

저온가스 저장공동 주위암반의 온도분포 예측에 관한 연구

이 양¹⁾, 이승도²⁾, 문현구³⁾*

The Estimation of Temperature distribution around Gas Storage Cavern

Yang Lee, Seung-Do Lee and Hyun-Koo Moon

Abstract As underground caverns have many advantages such as safety and operation, they can also be used for gas storage purpose. When liquefied gas is stored underground, the cryogenic temperature of the gas affects the stability of the storage cavern. In order to store the liquefied gas successfully, it is essential to estimate the exact temperature distribution of the rock mass around the cavern. The main purpose of this study is the development of theoretical solution to be able to estimate the temperature distribution around storage cavern and the assessment of the solution. In this study, a theoretical solution and a conceptual model for estimating two and three dimensional temperature distribution around the storage cavern are suggested. Based on the multi-dimensional transient heat transfer theory, the theoretical solution is successfully derived by assuming the cavern shape as simplified geometry. In order to assess the theoretical solution, by performing numerical experiments with this multi-dimensional model, the temperature distribution of the theoretical solution is compared with that of numerical analysis. Furthermore, the effects of the cavern size are investigated.

KeyWords Storage cavern, Cryogenic temperature, Temperature distribution, Liquefied gas, Theoretical solution, Heat transfer theory

초 록 저온가스를 지하공동에 저장하는 것은 안전과 운영 측면에서 많은 장점이 있다. 그러나 저장된 극저온 가스는 주변암반의 온도변화를 야기하여 공동의 안정성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 성공적인 저장공동의 건설을 위해서는 건설 초기에 공동 주위암반의 온도분포를 정확히 예측하는 것이 필수적이다. 본 연구의 목적은 저장공동 주변의 온도분포를 예측할 수 있는 이론해의 개발과 평가이다. 이를 위해, 공동의 형상을 단순화하고 비정상 열전도 이론을 적용하여 이론해를 도출하였다. 이론해의 적용성을 평가하기 위해서 이론해와 유한 차분 해석프로그램인 FLAC을 이용한 수치해석을 이용해 저장공동 주변의 2차원·3차원 온도분포를 추정하여 그 결과를 비교하였다. 또한, 공동의 크기에 대한 영향도 조사되었다.

핵심어 저장공동, 극저온, 온도분포, 액화가스, 이론해, 열전도 이론

1. 서 론

지하공간의 저온가스 저장시설은 국토의 활용과 환경 보전, 보안 및 안전 측면에서 대단히 효율적이다. 국내의 경우, 지질구조상 광범위하게 안정한 암반이 많은 뿐만 아니라 산지가 발달하여 동굴형 지하 저장시설을 건설하기에 적합한 여건을 가지고 있다.

영하 162℃의 LNG가 지하공동에 저장되면 주위암반

은 높은 열응력 및 열충격을 받게 된다. 초기 현저율은 저장공동 굴착과 보강으로 1차적인 응력 재분배를 겪게되며 가스 저장 후, 암반의 온도변화에 의해 발생하는 열응력에 의해 2차 응력 재분배 현상이 일어나게 된다. 따라서 저온 저장공동 건설시에는 공동의 열역학적 안정성 해석이 수반되어야 한다. 또한, 암반이 냉각되면 암반의 물성변화를 초래할 수 있으며 이들 요소들은 공동의 안정성과 직접적인 연관이 있다. 따라서 성공적인 저장공동 건설을 위해서는 건설 초기단계에서 공동 주위암반의 온도분포에 대한 정확한 예측이 필수적이다.

1970년대 이후 전세계적으로 water curtain system을 이용하여 LNG를 무복공 상태로 저장하려는 시도가 있었지만 극히 일부만 성공하였다. LNG의 극저온

¹⁾ 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구팀 연구원

²⁾ 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 과장

³⁾ 한양대학교 공과대학 지구환경시스템공학과 교수

*교신저자(Corresponding Author): hkmoon@hanyang.ac.kr

접수일: 2004년 1월 16일

심사 완료일: 2004년 2월 26일

으로 인한 열응력의 발생과 과도한 크랙 형성, 가스의 누출 등이 그 원인으로 파악되었다. 최근에 무복공 저장소의 대안으로 보냉패널(insulated panel)이 포함된 내조시스템(containment system)을 이용한 복공식 저장공동의 효용성이 입증되었다. 내조시스템은 공동 건설 후 공벽에 설치하는 구조체로서 적용성이 뛰어난 모듈식 구조로 이루어져 있다. 내조시스템을 이용하면 암반에 가해지는 온도를 -50°C 이하로 떨어지지 않도록 유지하며 기화율을 $0.1\%/day$ 미만으로 유지할 수 있다 (김호영 등, 2003).

지금까지 암반 내의 열유동에 대해 많은 이론이 제시되었고 저장공동 주위의 온도분포를 예측하고자 하는 연구도 다수 수행되었다. 일반적인 공동 주위의 온도분포 예측을 위한 해는 공동의 단면을 원이나 아치형으로 단순화하는 것에서 시작한다. 이러한 방법은 이론적인 근거가 명확하고 비교적 간단한 식을 통해서 공벽에서 수직인 방향으로 온도분포를 예측할 수 있지만 공동의 모서리 부근 등 실제적인 공동의 형상을 고려하는데 어려움이 있을 수 있다.

