

터널해석을 위한 다양한 감쇠특성의 3차원 정적무한요소 개발

Development of 3-Dimensional Static Infinite Elements with Various Decay Characteristics for Tunnel Analysis

구희대* · 고현무**

Koo, Hee-Dae · Koh, Hyun-Moo

Abstract

Analysis problems of tunnels whose geometrical dimensions are very small compared with surrounding media can be treated as infinite region problems. In such cases, even if finite element models can be applied, excessive number of elements is required to obtain satisfactory accuracy. However, inaccurate results may be produced due to assumed artificial boundary conditions. To solve these problems, a hybrid model, which models the region of interest with finite elements and the surrounding infinite media with infinite elements, is introduced for the analysis of infinite region. Three-dimensional isoparametric infinite elements with various decay characteristics are formulated in this paper and the corresponding parameters are presented by means of parametric studies. Three-dimensional tunnel analysis performed on a representative example verifies the applicability of hybrid model using infinite elements.

Keywords : *isoparametric type; infinite element; tunnel analysis, decay function*

요 지

터널과 같이 구조물의 크기가 매질의 영역에 비하여 상대적으로 작은 경우와 같은 무한영역의 문제는 유한요소법을 적용하여 해석할 수 있으나 해석의 정밀도를 높이기 위해서는 해석영역을 크게 선정하게 되어 계산량이 증가하고, 인위적인 경계조건에 의한 오차의 영향을 피할 수 없다. 이를 개선하기 위해 관심영역은 유한요소로 모델링하고 무한영역은 무한요소로 모델링하는 혼합법을 적용하면 보다 효과적이다. 본 연구에서는 다양한 감쇠함수를 적용한 등매개변수형 무한요소를 제안하였고 매개변수해석을 통하여 터널해석에 적합한 감쇠함수의 특성치를 제시하였다. 또한 이를 적용한 3차원 혼합모델이 터널 해석에 유효함을 입증하였다.

핵심용어 : 등매개변수형, 정적무한요소, 터널해석, 감쇠함수

1. 서 론

터널 안정성 해석과 같은 지반공학 문제는 이론적으로는 무한영역의 문제는 아니지만 해석대상구조물에 비하여 주변의 매질이 거의 무한하게 존재하므로 무한영역의 문제로 간주되며, 경계조건이 명확하지 않은 특징이 있다.

이러한 무한영역을 다룬 대표적인 이론해로는 반무한체 위의 한점에 작용하는 연직하중에 대한 Boussinesq의 해, 평면변형 상태에서의 Flamant의 해 등이 있다. 이러한 이론해는 특정한 경우에 한하여 해가 주어질 수 있으며 일반적인 경우에 대해서는 이론해를 얻기는 힘들다. 이를 극복하기 위하여 수치해석적 방법이 꾸준히 시도되고 있으며 무한요소는 이들 방법 가운데 하나이다.

무한요소는 Ungless(1973)와 Bettess(1977)가 개념을 정립한 이후 탄성정력학 문제(Bettess, 1992), 탄성동력학 문제(김재

민, 1995), 지반변형 문제(이성민, 1996) 등의 적용에 많은 연구가 있었다. Bettess는 무한요소를 감쇠함수형(Decay function type)과 사상형(Mapped type)으로 제시하였다(Bettess, 1992). 감쇠함수형(Decay function type)은 변위형상함수를 무한영역에 맞는 감쇠함수를 적용한 방법이고, 사상형은 전역좌표계에서 국부좌표계로 형상함수를 이용한 변환을 사용하는 방법이다. 사상형의 무한요소는 Zienkiewicz형식을 제시하였다.

사상형의 무한요소에서 3차원 및 다양한 감쇠함수를 제시하고, 지반응력 문제에 적용한 연구가 있었다(Abdel-Fattah, 2000). 감쇠함수형식을 역수형(Reciprocal type), 지수형(Exponential type), 대수형(Logarithmic type)을 제시하였고, 지반문제를 역수형 무한요소를 적용한 혼합요소를 사용하여 1, 2차원 및 3차원 문제에 적용하였다.

터널 안정성해석에서 혼합요소의 적용에 관한 연구는, 터

* (주)삼안 철도구조부 부장(E-mail: hdkoo@samaneng.com)

** 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수(E-mail: hmkoh@snu.ac.kr)

널 2차원 해석에서 유한요소와 무한요소를 혼합하여 적용한 연구가 있다(이성민, 1996). 사용된 무한요소는 사상형의 Zienkiewicz 형식과 감쇠함수형 (Decay function type)의 두가지 무한요소가 적용되었다. 감쇠함수형 (Decay function type)의 명칭을 등매개변수형 무한요소(Isoparametric infinite element)로 사용하였다.

고광훈 등(1997)은 감쇠함수를 역수형의 일반적인 형태를 사용하여 다양한 감쇠특성을 나타내고자 하였고, 이를 표현하기 위하여 Laguerre 함수를 사용하였다. 2차원 원형터널문제에 적용한 결과 단순한 형태의 감쇠함수로 표현해도 됨을 알 수 있었다.

이와 같이 지반변형문제에서 무한요소를 구성하는 방법은 기하학적 형상함수를 사용하는 방법과 변위형상함수를 이용한 방법이 많이 사용되고 있다.

