



지하공간 굴착을 위한 수치해석적 접근방법 분석

3차원 해석사례를 중심으로

글 | 김 창 수 토목기술부 대리 02-3433-7767 | E-mail : conshol@ssyenc.com

1. 머리말

터널이라 하면 흔히 산간 오지의 철도 터널을 연상하던 시절에서 급속한 경제성장에 따른 서울 지하철 건설과 더불어 도심지 터널이 활발히 건설되고, 통신구, 전력구, 공동구, 상하수도용 수로 터널 등이 개발되고 있는 지금은 도심지에서의 터널 건설은 매우 친숙한 말이 되었다.

더욱이 1980년대 초부터 에너지 저장을 위한 유류 및 액화 가스 비축시설, 양수 지하발전소 등이 건설되고 있거니와 앞으로는 핵폐기물의 지하 처분장, 농수축산물의 저장 등을 목적으로 지하 공간의 활용은 더욱 활발해질 것으로 예상된다.

선진 외국의 경우 위에 예시한 종류의 터널 및 지하공간 개발은 이미 보편화 되었고 나아가 새로운 생활 공간으로서의 활용 가능성과 그 개발 방안을 심도 있게 연구중인 것으로 알려지고 있다. 특히 일본의 세이칸 터널이나 영불간 도오버 해협을 횡단하는 유로 터널(Channel Tunnel)의 건설은 유럽지역 정치, 사회 및 경제에까지 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.

위와 같은 추세에 비추어 우리 나라와 같이 전 국토의 2/3이상이 산지이고 인구밀도가 높은 경우 새로운 공간 창출의 일환으로 지하개발은 더욱 활발해질 것이며 New

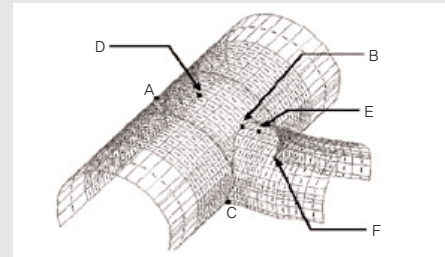
Millennium 시대의 중심에 대한민국이 앞장 설 수 있을 것으로 본다.

이와 같은 지하공간 개발을 위한 시공능력은 시공단계별 과다변위 발생 여부 혹은 지보에 과다한 응력이 작용하는지에 대한 여부 등 지하공간의 전반적인 안정성을 검토할 수 있는 수치해석 기법의 개발과 응용을 통해 더욱 향상될 수 있을 것이다. 이러한 측면에서 최근 수행된 3차원 수치해석에 대해 적용 사례를 소개하고 이에대한 이해를 돕고자 한다.

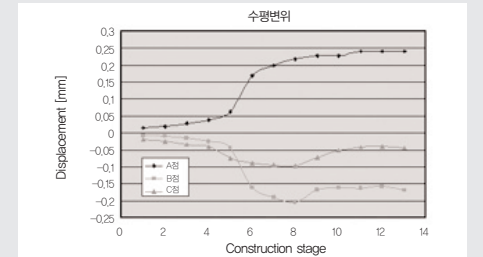
2. 터널 해석기법의 이해

터널해석의 목적은 설계 혹은 시공 단계에서 대상 단면 및 주변지반의 응력상태를 파악하고 터널 구조물의 전반적인 거동을 이해하는데 있다. 따라서 터널해석의 결과를 실제 현장 문제에 적용하기 위해서는 시공과정이 반영되어야 한다. 현재 터널설계 단계에서 적용하고 있는 각종 유한요소 혹은 유한차분 해석 프로그램은 이러한 시공과정에 대한 모사가 가능하므로 의미 있는 결과의 도출을 위해서는 시공과정이 고려된 해석이 수행되어야 한다.

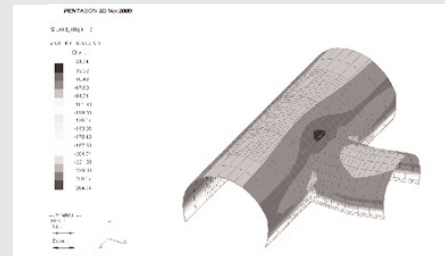
터널굴착 과정은 주변 지반의 3차원적인 응력-변형률 거동을 야기 시킨다. 특히 중방향이동이 발생하는 막장 인접부