본 연구는 설계단계에서 공동 주위암반의 온도분포를 해석적으로 예측할 수 있는 이론해를 개발하는데 그 목적이 있다. 이론해는 저장공동의 단면을 정사각형으로 단순화하고 비정상 열전달 이론을 적용하여 제안되었다. 유한 차분 해석프로그램인 FLAC을 이용하여 이론해의 적용성을 검증하였다.

2. 온도분포 예측을 위한 기존의 연구 사례

암반을 비롯한 재료내의 열유동에 관한 이론적인 연구는 많은 학자들에 의해 수행되어졌으며, 특정 경계조건을 갖는 경우에 대한 비정상상태 및 정상상태의 열전달 이론식이 정립되어 있다. 열전달 이론 중 가장 기본적인 형태로 지표와 같은 경계를 갖는 반무한 고체의 열전달을 생각할 수 있다. 이 경우에 경계면 열원의 온도를 T_{∞} , 암반의 초기온도를 T_i 라 할 때, 암반의 표면경계로부터 거리 x 지점에서 경과시간 t 일 때의 온도 T 는 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{T - T_i}{T_{\infty} - T_i} = \text{erfc}(z_1) - \exp[z_2(2z_1 + z_2)] \text{erfc}(z_1 + z_2) \quad (1)$$

여기서 $\text{erfc}(z)$ 는 보충 오차함수(complementary error function)이고 z_1 과 z_2 는 무차원 변수로서 다음 장에서 설명될 것이다.

실제 저장공동은 완전 원형이 아닌 아치형이 일반적

인데, 이 경우는 이론적으로 밝혀져 있는 반무한 고체의 선형적인 열유동이나 원형공동 주위의 방사상 열유동과는 다른 양상을 갖는다. 신중호 등(1999)은 반무한 고체의 열전달 이론식에 형상함수(shape function)를 도입하여 열원경계의 형상에 따른 열전도식을 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{T - T_i}{T_{\infty} - T_i} = \text{erfc}(z_1) - \exp[z_2(2z_1 + z_2)] \text{erfc}(z_1 + z_2) \cdot \text{SF} \quad (2)$$

또한 신중호 등은 식 (2)에 여러가지 형상함수를 적용한 계산치와 현장 계측치의 비교를 통해서, 아치형 열원을 가진 경우의 형상함수로서 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\text{SF} = \sqrt{\frac{\log x_0}{\log(x_0 + x)}} \quad (3)$$

이때, x_0 는 공동의 단면적과 동일한 면적을 갖는 원에 대한 등가반경이며, x 는 벽면으로부터의 거리이다.

Claesson(2001)은 공동의 형상을 구로 단순화하여 구 외부의 반경에 따른 온도를 예측할 수 있는 이론적인 해를 제안하였다. 이 이론해는 선형 열탄성화적인 근사 해석을 위한 해로서 구형 저장공동의 경우에 대한 완전 explicit한 해이다. 또한 Claesson은 이론해의 경계조건으로 일정 표면온도 경계조건을 사용하였으며, 공벽에 가해지는 온도를 현장계측을 통해 얻어진 값을 단계적으로 감소시키며 입력하였다. 이 때 Claesson의 이론해는 구형공동 벽면의 단계적인 온도감소에 기인한 공동 주위의 온도분포를 예측할 수 있다(Claesson, 2001; 이대혁과 김호영, 2002).

이대혁 등(2002)은 계측치, Claesson의 해석해 그리고 다양한 경계조건 경계조건을 이용한 수치해석 결과를 비교 분석하여 경계조건 변화가 온도분포 예측에 가장 중요한 영향 변수라고 제시하였다. 또한, 수치모델에서 공동 벽면 근처에서는 냉각 초기에는 열유속 경계조건, 정상상태에 근접할수록 온도 경계조건을 이용하는 것이 적합한 것으로 나타나, 이를 기초로 공동 주변의 온도분포를 예측할 수 있는 해석절차를 제안하였다.

3. 비정상상태의 열전도

3.1 무한 평면벽 내부의 비정상 열전도

Fig. 1에 도시된 바와 같이 초기시간($t=0$)에서 일정한 초기 온도 T_i 를 가진 평면벽이 갑자기 일정한 온도 T_{∞} 인 대단히 큰 유체에 노출되었다고 가정하면, 평

면벽과 유체 사이에는 대류에 의해 열전달이 발생하며 대류열전달계수 h 는 상수이고 일정하다. 대류열전달계수는 고체표면과 유체 사이의 단위 표면적당, 단위 온도차에 대한 열전달률이라 정의할 수 있다. 이 때 대류 열전달계수는 물체의 특성이 아니며 실험적으로 결정된다. 또한 평면벽 표면에서 발생하는 복사열전달 현상은 무시하거나 대류열전달계수에 복사효과가 고려된 것으로 가정한다. 외부 유체의 온도에 의한 평면벽 내부의 온도구배는 벽의 중심선($x=0$)을 기준으로 대칭이다. 벽에서의 1차원 비정상상태의 온도분포 $T(x, t)$ 를 구하기 위해서는 편미분 방정식을 고등수학을 이용해서 풀어야 한다. 이들의 해는 일반적으로 계산하기에 많은 시간이 소요되는 무한급수의 형태로 표현된다. 이 때 비정상상태의 온도분포 해를 표나 그래프의 형태로 나타낼 수 있으나, 거리(x), 두께(L), 시간(t), 열전도도(k), 열확산계수(α), 대류열전달계수(h), 온도(T) 등과 같이 많은 변수와 관계되므로 그래프를 이해하기가 용이하지 않다. 따라서 변수들의 수를 줄이기 위해서 무차원온도 $\theta(x, t)$ 를 도입하면 무한 평면벽 내부의 온도분포 $T(x, t)$ 를 식 (4)와 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\theta(x, t) = \frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad (4)$$