그리고 무한요소만을 사용하는 것보다 유한요소와 함께 사용하는 혼합법이 더 일반적이다. 해석대상구조물과 인접한 구간은 유한요소로 표현하며 나머지 지역은 무한요소로 표현한다. 이는 지반문제에서 소성해석 등에서 유한요소보다 적합하기 때문이다. 이와 같이 무한영역의 문제를 해결하기 위하여 혼합모델(Hybrid model)을 적용하면 관심영역은 유한요소로 관심영역 밖은 무한요소로 모델링하게 되어 요소수가 감소하여 계산의 효율이 높아지고 인위적인 경계를 사용하지 않게 되어 보다 계산의 정확도가 높아질 수 있다.

터널 안정성 해석 문제는 일반적으로 터널상부를 유한영역으로 하고 터널측면 및 하부방향과 터널 진행방향에 대해서는 무한영역을 가지는 반무한체 문제이다. 또한 시공공정을 감안하기 위하여 굴착, 지보재 설치의 과정을 모사하기 위하여 단계별 해석이 필요하다.

현재 설계실무에 많이 적용되는 터널 안정성 해석은 유한요소 해석법이나 유한차분 해석법이 사용되고 있다(지반공학회, 1996). 이러한 해석에서 해석영역은 통상 유한영역인 터널상부 지표면까지와 무한영역인 터널측면과 하부를 터널반경의 4~10배 정도의 영역을 해석범위로 정하고 있다. 그리고 경계조건은 측면은 힌지(Hinge)를 바닷은 롤러(Roller)를 대체로 적용하고 있다. 특히 도심지 터널굴착문제는 원역에 있는 건물의 침하문제를 다루어야 하며, 유한요소해석을 적용하는 경우에 원역에서는 경계조건으로 인하여 부정확한 결과를 나타낼 수 있다. 원역까지 좀더 정확하게 해석하려면 매우 넓은 해석영역이 필요하게 되고 3차원의 문제인 경우는 해석이 매우 어렵게 된다. 그러므로 원역에서도 정확한 거동을 해석할 수 있는 방법이 필요하고, 터널안정성 해석은 초기응력 상태를 비롯하여 시공단계별로 굴착, 지보재 설치, 탄소성해석 등의 반복 계산을 하므로 해석의 효율성을 증진시키기 위한 연구가 필요하다.

본 연구는 반무한체에서 3차원 무한요소의 적용성 검토 및 새로운 무한요소의 개발이 주목적이며 반무한체 문제를 지반문제 특히 터널안정성 해석 문제로 국한하였다. 터널은 NATM(New Austrian Tunneling Method)공법에 의해 건설된 것으로 가정하였으며, 고려하는 임반은 불연속면의 영향이 구조거동을 지배하지 않는 연속체역학에 의해 해석이 가능한 지반을 대상으로 하였다.

2. 무한요소의 강성행렬

2.1 무한요소의 개요

무한영역의 문제를 처리하기 위한 다양한 방법이 연구되어 왔으며 무한요소는 정식화 과정에 따라 변위감소(Displacement descent)와 좌표증가(Coordinate ascent)의 두가지 형식으로 대별된다. 이를 등매개변수형(Isoparametric)과 사상형(Mapped) 무한요소로 표현하기도 한다. 등매개변수형 무한요소는 변위형상함수를 새로 형성하여 무한영역에서 유한한 값을 가지도록 하는 방법이다. 변위형상함수는 기존의 기하학적 형상함수인 Lagrange형상함수나 Hermitian 형상함수에 감쇠함수(Decay function)를 곱하여 구해진다. 반면, 사상형 무한요소는 기하학적 형상함수를 사용하여 전체좌표를 국부좌표로 변환하여 강성행렬을 구성한다. 본 연구는 등매개변수형 무한요소를 사용하였다.

2.2 등매개변수형 무한요소의 강성행렬

유한요소해석과 같이 Jacobian 행렬은 원래 요소의 형상을 변화된 형상으로 사상(Mapping)시키는 것으로 정의된다. 이러한 사상이 요소의 형상함수에 근거한다면, 이 요소를 등매개변수형(Isoparametric)이라 한다(이성민, 1996). 만일 유한요소를 무한대로 확장한다면 유한요소의 형상함수에 근거한 사상은 여전히 유효하다. 그러나 유한요소의 형상함수는 영역변수들의 거동을 완전히 모사하는데 적절하지 못하다. 그래서 유한요소의 형상함수를 조정된 감쇠함수가 도입된다.

다음 식(1)과 같은 변위형상함수를 적용하여 1방향(ξ -방향) 등매개변수형 무한요소를 구성한다.

$$M_i(\xi, \eta, \zeta) = f_i(\xi) N_i^e(\xi, \eta, \zeta) \quad (1)$$

여기서 $M_i(\xi, \eta, \zeta)$: 무한요소의 변위형상함수, $N_i^e(\xi, \eta, \zeta)$ Lagrangian Polynomial, $f_i(\xi)$: ξ -방향 감쇠함수이다.

감쇠함수는 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

- 변위형상 함수가 무한대에서 영(Zero)의 값을 가지도록 해야 한다.
- 감쇠함수는 자기자신의 절점에서 단위 값을 가져야 한다.
- 자기자신의 절점 이외에서는 특별한 값을 가질 필요는 없다.
- 감쇠함수는 원역(Far field)에서 실제 변위형상과 잘 부합되어야 한다.

