사일로 구조형식 중저준위 방폐물 처분동굴의 유한요소 해석

김 선 훈^{1†} · 김 광 진²

¹유원대학교 토목환경공학과 교수, ²컴팩리서치 대표

Finite Element Analysis of Silo Type Underground Opening for LILW Disposal Facility

Sun-Hoon Kim^{1†} and Kwang-Jin Kim²

¹Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, U1 University, Yeongdong, 29131, Korea

²Principal Engineer, COMTEC RESEARCH, Seoul, 06650, Korea

Abstract

Finite element analysis of the silo type underground opening for low- and intermediate-level radioactive waste (LILW) disposal facilities in Korea is presented in this study. The silo wall is circular and the roof is made up of domes. The silo wall is 25 meters in diameter, 35 meters in height, and the dome is 30 meters in diameter and 17.4 meters in height, and it is located at -80 meters to -130 meters at sea level. Although six silos have been constructed in the first stage and are in operation, only one silo was considered in this study. The two-dimensional axial symmetric finite element model, as well as the three-dimensional finite element model were made using the computer program SMAP-3D. Generalized Hoek and Brown Model was used for the numerical analyses. The finite element analysis of the silo type underground opening was carried out under various lateral pressure coefficients (defined as ratio of average horizontal to vertical in-situ stress), and the numerical results of these analyses were examined.

Keywords : finite element analysis, silo, lateral pressure coefficient, excavation, deviatoric stress

1. 서론

지난 2005년 경상북도 경주시가 중저준위 방폐물 처분장의 최종 후보로 선정되었고 2008년 경주시 양북면에 방폐물처분장의 1단계 시설의 건설이 착수되어 2014년 말에 완공되었다(KORAD, 2018). 현재 경주 방폐물 처분장에는 사일로 타입의 1단계 동굴처분시설이 운영되고 있으며, 2단계 표층처분시설의 건설이 조만간 착수될 것으로 예상된다. 또한 고리 1호기의 영구 정지가 결정되어 연료봉 반출 작업을 마치고, 본격적인 해체 작업에 돌입할 예정이다. 고리 1호기의 해체 작업은 사용 후핵연료를 빼내고, 원자력 발전소 내부의 방사성 물질들을 제거한 후에 구조물을 철거한 뒤 땅을 복원하는 긴 과정을 거쳐야 하므로 15년 이상 소요될 것으로 예측된다. 또한 정부의 탈핵 정책 추진으로 향후 중저준위 방폐물의 증가가 예상되어 방폐물처분장의 추가적인 확충을 위해 3단계 매립형처분시설

의 건설도 계획하고 있다. 경주 방폐물 처분장은 내외부의 발생가능한 다양한 재난·재해 요인에 대해서도 건설 및 운영기간 동안 안전성 확보는 물론이고 폐쇄후에도 장기 안전성이 충분히 확보되어야 한다(KINS, 2011). 특히 2016년과 2017년에 경주와 포항에서 국내 최대 규모의 지진이 연이어 발생하여 인근 지역에서 가동되고 있는 원자력발전소와 경주 방폐물 처분장의 내진 안전성에 대한 관심이 매우 높다.

본 논문에서는 경주 방폐물 처분장 1단계 동굴처분시설의 구조적 안전성 검토를 위한 유한요소 모델링과 해석에 대한 내용을 다루고 있다. 동굴처분시설의 주변 지반체의 공학적 물성치 현황 및 조사자료, 사일로 타입 동굴처분시설의 공학적 방벽 주요 특성 등을 소개하였다. 또한 현재까지 수집한 지반 조사자료 및 사일로 동굴처분시설의 기본 자료들을 바탕으로 하여 수립한 사일로 동굴처분시설 및 주변 지반체의 유한요소 모델링 결과를 제시하였다. 2차원 축대칭 유한요소 모델링 및

[†]Corresponding author:

Tel: +82-43-740-1171; E-mail: kimsh@yd.ac.kr

Received August 18 2021; Revised August 27 2021;

Accepted August 30 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

3차원 유한요소 모델링은 SMAP-3D 프로그램을 사용하였다(Comtec Research, 2019; Kim, 2013). 사일로 중저준위 방폐물 처분동굴의 주변 지반체 측압계수 변화에 따른 유한요소해석을 수행하였다. 본 논문에서 제시한 연구결과는 향후 사일로 동굴처분시설의 구조거동해석 및 내진해석 등의 수행을 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

2. 중저준위 방폐물 처분동굴

2.1 사일로 구조

경주 방폐물 처분장의 지하시설은 사일로, 건설동굴, 운영동굴, 연결동굴, 하역동굴, 수직출입구 등으로 구성되어 있으며 Fig. 1에서 보는 바와 같다(KORAD, 2018). 사일로는 중저준위 방폐물 10만 드럼을 저장할 수 있는 용량으로 모두 6개가 건설되어 운영되고 있으며, 해수면에서 -80m~130m에 걸쳐 위치한다(Fig. 2 참조)(Park *et al.*, 2009).