3.2 반무한 고체에서의 비정상 열전도

반무한 고체는 모든 방향으로 무한한 길이의 이상적인 단면 판을 말한다. 이러한 이상적인 고체는 표면 근처의 온도변화가 한 방향의 열적 상태에 국한될 때 사용된다. 예를 들어 지구를 반무한 고체로 생각하여 표면 근처의 온도를 구할 수 있으며, 표면 근처에서의 온도만 구하려고 하고 다른 부분의 온도는 특정 시간동안

열전달 해석에 큰 영향을 주지 않을 때에는 두꺼운 벽도 반무한 고체로 생각할 수 있다.

일정한 온도 T_i 인 반무한 고체를 Fig. 2에 나타내었다. 시간 $t=0$ 에서, $x=0$ 인 고체의 표면은 온도 T_{∞} 인 유체에 대류에 의해 노출되고 대류열전달계수는 h 이다. 이때, 반무한 고체의 열전달은 무한 평면벽의 열전달의 경우와 개념적으로 반대인 형태이며, 고체 표면으로부터 거리 x 인 위치에서 시간 t 일 때의 온도는 무차원온도 $\theta^*(x, t)$ 를 도입하여 다음 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\theta^*(x, t) = 1 - \theta(x, t) = \frac{T(x, t) - T_i}{T_{\infty} - T_i} \quad (5)$$

또한 반무한 고체의 무차원온도 $\theta^*(x, t)$ 는 다음 식을 통해서 해석적으로 구할 수 있다.

$$\theta^*(x, t) = \operatorname{erfc}(z_1) - \exp[z_2(2z_1 + z_2)] \operatorname{erfc}(z_1 + z_2) \quad (6)$$

여기서, z_1 과 z_2 는 무차원 변수로 각각 $z_1 = \frac{x}{2\sqrt{at}}$, $z_2 = \frac{h}{k}\sqrt{at}$ 로 정의되며, $\operatorname{erfc}(z)$ 는 보충 오차함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (7)$$

한편, 반무한 고체의 표면에 열적인 경계조건 즉, 열원의 온도(T_{∞}), 대류열전달계수(h), 열유속(q)이 적용되었을 때, 시간 t 후에 열적 변화가 시작되는 범위를 열침투 깊이라 하며, 열침투 깊이는 경험적으로 다음과 같은 식으로 결정된다.

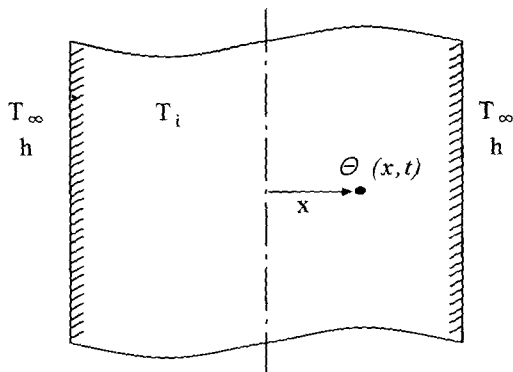


Fig. 1. Transient heat conduction in large plane wall

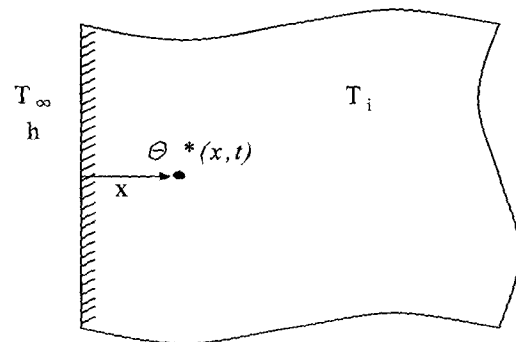


Fig. 2. Transient heat conduction in semi-infinite solid

$$x = \sqrt{at} \tag{8}$$

여기서 a 는 열확산계수로서 $a = k/(C_p \times \rho)$ 로 정의되며, C_p 와 ρ 는 각각 고체의 비열과 단위중량이다.

3.3 다차원에서의 비정상 열전도

앞 절에서 기술된 무차원 온도의 형태는 무한 평면벽이나 반무한 고체에서의 1차원 온도분포를 구하는데 사용되었다. 평면벽이나 반무한 고체에 대한 1차원 열전도의 해는 다양한 구조를 가진 고체의 2차, 3차원 전도에 대한 해를 구하는데 적용할 수 있다. 즉, product solution 방법을 적절하게 사용하면 원통, 무한 사각 막대기뿐만 아니라 사각 프리즘이나 반무한 사각 막대기와 같은 3차원 문제도 해결할 수 있다. 이 경우 모든 물체 표면은 동일한 온도인 유체에 노출되어야 하며, 동일한 열전달계수 그리고 내부의 열발생이 없어야 한다.