위의 조건을 만족시키는 함수 중에서 본 연구에서는 다음과 같이 역수형, 지수형 및 대수형 감쇠함수를 사용하였다.

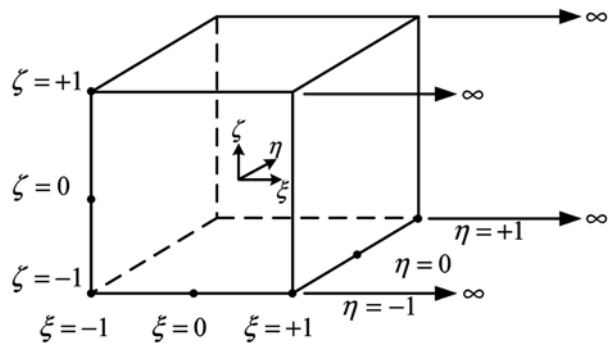


그림 1. 1방향 등매개변수형 무한요소

$$f_i(\xi) = \left(\frac{\xi_i - \xi_0}{\xi - \xi_0} \right)^n \quad (2)$$

$$f_i(\xi) = \left(\exp\left(\frac{\xi_i - \xi_0}{L}\right) \right)^n \quad (3)$$

$$f_i(\xi) = \left[1 + \ln\left(\frac{\xi^2 - \xi_0}{\xi_i^2 - \xi_0}\right) \right]^n \quad (4)$$

이항적 형상함수 $N_i^e(\xi, \eta, \zeta)$ 와 식(1)의 변위형상함수를 이용하여 다음 식(5)에 의하여 3차원 1방향(ξ 방향) 무한요소의 요소의 강성행렬 $[K_e]$ 을 구할 수 있다.

$$[K_e] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^{\infty} B^T D B \det J d\xi d\eta d\zeta \quad (5)$$

여기서, $B(\xi, \eta, \zeta)$: 변형율과 절점변위의 관계를 나타내는 행렬, D : 응력과 변형율의 관계를 나타내는 행렬, $J(\xi, \eta, \zeta)$: Jacobian 행렬을 나타낸다.

위의 식(5)는 적분영역이 $-1 \leq \xi \leq \infty$, $-1 \leq \eta \leq 1$, $-1 \leq \zeta \leq 1$ 이므로, 유한영역인 η, ζ 방향 Gauss-Legendre 수치적분을 적용하고 무한영역인 ξ 방향 Gauss-Laguerre 적분방법을 적용하였다. 기본적인 Gauss-Laguerre 적분식은 다음 식(6)과 같다.

$$\int_0^{\infty} f(y) e^{-y} dy = \sum_{i=1}^n f(y_i) q_i \quad (6)$$

여기서 q_i : Gauss-Laguerre 가중계수, y_i : Gauss-Laguerre 적분점이다.

요소의 강성행렬은 식(5)와 식(6)으로부터 다음 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$[K_e] = \sum_i \sum_j \sum_k \beta_i \alpha_j \alpha_k B^T(\xi_i, \eta_j, \zeta_k) D B(\xi_i, \eta_j, \zeta_k) \det J(\xi_i, \eta_j, \zeta_k) e^{-\xi_i} \quad (7)$$

여기서 β_i : Gauss-Laguerre 가중계수, ξ_i : Gauss-Laguerre 적분점, α_j, α_k : Gauss-Legendre 가중계수, η_j, ζ_k : Gauss-Legendre 적분점이다.

3. 감쇠함수의 매개변수영향평가

무한요소가 터널해석에 적합한지 알아보기 위하여, 무한요소만을 사용한 해석 모델을 무한탄성지반의 원형공동 문제에 적용하여 무한요소의 형태별 특성을 도출하였다. 해석에 영향을 주는 변수들은 감쇠의 정도를 나타내는 n, L, ξ_0 이다. 무

