

터널 3차원 계측 및 분석기법을 적용한 전방 지반거동 예측

Article

05



구 자 갑

한경대학교 토목공학과 교수

1. 머리말

터널 구조물은 원지반의 하중상태나 역학적 특성 등의 부정확성, 지보재의 특성과 터널 주변지반의 응력과 변위가 재분배되는 아칭효과(arching effects)등의 터널 거동에 영향을 미치는 요소가 매우 복잡한 관계로, 설계 단계에서 그와 관련된 정확한 정보를 판단하여 대처하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이러한 이유로 터널시공 중 계측을 통한 터널 및 주변지반의 거동을 관찰하고 이를 이용한 설계변경 및 수정, 시공개선 등의 과정을 통하여 터널의 장·단기적인 안정성을 확보하는 일련의 과정이 NATM 공법의 가장 기본적인 동시에 가장 중요한 요소라 할 수 있다.

국내의 경우 터널시공시 계측을 실시하고 있으나 그 결과에 대한 분석기술은 기존 방식을 크게 벗어나지 못하는 실정이며, 이로 인해 터널 시공중의 거동예측 오류, 터널붕괴사고 및 막대한 경제적 손실 등이 초래되고 있는 것도 현실이다. 특히, 과도한 변위가 예상되는 지반조건인 경우, 지반조건 변화의 사전예측을 통한 적정 지보

설계 변경 등의 사전대책 수립 등이 매우 중요시 되고 있으나, 터널의 천단침하 및 내공변위 등을 측정한 뒤, 시간에 따른 그 변위량 및 변위속도, 수렴상태 등을 살펴보는 기존의 계측결과 분석방식은 막장 전방의 지반조건 변화를 적절하게 예측하는데 한계를 가질 수밖에 없다.

비록 사전 지반조사를 통하여 지반정보를 어느 정도 알고 있어도 변화하는 지반 조건 및 막장 전방의 지질특성을 예측하는 것은 매우 어려운 것이 사실이다. 이러한 이유로 최근에는 3차원계측 및 그 분석방법에 대한 연구 내용들이 활발히 발표되고 있다. 외국에서는 3차원변위 계측 결과를 터널 시공 중의 중요 의사결정 자료로 적극 활용하고 있으며, 이를 통해 시공비 절감 및 공기단축의 효과를 얻고 있다.

따라서 기존 천단침하 계측결과의 한계점을 수치해석적 방법으로 제시하고, 막장 전방의 지층변화나 파쇄대층의 존재가 vector orientation 및 연직방향 변위에 미치는 영향을 알아보고자 기존 현장사례에 대한 분석과 함께 3차원 수치해석을 실시하였다. 이를 통해 다양한 조건별 vector orientation의 변화특성 및 현장계측결

과의 활용기법 등을 제시하고자 한다.

2. 현재의 터널계측 현황

2.1 터널 계측계획의 수립

현재 국내에서 수행되고 있는 터널계측은 공사중 계측 및 유지관리 계측으로 구분될 수 있으며, 공사중 계측은 일반적으로 일상계측 및 정밀계측으로 세분화되는데, 모든 계측에 있어 터널 구조물의 안정성 확보 및 경제성 향상의 공통적 목적이 내포되어 있다.

터널 구간의 지반은 구성이 복잡하고 재료적 특성도 매우 다양하여 설계단계에서 지반특성을 정확히 판단하는 것은 현실적으로 불가능하다. 설계는 한정된 지반정보를 바탕으로 이루어질 수밖에 없으므로 시공단계에서의 실제 지반조건이 설계시 예측결과와 상이한 경우가 흔히 발생하게 된다. [그림 1]에서와 같이 공사중 계측을 통해 터널 굴착중의 지반거동 및 각 지보재의 효과, 구조체로서의 안정성, 기존시설물에 미치는 영향 등을 파악하여 터널설계의 불확실성을 보완하고 실제 계측결과를 바탕으로 한 설계변경 및 보완작업을 수행함으로써 터널의 안정성 및 경제성을 확보하여야 한다. 이러한 목적을 위한 공사중 계측의 세부 수행내용은 다음과 같다.

(안정성의 확인)

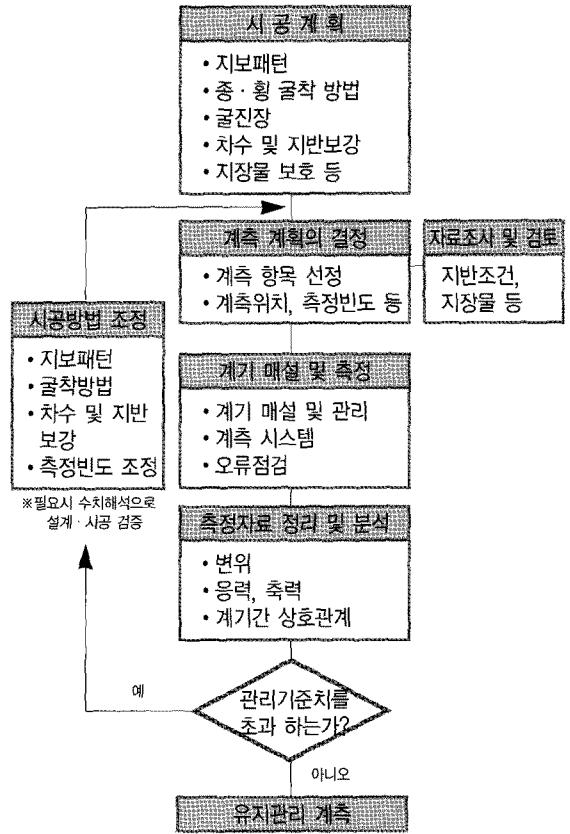
- ① 주변지반의 거동파악
- ② 지보재의 효과확인
- ③ 터널 구조체의 안정성 확인
- ④ 주변 구조물의 영향 파악