폭과 높이가 a 와 b 인 무한 사각막대기는 Fig. 3에 표현된 바와 같이 두께가 각각 a 와 b 인 두 개의 무한 평면벽의 교차로 생각할 수 있다. 이러한 다차원 문제의 해석은 교차부분이 다차원이 되는 1차원 해의 곱으로 나타낼 수 있다. 두 개나 세 개의 무한 또는 반무한대 기하학적 구조의 교차로 2차나 3차원 열전도해를 얻을 수 있는 수학적 배경은 편미분 방정식을 변수 분리법에 의해 구할 수 있다는 사실로부터 출발한다. 변수 분리법은 각 1차원의 경우에 대한 해의 곱이 결합된 고체를 이루기 위해 사용된 무한이나 반무한대 기하학적 구조 각각의 무차원 온도의 곱의 형태로 표시된다.

만일, 균일한 초기온도를 가진 무한 사각막대기가 시간 $t=0$ 에서, 온도가 T_∞ 이고 대류열전달계수가 h 인 유체에 노출되었다면, 사각봉 내부의 열전달은 좌우면과 상하면을 통해 동시에 이루어지기 때문에 x, y , 그리고 시간 t 에 따라 변하게 될 것이다. 따라서 사각봉 내부

의 온도분포는 $T(x, y, t)$ 가 되며 무차원온도 $\theta(x, y, t)$ 는 사각봉을 이루는 두 개의 무한평면벽의 무차원온도의 곱으로 표현될 수 있다.

$$\theta(x, y, t) = \theta(x, t)\theta(y, t) \tag{9}$$

같은 방법으로 육면체의 무차원온도는 세 개의 1차원 해를 곱하여 얻어진다.

$$\theta(x, y, z, t) = \theta(x, t)\theta(y, t)\theta(z, t) \tag{10}$$

4. 저장공동 주위의 온도분포 예측을 위한 이론해

4.1 2차원 온도분포 예측을 위한 이론해

저장공동 내에 저온가스가 저장되면 가스와 공벽 사이에서 대류에 의한 열전달이 발생한다. 저장된 가스에서 공벽으로 전달된 열은 전도를 통해 암반으로 전파하여 공동의 주위암반의 온도변화를 야기한다. 열원의 온도가 일정하게 유지될 때, 충분한 시간이 흐른 후의 열유동은 암반은 온도변화 없이 열전달만 발생하는 이른바 정상상태에 도달하게 된다.

일반적인 저장공동 주위의 2차원적 온도분포의 해는 공동의 단면을 원이나 아치형으로 단순화하는 것에서 시작한다. 이러한 방법은 이론적인 근거가 명확하고 비교적 간단한 식을 통해서 공벽에서 수직인 방향으로 온도분포를 예측할 수 있지만 실제 공동의 형상에서 볼 수 있는 모서리 부근에서의 온도분포를 예측하는데 무리가 있고 3차원으로 확장이 곤란하다. 본 연구에서는 저장공동 주위암반의 온도분포 예측을 위한 이론해를 도입하기 위해서 저장공동의 단면을 정사각형으로 단순화하였다. 이 때, 대상 암반이 열적인 등방성을 갖는다고 가정하면 대상 암반의 온도변화는 공동의 중심을 기준으로 대칭이 된다. 따라서 대상 모델의 1/4부분만

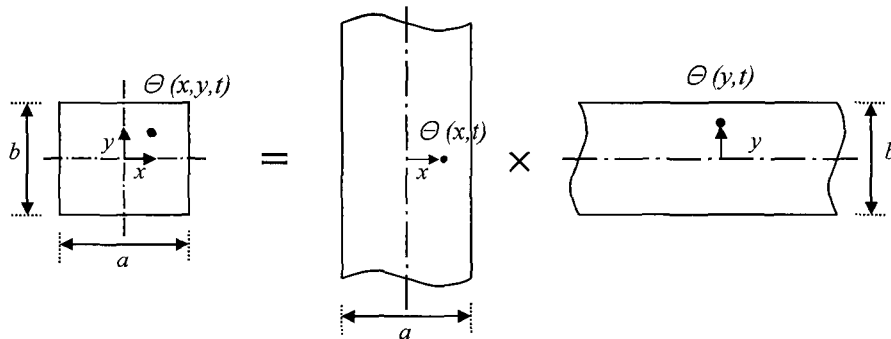


Fig. 3. Transient heat conduction in multi-dimensional system

Table 1. Computational procedure for 3-D analytic solution

대상 위치	대상 온도	매질의 초기온도	열원의 온도	열전달 시간	적용 이론
b (a')	T(b,t)	T(x,t)	T _i	t'	반무한 고체 이론
a	T(a,t)	T(x,t)	T(b,t)	t'	반무한 고체 이론
c (a'')	T(c,t)	T _i	T(b,t)	t	다차원 이론(2D)
b'	T(b',t)	T(x,t)	T _i	t'	다차원 이론(2D)
c' (b'')	T(c',t)	T _i	T(b',t)	t	다차원 이론(2D)
c''	T(c'',t)	T _i	T(c',t)	t	다차원 이론(3D)

는 면($\square acc'a''$)에서 공벽의 중심선 위에 있는 선 ($\overline{ac} = \overline{aa''}$)의 온도분포는 전 절의 2차원 이론해와 같은 방법을 이용하고 나머지 부분은 다차원 열전달 이론을 적용하였다. 2차원 이론해의 경우와 동일하게 온도분포를 구하고자 하는 면은 그 면과 평행한 공벽의 영향만을 받으며 열전달은 각 축방향으로만 일어난다고 가정하였다.