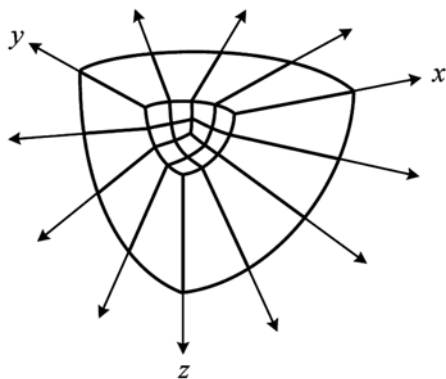


그림 2. 원형공동의 무한요소 모델

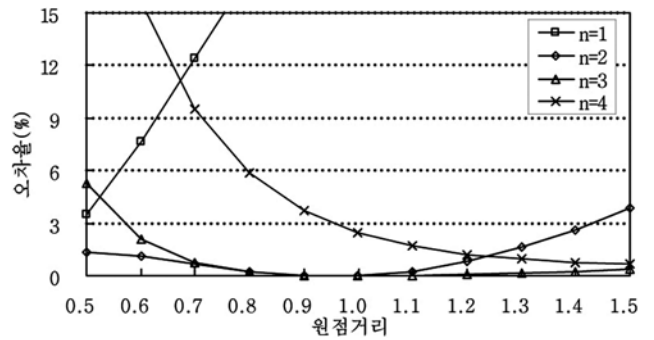


그림 3. 역수감쇠형 무한요소의 변위오차

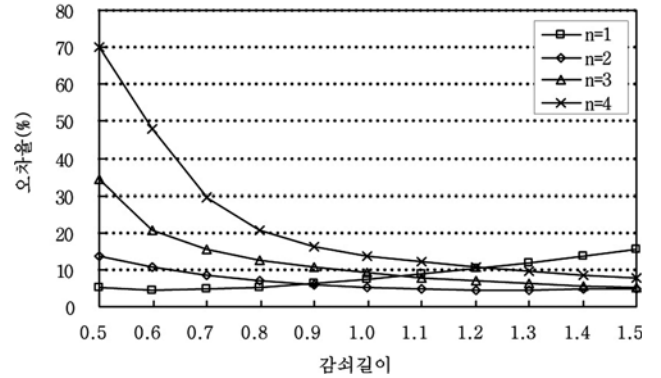


그림 4. 지수감쇠형 무한요소의 변위오차

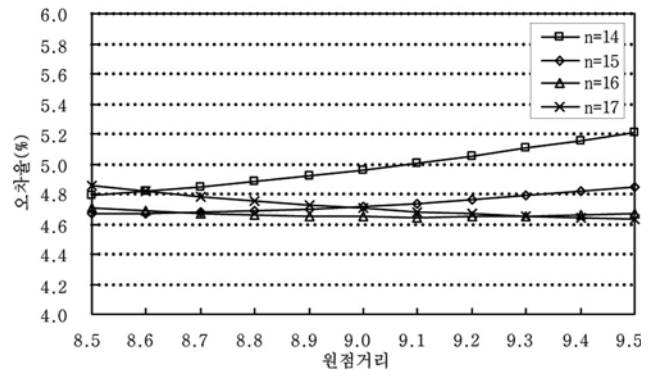


그림 5. 대수감쇠형 무한요소의 변위오차

한요소해석 모델은 터널반경이 5m이며 무한요소의 무한영역방향의 길이도 5m이다. 대칭조건을 감안하여 1/8모델을 사용하였다. 내압은 10 tonf/m²이며, 해석에 적용한 공학적 특성치는 탄성계수 $E=1,000 \text{ tonf/m}^2$, 포아송비 $\nu=0.1$ 로 가정하였다. 그림 2에 12개의 무한요소로 구성된 해석모델을 나타내었다.

무한요소의 감쇠함수에서 감쇠지수는 이론해와 비교하여 적절한 값을 나타내도록 선정하였으며, 원점거리의 범위는 국부좌표에서 0.5의 차이를 가지도록 정하였다. 그림 3~그림 5에 감쇠함수가 각각 역수형, 지수형 및 대수형인 경우에 이론해에 대한 내공변위의 오차를 나타내었다.

역수형감쇠함수를 사용한 무한요소에서 이론해와 오차는 감쇠지수가 1인 경우 3.5%~42.4%, 2인 경우 0.0%~3.8%, 3인 경우 0.0%~5.3%, 4인 경우는 0.7%~24.6%로 가장 이론해와 근접한 해는 감쇠지수가 2와 3이고 원점위치가 1.0인 경우이다. 원점위치의 변동에 따른 오차의 변동 측면에서는 감쇠지수가 2나 3인 경우에 해의 안정성이 높은 것으로 분석된다. 원점거리 1.0은 원형공동의 중심과 터널면과의 거

표 1. 무한요소의 특성치

무한요소형식	무한요소 특성치
역수감쇠형	$n=2, \zeta_0=1.0$
지수감쇠형	$n=2, L=1.3$
대수감쇠형	$n=16, \zeta_0=9.0$

리와 무한요소의 한변의 길이가 같은 경우로 감쇠함수의 가상적인 원점이 원형공동의 중심과 일치함을 의미한다.

지수형감쇠함수를 사용한 무한요소에서 이론해와 오차는 감쇠지수가 1인 경우 4.5%~15.5%, 2인 경우 4.5%~13.8%, 3인 경우 5.1%~34.3%, 4인 경우는 7.6%~69.9%로 이론해와 근접한 해는 감쇠지수가 1 이나 2인 경우이다. 감쇠지수가 2인 경우에 감쇠길이가 1.2 또는 1.3일 때 오차가 최소가 되었다.

대수형감쇠함수를 사용한 무한요소에서 감쇠지수는 1부터 차례로 큰 값을 사용하였고, 이론해와의 오차는 감쇠지수가 14인 경우 4.8%~5.2%, 15인 경우 4.7%~4.8%, 16인 경우 4.6%~4.7%, 17인 경우는 4.6%~4.9%로 가장 이론해와 근접한 해는 감쇠지수가 16인 경우이다. 거의 일정한 오차를 나타내며, 감쇠지수와 원점거리의 영향을 적게 받는 것으로 나타난다.

이러한 무한요소의 매개변수영향해석을 결과로부터 표 1과 같은 무한요소의 특성치를 제안하였다. 제시한 감쇠함수의 특성치는 감쇠원점과 무한요소의 첫번째 절점의 거리와 무한요소의 한변의 길이(첫번째 절점과 두번째 절점간 거리)가 같은 경우임을 국부좌표에서 알 수 있다.

