

비균질 암반에서의 터널 변위 거동 분석 Interpretation of Displacement Monitoring Results for Tunnels in Heterogeneous Rock Mass

김창용¹⁾, 홍성완¹⁾, 배규진¹⁾, 서용석²⁾, 김광염¹⁾, Wulf Schubert³⁾

¹⁾한국건설기술연구원, ²⁾충북대학교, ³⁾Institute of Rock Mechanics and Tunnelling,
University of Technology Graz, Austria

1. 서론

터널 내공변위는 암반의 변형특성과 굴착 및 지보 특성에 의해 직접적인 영향을 받고, 굴착이 중지된 상태에서는 암반의 시간의존성(time dependent characteristics)에 영향을 받게 된다. 특히, 대규모 파쇄대나 단층대 등 연약대가 존재하는 암반을 통과할 때의 내공변위는 암반의 변형특성과 굴착, 지보 특성 외에 추가로 연약대 특성의 영향으로 균질/등방 암반 굴착시의 변위거동특성과 동일하게 볼 수 없음이 이미 밝혀졌다(Schubert와 Budil 1996). 이는 최근 3차원 절대 계측 기술의 도입과 적용에 기인한 것으로서, 비균질/이방성 특성을 보여주는 연약대의 존재 여부를 사전에 파악할 수 있는 여러 지표들이 현재 제시되고 있으며, 전방 연약대의 영향을 파악하기 위한 연구들이 최근 들어 활발히 진행되고 있다.(Steindorfer 1998, 이인모 등 1998, 1999, Sellner 2000, Grossauer 2001, Tonon과 Amadei 2001).

3차원 계측이 도입되기 전 터널 내공변위는 통상적으로 Panet과 Guenot(1982), Sulem, Panet과 Guenot(1987) 등이 제안한 convergence equation으로 비교적 현장 결과와 잘 일치하는 경향성을 보여주었고, 그 이전에 제안되었던 다양한 모델들 중 가장 일반적으로 활용되게 된 모델이 되었다. 그러나 이 모델은 파쇄대나 단층대 등 연약대가 존재하는 암반에서의 특성치 변화를 표현할 수 있는 수치해석 및 계측관련 연구가 필요하며, 현재까지 convergence equation을 이용한 비균질/이방성 암반에 대한 분석결과가 없는 실정이다. 또한, 내공변위 자체도 터널 계측 지점의 절대 변위가 아니라 상대 변위를 계측하기 때문에 대규모 파쇄대나 단층대 등 연약대를 통과할 때, 터널 자체가 한쪽 방향으로 움직이는 것을 감지할 수 없는 것이 한계점으로 인식이 되고 있다. 그러나 3차원 계측 기술의 발달은 이러한 문제를 해결하였고, 필요시 각 계측 chainage별 및 각 계측 포인트별로 얻어지는 결과분석을 통해서 비균질/이방성 암반에서의 변위거동 특성과 전방 연약대 존재 여부 예측이 가능해졌으나, 계측결과를 이용한 연약대의 특성치를 정량적으로 예측할 수 있는 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 수치해석상 3차원 절대계측을 통해 얻어진 내공변위 거동을 이용하여 터널 막장 전방의 연약대 규모, 방향성, 강성 차이, 연약대와의 거리 등을 비교적 정량적으로 예측할 수 있는 방법에 연구 포인트를 맞추었으며, 이를 위해서 초기응력조건 변화, 연약대 강성비(MC, Modulus Contrasts), 규모 및 방향성 변화 등, 무지보 탄성 비균질

암반에 대한 3차원 FEM 매개변수 변환 연구를 수행하였다. 터널 내공 변위함수 (Convergence equation)의 형태를 결정짓는 function parameters; X, T, C, m 중 터널 굴착에 주요한 영향을 받는 변수 X, C가 비균질 암반에서 터널 막장 전방 연약대의 영향을 받아 균질 암반과는 다르게 연약대의 강성비 및 연약대 규모 등과의 일정한 상관관계가 있음을 확인하였고, 관련된 강성차이, 연약대 규모 등과의 상관도표를 제안하였다. 아울러, 균질 암반의 터널 변위 vector orientation(normal)과 비균질 암반의 변위 vector orientation과의 차이를 표현하는 D.V.O(Differential Vector Orientation)분석을 통해, 터널 막장 전방 연약대 규모, 방향성, 강성차이 등과의 상관관계를 규명하였다. 마지막으로 시공 시 문제가 되었던 몇몇 Alpine 터널 3차원 계측 결과와 비교하였다.

