

2차원 및 3차원 모델링에 의한 터널구조물의 구조해석

Structural Analysis of Tunnel Structures
by Two and Three Dimensional Modeling

김 래 현* 정 재 훈** 임 성 순***
Kim, Rae-Hyun Chung, Jae-Hoon Yhim, Sung-Soon

Abstract

Two dimensional Analysis has been applied to most of tunnel lining design in these days. Two dimensional analysis uses beam or curved beam element for finite element method. But because the behaviors of tunnel concrete lining structure is near to shell, it is required to model the tunnel lining as shell structure for safety design of tunnel lining structure. In this paper, two dimensional analysis by beam element and the three dimensional analysis by shell element of tunnel concrete lining are studied, in which 3 type of tunnel lining and lateral pressure factors are considered.

As results of the study, three dimensional analyses of the behavior of tunnel concrete lining structure considering lateral pressure factor shows that the moment of three dimensional analysis is greater than those of two dimensional analysis. The results shows that three dimensional analysis is necessary for safety design of tunnel lining.

keywords : Tunnel Concrete Lining, Three Dimensional Analysis, Two Dimensional Analysis, Pressure factor

1. 서 론

터널구조물에서 지반하중은 숏크리트, 록볼트 등의 1차 지보재에 의하여 지지되는 것으로 설계되고 시공

된다. 콘크리트 라이닝은 지반의 변형이 수렴된 후에 숏크리트와 방수막을 경계로 시공되기 때문에 지반하중이 콘크리트 라이닝에 전달되지 않는 것으로 간주하여 해석적인 의미를 부여하지 않고 있으며, 지반의 장

* 한국건설안전기술협회

** 학생회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 부교수

E-mail : kchungjh@dreamwiz.com 011-9925-2953

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

기적인 변형 등을 고려하는 경우에도 지반하중이 콘크리트라이닝에 어떻게 전달되는지 명확한 해를 찾지 못하고 있다. 따라서 콘크리트 라이닝은 지질조건이나 환경의 변화에 대하여 터널 구조물의 안전성을 증대시키고 슛크리트의 품질저하나 록볼트의 부식에 의한 내구성 저하 등에 대비하기 위한 구조물로서 고려한다. 그러나 터널은 일종의 지하 구조물로서 지형, 지질 등 영향을 미칠 수 있는 주변 환경이 매우 다양할 뿐만 아니라 예기치 못한 외력이 작용하여 구조물에 중대한 문제를 유발할 수도 있다. 최근 노후화된 터널에 대한 조사결과 터널라이닝에 발생되고 있는 균열, 백태, 누수 등의 손상은 터널라이닝의 거동에 대한 보다 정확한 이해를 요구하고 있다. 실무에서 주로 사용하는 2차원 해석에서는 터널의 구조적 형상을 보 요소나 아치요소를 사용해서 모델링한다. 그러나 실제 터널구조물은 보 요소나 아치 요소보다 원통형 쉘 구조물인 3차원 구조물에 해당한다.²⁾

본 연구는 대표적인 터널 구조물을 선택하여 Sap90을 이용하여 2차원과 3차원 모델링 및 해석을 수행하여 비교 고찰함으로써 모델링에 의한 해석적 차이점을 제시함을 연구의 목적으로 한다.

2. 터널구조

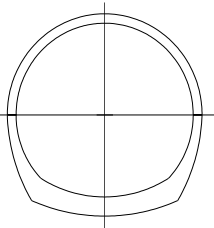
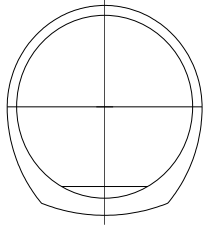
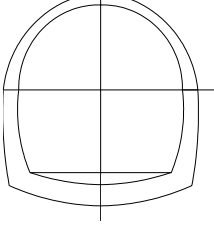
터널 라이닝의 주재료는 콘크리트이며 크게 아치 라이닝 콘크리트, 측벽 라이닝 콘크리트, 인버트 라이닝 콘크리트로 구분한다. 라이닝은 필요한 내공단면을 확보하고 토압에 경제적으로 저항해야 하며 아치의 축력 효과로 인해서 전달되는 모멘트가 최소가 되게 해야 한다. 또한 급격한 변화나 만곡, 우각, 요철이 없어야 한다. 지질이 양호할 때는 측벽을 수직으로, 불량할 때는 마제형으로 시공하고 지질이 아주 불량할 때에는 원형으로 시공한다. 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 터널의 형상은 도로터널의 경우 난형을 주로 적용하고 철도 터널의 경우 마제형을 주로 사용한다. 위에서 설명한 터널의 종류를 표시하면 Table 1과 같다.