4. 혼합모델의 적정성 검토

4.1 유한요소모델의 해석대상범위에 따른 영향검토

터널해석에는 지반의 항복특성 및 복잡한 형상에 의하여 무한요소만을 사용하여 모델링하는 것보다는 유한요소 모델과 같이 사용하는 것이 일반적이다. 응력의 변화, 모델의 복잡 정도를 감안하여 유한요소 모델의 범위를 정하는 것이 필요하다. 해석모델은 그림 6의 원형터널의 1/4 모델을 적용하였다. 혼합모델의 구성은 유한요소의 모델을 증가시키면서 외측에 무한요소를 배치하는 방식으로 총13개의 해석모델을 사용하였다. 표 2에 해석모델에서 유한요소의 범위를 나타내었다. 유한요소모델의 외측경계조건은 가동조건으로 하였다.

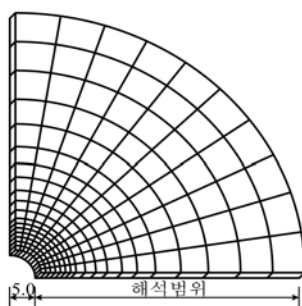


그림 6. 혼합모델의 적합성평가를 위한 모델

표 2. 해석범위의 변동

해석범위(m)	5	6	7	9	11	13	16
해석범위(m)	19	23	27	31	35	45	총13개

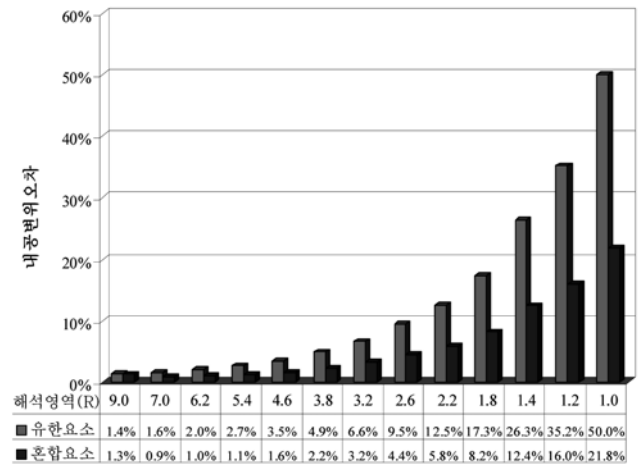


그림 7. 원형터널의 탄소성해석에서 해석영역에 따른 내공변위오차

감쇠함수는 역수감쇠형이며 감쇠특성치는 감쇠지수 2 및 원점거리 1.0을 사용하였다. 하중 및 공학적 특성치는 초기응력 $P_0=800 \text{ tonf/m}^2$, 지보재내압 $P_f=200 \text{ tonf/m}^2$, 탄성계수 $E=50,000 \text{ tonf/m}^2$, 포아송비 $\nu=0.2$, 점착력 $C=30 \text{ tonf/m}^2$, 내부마찰각 $\phi=30^\circ$, 측압계수 $K_0=1.0$ 를 사용하였다. 해석은 재료의 항복기준은 Mohr-Coulomb항복기준의 탄소성해석을 하였다. 해석에서 하중조건은 초기응력을 지반에 가한 상태에서 지보재 내압과의 차이를 하중으로 적용하였다.

그림 7에서 터널내공변위의 오차는 해석영역이 터널반경의 4배 이상이 되면 5%이하가 됨을 알 수 있고, 유한요소의 결과 보다 혼합요소의 결과가 더 빨리 수렴함을 알 수 있다. 사용한 예제는 소성영역이 터널반경의 30%로 일반적인 터널의 설계문제보다 과도한 경향이 있다. 매개변수해석에 적용한 탄성지반에서는 무한요소만을 사용한 경우에도 5%이하의 정확도를 나타내므로, 만약 소성영역이 더 작아져 탄성문제와 유사하게 되면 혼합모델의 수렴은 더욱 빨라지게 될 것임을 알 수 있다. 유한요소의 결과와 혼합요소의 결과는 전 해석영역에서 약2배정도 차이가 있다. 이로부터 혼합모델이 보다 정확한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

4.2 무한요소 감쇠원점의 변화에 대한 영향검토

해석은 원형터널의 탄소성해석을 수행하였고, 해석모델은 그림 8에 나타내었으며, 대칭조건을 고려하여 1/4모델을 사용하였다. 해석에 적용한 지반특성치와 하중은 4.1절의 적용값과 동일하다. 그림 9에 45°의 경사를 이루는 경우에 각 무한요소에서 원점거리의 변동을 나타내었다. 무한영역의 방향은 ξ 이며, 원점거리 차이는 0.5정도이다. 해석결과는 그림 10에 수평의 절점과 45°의 경사를 이루는 대각선 절점의 변위를 나타내었다. 원점거리가 다소 변동하여도 변위결과에는 영향이 적음을 알 수 있다. 이는 무한요소가 하중이 작용하는 터널면에서 멀리 떨어진 점에 위치하고 있어 그 영향이 크지 않음을 나타낸다.