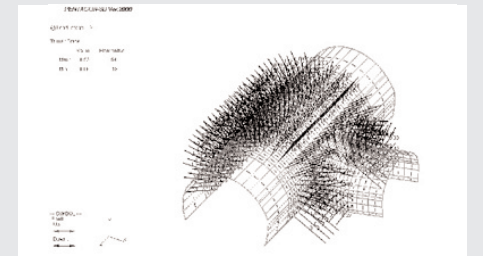
[그림 1] 접속부 현황 및 변위측정지점



[그림 2] 굴착단계에 따른 위치별 변위도



[그림 3] 최종굴착에 따른 스킨리트 압축응력



[그림 4] 최종굴착에 따른 락벨트 축력

에 대한 해석이나 터널교차부, 단면변화부 등에 대해서는 2차원 해석식(평면변형률 조건) 신뢰성있는 결과의 도출이 곤란한 지역으로 굴착하중에 따른 거동의 정량적 평가를 위해서는 3차원 해석을 수행하여야 한다. 또한, 하중분담율이라는 개념을 도입하여 굴착하중을 막장으로 부터의 거리에 따라 적절히 분배하는 방법으로 3차원 해석을 2차원 해석으로 단순화 시킬 수 있으나 터널의 가장 취약한 상태는 막장에서 발생하므로 궁극적으로는 3차원 해석이 바람직할 것이다.

쉽게 접할 수 있는 도로 및 철도터널의 경우를 예로들어 3차원 수치해석 기법을 이용한 해석사례에 대해 알아보도록 하자.

3. 수치해석 사례검토(3차원 해석기법을 중심으로)

3.1) 사갱 접속부 안정성 해석

가. 해석개요

본선터널과 사갱이 접속되는 구간은 본선터널 시공후, 본선터널과 직각으로 사갱을 굴착하는 것으로 계획되어 있으며 접속부근처에서의 응력집중현상 및 지보재에 발생하는 단면력의 파악을 위해 3차원 해석을 수행한 경우임

나. 해석결과요약

1) 시점 갱구부와 마찬가지로 굴착단계에 따른 변위는 상부

토피로 인해 작은 값을 나타냈으며 본선터널 측벽부 및 본선과 사갱이 접속되는 부분의 천단 및 측벽부에서의 최대변위는 0.27 mm 정도로 상대적으로 크게 나타남.

- 2) 터널측벽부에서의 초기 축압계수(K_0)에 따른 3차원 응력분포를 검토하면 K_0 가 2.0 이므로 터널종단방향의 응력이 가장 크고(최대주응력방향) 연직방향(y 방향)이 중간주응력 수평방향(x 방향)이 최소주응력 방향이 됨.
- 3) 본선터널굴착시에는 소성영역이 발생하지 않았으나 사갱굴착에 따라 소성영역이 발생하기 시작하였으며 굴착완료시 파괴율이 1을 초과하는 영역이 본선터널과 사갱이 접속되는 위치에 집중되는 현상을 보이며 사갱이 본선터널로부터 멀어짐에 따라 소성영역이 없어지고 파괴율도 1 이하로 감소하는 것으로 나타남
- 4) 터널주변지반에서의 최대주응력(압축응력)은 본선터널 및 사갱의 바닥모서리부에서 나타났으며 최대값은 터널종단방향(z방향)에서 290tonf/m² 정도로 산정됨. 최소주응력은 터널측벽부에서 나타났으며 지반이 인장응력(+값) 상태가 되는 것으로 나타남
- 5) 굴착하중에 의해 숏크리트에 발생하는 축력 및 모멘트를 종합하여 산정한 숏크리트 최대 압축응력은 본선터

널 및 사갱의 접속부의 천단부근에서 가장 크게 발생하였으며 최대값은 26.4kgf/cm² 정도로 시점갱구부에 비해 2배정도 크게 나타남 최대인장응력은 사갱접속부의 본선터널 측벽부에서 4kg/cm² 정도의 값을 보임

- 6) 록볼트에 발생하는 최대축력은 굴착완료시 0.53 tonf으로 산정되었으며 응력으로 환산하면 100 kgf/cm²으로 재료의 허용인장응력 이내임
- 7) 본선터널 및 사갱접속부의 해석결과를 토대로 굴착 및 지보패턴을 검토하면, 지보패턴은 적절하게 설계된 것으로 보이나 소성영역이 발생하는 지점에 대해서는 록볼트의 추가보강등이 필요한 것으로 판단됨