재래식 터널의 경우 라이닝에 작용하는 하중에 대한 파악이 곤란하고 터널 라이닝의 구조해석법도 불명확하여 라이닝의 설계는 주로 굴착중의 지보공에 작용하

는 토압과 기존의 시공경험을 참고로 실시한다. 터널 라이닝의 설계두께는 지질조건에 따라 최소 30cm에서 최대 80cm정도의 두께로 시공된다. NATM으로 시공되는 터널에서는 주로 영구 구조물로서의 내구성 및 유지관리를 목적으로 라이닝이 시공되고 있으며, 라이닝의 두께는 단면의 형상, 크기, 콘크리트의 시공성 등에 의해 결정되나 지하철 터널이나 도로 터널의 경우 단면의 크기에 따라 30~40cm 두께를 사용하는 것이 일반적이다.⁶⁾

터널 라이닝에 작용하는 하중은 크게 암반에 작용하는 이완하중, 편압, 수압등으로 구분한다. 터널에 작용하는 암반의 이완하중은 지반조건, 적용 공법에 따라 산정되는 하중 값이 달라진다. 터널 설계는 터널에 작용하는 하중을 추정해 이를 지지하는 지보공 및 라이닝을 구축하는 방법과 터널 굴착에 따라 터널의 주변 지반이 응력 재분배에 의해 그 자체가 안정하도록 지보공이나 라이닝을 검토하는 방법으로 구분한다.

Table 1 터널 단면 형상

구분	형상도	장점 및 단점
난형		<ul style="list-style-type: none"> · 터널 굴착량이 마제형과 원형의 중간이나 하부 폭이 넓어야 경제적 · 구조적으로 안정적 · 근래 도로 터널의 경우 가장 많이 적용
원형		<ul style="list-style-type: none"> · 굴착면이 크므로 비경제적 · 구조적으로 가장 안정적 · 굴착공법이 TBM인 경우 주로 적용
마제형		<ul style="list-style-type: none"> · 굴착시공이 양호하며 굴착량이 적어서 경제적 · 구조적으로 난형이나 원형보다 불안정 · 철도터널 등의 경우 많이 적용

두 가지 방법은 지반을 하중으로 볼 것인가 아니면 지보재로 볼 것인가에 따른 해석상의 차이이다. 터널에 작용하는 지압의 양상은 매우 다양하며, 지압을 평가하는 방법에 대해서도 아직까지 확실하게 확립되어 있지 않다. 따라서 터널에서 예상치 못한 지압의 작용은 터널 라이닝의 변형 및 손상 원인으로 작용할 수 있다.

편압의 경우 토피가 얇은 갱구 부근에서 지표면에 경사 및 관입하는 연약층이 존재하는 경우 발생한다. 토피가 깊은 경우에는 지형에 의한 지압의 편차를 무시할 수 있지만 과쇄대가 있는 경우에 지질 상황에 따라 편압이 발생할 수 있다. 수압은 지하수위의 변동을 고려하여 안전한 설계가 되도록 결정한다. 수직방향 수압은 분포하중의 형태를 가지며 종류로는 복공 천정부에 대해서 정점에 작용하는 정수압, 터널 저면에 대해서 저면에 작용하는 정수압으로 구분한다. 수평방향의 수압은 등분포 하중의 정수압 형태를 가진다. 라이닝에 작용하는 수압은 자연 또는 인위적인 영향에 의해 변동된다. 지하수위에 따라 터널 설계에 많은 영향을 미치기 때문에 주위의 영향을 고려해서 결정해야 한다. 터널라이닝 설계시 배수형 터널의 경우 수압이 작용하지 않고 비배수형 터널에만 수압이 작용하는 것으로 설계하나, 배수형 터널이라도 유도 배수층인 부직포의 기능저하를 고려하여 잔류수압을 고려한다.⁶⁾