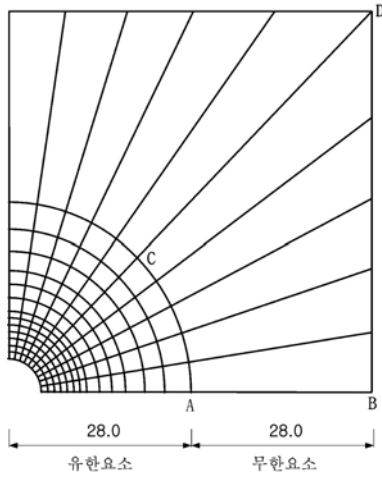


그림 8. 원형터널의 탄소성해석에서 해석영역에 따른 내공변위오차

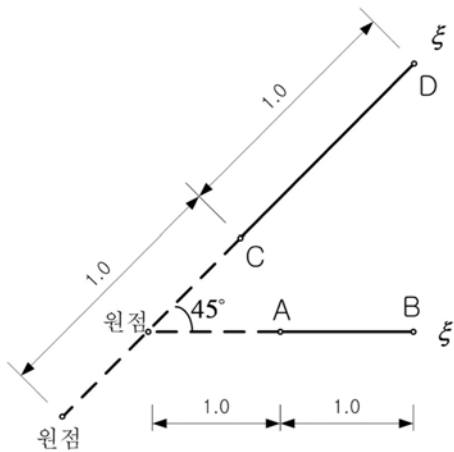


그림 9. 원형터널의 탄소성해석에서 해석영역에 따른 내공변위오차

5. 적용예제

수직구, 연결터널 및 본선터널의 굴착문제는 대표적인 3차원 지반굴착 문제로 본 연구에서 제시한 무한요소의 타당성을 검토하기 위하여 해석을 수행하였다. 본선터널은 철도 단선터널 규모이며 여기에 연결터널 및 수직구(환기 및 대피용)로 구성되어 해석모델을 이룬다. 굴착순서는 수직구를 먼저 굴착한후 연결터널과 본선터널 순서로 굴착이 이루어진다.

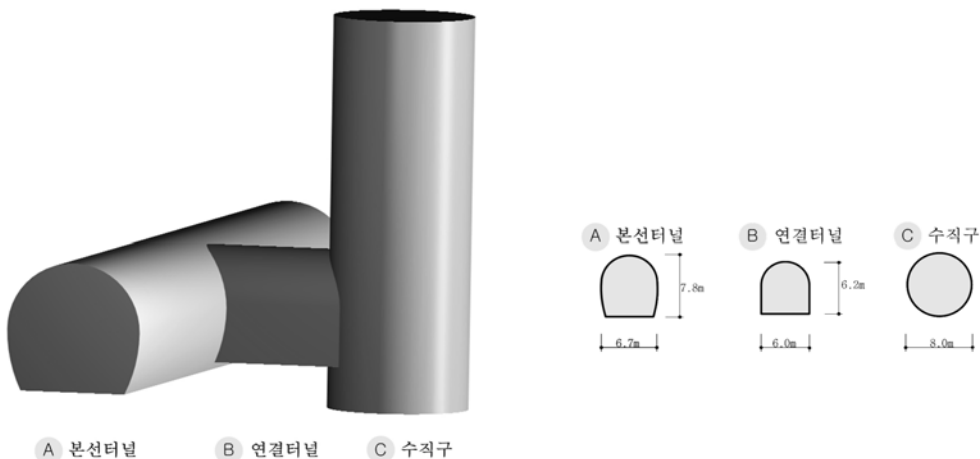


그림 11. 해석 개요도(수직구 및 본선터널)

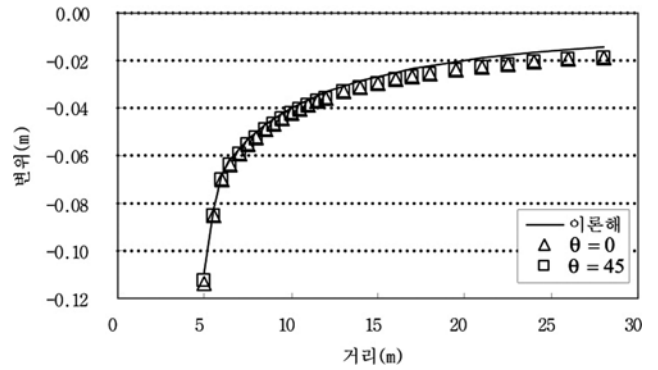


그림 10. 원형터널의 탄소성해석에서 해석영역에 따른 내공변위오차

그림 11에 수직구의 모양과 크기 등 기하학적 관계를 나타내었다. 기하학적인 대칭조건을 감안하여 1/2모델을 사용하였다. 해석대상 지반의 층상분포는 풍화토, 풍화암, 연암순(그림 12)이다. 비교를 위하여 혼합모델(그림 13, 절점수: 18,157, 유한요소: 16,447, 무한요소: 388)과 유한요소 해석모델(그림 14, 절점수: 19,295, 유한요소: 17,807)을 해석대상으로 하였다. 유한요소모델의 외측경계조건은 가동조건으로 가정하였다. 지반 특성치는 표 3과 같이 가정하였다.