이러한 결과는 실제 터널 시공 시, 실시간으로 얻어지는 3차원 절대계측 결과 분석과 함께, 전방 비균질 연약대의 영향을 고려한 굴착 및 지보 변경의 의사 결정과정에 반영함으로써 좀 더 안전하고, 경제적인 터널 시공을 이루는데 일조할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 터널 변위 계측

2.1 내공 변위 이력

터널굴착시 계측된 변위에 대한 가장 일반적인 표시 방법은 시간에 따른 변위양상을 나타내는 것이다. 균질한 암반을 일정한 속도로 굴착을 하는 경우는 변위양상 파악이 매우 용이하며, 터널의 굴착후 안정은 점진적인 변위량의 감소로 나타나게 된다. Fig. 1은 상하반 분할 굴착시 굴착량에 따라 변위가 증가하다가 시간이 경과하면서 수렴하는 전형적인 내공 변위의 양상을 보여주고 있다.

불균질한 이방성 암반을 일정하지 않은 속도로 굴진하는 경우 계측데이터의 분석은 어려워지게 된다. 동일한 조건의 터널에서 굴진율이 틀린 경우 시간에 따른 천단변위 양상은 암반의 시간의존적 특성에 의해 다르게 나타날 수 있다.

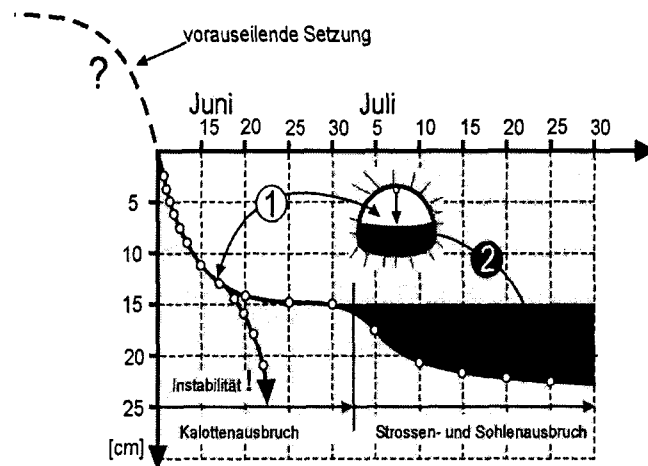


Fig. 1. Typical Convergence Trend(Sellner, 2000)

막장 진행에 따른 변위를 고려하지 못한다면 변위의 양상을 정량적으로 해석하기 어렵다. 또한, 추가적인 굴착, 불균질한 암반조건 또는 시간의존적인 지보의 거동에 대해 변위이력만을 가지고 적절하게 파악하기는 힘들기 때문에 최근에는 이러한 여러 복합적인 상황에서 조차 변위를 예측할 수 있는 기법들이 많이 개발되고 있으며, 이러한 기법을 이용하여 막장진행효과, 지보의 시간 의존적 거동을 분석 할 수 있다. Table 1은 내공변위양상을 표현할 수 있는 여러 함수들을 보여주고 있다. 최근까지 가장 많이 활용되고 있는 convergence equation은 Sulem 등(1987)이 제안한 5 변수식이며, 각 function parameter X, T, C, m이 의미하는 바가 크기 때문에 비균질/이방성 암반터널에서는 회귀식을 통한 parameter결정이 매우 중요하다고 볼 수 있다.

Table 1. Tunnel Convergence Equations(김호영 등, 1993)

No.	Modelling Function	Parameter	Remarks
1	$C(x) = a\{1 - \exp(-bx)\}$ & $C(t) = a\{1 - \exp(-bt)\}$	a, b	Elastic
2	$C(t) = a \log(1 + bt)$	a, b	Visco-plastic
3	$C(x) = C_x \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\}$	C_x, X	Elasto-plastic
4	$C(x, t) = a\{1 - \exp(-bx)\} + c\{1 - \exp(-dt)\}$	a, b, c, d	Visco-elastic (Kelvin-Voigt)
5	$C(x, t) = C_x \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\} \left[1 + m \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T+t} \right) \right\} \right]$	C_x, X, T, m	Elasto-plastic with time-dependent closure

2.2 변위 경향 및 영향선(Trend line, Deflection line)

터널의 천단 침하량을 같은 시간에 각기 다른 측정지점에서 측정한 변위를 하나의 선으로 연결한 것을 영향선(Deflection line)이라 정의하고, 영향선의 시작점에서 같은 거리만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선(Trend line)이라고 정의할 수 있다.