사일로 형식의 중저준위 방폐물 처분동굴은 방폐물 처분 드럼이 저장되는 원통형의 하부(직경 23.6m, 높이 36m)와 폐쇄 후에 잠석으로 채워지는 공간인 돔형의 상부(직경 30m, 높이 17.4m)의 2개 부분으로 구성되었다(KINS, 2011)(Fig. 3 참조).

Fig. 1 Layout of gyeongju LILW in Korea

Fig. 2 Side view of LILW facilities

2.2 사일로 주변 지반체 물성치

지반조사결과 사일로 주변 지반체의 평균 수평응력과 수직응력의 비를 나타내는 측압계수값(K_0)은 1.17~1.92 사이의 값을 보여주고 있다(Shin and Lee, 2017). 따라서 본 연구에서는 측압계수값을 0.5, 1.0, 2.0의 3가지 경우에 대해 검토하였다. 사일로 주변 지반체의 재료특성값은 Table 1에 나타난 바와 같다(Kim *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2012).

2.3 지반체 재료의 구성 모델

본 연구의 유한요소해석에서는 지반체 재료의 구성 모델로서 Generalized Hoek and Brown(Hoek and Brown, 1984; Kim *et al.*, 1987)을 사용하였다. Generalized Hoek and Brown Model의 파괴표면(failure surface)은 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$F(p, q, \theta) = q - [(\alpha + \beta p)^n + \kappa] R(\theta) = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 p , q , θ 는 각각 응력불변치(stress invariant)로 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$p = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (1a)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - p \cdot \delta_{ij} \quad (1b)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \quad (1c)$$

$$q = \sqrt{3J_2} \quad (1d)$$

Fig. 3 Concept of silo type underground disposal opening after closure

Table 1 Material properties of geomaterials

Ground Layer	Unit weight (t/m ³)	Young's modulus (t/m ²)	Poisson's ratio	Internal Friction Angle (Degree)
Weathered Soil	1.90	0.126×10 ⁶	0.33	30°
Weathering Rock	2.10	0.349×10 ⁶	0.30	38°
Rock	2.69	8.420×10 ⁶	0.27	43°

$$\theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left(-\frac{27}{2} \frac{J_3}{q^3} \right) \quad (1e)$$

식 (1a)~(1e)에서 σ_{ij} 는 전응력텐서(total stress tensor)를 의미하고, S_{ij} 는 편차응력(deviatoric stress tensor)를 나타낸다.

식 (1)에서 함수 $R(\theta)$ 는 8면체 평면에 투영된 항복표면의 형상을 나타낸다. 지반체 재료의 구성모델에 대한 보다 자세한 내용은 Kim 등(1987) 및 Kim과 Kim(2000)에서 볼 수 있다.

3. 처분동굴의 유한요소해석

3.1 유한요소모델링

경주 중저준위 방폐물 처분장에는 1단계 동굴처분시설로서 모두 6개의 사일로 처분동굴이 건설되어 운영 중에 있으나 본 연구에서는 1개의 처분동굴만을 고려하여 모델링하였다. 처분동굴의 굴착으로 인한 주변 지반체의 응력이완을 충분히 고려하기 위하여 해석영역은 수평방향으로는 처분동굴 직경의 10배까지 고려하였으며, 수직방향으로는 지표면부터 사일로 바닥에서 사일로 높이의 5배까지로 설정하였다. 축대칭요소를 사용하여 사일로 처분동굴의 굴착전 전체 유한요소모델을 Fig. 4(a)에 나타내었고, 처분동굴 주변 유한요소모델을 Fig. 4(b)에 나타내었다.

사일로 처분동굴의 굴착전 전체 해석영역의 Rendering 모델은 Fig. 5(a)에 나타내었으며, 처분동굴 주변 유한요소모델의 Rendering 모델은 Fig. 5(b)에 나타내었다.

사일로 처분동굴의 굴착후 3차원 해석모델은 Fig. 6에 나타내었다. 수평방향 및 수직방향 해석영역의 크기는 Fig. 4(a)와 동일하며, 대칭성을 고려하여 두께방향으로는 처분동굴 직경의 10배까지 모델링하였다. 해석모델의 경계조건은 측면 및 하부면은 롤러조건을 적용하였다. 굴착후 사일로 구조의 3차

원 유한요소모델은 Fig. 7에 나타낸 바와 같다.