(경제성의 확보)

- ① 설계 및 시공에 계측결과를 반영하여 경제적인 공사를

유도

- ② 향후 공사 진행시의 기초자료 활용
- ③ 소송, 보상 등을 위한 근거자료 확보



[그림 1] 터널의 계측

2.2 계측항목의 구분 및 선정

현재 국내에서는 터널계측을 일상계측, 정밀계측, 유지관리계측으로 구분한 후, 각 목적에 따른 적정 계측항목을 선정하여 실무에 적용하고 있다.

일상계측(A계측)은 터널 주변지반의 안정성 확보와 설계 및 시공반영을 위하여 일상적인 시공관리 차원에서 실시하는 계측을 의미한다. 정밀계측(B계측)은 지반 조

건 또는 주변여건에 따라 정밀한 지반 및 구조물의 거동을 관찰할 목적으로 필요에 따라 일상계측에 추가하여 실시하는 것을 의미한다. 유지관리계측은 일반관리계측과 대표단면계측으로 구분할 수 있으며, 일반관리계측은 유지관리 대상 전 구간에서 시행하는 주로 터널의 전반적인 안전성 확인을 위한 계측이며, 대표단면계측은 설계 시공상의 불확실 요소가 내재되어 있거나 외력조건의 변화가 예상되는 등 특수조건을 갖는 위치에서 수행하는 계측을 말한다.

터널의 계측항목 선정에 있어서는 설계시 지반상태 및 그에 따른 지보재의 효과를 파악하여 각 계측의 역할과 이용도를 충분히 고려함으로써 필요한 계측항목을 선정하게 된다.

[표 1] 터널 공사중 계측항목 및 판단내용

계측항목	내 용	
일상 계측 (A)	경내관찰	막장의 안정성, 지질상황, 용수상태, 기 시공구간의 상황을 판단하여 지반구분의 재평가 및 지반상황과 지반거동의 상관성, 막장 이후의 지반상황을 추정
	지표침하	지표면의 침하 및 융기를 측정하여 터널굴착의 영향을 평가
	내공변위	터널 벽면간 거리변화, 변위속도를 파악하여 주변 지반의 안정 및 지보재의 효과, 콘크리트 라이닝의 타설시기를 판단
	천단 침하	천단침하를 측정하여 터널 천단부 및 주변지반의 안전성을 판단
정밀 계측 (B)	록볼트 축력	록볼트 축력을 측정하여 록볼트의 길이, 개수, 위치, 정착방법의 타당성을 판단
	숫크리트 응력	숫크리트의 접선 및 반경방향의 응력을 측정하여 숫크리트의 두께, 시공시기의 타당성 및 단면폐합에 의한 효과를 판단
	지중 변위	터널 경내에서 측정하는 변위로 터널 주변지반의 이완영역, 록볼트 길이의 타당성, 지중 변형분포를 판단
지중 침하	지상에서 측정하는 터널 주변지반의 연직변위로 굴착 이전에 대한 지반거동의 안정성을 판단	

[표 1]은 터널 시공시 수행되는 계측항목 및 계측결과로부터의 판단내용을 나타낸 것이다. 각 계측항목의 중요도는 터널의 용도, 규모, 지반조건, 주변환경, 시공방법 등에 따라 상이하기 때문에 구체적인 계측결과의 활용목적, 평가방법을 명확히 설정한 뒤 계측계획 수립시 필요한 항목을 선정하여야 한다.

3. 3차원 터널계측 및 분석

3.1.3차원 계측의 필요성

터널의 천단침하나 내공변위를 측정한 뒤, 시간에 따른 그 변위량 및 변위속도, 수렴상태 등을 살펴보는 형식의 분석방법은 가장 보편적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 이러한 1차원적 변위에 대한 분석방법은 주변 지반의 거동 및 터널의 안정성 확보를 위한 정보를 습득하는데 있어 아래와 같은 문제점을 가질 수밖에 없다.

(기존 1차원적 변위 분석시의 문제점)

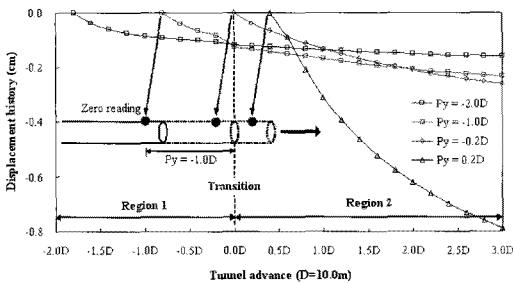
- 변위수렴 여부에 대한 판단 오차 (Scale)
- 변화하는 지반조건 예측의 지연(판단오류 가능성 증가)
- 지반의 이방성 및 지질조건, 응력조건 등을 반영하지 못함(단편적 변위거동 파악)

[그림 2]는 터널 굴착과정별 실제 계측시점을 고려한 수치해석 결과로서, 기존의 1차원적 천단침하 계측결과가 변화하는 지반조건을 예측하는데 있어 상당한 예측 지연 결과를 초래한다는 것을 나타내고 있다.