영향선으로부터 얻어진 경향선을 토대로 외삽법에 의해 막장후방의 특정지점에서의 변위예측도 가능하다. 하지만 외삽법에 의한 변위추정으로 막장전방의 암반의 특성에 대해서는 많은 것을 얻기가 힘들다. 서로 다른 지점에서 측정된 변위그래프를 한 그래프 상에서 비교하기 위해서는 초기계측값(Zero reading)이전에 발생한 선행변위에 대한 결정이 중요하다. 터널공사의 특성상 초기계측값이 이루어지는 시간이나 거리가 항상 일정할 수 없다. 이는 막장전방 및 계측기 설치점 이전의 지점에서 발생하는 변위는 계측될 수 없음을 의미한다. 계측된 데이터를 비교하기 위해서 일반적으로 막장전방에서 발생하는 선행변위는 무시된다. 또한, 막장면에서의 변위를 0으로 간주하게 된다. 막장면과 계측지점사이에서 발생하는 변위를 계측하기 위해서는 시간과 거리에 따른 함수를 사용하는 것이 가장 일반적이다.

Fig. 2는 막장이 단층대에 접근하면서 영향선과 경향선의 모양에 변화가 생김을 볼 수

있다. 따라서, 영향선과 경향선을 이용하여 터널의 막장면 전방 파쇄대층에 접근하고 있음을 계측결과를 통해 확인할 수 있다.

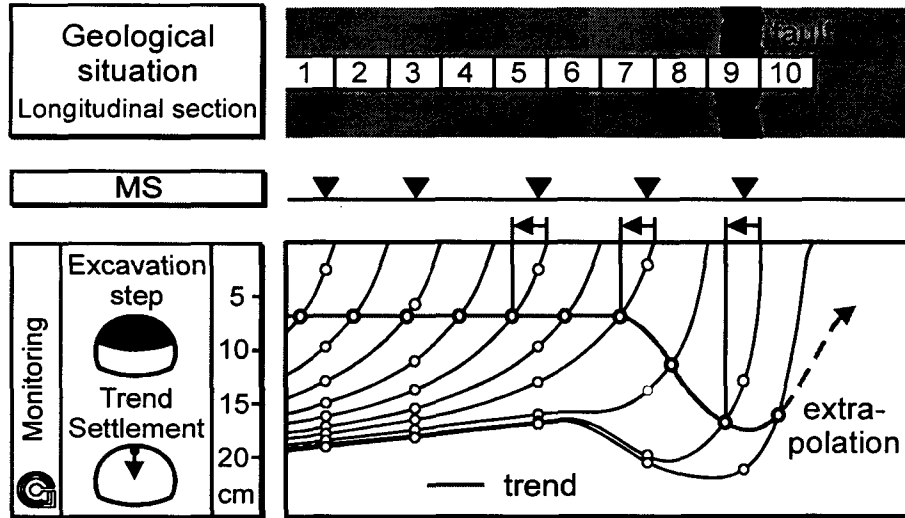


Fig. 2. Typical trend line and deflection line for approaching weak zone

2.3 변위 벡터(Displacement vectors)

천단변위, 수평내공변위 및 터널진행방향의 3방향 변위벡터(Fig. 3)의 비는 막장전방의 암반의 상태를 나타내는 좋은 지표가 될 수 있다. 이러한 3방향 변위벡터비는 특히 토피고가 크고 지반의 상태가 연약한 곳에서 유용하게 이용될 수 있다. 보다 연약하거나 보다 강성이 큰 암반으로의 굴착이 진행되는 경우 이러한 변위벡터는 암반의 강성의 변화에 앞서서 뚜렷한 경향성을 보여주게 된다. 이러한 변위벡터의 그래프는 터널주변의 연약대를 초기에 감지할 수 있을 뿐 아니라 록볼트 등의 지보설계에도 유용하게 이용될 수 있다.