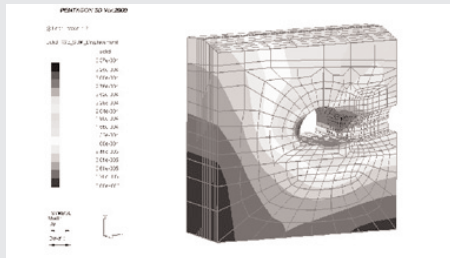
3.2) 비상주차대-차량용 피난연결통로 접속부 안정성 해석

가. 해석개요

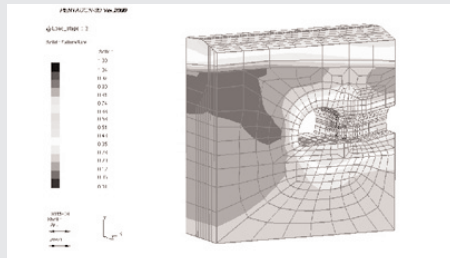
본 해석은 차량용 피난연결통로의 굴착에 의하여 계획구간의 3차원적인 거동이 터널안정성에 지배적인 요인이 될 것으로 판단되며 주변 지반의 응력장이 교란되어 차량용 피난연결통로 및 본선-비주차대 접속구간의 응력 집중이 예상되므로 차량용 피난연결통로 굴착에 따른 영향 및 안정성을 3차원 해석으로 검토한 경우임

나. 해석결과요약

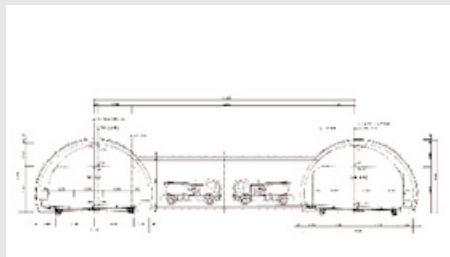
- 1) 본선과 차량용 피난연결통로 접속부에서 피난연결통로의 굴착으로 접속부분의 응력해방에 의한 편차응력의 증가가 일어나며 소성영역이 부분적으로 발생하나 그 값은 접속부 안정성에 영향을 미칠 정도의 큰 값은 아니라고 판단되며 발생하는 지보재응력 및 변위양상은 해석상 안정하다고 판단되며 본선과 비상주차대 확폭구간에서 응력집중 및 지보재응력이 증가하는 경향을 보이거나 모두 허용치 이내로 안정한 결과를 보임
- 2) 차량용 피난연결통로의 최대 천단침하량은 4.05mm로 나타났으며 최대 내공변위량은 2.80mm의 값을 보여 안정한 것으로 나타났으며 본선부 및 비상주차대 확폭구간의 천단침하량 및 내공변위는 비상주차대 확폭구간이 더 큰 변위를 보이며 피난연결통로 굴착의 영향으로 증가하는 경향을 보여 각각 4.66mm와 3.01mm로 나타나 안정한 것으로 판단됨
- 3) 지보재응력은 본선과 비상주차대 확폭구간의 단면변화구간과 비상주차대구간과 피난연결통로 접속부 측벽에 국부적인 응력집중에 의해 큰 값을 보이거나 78.44kgf/m²로 허용응력 이내로 안정한 상태를 보였고 최대 록볼트