수룩한 해석결과는 최종 굴착단계의 결과들을 수록하였다. 그림 15는 혼합모델에서 지반의 최대주응력을 나타내며, 그림 16은 혼합모델의 변위를 나타낸다. 그림 17과 그림 18은 각각 유한요소 모델에서의 최대주응력과 변위결과를 나타낸다. 최대주응력을 비교해보면 두 경우가 동일한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 변위를 비교하면 굴착부 주변에서 최대 변위가 발생하며 발생경향 및 크기가 두 해석모델에서 동일함을 알 수 있다. 혼합모델의 절점수는 유한요소모델에 비하여 약6% 적었으며, 이는 외측영역보다 터널연결부 등의 모사에 많은 절점이 사용되었음을 나타낸다. 혼합모델의 해석시간이 유한요소모델에 비하여 13%적게 소요되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 반무한 지반의 수치해석에서 인위적인 경계

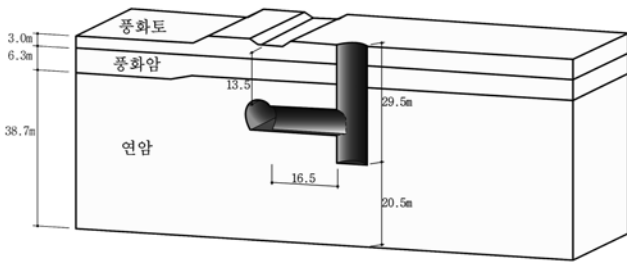


그림 12. 해석대상 지반의 개요도

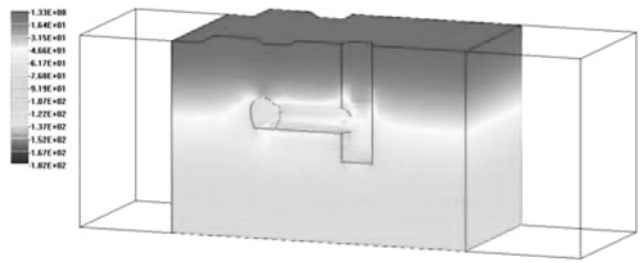


그림 15. 혼합모델의 최대주응력(본선터널 굴착완료후)

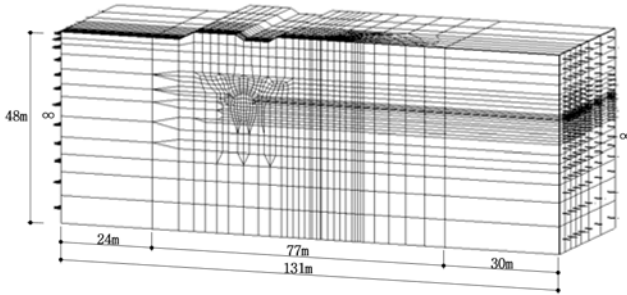


그림 13. 혼합요소 모델링

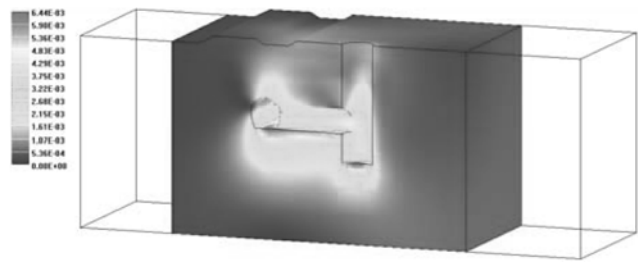


그림 16. 혼합모델의 변위(본선터널 굴착완료후)

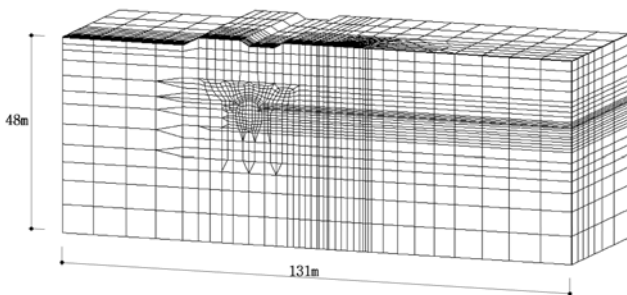


그림 14. 유한요소 모델링

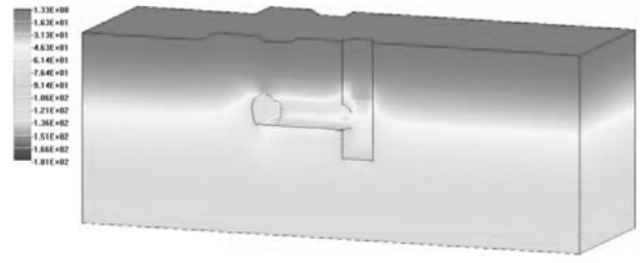


그림 17. 유한요소모델의 최대주응력(본선터널 굴착완료후)

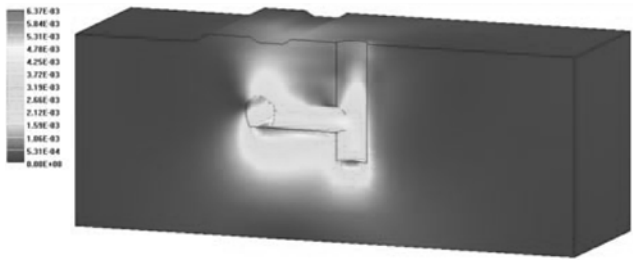


그림 18. 유한요소모델의 변위(본선터널 굴착완료후)

조건문제로 발생하는 오차를 줄이기 위하여 3차원 무한요소를 개발하였다. 개발한 무한요소는 등매개변수형으로 역수형, 지수형 및 대수형 감쇠특성을 가지며, 일반적 형태의 감쇠함수로 표현되었다. 제안한 등매개변수형 무한요소는 감쇠함수를 변위형상함수에 직접 곱하는 형태이며, 만약 다른 감쇠함수를 적용하여 새로운 요소를 만들 경우 간단하게 변위형상함수를 구성할 수 있는 장점이 있다.