터널 굴착이 진행되는 지층을 크게 Region 1과 Region 2로 구분하되, Region 1이 Region 2에 비해 상대적으로 강성이 좋은 지반조건을 나타내도록 지반 물

성치를 적용하였다(세부 내용은 3차원 수치해석 내용 참조).

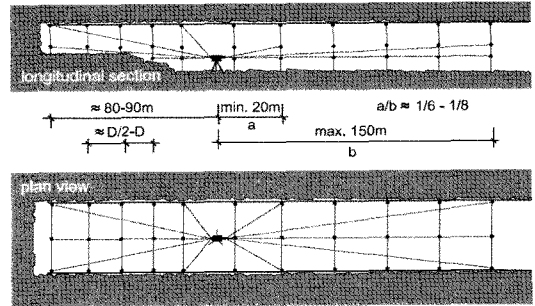
천단침하용 계측지점은 $P_y = -2.0D$ (터널직경), $-1.0D$, $-0.2D$, $+0.2D$ 로 하였으며, 계측기 설치지점은 1회 굴진장을 1m로 했을 때, 2막장 굴착후에 설치하는 것으로 고려하였다. 결과에서 알 수 있듯이, 상대적으로 양호한 지반에서 연약한 지반으로 터널굴착이 진행되지만, 계측결과를 통한 전방 연약층의 존재는 연약층에 대한 터널굴착이 진행된 후에야 비로서 인지가 가능함을 알 수 있다. 즉, 기존 천단침하 분석결과로서는 연약층에 대한 굴착시점 이전에 그 존재를 예측하는 것이 어렵다는 것을 의미하고 있다.



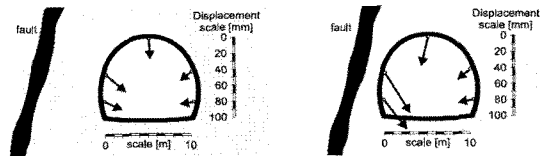
[그림 2] 실제 터널계측시점을 고려한 천단변위 경향(막장면 2m 뒤)

이러한 이유로 최근들어 3차원 계측 및 그 분석방법에 대한 연구내용들이 활발히 발표되고 있다. 오스트리아에서는 3차원 변위에 관한 계측결과를 분석한 결과, 3차원적 변위발생 경향은 인접 연약층의 공간적 존재를 인지하는데 큰 역할을 하며, 막장 전방의 지반조건 및 터널 주변의 지반거동이 터널 내 변위벡터의 회전(이하 “vector orientation, α ”라 명명)에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로, 다양한 응력조건과 지반강도 등에 관한 수치해석을 실시하였으며, 그 결과

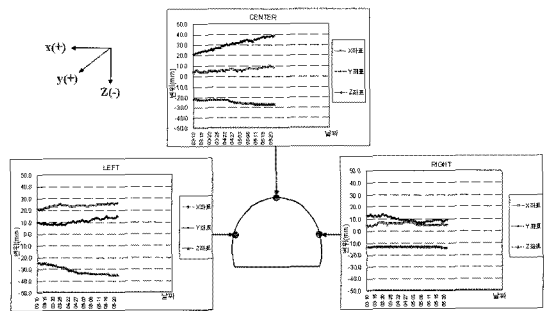
vector orientation은 주변지반의 거동양상 및 전방 지질을 예측하는 좋은 수단임을 밝힌바 있다.



[그림 3] 3차원 계측 모식도



[그림 4] 3차원 계측에 의한 변위거동 분석 예

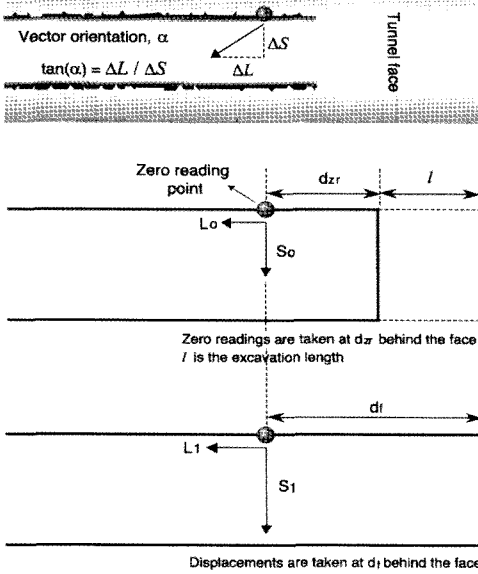


[그림 5] 3차원 계측결과 분석 예

3.2 Displacement vector orientation,

오스트리아에서는 터널 시공 중, 터널 특정 지점에서의 수평변위 성분(ΔL)과 수직변위 성분(ΔS)의 증분비로 표현되는 Vector orientation(ω)의 변화를 통해, 전방 지질조건의 변화를 예측할 수 있음을 확인한 바 있다.

현재 굴착지반에 비해 전방의 지반조건이 좋지 않은



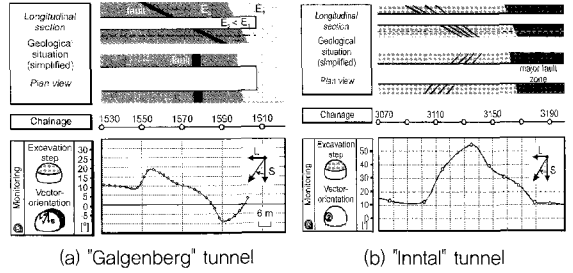
[그림 6] Vector orientation 정의

경우, 터널굴착이 진행됨에 따라 막장 전방의 수평변위가 굴착반대방향으로 증가하게 되며, 이를 통해 α 는 증가하게 된다.