대상 면($\square acc'a''$)의 각 시간별 온도분포를 예측하기 위해서 각 단계별로 비정상 열전도 이론을 다음과 같이 적용하였다. 반무한 고체의 열전달 이론에 의하면 공벽에서 x 만큼 평행이동한 면($\square abb'a'$)의 t 시간 후의 온도는 $T(x, t)$ 이다. 그러나 열원이 무한하지 않으므로 $\square abb'a'$ 의 온도는 주변의 온도에 영향을 받는다. 따라서 $\square abb'a'$ 의 온도를 $T(x, t)$ 라하고 주변 암반의 초기온도 (T_i)에 의한 온도상승을 계산한다. 그 다음으로 다차원 열전달 이론을 적용하여 c, c', c'' 의 온도를 추정한다. 이러한 일련의 과정을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 t' 은 식 (8)에 의해서 $t' = x^2/\alpha$ 로 주어지며 x 를 열침투 깊이로 가정하였다. Matlab을 이용하여 Table 1의 모든 과정을 수행할 수 있는 프로그램을 작성하였다.

작성된 프로그램을 이용하여 폭이 5 m인 액화가스 저장공동이 초기온도 12°C인 암반내에 건설되었을 때의 공동 주위의 온도분포를 예측하였다. 또한, 공동의 크기에 따른 영향을 분석하기 위해서 동일한 조건하에서 공동의 폭이 각각 10 m와 15 m인 공동에 대하여 온도분포를 추정하였다. 단, 다차원 열전달 이론이 적용된 영역은 공동의 크기에 관계없이 일정하며, 반무한 고체 이론이 적용된 a 위치의 온도만이 공동의 크기에 영향을 받게 된다.

5. 온도분포 예측 결과

5.1 2차원 온도분포 예측 결과

제안된 2차원의 이론해를 이용하여 온도가 -50°C인

가스가 초기온도 12°C인 암반내에 저장되었을 때의 온도분포를 예측하였다. 공동의 폭을 5 m로 설정하고 공벽으로부터 0 m, 1 m, 2 m, 4 m, 6 m의 거리에 있는 \overline{ac} 의 온도분포를 추정하였다. 또한, 열유속 경계조건을 적용한 FLAC 수치해석을 통해 온도분포를 예측하였으며, 이론해와 수치해의 결과를 비교하기 위해서 a, b, c 위치에서의 온도를 Fig. 6, 7, 8과 같이 도시하였다.

비정상 열전도 이론을 응용한 이론해는 a 의 위치에서 수치해석과 매우 근접한 결과를 나타냈다. 특히, 공벽에서와 공벽으로부터 거리 4 m, 6 m인 위치에서는 이론해와 수치해석 결과의 오차가 1.1°C 이하로 거의 일치하는 결과를 얻었다. 한편, 이론해는 공벽($x = 0$)에서는 위치에 관계없이 같은 온도를 예측하게 된다. 공벽에서는 b 와 c 가 같은 위치에 있으므로 거리(x)가 0으로 입력되기 때문에 주위암반의 초기온도에 의한