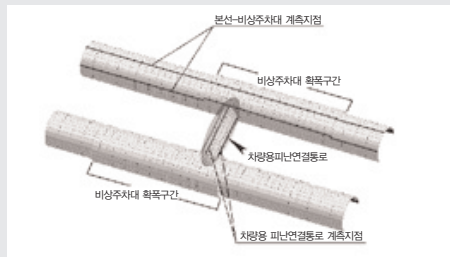
[그림 5] 최종굴착후 변위도



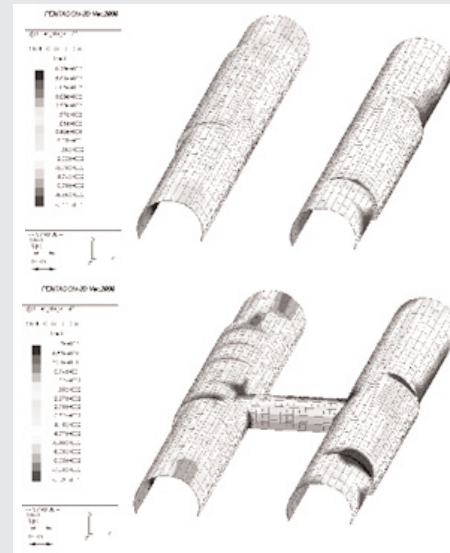
[그림 6] 최종굴착후 파괴율도



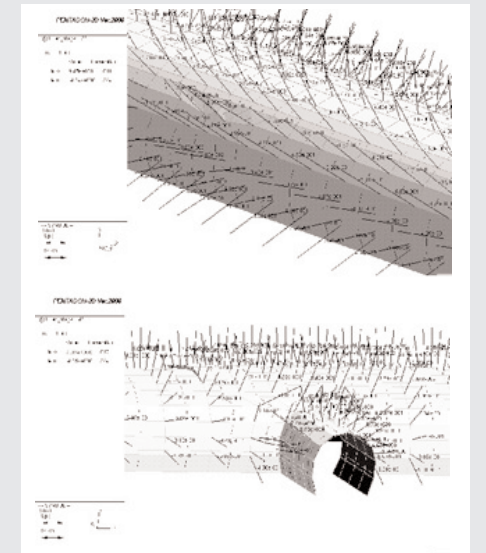
[그림 7] 비상주차대-차량용 피난연결통로 접속부 현황



[그림 8] 모델링 개요



[그림 9] 시공단계별 숏크리트응력 분포도



[그림 10] 시공단계별 록볼트 축력도

축력은 7,360tonf/m²로 허용치 이내로 안정한 것으로 나타남

4) 접속부는 일반 본선터널구간과는 달리 지반의 3차원 거동이 탁월하고 응력집중이 일어나는 구간이므로 적절한 보강이 실시되어야 하며 특히, 현장의 지질상황에 따른 적절한 굴착공법이나 보조공법 등을 적용하여야 함

3.3) 회차갱 안정성 해석

가. 해석개요

배수지 터널 시공 중 원활한 버력처리를 위하여 접속갱 형태의 버력처리 차량의 회차갱을 개설하게 되며, 이에 따른 주변지반의 거동 및 굴착방법에 대한 영향 검토가 필요하고, 회차갱과 같은 단면 변화부의 경우는 굴착에 따라 주변지반이 3차원 거동을 하게되어 설계시 이를 적절히 평가하기 위해 3차원 수치해석을 수행한 경우임

나. 해석결과요약

- 1) 본선구간의 천단부의 변위는 본선 굴착종료시 1,508~1,517mm를 나타내었으며, 회차갱 굴착의 영향으로 최대 1,718mm 까지 발생(13% 증가)
- 2) 본선굴착시 회차갱의 천단부 변위는 0,326mm 가 발생

하였으며, 회차갱 굴착시 천단부의 변위는 1,699mm 까지 증가함

- 3) 주요 시공단계별 각 축점의 슛크리트 휨응력값은 위의 그래프와 같으며 최대 압축응력의 경우 25,411 kgf/cm² 으로서 회차로가 설치되는 본선터널의 축벽부에서 발생하였고, Rock Bolt의 최대 축력은 회차갱 설치 부근에서 발생(본선터널의 경우 2,432 tonf, 회차갱의 경우 3,230 tonf)함
- 4) 설계지보패턴을 적용하여 회차갱구간에 대한 해석결과 지보재의 발생응력이 모두 허용응력 이하이므로 안정한 것으로 판단됨

3.4) 집진기실~기계실 안정성 검토

가. 해석개요

본 해석은 집진기실 설치를 위한 본선구간의 확폭과 기계실의 굴착으로 계획구간의 3차원적인 거동이 터널안정성에 지배적인 요인이 될 것으로 판단되며 주변 지반의 응력장이 교란되어 집진기실 및 기계실에 응력 집중이 예상되므로 굴착에 따른 영향 및 안정성을 3차원 해석으로 검토한 경우임

나. 해석결과 요약

- 1) 동면방향 확폭부 굴착과 기계실의 굴착에 의하여 축벽부의 응력집중으로 최대주응력은 172,0 kgf/cm²의 값을 보이며 집진기실 확폭부와 기계실 접속부 천단부에서의 응력해방에 의한 최소주응력의 감소 경향이 두드러지고 32,4 kgf/cm²의 값을 보이나 그 값이 주변 지반의 강도에 비하여 매우 미소하므로 안정하다고 판단됨
- 2) 양산방향 본선부의 내공변위 및 천단변위 동면방향 본선 및 집진기실 확폭부 굴착에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이나 기계실 굴착에 따른 영향은 거의 없는 것으로 보이며 최대 내공변위는 1,156mm를 나타내며 동면 방향 본선부 및 확폭부 천단변위는 확폭부 굴착후에 대부분의 변위가 발생하며 그 값은 1,25mm로 나타나며 기계실 굴착에 따른 기계실 천단부 변위는 확폭부 접속부에서 최대 1,18mm로 나타남 동면방향 집진기실 확폭부에서 가장 큰 변위를 나타내나 1,13mm 내외로 그 값이 작음
- 3) 본선부, 집진기실 확폭부 및 기계실에 발생하는 슛크리트 응력은 및 록볼트 최대 축력은 각각 45,1kgf/cm² 와 4,743 ton으로 나타나 허용치 이내임