즉, 균질한 지반에서는 막장 굴착이 진행됨에 따라 수평변위 및 수직변위의 증분비가 일정한 경향을 나타내게 되지만, 지반조건이 안좋은 경우가 막장 전방에 나타날 경우, 수평변위의 증가량이 수직변위의 증가량보다 커지면서 전체적인 α 값이 증가하게 된다.

이 반대의 경우는 α 의 절대값이 감소하는 것이 아니라, 수평변위의 증분방향이 변화되어 결과적으로는 반대현상이 발생하게 된다. 이러한 현상은 [그림 7]의 실제 터널시공중의 계측결과 사례(Galgenberg 및 Inntal tunnel)에 의해 확인되었다.

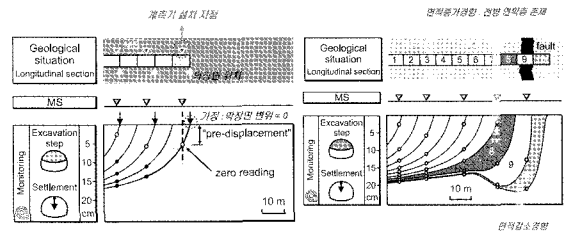
터널 굴착에 따른 시공단계별 α 값은, 각 단계별 zero reading에 의한 3차원 계측결과를 이용하여 [그림 6]과 같이 계산할 수 있다.



[그림 7] Vector orientation 분석사례

3.3 영향성 및 경향선 분석

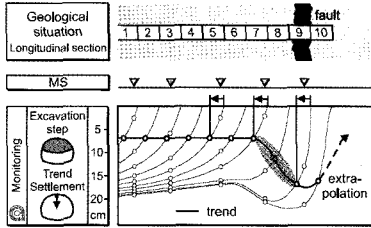
각 방향별 변위는 기존의 시간별 경시변화가 아닌 영향선(Influence line) 및 경향선(Trend line) 작성을 통해 방향별 지반거동과 전방 지층특성 예측에 활용될 수 있다.



[그림 8] 영향선 작성 및 활용

영향선은 임의 위치에서의 계측성과를 연속적으로 도시한 것으로서, 임의 지점에 대한 변위증가 경향 및 면적증가 경향을 통해 전방 연약층 파악에 이용될 수 있다. 단, 막장면으로부터의 계측기 설치위치 및 측정시기에 대한 신중한 고려가 필요하다.

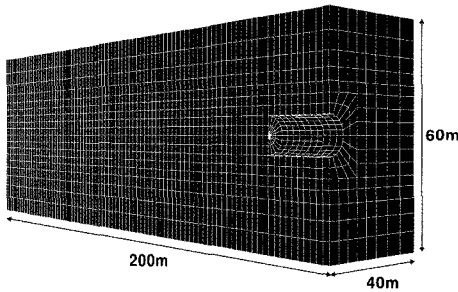
경향선은 기 작성된 영향선을 이용하며, 막장면에서 특정 거리에 대한 변위 경향 분석을 통해 전방 연약층 분포 파악에 이용될 수 있다. 만약 전방에 현재의 지층보다 연약한 지층이 분포할 경우, 경향선상의 특정거리별 경향선 기울기 및 거리가 크게 증가하게 된다.



[그림 9] 경향선 작성 및 활용

4. 터널 3차원 수치해석

4.1 수치해석 개요



[그림 10] 3차원 터널 수치모델

터널 3차원 수치해석을 통해 다양한 경우에 대한 터널 굴착시의 변위벡터회전(displacement vector orientation)을 살펴보았다. 수치해석에 사용된 프로그램은 FLAC^{3D}로서, 경계조건에 의한 수치해석 오차를 최소화하고 소정의 신뢰도를 확보하기 위하여 해석단면의 크기 및 요소 크기와 수 등을 변화시켜가며 다양한 해석을 실시하였다. 그 과정을 통해 결정된 최종적인 해석요소망은 [그림 10]과 같다. 터널은 원형터널로 가정하였으며, 1회 굴진장은 2.0m로서 총 90회의 굴착단계별 해석을 실시하였다.

터널 주변에 대한 요소 분할 수는 터널 천단부 및 측벽 부 응력과 변위에 큰 영향을 미치는 관계로, 본 연구에서

는, 다양한 터널 주변 분할수에 대한 해석을 실시한 후, 이 결과를 Kirsch 방정식의 해석해와 비교하여 최적의 분할수를 결정, 이를 해석에 적용하였다.

4.2 해석조건 및 방법

Schubert 등의 연구는 대심도 터널을 대상으로 했기 때문에, far-field 응력을 적용하였으며, 지반은 탄성모델로 해석에 적용하였다. 본 연구는 터널 심도가 깊지 않은 산악터널 및 도심지 터널을 대상으로 하기 때문에, 경계조건으로서 별도의 far-field 응력을 적용하지 않았으며, 원지반 응력은 지반의 단위중량에 의한 깊이별 증가 형태로 고려하였고, 지반은 Mohr-Coulomb 모델을 이용하여 해석에 적용하였다. 단, 탄성모델과 Mohr-Coulomb 모델과의 비교·분석을 위한 탄성해석도 실시하였다.