터널의 라이닝이 구조체의 역할을 수행하게 되는지 여부는 지반과 1차 지보재의 거동에 의해서 결정된다. 일반적으로 터널은 1차 지보재에 의해 안정되는 것으로 고려하기 때문에 배수형 터널의 콘크리트 라이닝은 자중만을 지탱하도록 설계한다. 그러나 1차 지보재는 시공 중의 품질과 주변 환경 등 여러 가지 요인들의 영향으로 인해 내구성이 저하될 수 있다는 점과 굴착 주변의 지반 내하력이 감소되면 1차 지보재에 의해 지탱되었던 하중이 궁극적으로 콘크리트 라이닝으로 전이된다는 점을 감안하여 현실적인 내부라이닝 설계 방법을 정립할 필요가 있다. 콘크리트 라이닝은 완전히 교란된 지반 중에 되메움하여 설치한 구조물이나 지상 구조물과는 달리 작용하는 외력을 명확히 규명하기가 어렵다. 현행 콘크리트 라이닝의 구조해석은 강도 설계법과 허용응력 설계법을 동시에 허용하고 있으나 강

도 설계법을 적용할 경우 라이닝에 작용하는 토압 산정과 하중계수를 어떻게 적용하여야 하는 것에 대해서는 세부적인 규정이 없다.

콘크리트라이닝의 구조해석방법은 평면변형모델과 지중골조모델로 구분된다. 평면 변형모델은 지반, 슛크리트, 콘크리트 라이닝을 동시에 연속체로서 해석하는 기법으로 모델링 상의 결점이 있지만 크리프 효과를 고려할 수 있는 장점이 있다. 지중 골조 모델은 콘크리트 라이닝만 보 요소로 모델링하며, 지반과의 상호작용은 탄성스프링을 이용하여 효과를 고려한다. 일반적으로 터널 라이닝의 설계는 평면변형모델을 이용하지 않고 지중 골조모델을 사용한다. 라이닝의 구조해석을 위해 지중 골조모델을 사용하는 경우, 적용하는 토압은 암반이나 토질역학상의 해석으로부터 결정한다. 연약 지반 또는 지반이 불량하고 토피가 얇은 터널에서는 초기 응력 상태에 가까운 응력 재분배가 발생한다. 따라서 콘크리트 라이닝의 일반적인 설계기준은 1차 지보재의 완전한 기능 상실 후에도 콘크리트 라이닝이 전 토피하중을 받을 수 있게 설계해야 한다. 터널라이닝의 2차원 보요소 모델링시 곡선형태의 콘크리트 라이닝을 직선 요소로 모델링 함에 따라 발생하는 오차를 줄이기 위하여 두 요소의 연결각이 15°를 초과하지 않도록 한다. 터널 콘크리트 라이닝을 계산하기 위한 평면 골조의 경계조건은 주변암반의 세분된 반력으로 결정된다. 지반부분은 라이닝 중심선에 직각 방향으로 설치되는 스프링 요소로써 모델링한다. 콘크리트 라이닝과 지반과의 실제 거동을 고려하기 위하여 모든 인장 스프링요소는 반복되는 계산과정에 따라 제거됨으로써 최종 결과에서는 압축 스프링요소만으로 해석한다.⁷⁾

3. 구조해석

본 연구에서는 NATM으로 시공된 도로터널을 해석 대상으로 선정하였다. 본 장에서는 선정된 모델은 Table 2와 같고 터널 라이닝에 대한 2차원 해석과 3차원 해석을 실시하였다. 다양한 터널의 거동을 분석하기 위해 2차선의 도로터널 형태인 난형 터널, 반원형 터널, 반원측벽수직형의 배수형 터널을 각각 선정하였다.