터널 해석에 적합한 감쇠함수를 구하기 위하여 매개변수해석을 수행하였다. 이로부터 각각의 감쇠함수에 적합한 특성치를 제시하였다. 이러한 감쇠함수의 모양은 터널문제에 적합한 단조감쇠형식의 형상을 가짐을 알 수 있었다. 또한 제시한 감쇠함수의 특성치를 분석해보면 하나의 무한요소에서 무한영역 방향으로 첫번째 절점과 두번째 절점간 거리가 감쇠원점에서 첫번째 절점까지 거리와 같은 경우에 정확한 값을 나타냄을 알 수 있다.

혼합모델에서 해석의 정확성을 검토하기 위하여 원형터널

의 탄소성 해석을 수행하였다. 본 연구에 사용한 해석 모델은 소성영역이 터널반경의 30% 정도이며, 유한요소모델만으로 해석하는 경우에는 터널반경의 약4배 정도의 해석모델에서 해가 수렴하였고, 혼합모델의 경우에는 유한요소해석 모델링 범위가 유한요소모델만의 약 30% 정도인 모델에서 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 이로부터 적은 크기의 혼합모델로도 동일한 정확도를 가짐을 알 수 있다.

그리고, 제시한 3차원 등매개변수형 무한요소의 적용성을

표 3. 해석에 사용한 지반 특성치

구분	탄성계수 (tonf/m ²)	포아송비	단위중량 (tonf/m ³)	점착력 (tonf/m ²)	내부 마찰각	측압 계수
풍화토	2,000	0.35	1.9	1	30	0.5
풍화암	15,000	0.33	2.3	5	33	0.5
연암	50,000	0.30	2.5	10	35	0.5

검토하기 위하여 대표성이 있는 3차원 터널문제를 해석하였다. 해석결과는 유한요소결과와 혼합모델의 결과를 비교하였으며, 지반응력 및 변위의 결과가 발생 경향 및 크기에서 동일한 값을 나타내었다. 또한, 해석시간에서 혼합모델이 13% 적게 소요되었다. 계산결과 및 해석시간의 비교로부터 혼합모델이 터널해석에 적합함을 보였다.

이상에서 반무한 지반문제인 터널해석에 적합한 다양한 감쇠특성의 3차원무한요소를 개발하였고, 이를 이용한 터널안정성 해석의 적용방안의 제시 및 그 타당성을 입증하였다.

참고문헌

고광훈, 이승래(1997) 다양한 변위감쇠특성을 고려할 수 있는 p-버전 정적 무한요소, **한국지반공학회지**, 한국지반공학회, 제13권 제1호, pp. 101-109.

구희대(2004) 3차원 터널해석을 위한 다양한 감쇠특성의 무한요소 개발. 공학박사학위논문, 서울대학교.

김재민, 윤정방(1995) 다층 반무한지반에서 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 동적 무한요소, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제15권 제1호, pp. 51-62.

문선경, 이희근(1995) 3차원 유한요소법을 이용한 터널 막장 주위에서의 응력 재분배 해석에 관한 연구, **터널과 지하공간**, pp. 95-103.

이성민(1996) 터널안정성 해석에 있어서 무한요소 적용성 연구. 공학박사학위논문, 서울대학교.

이완훈, 남우준, 최장근(2001) 무한영역 해석을 위한 무한요소의 개발, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권 제2-A호, pp. 225-233.

이인모, 김돈희, 이석원, 박영진(1999) 파쇄대 예측을 위한 터널의 3차원 수치해석, **한국지반공학회논문집**, 한국지반공학회, pp.

99-112.

정대열(1993) 터널 막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한 연구. 공학박사학위논문, 서울대학교.

한국지반공학회(1996) 터널.

Abdel-Fattah, T.T., Hodhod, H.A., and Akl, A.Y. (2000) A novel formulation of infinite elements for static analysis, *Computers & Structures*, Vol. 77, pp. 371-379.

Bathe, K.J. (1982) Finite element procedures in engineering analysis, Prentice-Hall Inc., pp. 120-124.

Bathe, K.J., Wilson, E.L., and Peterson, F.E. (1974) SAP IV A structural analysis program for static and dynamic response of linear systems, Earthquake Engineering Research Center.

Betess, P. (1992) Infinite elements, Penshaw Press.

Cook, R.D. (1981) Concepts and applications of finite element analysis, John Wiley & Sons

Crisfield, M.A. (1997) Non-linear finite element analysis of solids and structures, John Wiley & Sons.

Kumar, P. (2000) Finite element method computations in unbounded domains with nonzero but uniform far field decay, *Computers & Structures*. Vol. 75, No.5, pp. 457-462.

Rocscience, Inc. (2002) Phase2 verification manual; 2D finite element program for calculating stresses and estimating support around underground excavations.

Sivakumar, M.S. and Voyiadjis, G.Z. (1997) A simple implicit scheme for stress response computation in plasticity models, *Computational Mechanics*, Vol. 20, pp. 520-529.

Viladkar, M.N., Noorzaee, J., and Godbole, J.N. (1995) Convenient forms of yield criteria in elasto-plastic analysis of geological materials, *Computers & Structures*, Vol. 54, No. 2, pp. 327-337.

(접수일:2005.5.30/심사일:2005.8.3/심사완료일:2006.1.25)