실제 사일로 처분동굴의 건설과정에서 사일로는 단계별로 굴착되었으나, 본 연구에서는 사일로 전체를 한꺼번에 굴착한 것으로 가정하였다. 또한 지반의 축압계수 변화에 따른 사일로 주변 지반체의 응력변화를 검토하기 위해 사일로의 라이너구조체 및 쇼크리트는 지반체와 일체로 가정하여 모델링하였다.

사일로의 굴착후 주변 지반체에서의 변위 및 응력을 검토하기 위하여 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 주요 위치를 설정하였다.

(a) 2-D total model after excavation

(b) 2-D close-up model before excavation

Fig. 5 2-D finite element rendering model

(a) Total Model

(b) Close-up model

Fig. 4 2-D axial symmetric finite element model before excavation

Fig. 6 3-D Finite element model after excavation

Fig. 7 3-D model for silo after excavation

Fig. 8 Key location for displacements and stresses

3.2 수치해석결과

2차원 축대칭 유한요소해석과 3차원 유한요소해석을 수행하여 Fig. 8에 제시된 주요 위치에서 변위값을 비교하였으며 모든 위치에서 거의 일치하는 결과를 보여주었다(Table 2 참조).

따라서 2차원 해석모델과 3차원 해석모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

사일로 주변 지반체의 측압계수 변화에 따른 사일로 굴착후 변형 형상을 Fig. 9에 나타내었다. $K_0=0.5$ 와 1.0 에서는 사일로 바닥면의 중심에서 수직변위값이 가장 크게 나타났으며, $K_0=2.0$ 에서는 사일로의 벽면의 중앙부에서 수평변위값이 가장 크게 나타났다.

사일로 주변 지반체의 측압계수 변화에 따른 사일로 굴착후 주응력분포를 Fig. 10에 나타내었다. 그리고 Fig. 8에 제시된 주요 위치에서 굴착후 평균 압력과 편차응력 사이의 관계를 Figs. 11~13에 나타내었다. $K_0=1.0$ 의 경우 C5(돔과 벽체가 만나는 지점의 수평방향 Line)와 D6(벽체 중앙지점의 수평방향 Line)에서 평균 압력과 편차응력 사이의 관계값이 Mohr-Coulomb 인장모드에 근접하는 결과를 보여주었다(Fig. 12(a) 참조). $K_0=2.0$ 의 경우 C5(돔과 벽체가 만나는 지점의 수평방향 Line)에서 평균 압력과 편차응력 사이의 관계값은 Mohr-Coulomb 인장모드를 넘어 압축모드에 근접하였으며, D6(벽체 중앙지점의 수평방향 Line)에서 평균 압력과 편차응력 사이의 관계값은 Mohr-Coulomb 인장모드에 근접하는 결과를 보여주었다(Fig. 13 참조). 따라서 $K_0=2.0$ 의 경우 이들 위치에서는 지반체의 파괴 가능성이 높을 것으로 예상되어 보다 정밀한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

Table 2 Comparison of displacements at key locations between 2-D and 3-D analyses

Locations (Node)	Displacement (mm)	$K_0=0.5$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$
A(36)	Radial	0.0	0.0	0.0
	Vertical	-0.489 (-0.485)	-0.379 (-0.375)	-0.158 (-0.153)
B(46)	Radial	-0.078 (-0.076)	-0.234 (-0.230)	-0.547 (-0.538)
	Vertical	-0.321 (-0.318)	-0.235 (-0.234)	-0.064 (-0.064)
C(85)	Radial	-0.209 (-0.208)	-0.542 (-0.540)	-1.208 (-1.205)
	Vertical	0.286 (0.284)	0.285 (0.284)	0.283 (0.283)
D(167)	Radial	-0.319 (-0.318)	-0.652 (-0.651)	-1.320 (-1.316)
	Vertical	0.087 (0.087)	0.070 (0.070)	0.037 (0.038)
E(191)	Radial	-0.067 (-0.067)	-0.191 (-0.191)	-0.439 (-0.438)
	Vertical	0.282 (0.281)	0.206 (0.206)	0.054 (0.055)
F(107)	Radial	0.0	0.0	0.0
	Vertical	0.850 (0.848)	0.786 (0.785)	0.659 (0.658)

Note: 3-D analysis results are in ()

Note: Displacements are 5000 times magnified

Fig. 9 Deformed shape after excavation

Fig. 10 Major principal stress distribution after excavation

Fig. 11 Stress state along the line line C5 and D6($K_0=0.5$)

(a) Line C5

(b) Line D6

Fig. 12 Stress state along the line line C5 and D6(Ko=1.0)