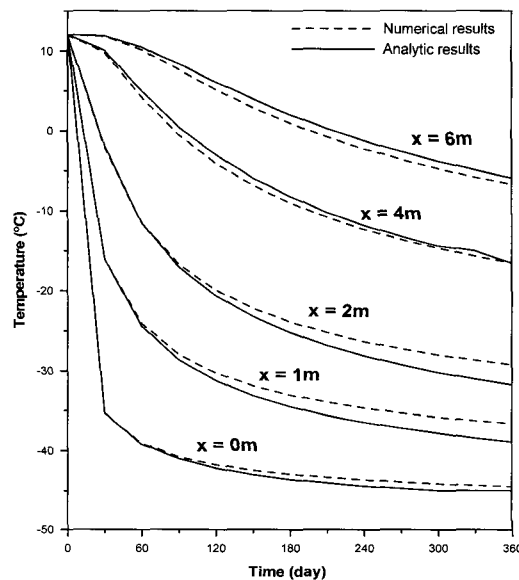


Fig. 6. Temperature change with time at point a

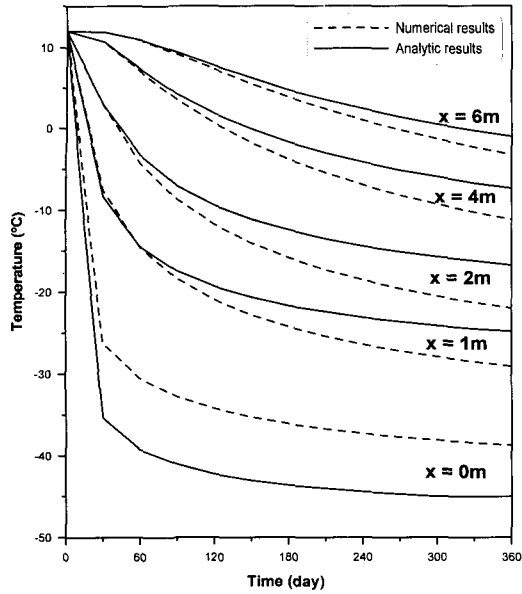


Fig. 7. Temperature change with time at point *b*

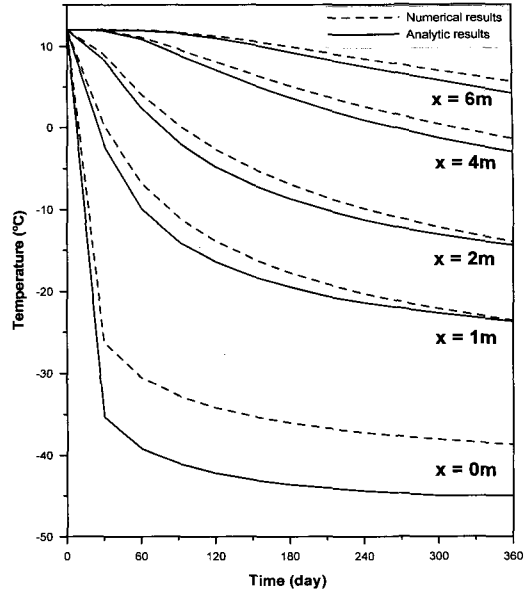


Fig. 8. Temperature change with time at point *c*

Table 2. Temperature profile after 90 days cooling

거리 (m)	해석방법	온도 (°C)					
		a	b	b'	c	c'	c''
1	이론해	-28.6	-17.4	-13.9	-9.3	-6.7	-6
	수치해	-27.4	-18.3	-10.3	-10.7	-4.1	-0.1
2	이론해	-17	-7	-1.8	-0.3	3.1	4.4
	수치해	-15.9	-8.3	-2.3	0.7	4.3	7.7
4	이론해	0.5	4.2	9	7.4	10.3	11.1
	수치해	0.1	3.9	6.5	9.8	10.6	11.6
6	이론해	8.4	9.4	11.6	10.5	11.8	12
	수치해	7.9	9.3	10.2	11.7	11.8	12

온도 상승 효과를 받지 못하기 때문이다. 이러한 원인으로 *b*에서 이론해는 수치해석과 최대 9°C 정도의 온도차이를 보였으며, *c*에서도 비슷한 경향이 나타났다.

*a*의 위치에서는 냉각 초기에는 이론해와 수치해가 비슷한 결과를 보였지만 시간이 흐름에 따라 두 모델의 오차는 커졌다. *b* 위치에서는 전체적으로 이론해가 더 높은 온도분포를 보였다. 이는 이론해가 측벽 외에 다른 열원 즉, 공동의 천반에서 발생하는 열전달을 고려하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. *c*에서는 최대 오차 3.1°C 이하로 나타나 두 결과가 어느 정도 근접하다고 할 수 있으나, 전체적으로 이론해가 수치해보다 더 낮은 온도를 예측하였다.

이론해의 도출과정에서 오직 *c* 위치에서만 측벽과 다른 열원 즉, 천반의 영향이 고려된다. 따라서 *c* 위치에서는 2개의 열원의 영향을 받았기 때문에 상대적으로 낮은 온도를 예측하였고 *b*의 위치에서는 단일 열원(측벽)만이 고려되어 높은 온도를 예측하였다는 가설을 세울 수 있다.

5.2 3차원 온도분포 예측 결과

비정상 열전도 이론을 응용한 이론해의 적용성을 평가하기 위해서 FLAC3D를 통한 수치해석의 결과와 비교하였다. 폭이 5 m인 정사각형 공동에 -50°C의 가스가 저장되었을 때, 공벽으로부터 거리가 0~6 m인 주요 지

점에서 냉각 시간이 각각 90일, 180일, 360일 후의 온도를 다음 Table 2, 3, 4에 나타내었다. 한편, Fig. 9, 10은 각각 360일 후, 이론해와 수치해를 통해 예측된 공벽에서 4 m 떨어진 면의 온도분포이다.

이론해와 수치해는 해석 온도범위(-50~12℃)의 5% 이내의 오차를 보여 이론해의 타당성이 확인되었다. 특히, 냉각 시간이 길어져 정상상태에 다다를수록 두 결과의 차이가 작게 나타났다. 하지만 거리나 시간에 따

Table 3. Temperature profile after 180 days cooling

거리 (m)	해석방법	온도 (℃)					
		a	b	b'	c	c'	c''
1	이론해	-34.5	-21.5	-19.5	-12.4	-10.8	-10.5
	수치해	-31.8	-23.2	-15.3	-16.4	-9.5	-5.4
2	이론해	-25.2	-12.4	-8.7	-3.8	-1.4	-0.6
	수치해	-22.2	-14.4	-7.8	-5.4	-0.8	3.4
4	이론해	-8.2	-1.7	3.7	3.9	7.1	8.3
	수치해	-7.1	-2.2	1.6	6.1	7.7	10.1
6	이론해	2	4.8	9.3	7.9	10.5	11.2
	수치해	2.3	4.9	6.8	10.3	10.8	11.7

Table 4. Temperature profile after 360 days cooling

거리 (m)	해석방법	온도 (℃)					
		a	b	b'	c	c'	c''
1	이론해	-38.9	-24.8	-23.7	-14.7	-13.8	-13.7
	수치해	-34.6	-26.9	-19.5	-20.9	-14.2	-10.4
2	이론해	-31.7	-16.7	-14.4	-6.5	-5.1	-4.7
	수치해	-26.4	-19.1	-12.7	-10.8	-5.9	-1.6
4	이론해	-16.5	-7.3	-3	0.6	3.1	4.1
	수치해	-12.9	-7.8	-3.7	1.3	3.5	7.1
6	이론해	-5.9	-1	4.2	4.6	7.6	8.7
	수치해	-3.4	-0.3	2.2	7.2	8.2	10.4