토압이나 암반하중은 연직 방향 또는 수평 방향으로 작용하나 3차원 해석시에는 연직 방향 또는 수평방향의 하중 적용이 용이하지 않으며 2차원 해석과 3차원 해석시 동일한 하중이 작용하도록 하중을 부재면에 연직 방향으로 작용하도록 변환하여 적용하였다. 콘크리트 라이닝의 해석을 위한 하중은 배수형 도로 터널의 라이닝의 자중과 지반하중만을 고려하였으며 수압은 고려하지 않았다. 콘크리트 라이닝의 자중은 단위중량을 2.35 tf/m³를 적용하였다. 터널 천정부에 작용하는 지반하중은 10 tf/m로 하고 축압계수 변화(K=0.5, 1.0, 1.5, 2.0)에 따른 하중 조건을 적용 검토하였다. 각 터널모델에 작용하는 하중을 정리하면 Table 3과 같다.

Table 2 터널모델의 제원

종류 \ 제원	높이(m)	폭(m)	두께(cm)	단위중량 (tf/m ³)
반원형	7.65	11.75	30	2.35
난형	7.65	10.99	30	2.35
반원축벽수직형	7.65	10.99	30	2.35

Table 3 터널라이닝에 작용하는 하중 (tf/m)

절점	반원형 터널				난형 터널				반원축벽수직형 터널			
	K=0.5	K=1.0	K=1.5	K=2.0	K=0.5	K=1.0	K=1.5	K=2.0	K=0.5	K=1.0	K=1.5	K=2.0
1	14.018	25.000	36.585	48.363	19.345	24.988	32.291	40.344	12.489	24.988	37.497	49.966
2	11.878	23.076	34.422	45.805	15.372	23.526	32.895	42.687	11.763	23.526	35.289	47.052
3	10.556	21.106	31.657	42.209	11.985	21.844	32.141	42.559	10.922	21.844	32.766	43.688
4	10.944	19.150	27.888	36.804	10.029	20.046	30.065	40.086	10.023	20.046	30.069	40.092
5	11.061	17.262	24.305	31.631	9.7570	18.226	26.966	35.779	9.7570	18.226	26.966	35.779
6	11.125	15.500	20.842	26.575	10.392	16.126	22.660	29.466	10.392	16.126	22.660	29.466
7	11.044	13.912	17.687	21.904	10.555	14.412	19.188	24.349	10.555	14.412	19.188	24.349
8	10.826	12.544	14.975	17.831	10.564	12.920	16.098	19.704	10.564	12.920	16.098	19.704
9	10.533	11.438	12.806	14.505	10.434	11.700	13.550	15.780	10.434	11.700	13.550	15.780
10	10.245	10.626	11.232	12.029	10.241	10.790	11.648	12.753	10.241	10.790	11.648	12.753
11	10.038	10.130	10.281	10.489	10.071	10.216	10.453	10.775	10.071	10.216	10.453	10.775
12	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
13	10.038	10.130	10.281	10.489	10.071	10.216	10.453	10.775	10.071	10.216	10.453	10.775
14	10.245	10.626	11.232	12.029	10.241	10.790	11.648	12.753	10.241	10.790	11.648	12.753
15	10.533	11.438	12.806	14.505	10.434	11.700	13.550	15.780	10.434	11.700	13.550	15.780
16	10.826	12.544	14.975	17.831	10.564	12.920	16.098	19.704	10.564	12.920	16.098	19.704
17	11.044	13.912	17.687	21.904	10.555	14.412	19.188	24.349	10.555	14.412	19.188	24.349
18	11.125	15.500	20.842	26.575	10.392	16.126	22.660	29.466	10.392	16.126	22.660	29.466
19	11.061	17.262	24.305	31.631	9.7570	18.226	26.966	35.779	9.7570	18.226	26.966	35.779
20	10.944	19.150	27.888	36.804	10.029	20.046	30.065	40.086	10.023	20.046	30.069	40.092
21	10.556	21.106	31.657	42.209	11.985	21.844	32.141	42.559	10.922	21.844	32.766	43.688
22	11.878	23.076	34.422	45.805	15.372	23.526	32.895	42.687	11.763	23.526	35.289	47.052
23	14.018	25.000	36.585	48.363	19.345	24.988	32.291	40.344	12.489	24.988	37.497	49.966