(a) Line C5

(b) Line D6

Fig. 13 Stress state along the line line C5 and D6(Ko=2.0)

4. 결 론

본 연구에서는 중저준위 방폐물 처분을 위한 사일로 형식의 지하 처분동굴의 주변 지반체의 거동변화 및 응력분포를 파악하고자 수치해석을 실시하였다. 처분시설 주변 지반체 축압계수의 변화에 따른 사일로 처분동굴의 굴착후 2차원 축대칭 유한요소해석 결과와 3차원 유한요소해석 결과를 비교해 본 결과 모든 위치에서 변위값은 거의 일치하여 해석모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

Ko=1.0의 경우 돔과 벽체가 만나는 지점의 수평방향 Line과 벽체 중앙지점의 수평방향Line에서 평균 압력과 편차응력 사이의 관계값은 Mohr-Coulomb 인장모드에 근접하는 결과를 보여주었다. Ko=2.0의 경우 돔과 벽체가 만나는 지점의 수평방향 Line에서 평균 압력과 편차응력 사이의 관계값은 Mohr-

Coulomb 인장모드를 넘어 압축모드에 근접하였으며, 벽체 중앙지점의 수평방향Line에서 평균 압력과 편차응력 사이의 관계값은 Mohr-Coulomb 인장모드에 근접하는 결과를 보여주었다.

본 논문에서 제시한 연구결과는 향후 사일로 동굴처분시설의 구조거동해석 및 내진해석 등의 수행을 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2019 에너지기술개발사업의 지원으로 수행되고 있는 과제(과제번호: 20193210100040) 내용의 일부를 요약 정리한 것입니다. 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원의 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Comtec Research** (2019) SMAP-3D Version 7 Manual.
- Hoek, E., Brown, E.T.** (1984) *Underground Excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy: London.
- Kim, K.J., Piepenburg, D.D., Merkle, D.H.** (1987) Influence of the Intermediate Principal Stress on Rock Tunnel Behavior, *Proc. of 2nd Int. Conf. on Constitutive Laws in Engineering Materials*, Tucson, AZ.
- Kim, M.K., Choi, I.K., Jeong, J.** (2011) Development of a Seismic Risk Assessment System for Low and Intermediate Level Radioactive Waste Repository – Current Status of Year 1 Research, *WM2011 Conference*, Phoenix, AZ.
- Kim, S.H.** (2013) Finite Element Analysis of Underground Electrical Power Cable Structures Considering the Effects of Construction Sequence, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26(2), pp.147~155.
- Kim, S.H., Kim, K.J.** (2000) Two-phase Finite Element Procedures for Dynamic Analysis of Saturated Porous Media, *Eng. Comput.*, 17(7), pp.758~774.
- KINS** (2011) The Investigation and Analysis for Stability Evaluation and a Verification Process Establishment of a Gyeongju Radioactive Waste Disposal Facility Silo Structure, pp.1~28.
- KORAD** (2018) Earth & Us, Korea Radioactive Waste Agency.
- Park, J.B., et al.** (2009) Wolsong Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Center: Progress and Challenges, *Nucl. Eng. & Technol.*, 41(4), pp.1~16.
- Park, J.H., Kim, M.K., Choi, I.K.** (2012) Seismic Fragility Evaluation of Surface Facilities Structures in Intermediate Low-Level Radioactive Waste Repository, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25(1), pp.57~64.
- Shin, Y.L., Lee, J.W.** (2017) The Status and Experiences of LILW Disposal Facility Construction, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, 54(4), pp.389~396.

요 지

본 논문에서는 우리나라의 중저준위 방폐물 처분을 위한 사일로 형식 지하동굴의 유한요소해석을 수행하였다. 사일로의 벽체부분은 지름 25m의 원형구조이고, 높이는 35m이다. 사일로의 천장부분은 지름 30m의 돔 형식이고, 높이 17.4m의 규모이다. 사일로는 해수면으로부터 -80m에서 -130m에 위치하고 있다. 중저준위 방폐물 처분 1단계 시설로 6개의 사일로는 건설되어 운영되고 있으나, 본 연구에서는 1개의 사일로는에 대해서 고려하였다. SMAP-3D 프로그램을 사용하여 2차원 축대칭 유한요소모델과 3차원 유한요소모델을 생성하였다. Generalized Hoek and Brown Model이 수치해석에 적용되었다. 다양한 축압계수(수평방향 현장응력과 수직방향 현장응력의 비)의 변화에 따른 사일로 형식 지하동굴의 유한요소해석을 수행하였으며, 수치해석결과 및 분석결과가 제시되었다.

핵심용어 : 유한요소해석, 사일로, 축압계수, 굴착, 편차응력