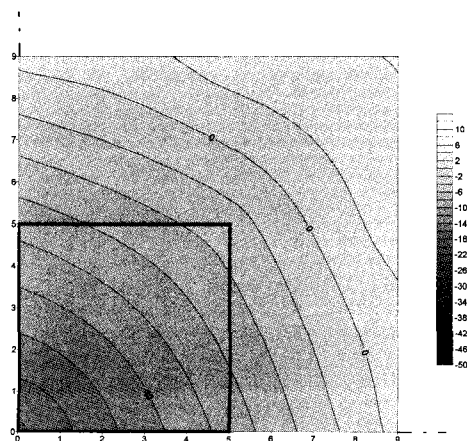


Fig. 9. Temperature distribution of the plane of 4m from the wall after 360 days by analytic solution

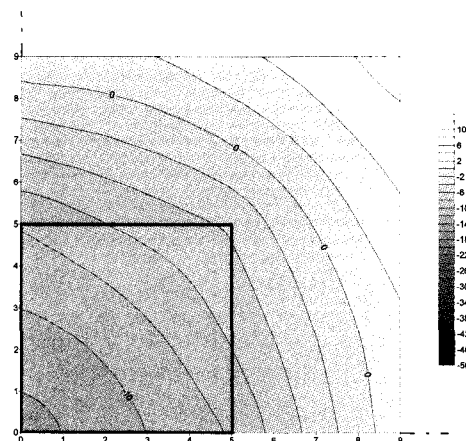


Fig. 10. Temperature distribution of the plane of 4m from the wall after 360 days by numerical solution

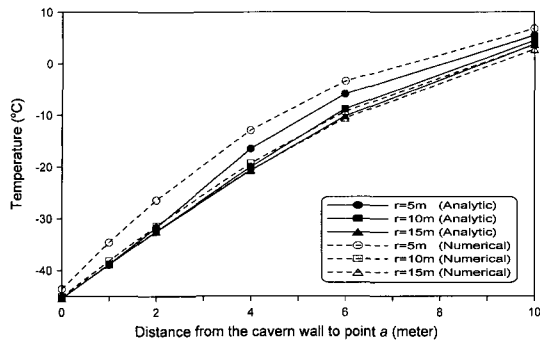


Fig. 11. The effect of cavern size on the temperature at point *a*

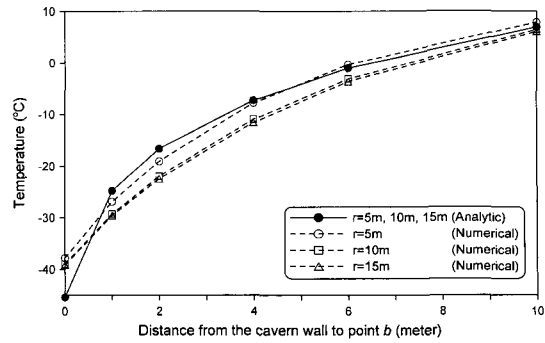


Fig. 12. The effect of cavern size on the temperature at point *b*

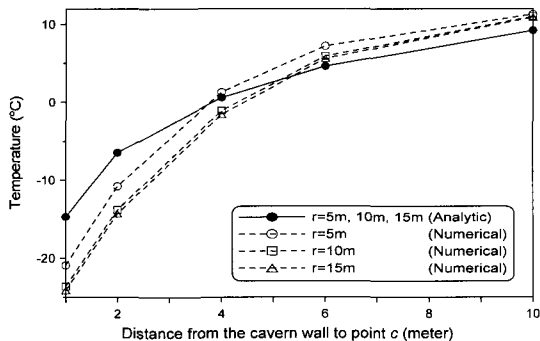


Fig. 13. The effect of cavern size on the temperature at point *c*

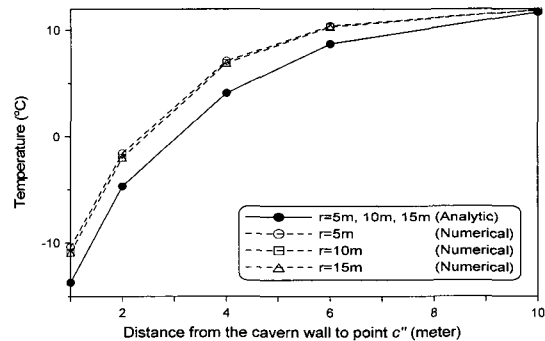


Fig. 14. The effect of cavern size on the temperature at point *c''*

른 온도변화 양상에는 특정한 경향을 찾기 어려웠다. 공동의 크기에 대한 영향을 분석하기 위해서 공동의 폭이 각각 5 m, 10 m, 15 m인 공동 주위의 온도분포를 이론해와 수치해를 이용하여 추정하였다. 각 위치에서 360일 후의 거리별 온도변화를 Fig. 11, 12, 13, 14에 도시하였다. 이론해는 해석 과정상 주위암반의 초기온도에 의한 영향이 고려된다. 이 때 *a*의 위치에서는 공동의 크기에 영향을 받지만 나머지 위치에서는 공동의 크기와 관계없이 모두 같은 온도를 예측하게 된다.