구조해석에 사용된 2차원, 3차원 해석 모델의 형상은 Fig. 2와 같다. 경계조건은 스프링요소를 이용해서 모델링하였고 콘크리트 라이닝과 지반과의 실제거동을 고려하기 위하여 모든 인장스프링을 제거하면서 반복적으로 해석을 수행하였다. 이를 표시하면 이를 표시하면 Fig. 3과 같다. 반원형 터널라이닝에 대한 해석 결과를 비교한 결과 축압계수가 0.5인 경우 발생하는 휨 모멘트는 측벽부와 천정부에서 3차원 해석결과가 2차원 해석 결과 비해 크게 나타나고 있으며 2차원 해석의 경우 측벽부에서 부(-)모멘트 발생이 나타나나 3차원 해석결과 측벽부에서 정(+) 모멘트가 발생되고 있는 것으로 나타났다. 축압계수가 1.0 이상인 경우에도 3차원 해석결과가 2차원 해석결과 보다 크게 나타나고 있다.

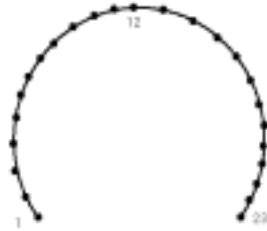


Fig. 2(a) 터널라이닝의 2차원 모델링

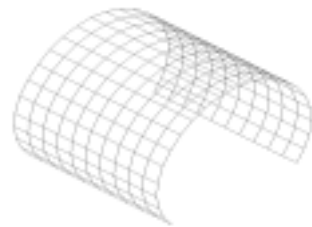


Fig. 2(b) 터널라이닝의 3차원 모델링

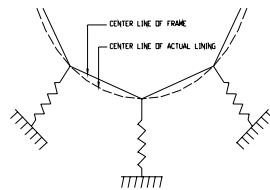


Fig. 3 터널라이닝과 터널경계조건

천정부 연직변위를 비교한 결과 축압계수가 K=0.5, 1.0인 경우에는 3차원 해석에 의한 연직변위가 다소 (+)방향으로 크게 나타나며 K=2.0인 경우에는 2차원 해석에 의한 연직변위가 다소 크게 나타난다. 반원형터널의 2차원과 3차원의 모멘트 결과를 표시하면 Table 4와 같고 천정부 연직변위를 표시하면 Fig. 4와 같다.

난형 터널라이닝에 대한 해석 결과를 비교한 결과 축압계수가 0.5인 경우 발생하는 휨 모멘트는 측벽부와 천정부에서 2차원 해석결과가 3차원해석 결과에 비하여 크게 나타나고 있다.

그러나 축압계수가 1.0 이상인 경우 3차원 해석 결과가 2차원 해석 결과에 비하여 크게 나타나고 있다. 천정부 연직변위를 비교한 결과 축압계수가 K=0.5, 1.0, 1.5 인 경우에는 3차원 해석에 의한 연직변위가 (+)방향으로 7~8mm 정도 크게 나타나고 있으며 반원형과 반원측벽 수직형 터널에 비하여 2차원과 3차원 해석 결과의 차이가 다소 크게 나타나고 있다. K=2.0인 경우에는 1mm 이하의 근소한 차이를 보이고 있다.

난형 터널의 2차원과 3차원의 모멘트 결과를 표시하면 Table 5와 같고 천정부 연직 변위를 표시하면 Fig. 5와 같다. 반원 측벽수직형 터널 라이닝에 대한 해석 결과를 비교한 결과 축압계수가 0.5인 경우 발생

하는 휨 모멘트는 측벽부와 천정부에서 3차원 해석결과가 2차원해석 결과에 비하여 크게 나타나고 있으며, 축압계수가 1.0 이상인 경우에도 3차원 해석결과가 2차원 해석결과 보다 크게 나타나고 있다.