4) 접속부는 일반 본선터널구간과는 달리 지반의 3차원 거동이 탁월하고 응력집중이 일어나는 구간이므로 적절한 보강이 실시되어야 하며 특히, 현장의 지질상황에 따른 적절한 굴착공법이나 보조공법 등을 적용하여야 함

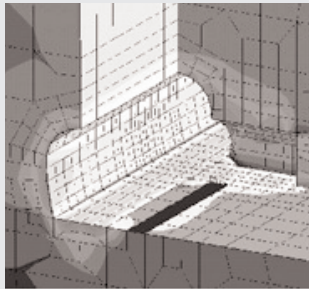
4. 맺음말

이와 같이 도로 및 철도 터널의 최근사례를 예로들어 3차원 수치해석 모델을 적용해야되는 사유와 그에대한 결과를 중심으로 살펴보았다.

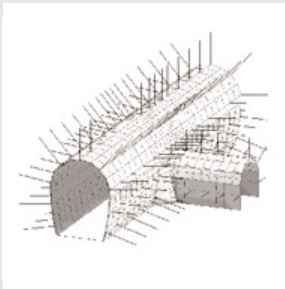
좀더 다양한 형상의 지하공간 굴착에 따른 3차원 모델링을 통해 시공중 발생할 수 있는 응력분포 및 변위, 지보재의 역할을 굴착과정에 따라 사전에 인지할 수 있게 해주며, 최종 굴착에 대한 목적구조물의 형상을 알기 쉽게 보여준다.

현재 이러한 수치해석적 분석기법을 활용한 접근방법은 실사공시 발생되는 오류를 최소화하여 안정적이고 경제적인 시공을 가능하게 하는 일련의 수단이 되고 있다.

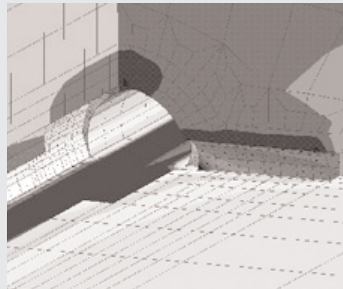
또한, 이를 활용한 미래의 지하공간은 폐쇄적이고 답답한 공간이 아닌 지상의 혼잡과 공해문제를 해결할 수 있는 입체적이고 아름다운 생활환경이 될 것이다.



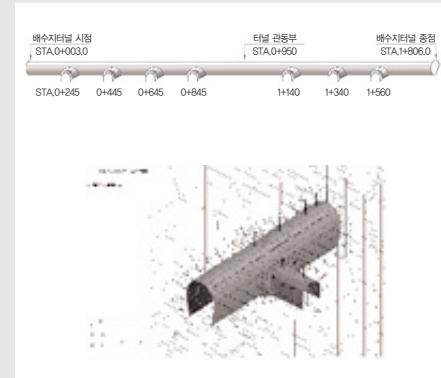
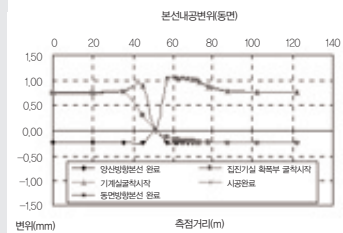
[그림 12] 최대 및 최소 주응력도



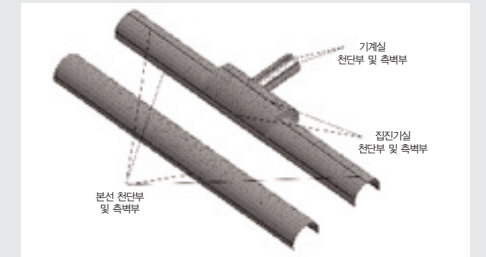
[그림 13] 슛크리트 모멘트 및 락볼트 축력도



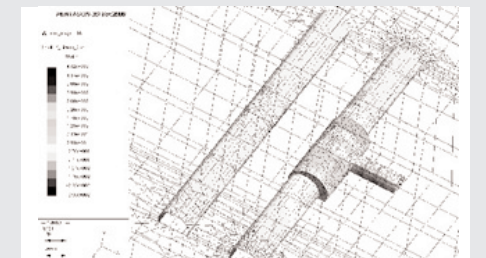
[그림 15] 기계실 굴착후 Y방향 변위도 및 내공변위



[그림 11] 회차갱 현황 및 모델링 개요



[그림 14] 집진기실~기계실 개요



[그림 16] 굴착완료후 슛크리트 응력도