수치해석의 온도분포 예측 결과에 의하면 *a*의 위치에서 공동의 크기에 따라 가장 큰 온도 차이를 보이며, *b*와 *c*에서는 공동 크기의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 한편, *c''* 위치에서 수치해석에 의한 온도분포는 공동의 크기에 대한 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

a 위치에서는 공동의 크기가 클수록 이론해와 수치해의 결과가 근접한 양상을 보인 반면, *b*에서는 공동의 크기가 작을 때 두 결과가 더 유사하였다. 한편, *c*에서는 거리에 따라 두 결과가 다른 양상을 보였다. 즉, 이론해와 수치해의 결과는 공벽에서 5 m 이내의 거리

에서는 공동의 크기가 작을 때, 거리가 5 m 이상인 경우에는 공동의 크기가 클수록 유사하였다. *c''*에서 수치해는 공동의 크기와 관계없이 거의 같은 온도분포를 보였으며 이론해는 수치해보다 더 낮은 온도분포를 예측하였다.

6. 결 론

저온가스 저장공동 주위암반의 2차원 및 3차원적 온도분포를 예측하기 위하여 공동의 형상을 단순화하고 비정상 열전도 이론해를 응용한 이론적 방법을 제시하였다. 이론해를 통한 온도분포 예측 결과와 수치해석을 통한 온도분포 예측 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

2차원 온도분포를 예측한 결과, *a*와 *c*위치에서는 이론해와 수치해는 약 3°C 이내의 비슷한 온도분포 결과를 보였다. 그러나 *b*의 위치에서는 최대 9°C까지의 온도차이를 보이는데 이는 열원으로 작용하는 공벽의 중첩효과에 의한 것으로 판단된다. 이론해의 도출과정에서 *c*위치에서만 측벽과 다른 열원 즉, 천반의 영향이

고려되므로 *c* 위치에서는 2개의 열원의 영향을 받았기 때문에 상대적으로 낮은 온도가 예측되었고 *b* 위치에서는 단일 열원(측벽)만이 고려되어 수치해보다 높은 온도를 예측되었다고 사료된다.

비정상 열전도 이론이 적용된 이론해를 통해 공동 주위의 3차원적 온도분포를 예측한 결과는 수치해석에 의한 온도분포 결과와 총 해석 온도범위의 5% 이내의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이론해는 공동형상의 단순화와 물성 자료의 입력만으로 빠르고 간편하게 온도분포를 추정할 수 있으므로 건설 초기단계에서 온도분포 예측을 위해 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

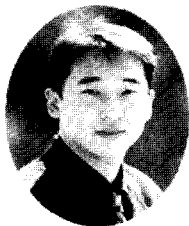
본 연구는 저온가스 지하저장시 발생할 수 있는 열응력과 열충격을 분석하기 위해서 공동 주변의 온도분포를 예측할 수 있는 이론적인 방법을 개발하기 위해서 수행되었다. 비정상 열전도 이론을 응용한 이론해는 다른 방법보다 신속하게 온도분포를 예측할 수 있다. 그러나 이론해의 도출과정에서 몇 가지 입력변수의 모호함과 공동의 기하학적 단순화 등의 가정으로 인해서 다소 비합리적인 온도구배를 보이기도 하였다. 이러한 점은 해석 온도범위, 공동의 크기, 공벽으로부터 거리 등에 대한 정량적인 연구를 통해서 보완되어야 할 것으로 판단된다.

향후 제한된 열원을 가지는 반무한 고체의 열전도 이론과 다차원 시스템에서 각 표면에 서로 다른 온도의 열원을 가지는 경우에 대한 이론이 수립된다면 보다 실제적인 공동의 형상과 암반의 열적 이방성을 고려한 해석이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김호영, Eric Amantini, Emmanuel Chanfreau, 2003, 대전 동굴식 LNG 지하저장 Pilot Project, 한국지구시스템공학회지, 40.2, 140-145.
2. 신중호, 박연준, 김호영, 박찬, 1999, 아치형 냉동저장공동 주위암반의 비정상상태 열전도 특성 및 열물성 평가, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 9.1, 27-35.
3. 이대혁, 김호영, 2002, 냉동저장 공동 주변의 온도분포 예측을 위한 해석해 및 수치모델 적용에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 12.3, 142-151.
4. Claesson J., 2001, Thermoelastic Solution outside a Spherical Cavity, Department of Building Physics, Chalmers University of Technology, Sweden.
5. Hagen K. D., 1999, Heat transfer with applications, Prentice-Hall.
6. SK 건설주식회사, 1997, 에너지 절약형 지하 냉장 및 냉동 저장 설계기술개발에 관한 최종보고서, 통산산업부.
7. Yunus A. C, 1999, Heat transfer; A practical approach, McGraw-Hill.

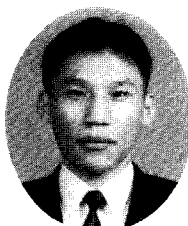
이 양



2002년 한양대학교 지구환경건설공학부
공학사
2004년 한양대학교 지구환경시스템공학과
공학석사

Tel: 042-868-2071
E-mail: ex-neroyang@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처
분연구팀 연구원

이 승 도



1993년 한양대학교 자원공학과 공학사
1995년 한양대학교 암반공학 공학석사
2002년 Imperial College Earth Sci. &
Eng., Ph.D.

Tel: 02-2145-6014
E-mail: engrockmech@hotmail.com
현재 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀
과장

문 현 구



1974년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1983년 Univ. of Utah 암석역학 공학석사
1987년 Univ. of Utah 암석역학 공학박사

Tel: 02-2290-0413
E-mail: hkmoon@hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 지구환경시스템공학과
교수