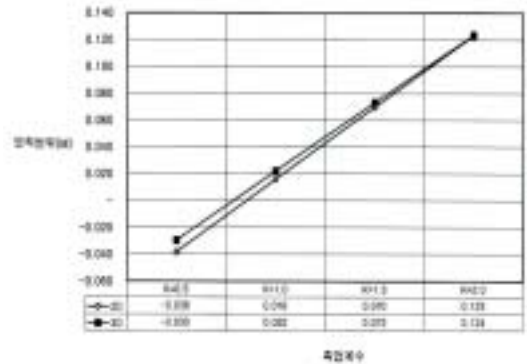


Fig. 5 난형 터널의 천정부 연직 변위

Table 5 난형 터널의 모멘트 ($t \cdot m$)

구 분		K=0.5	K=1.0	K=1.5	K=2.0
측벽	2D	-26.1	6	36.6	66.2
	3D	-20.6	11.8	42.8	72.7
천정	2D	13.5	-11.8	-37.8	-63.9
	3D	11.1	-14	-39.8	-65.5

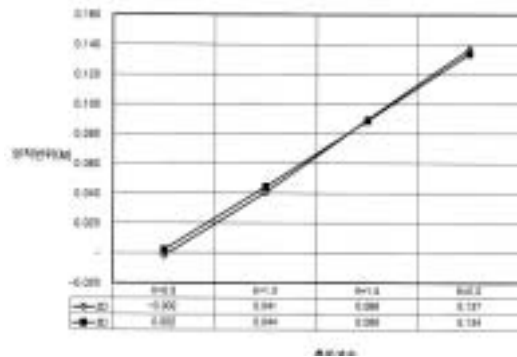


Fig. 4 반원형 터널의 천정부 연직 변위

Table 4 반원형 터널의 모멘트($t \cdot m$)

구 분		K=0.5	K=1.0	K=1.5	K=2.0
측벽	2D	-2.2	30.3	63.7	97
	3D	1.5	34.4	68.1	101
천정	2D	-0.8	-24.9	-51	-77.8
	3D	-2.1	-26.1	-52.1	-78.7

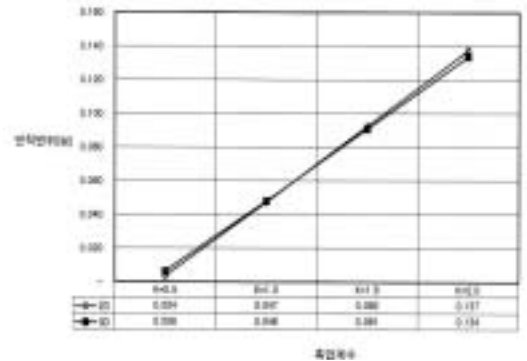


Fig. 6 반원측벽수직형 터널천정부 연직변위

Table 6 반원측벽수직형 터널모멘트($t \cdot m$)

구 분		K=0.5	K=1.0	K=1.5	K=2.0
측벽	2D	14.1	46.2	82.7	118.0
	3D	15.7	49.0	85.7	122.0
천정	2D	-3.6	-30.7	-59.4	-88.4
	3D	-4.6	-31.6	-60.1	-89.0

천정부 연직 변위를 비교한 결과 축압계수가 $K=0.5$, 인 경우에는 3차원 해석에 의한 연직변위가 (+)방향으로 7~8mm 정도 크게 나타나고 있다. 마제형이 반원형과 반원측벽 수직형 터널에 비하여 2차원과 3차원 해석 결과의 차이가 다소 크게 나타나고 있다. $K=1.5$, 2.0인 경우에는 각각 1mm, 3mm 이하의 근소한 차이를 보이고 있으며, 축압계수가 증가함에 따라 연직변위의 차이가 커지고 있는 것으로 나타났다.

반원측벽 수직형 터널의 2차원과 3차원의 모멘트 결과를 표시하면 Table 6와 같고 천정부 연직 변위를 표시하면 Fig. 6와 같다.

터널구조형식과 축압계수에 따른 2차원, 3차원의 측벽부와 천정부의 모멘트를 도시하면 Fig. 7, Fig. 8과 같다.

