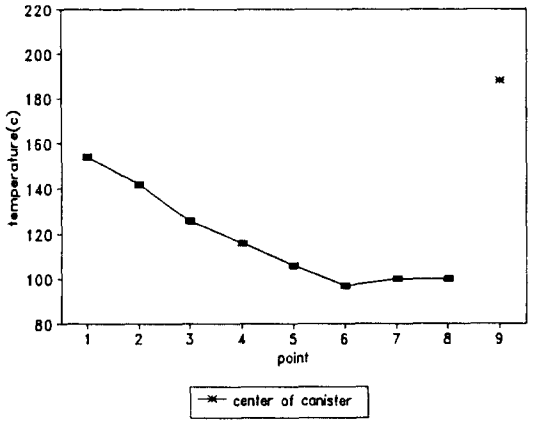

Fig. 3. Temperature distribution around the canister room

Table 2. Temperature variation by number of canisters.

Nr. canister / Elapsed time	1000	2000	3000	4000	5000	6000
3	146	146	146	146	146	146
4	149	149	149	149	149	149
5	150	151	151	151	151	151
6	151	152	152	152	152	152
7	151	152	152	152	152	152
8	151	153	153	153	153	153
9	151	153	153	153	153	153
10	151	154	154	154	154	154
15	148	153	153	153	153	153
20	145	153	153	153	153	153
25	143	152	153	153	153	153
30	139	150	151	152	152	152

이 된다. 여기서 $\frac{n}{2m}$ 은 한 줄에 배치되는 캐니스터의 수이다. (9) 식에서 보는 바와 같이 저장터널의 수가 증가하면 굴진장은 캐니스터 간격에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 m, r, c 등은 고정하였다.

Fig. 3은 캐니스터의 간격을 0.5 m, 처분시기를 30년으로 했을 때 온도의 분포를 나타내고 있다. 이 결과는 캐니스터 공의 중심부에서 최고 온도를 나타내고 있다. 그러므로 본 연구에서 나타낸 온도는 점 ⑨에서의 온도만 나타내고자 한다.

캐니스터의 수는 Table 2에서 보는 바와 같이 4000

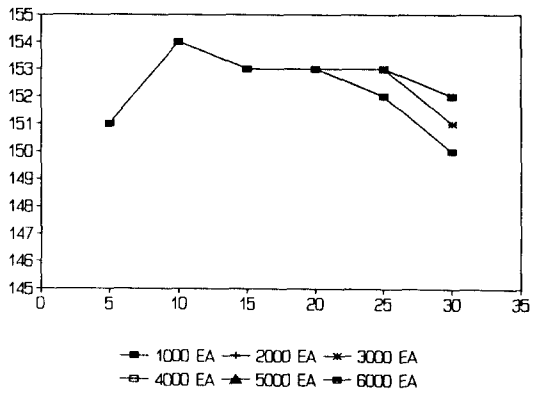

Fig. 4. Temperature variation by number of canisters

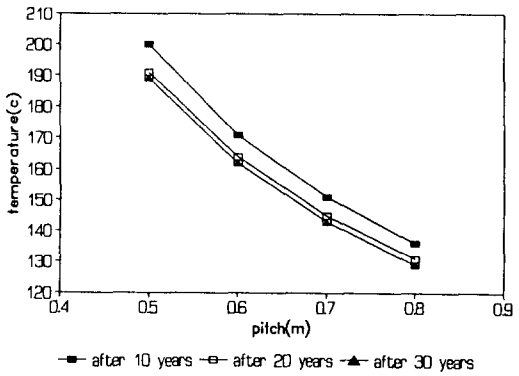

Fig. 5. Calculated temperature at point E

개를 넘어서면 일정시간이 경과한 후의 온도가 같은 값으로 수렴되므로 4000개로 가정하였으며, 변수는 캐니스터 간격 p와 사용 후 연료의 중간저장 시간 즉 처분장에 처분할 때까지의 시간만을 달리하여 최적 간격과 저장시기를 구하였다.