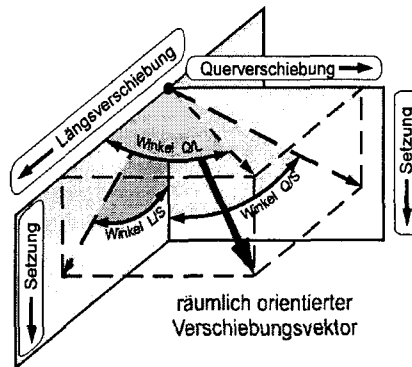


Fig. 3. Spatial displacement vectors

3차원 절대계측을 통하여 터널의 진행방향변위(L, longitudinal), 수직방향변위(S, settlement), 수평방향변위(H, horizontal)를 얻을 수가 있다. 통상적으로 Fig. 4와 같이 터널 진행방향변위와 수직방향변위비(L/S)는 vector로 표현하며 이 값은 터널 막장전방의 연약대(weak zone)를 감지할 수 있는 지표가 되며, Fig. 5와 같이 터널 횡단면상의 변위방향성은 터널 진행방향 주변의 암반상태나 연약대의 방향성에 영향을 받기 때문에 각 계측 막장별로 변위벡터 방향성을 분석해보면 개략적인 연약대의 존재여부, 방향성 등을 알 수 있다.

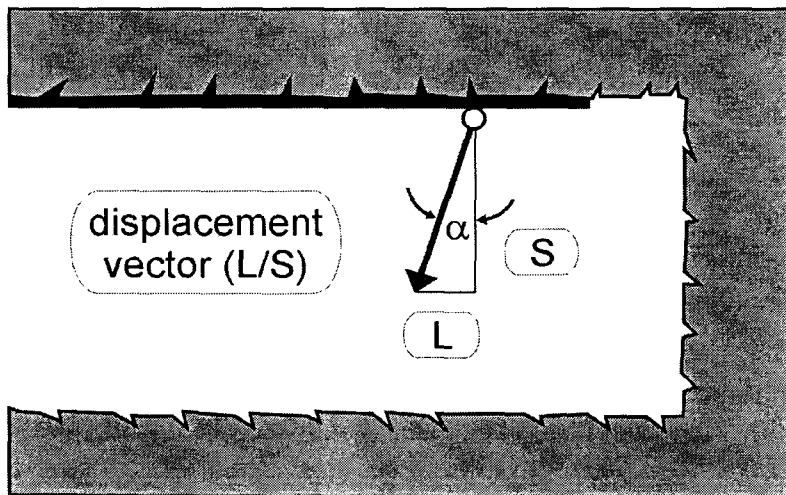
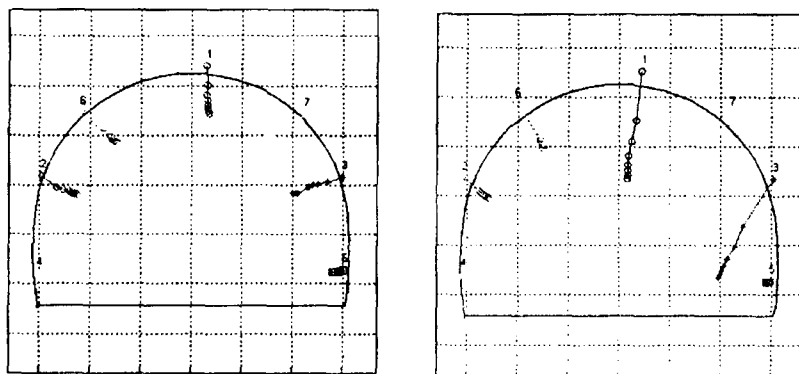


Fig. 4. Concept of displacement vector(L/S)



(a) Normal

(b) Rightside faults

Fig. 5. Displacement vectors in a cross section

2.4 공간 벡터 방향성(Spatial vector orientation)

Steindorfer 와 Schubert(1996)는 변위 계측 데이터를 통한 변위벡터의 방향성의 변화가 암반의 강성의 변화를 나타낼 수 있다는 것을 제안하였다. 또한, 이러한 변위벡터의 평사투영법과 변위데이터의 3차원적 도시방법을 통하여 막장전방의 및 굴착영역 밖의 암반의 구조

와 상태에 대한 단기예측이 가능함을 밝혀냈다.