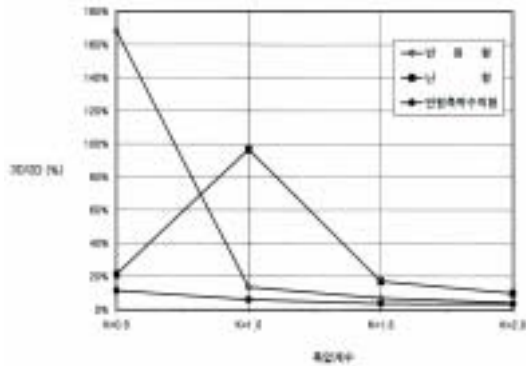


Fig. 7 축압계수변화에 따른 측벽부 휨모멘트

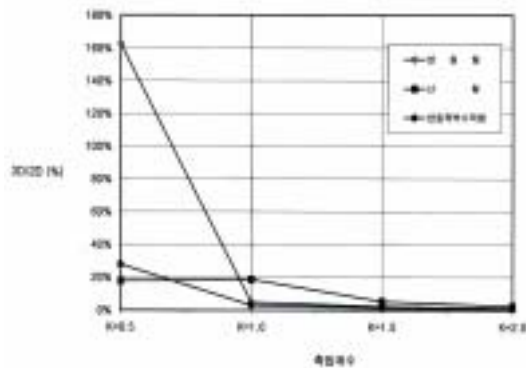


Fig. 8 축압계수변화에 따른 천정부 휨모멘트

4. 결 론

본 연구결과 다음과 같은 결론을 유도하였다. 3차원 해석결과가 2차원 해석 결과보다 휨 모멘트가 크게 발생하는 것으로 나타났으며 곡률의 변화가 큰 난형 터널 라이닝의 경우 휨 모멘트의 차이가 큰 것으로 나타났다. 이는 셸 구조물의 경우 면내거동이 지배적이며 굴곡부에서 큰 휨 거동을 나타내는 특성을 반영한 것이라고 판단된다. 축압이 적은 경우 반원형 터널이 가장 안정적인 것으로 나타났다. 난형 터널은 천정부 및 측벽부의 휨 모멘트가 크게 발생하는 것으로 나타났으며 반원 측벽 수직형은 천정부에서는 휨 모멘트 발생이 적으나 측벽부의 휨 모멘트 발생이 큰 것으로 나타났다. 축압이 증가함에 따라 난형 터널이 가장 안정적인 것으로 나타났으며 반원 측벽 수직형 터널이 가장 불안정한 것으로 나타났다. 따라서, 연직하중에 비하여 축압이 크게 작용하는 경우에는 난형 터널로 설계하는 것이 바람직하며, 연직하중이 지배적인 경우에는 원형에 가까운 터널이 안정성이 높은 것으로 나타났다. 터널의 라이닝 설계 시 지반하중을 고려할 경우에는 축압계수의 크기에 따라 2차원 해석과 3차원 해석의 차이가 나타나며 3차원 해석에 의한 휨 모멘트가 크게 발생되므로 보다 안전한 설계를 위하여 3차원 해석을 통한 설계가 이루어져야할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국도로공사 “고속도로 터널설계 실무자료집”, 1995.
2. 홍성영 역, “터널의 설계이론”, 탐구문화사, 1993.
3. 건설교통부, “터널공사 표준시방서”, 1996.
4. 윤지선, “NATM 공법의 조사 설계 시공”, 구미서관, 1992.
5. 한국도로공사, “도로설계요령 제4권(도로, 지하철)”, 1992.
6. 김상수 역, “도시터널의 NATM 공법”, 창우출판, 1995.
7. 최성웅, “현지암반초기지압의 분포 특성 및 암반터널설계의 작용”, 한국암반공학회, Vol.7, No.4, pp323-333, 1997.
8. 이대혁, 김재순, 이희근, 김성운, “수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열특성에 관한 연구”, 한국암반공학회, Vol.8, No.2, pp146-156, 1998.

(접수일자 : 2002년 3월 22일)