현재 굴착지반보다 막장 전방의 지반조건이 좋지 않은 경우를 표현하기 위하여, 전체 지반을 두 부분(Ground 1 및 Ground 2) 혹은 여러 부분으로 구분하여 각기 다른 지반 특성치를 적용하였는데, 구체적인 지반 특성치는 아래 표와 같다.

터널 굴착중, 임의 지점에 대한 변위는 막장 전방에서부터 발생하기 시작하여, 터널굴착이 진행됨에 따라 일정한 값에 수렴하게 된다. 수치해석을 통해서 이러한 일련의 변위 진행과정을 모두 알 수 있지만, 실제 현장에서의 예측결과는 어느 정도의 변위가 진행된 후의 과정만을 알 수 있다. 이러한 이유로, zero reading을 통한 수치해석 결과의 보정이 필요한데, 본 연구에서는, 모든 해석 경우에 있어 zero reading을 실시하여 각 시공단계별 변위를 보정하였으며, 터널막장으로부터 zero reading 지점까지의 거리별 수치해석을 실시하여 그 영

향을 분석하였다.

여기에서는 다양한 조건에 대한 방향별 변위 및 α 의 변화특성을 파악하기 위한 3차원 변위해석을 실시하였다.

[표 2] 3차원 수치해석 입력치

Ground	Ground 1	Ground 2			Remarks
Properties Symbol	G1	G2-1	G2-2	G2-3	Material :
Elastic modulus(MPa)	300	30	20	15	Elastic &
Cohesion (MPa)	0.2	0.03	0.02	0.01	Mohr-
Friction angle (°)	35	30	29	25	Coulomb
Poisson's ratio	0.30	0.35	0.35	0.35	
Density (kg/m ³)	2,200	2,000	2,000	2,000	

[표 3] 다양한 3차원 해석조건

Parameters	Typical values	Remarks
Model	Elastic and Mohr-Coulomb	Geotechnical properties for weak zone :
Stiffness ratio, E_1/E_2	10, 15, 20	G2-1, G2-2, G2-3
Primary stress conditions, k_0	0.5, 0.75, 1.0	θ_{int} : angle of interface
Extension of weak zone, L_s	10m, 20m, 30m, 50m, 100m	adjacent two grounds with horizontal axis
Tunnel diameters, D	5.0m, 7.5m, 10.0m	
Interface angle, θ_{int}	90°	
Distance of zero reading, d_{zr}	0.0m ~ 16.0m	

4.3 막장전방 연약층 영향

터널 막장 전방에 연약층이 존재하는 경우를 대상으로, 터널 굴착에 따른 변위 및 α 의 기본적인 변화경향을 살펴보기 위한 수치해석을 실시하였다.

터널 천단부에서의 수직침하량 변화를 볼 때, 터널 막장이 연약층에 접근함에 따라 점차 증가하는 추세를 보이지만, 두 지반의 경계지점에서도 그 변화는 미비하며 0.4D 이상 연약층을 통과한 후에야 급격한 증가양상이

나타남을 볼 수 있다. 이 결과는 실제 시공시, 터널 천단부 침하량이나 내공 변위량의 예측결과에 과도한 변위량이 확인된 시점은 이미 상당량의 변위가 진행된 후라는 사실을 의미한다.

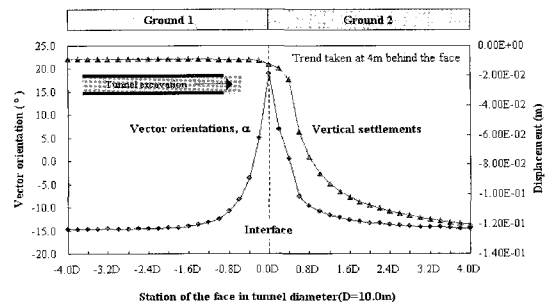
[표 4] 해석적용 지반 물성치

Properties	Ground	Ground1	Ground2	Ground 2 is relatively weak zone
Elastic modulus (MPa)		300	30	- $k_0 = 0.5$
Cohesion (MPa)		0.2	0.03	- Mohr-Coulomb model
Friction angle (°)		35	30	- $E_1 / E_2 = 10$
Poisson's ratio		0.30	0.35	- Tunnel diameter = 10.0m
Density (kg/m ³)		2,200	2,000	- $d_f = 4.0m$
				- $\theta_{int} = 90^\circ$

* d_f : distance from the tunnel face to reading point

Vector orientation(α)의 경우, 연약층의 영향이 미치지 않는 곳에서는 일정한 값의 경향을 보이지만, 터널 막장이 점차 연약층에 가까워질수록 그 값이 증가하는 형태를 보이며, 연약층과의 경계면에서 그 값이 최대가 됨을 확인할 수 있다.

해석결과에서는 대략 경계면에서 -1.8D 떨어진 거리부터 서서히 증가하기 시작했으며, -0.6D부터는 그 값이 급격하게 증가함을 확인할 수 있었다. 일단 터널 막장이 연약층을 통과하면, 서서히 그 값이 감소하면서 일정 거리를 지나서는 또다시 일정한 값에 수렴함을 볼 수 있



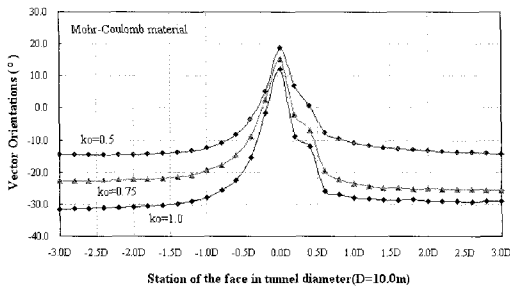
[그림 11] 터널굴진에 따른 천단변위 및 변화

다. 즉, 막장 전방에 지반조건이 좋지 않은 연약층이 존재할 경우, α 의 변화 경향으로부터 막장 전방의 연약층 분포를 조기에 예측할 수 있으며, 그 예측시점은 터널 천단부 침하량을 이용하는 경우에 비해 매우 빠르다는 것을 알 수 있다.