4. 계산 결과

4.1 최적간격

Fig. 5는 처분 시기를 6년으로 하고 캐니스터의 간격을 각각 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 m로 각각 달리한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 캐니스터의 간격이 가까울수록 온도가 상승한다. 캐니스터 간격이 0.6 m가 되면 전기간에 걸쳐 200도를 넘지 않는다. 따라서 0.6 m를 최적거리로 볼 수 있다.

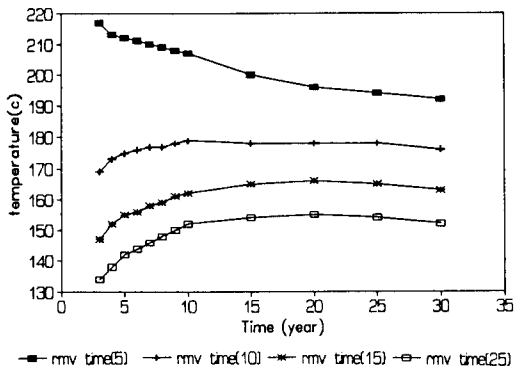

Fig. 6. Temperature variation by removal time

4.2 처분시기

처분시기와 관련한 온도의 집중현상을 Fig. 6에 보였다. 표에서 캐니스터의 수는 4000개로 하였고, pitch 간격은 안전율을 고려하여 0.5 m로 하였다. 처분시기가 빠를수록 온도가 높은 것을 볼 수 있다. 그림에서와 같이 시간이 경과할수록 온도가 상승하다가 감소하게 되는데 처분 시기가 5년 미만일 때는 200도 이상의 고온에서 계속해서 감소하는 경향을 보인다. 따라서 처분시기가 늦을수록 열집중에는 유리하지만, 10년 이후에는 전 기간에 걸쳐 200도를 넘지 않는다. 그러므로 캐니스터를 10년 정도가 경과한 후에 처분한다면 열문제는 없을 것으로 판단된다.

5. 결 론

FLLSSM 프로그램을 이용하여 우리나라 화강암내에 고준위 폐기물의 처분장을 건설할 때에 발생할 수 있는, 캐니스터의 배열에 따른 열집중을 연구한 결과는 다음과 같다.

1) 열집중을 고려할 때 처분장의 면적이나 굴진량은 캐니스터의 간격에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

2) 허용온도를 200℃ 로 했을 때 캐니스터의 간격을 0.6 m까지 근접시킬 수 있었다.

3) 캐니스터의 처분 시기는 늦을수록 열집중이 적었으나 10년 정도가 경과한 후면 열문제는 없을 것으로 판단된다.

6. 요 약

본 연구에서는 FLLSSM 프로그램을 이용하여 시급히 요구되고 있는 고준위 폐기물의 처분장에 있어서 캐니스터의 배열에 따른 열집중을 연구하였다. 대상 지질암체로는 우리나라의 경우 잠재성이 높은 화강암을 선택하였다. 열집중을 고려할 때 처분장의 면적이나 굴진량은 캐니스터의 간격에 의해 결정되며 허용온도를 200℃ 로 했을 때 캐니스터의 간격은 0.6 m까지 근접시킬 수 있었다. 그리고 캐니스터의 처분시기는 늦을수록 열집중이 적었으나 10년 정도가 경과한 후면 열집중 문제가 없을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1) Carlslaw, Jaeger, 1950, Conduction of Heat in Solids, University Press, Oxford.

2) Heuze, F.E, 1983, High-temperature mechanical,physcial and thermal properties of granitic rocks-Review, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Absst., vol. 20, p. 3-10.

3) 신희순 정소걸, 1991, 방사성 폐기물 지하 저장을 위한 화성암의 열역학적 거동 특성, 터널과 지하공간, vol. 1, p. 49-65.

4) 여인욱, 전용원, 1992, 화강암의 열팽창 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, vol. 29, p. 263-275.

6) 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, 화강암질 석재의 열파괴 특성연구, 한국자원공학회지, vol. 27, p. 31-42.