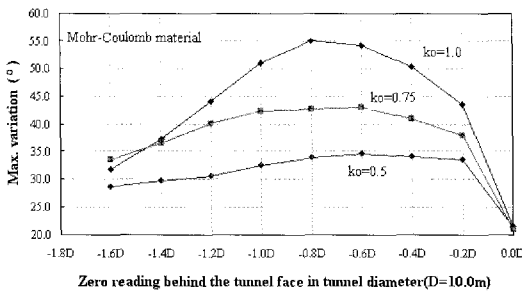
4.4 초기 주응력 영향

k_0 에 따른 초기 주응력이 α 의 변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여, k_0 를 각각 0.5, 0.75, 1.0으로 변화시켜 가며 해석을 실시하였다. 결과에서 보듯이, k_0 가 클수록 α 의 절대값은 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 k_0 에 따른 수평방향 변위의 증가에 기인한 것으로, $\Delta\alpha_{max}$ 도 증가하는 경향을 보인다.

k_0 에 따른 계측지점별 $\Delta\alpha_{max}$ 의 변화양상을 살펴보면, k_0 가 클수록 임의 지점에서의 $\Delta\alpha_{max}$ 뿐 아니라, $\Delta\alpha_{max}$ 가



[그림 12] 주응력 조건에 따른 변화



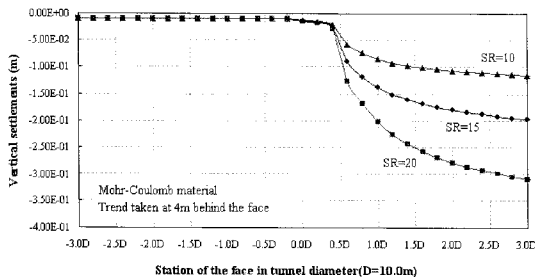
[그림 13] 주응력 조건별 최대 변화

감소경향을 나타내는 지점까지의 거리도 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 k_0 가 커질수록, 막장 전방에 존재하는 연약층의 영향에 의한 α 값의 변화시점도 빨라지는 것을 알 수 있다. 본 해석 결과상에서는, k_0 가 0.5일 경우, α 값은 연약층으로부터 -2.0D떨어진 지점에서부터 변화하기 시작하였으며, k_0 가 0.75일 경우는 -2.2D, k_0 가 1.0일 경우는 대략 -2.4D 정도에서 그 변화가 시작되었다. 즉, 실제 현장의 k_0 가 커질수록, α 의 변화를 통한 막장 전방의 연약층을 더욱 빠르고 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

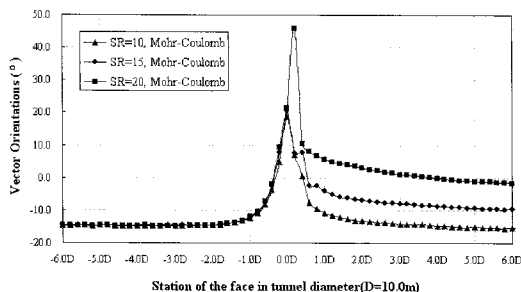
4.5 지반 강성비 영향

두 지반의 강성비가 α 의 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 지반변화의 경계점(0.0D)으로부터 시작되는 연약층의 지반 특성치를 변화시켜 가며 해석을 실시하였다. 해석시 두 지반에 대한 특성치중 탄성계수의 비를 SR로 표시하였는데, 해석에 이용된 SR값은 10, 15, 20이다. 아래 그림은 각각의 SR에 대한, 터널 굴착에 따른 천단 침하량의 변화를 나타낸 것으로서, 연약층의 지반 특성치가 불리할수록 연약층에서의 천단 침하량도 증가함을 볼 수 있다. 즉, 천단 침하량을 이용하여 연약지반의 존재를 예측할 수 있는 시점은, 연약층의 지반 특성치에 관계없이 이미 연약층으로 터널굴착이 진행된 후라는 것을 유추할 수 있고, 실제 터널현장에서는 이같은 경우, 이미 막장면 붕괴가 발생했을 것이다.

SR에 따른 α 의 변화에서 알 수 있듯이, SR에 관계없이 α 의 변화시점은 대략 -2.0D로 비슷하게 나타났다. 에 있어서는, SR=20인 경우, 지반 변화의 경계점에서 순간적으로 큰 폭의 발산경향을 보이고 있는데, 이는 연약층의 매우 불리한 지반 특성치로 인해, 경계점에서 소성파



[그림 14] 강성비 차이별 천단변위 분포



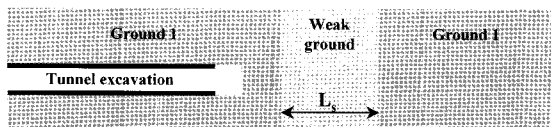
[그림 15] 강성비별 분포 변화

괴가 발생했기 때문이다.

모든 조건을 동일하게 하되, 탄성해석을 실시한 결과를 볼 때, SR=20인 경우도 다른 경우와 마찬가지로 거의 비슷한 값을 보임을 알 수 있다. 즉, 막장전방 연약층의 존재를 파악하는데 있어, α 의 변화 시점 및 정도는 전방 연약층의 변형계수 및 전단강도와 같은 지반 특성치에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

4.6 연약층 규모 영향

연약층의 폭(L_s)이 α 의 변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여, L_s 값을 10m, 20m, 30m, 50m, 100m로 변

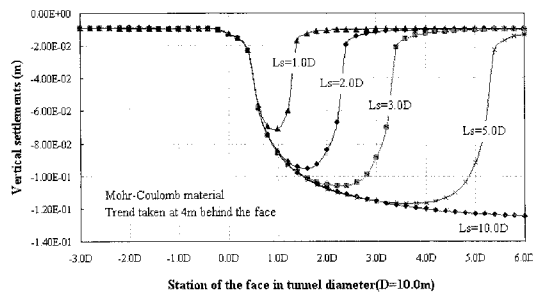


[그림 16] 중간 연약층 모델링 모식도

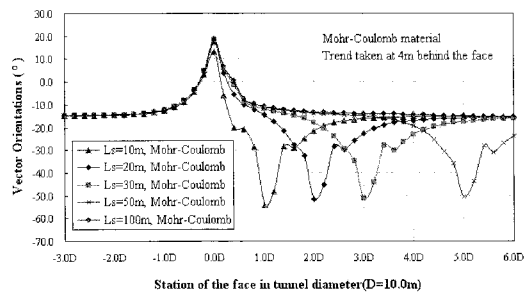
화시켜 가며 해석을 실시하였다. 해석에 적용된 지반 특성은 위의 SR=10인 경우와 동일하며, 연약층이 나타나는 지반 변화의 경계점은 0.0D이다.

터널이 ground 1을 통과할 때는 일정한 천단 침하 양상을 보인다. 추가적인 굴착에 의해, 터널이 상대적으로 지반 강도가 낮은 연약층을 통과하면서 천단 침하량은 급격히 증가하게 되지만, 천단 침하량이 증가하기 시작하는 시점은 이미 터널 막장이 연약층으로 진입한 후라는 것을 알 수 있다. 연약층을 벗어나 다시 ground 1로 진입한 후에는 원래의 양상대로 일정한 값으로 천단 침하량이 수렴되는 것을 볼 수 있다.

Vector orientation, α 의 경우, 지반 강도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 터널 굴착이 진행되는 ground 1에서는 연약층에 터널 막장이 접근함에 따라 급격한 증가양상을 보이나, 지반 강도가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 터널



[그림 17] 연약층 거리별 천단침하 분포



[그림 18] 연약층 거리별 분포

굴착이 진행되는 연약층에서는 방향에 있어 반대의 현상이 나타난다. 즉, 반대방향으로의 변위 경향이 발생하는데, 이때 각 경우별 $\Delta\alpha_{max}$ 는 비슷한 것으로 나타났고, 연약층을 벗어나서는 다시 ground 1에서의 평균적인 α 값으로 수렴되었다.

각기 다른 L_s 에 대한, 굴착단계별 α 의 변화양상을 살펴보면, 각 경우별 α 의 초기 변화시점 및 $\Delta\alpha_{max}$ 는 큰 차이를 보이지 않았는데, $L_s=10m$ 인 경우에 있어서도, 지반 변화지점으로부터 소정의 거리 앞에서 α 의 변화양상이 확연히 보이는 것을 알 수 있다. 이로부터, 비록 터널 막장 전방에 좁은 폭을 갖는 파쇄대 혹은 연약층이 존재하는 경우에 있어서도, α 의 변화를 통해 그 존재를 사전에 예측하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그러나, $\alpha_{값}$ 혹은 $\Delta\alpha_{max}$ 로부터 터널 막장 전방의 연약층에 대한 폭을 예측하는 것은, α 가 위에서 언급한 여러 가지 원인에 의해 변화할 수 있는 점을 감안할 때, 현실적으로 어렵다고 판단된다.

4.7 터널 직경 영향

모든 거리는 터널 직경에 대한 비로 표현하였는데, 터널 직경을 달리할 경우에 대한 α 의 변화시점 및 $\Delta\alpha_{max}$ 의 변화를 살펴보기 위하여, 터널 직경을 5.0m, 7.5m, 10.0m로 변화시켜 가며 해석을 실시하였다.

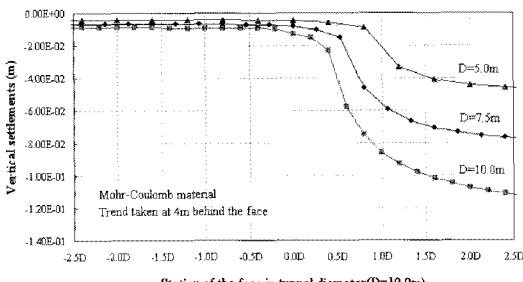
모든 조건이 동일한 상태에서 단지 터널의 직경 변화에 대한 영향만을 살펴보기 위해서는, 터널 각 부분에 작용하는 초기 응력이 각각의 해석경우에 있어 동일해야 하지만, 해석상에서 완전하게 동일한 하중조건을 유지시킨 채 터널 직경만을 변화시키는 것은 쉽지 않은 관계로, 각각이 해석경우별로 하중조건에 있어 약간의 차이가 발생하였다.

터널 굴착에 따른 천단 침하량의 변화양상을 볼 때, 초기 응력조건 차이에 의해 각 경우별로 차이가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이에 의해 α 의 변화양상에도 각 해석 경우별로 약간의 차이가 발생하였다.

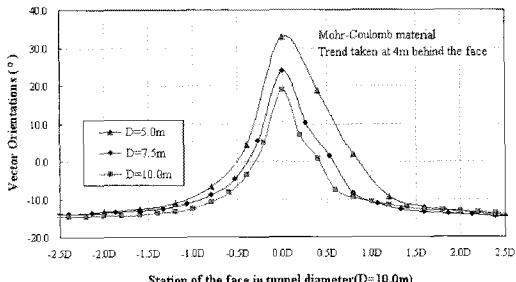
터널 직경이 5.0m인 경우, 가장 작은 천단 침하량이 발생하였는데, α 의 변화양상에 있어서는 오히려 가장 큰 $\Delta\alpha_{max}$ 와 이에 기인한 가장 빠른 변화시점을 보였다.

이는 동일한 지보압하에서 터널 직경이 작은 경우가 큰 경우에 비해, 작은 천단 침하량을 발생시키게 되고, 이에 의해 상대적으로 α 값은 커졌기 때문이라 판단된다.

그러나, 연약층의 존재를 나타내는 α 의 변화 등 전체적인 경향은 앞서 언급된 결과와 일치하며, 만약 각기 다른 조건하에서도 결과적으로 비슷한 범위의 변위가 발생하는 경우라면, 터널 직경의 비로 표현되는 α 의 변화시점에는 큰 차이가 없다고 판단된다.



[그림 19] 터널직경별 천단침하 분포



[그림 20] 터널직경별 분포

5. 결론

국의 터널현장에서 관찰된 현상을 기초로 기존터널변위 계측방식의 문제점을 제시하고, 이에 대한 보완수단으로서 3차원 계측 및 분석에 대한 필요성을 제시하였다. 터널에 대한 3차원 수치해석을 통해, 3차원 계측결과에 의해 산정된 변위벡터의 회전량 및 그 증감경향으로부터 막장 전방에 존재하는 연약층의 존재를 사전에 예측할 수 있음을 확인할 수 있다. 터널 굴착시, 전방의 변화하는 지반조건을 나타낼 수 있는 α 의 변화는, 천단 침하량이나 내공 변위량에 비해 더욱 빠른 시점에서 나타났다. 인접해 있는 두 지반의 강성비나 연약층의 폭, 터널 직경 등은 α 의 변화시점 및 $\Delta\alpha_{max}$ 에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 지반의 초기 응력상태 및 지보압, 소성영역의 발생범위 등은 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

특히, 현장에서의 계측결과를 이용한 초기화(zero

reading)은 α 의 변화를 분석하는데 있어 매우 민감하고 중요한 요소임을 확인할 수 있었다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 기존의 절대변위 계측 및 분석방법은 터널 안정성과 관련된 정보를 주지 못하는 한계점을 내포하고 있으며, 변화하는 지반조건 및 터널 안정성을 판단하는데 있어 수평변위를 포함한 3차원 계측이 필요함을 알 수 있다.
- 3차원 계측결과를 바탕으로한 Vector Orientation 변화로부터 변화하는 지반조건을 예측할 수 있었으며, 3차원 계측결과를 분석하는데 있어, Zero Reading 및 막장부근에서의 방향변화를 신중히 고려하는 것이 전체 분석에 있어 매우 중요한 요소임을 알 수 있다.
- Vector Orientation 분석은 지반의 초기응력상태(ko) 및 전방지반 상태에 대한 정략적 상태를 반영하지는 못하므로, 터널시공중의 정략적 관리기준치로 사용하는 것 보다는, 전방의 연약층 존재 예측 및 3차원적 변위거동을 판단하여 이에 대한 시공중 보강방법과 영역 등을 결정하는데 활용될 수 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 구자갑 외 (1994). 안정된 지하구조물의 설계와 시공. 세론출판사
2. 구자갑, 전제성 (2003). 3차원 변위벡터 분석을 통한 전방 지반거동 예측. 대한토목학회논문집, 제13권, 제III-4호, pp. 505-519.
3. Golser, H. and A. Steindorfer (2000). Displacement Vector Orientations in Tunnelling - What do they tell?. Felsbau, Vol. 18, No. 2, pp. 16-20.
4. Itasca Consulting Group Inc. (1996). FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), version 2.0, User's manual, Vol. 1, 2, 3.
5. Rokahr, R. B., Stark, A., and Zachow, R. (2002). On the Art of Interpreting Measurement Results. Felsbau, Vol. 20, No. 2, pp. 16-21.
6. Schubert, W. and A. Budil (1995). The importance of longitudinal deformation in tunnel excavation, 8th Congress on Rock Mechanics:Pro. of the Int. Society for Rock Mechanics, Tokyo, Rotterdam, Balkema, pp. 1411-1414
7. Schubert, W., Steindorfer, A., and Button, E. A. (2002). Displacement Monitoring in Tunnels - an Overview. Felsbau, Vol. 20, No. 2, pp. 7-15.
8. Tonon, E. and B. Amadei (2000). Detection of rock mass weakness ahead of a tunnel - A numerical study. NARMS, Balkema, Seattle, pp. 105-111.