3차원 상의 절리를 2차원 평면에 묘사하기 위하여 많이 사용하는 평사투영법을 이용하면 변위 벡터로부터 터널 막장 전방의 지반 변화를 예측할 수 있다. 즉, 평사투영법을 통해 3차원 변위벡터 방향의 변화를 파악한다면 파쇄대의 방향성이나 공동의 위치 등을 예측할 수 있다. 최근에는 균질 암반의 터널 내공 vector orientation(Normal)과 비균질 암반의 내공 vector orientation과의 차이(Deviation)를 통해, 터널 막장 전방 연약대 규모, 방향성, 강성차이 및 거리등과의 상관관계를 규명할 수 있는 방법들이 제안되고 있다.

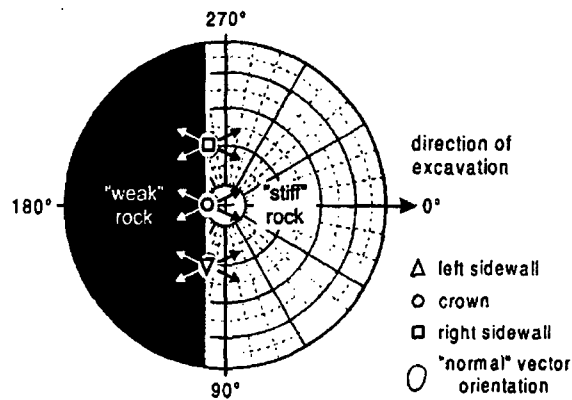


Fig. 6. Spatial vector orientation

2.5 변위결과 분석

터널 계측관리의 목적은 터널 시공시 긴급한 상황에서 터널의 안정성 확보와 굴착 및 지보의 신속한 변경 등에 초점을 맞추고 있으며, 당면한 문제의 성격에 따라서 계측결과 분석도 달라져야 한다. Table 2는 이러한 터널 계측 목적과 그 평가항목들에 대한 개요를 보여주고 있으며, 어느 경우든 각각의 평가방법들을 조합해야만 지질 및 지반공학적 상황과 암반, 터널의 거동에 대한 분명한 이해가 될 수 있음을 알 수 있다.

Table 2. Overview of the value of evaluation methods for specific questions
(+ : good, 0 : limited value, - : no value)

	Evaluation of stabilization process	prediction final displacements	Stress redistribution longitudinal	Detection weak zones outside profile, kinematics					prediction ahead	estimate of stress intensity in lining
				overall	properties	orientation	Thickness size	distance		
Displacement history	+	+	-	0	-	-	-	0	-	+
Deflection lines, trends	0	-	+	0	0	0	+	0	0	-
Trends of relative displacement values	-	-	-	-	+	0	0	+	-	-
vectors in cross section	-	-	-	+	-	+	-	-	-	+
vectors in longitudinal section	-	-	-	0	+	+	+	-	+	-
spatial vector orientation	-	-	+	+	0	+	0	+	+	-

3. 수치해석 모델

본 논문에서는 비균질 암반에 터널을 굴착할 경우, 발생하는 변위를 분석하기 위해서 3차원 유한요소 해석을 실시하였다. 특히, 비균질 암반의 특성을 반영하기 위해서 연약대의 탄성계수, 규모, 방향성 및 초기 응력 특성 등을 변화시키면서 해석을 수행하였고, 등방 암반 터널, 즉 연약대가 존재하지 않는 암반 터널에서의 변위특성과 비교를 수행하였다.

본 연구에서 사용된 유한요소 프로그램은 비균질/이방성 암반 특성을 반영할 수 있는 UTAH III 코드를 이용하였다(문현구, 김창용 등 1991). 본 UTAH III 코드는 다수의 절리나 파쇄대 등 연약대가 임의의 방향성, 두께, 탄성계수를 갖고 3차원 공간에 분포할 때, 통과하는 각 3차원 유한요소에 개별적으로 연약대의 특성을 반영할 수 있는 장점을 갖고 있으며, 이에 대한 전후 처리를 위해서 연약대의 물성을 계산할 수 있는 PM code와 공간상에서 절리나 파쇄대의 기하 특성을 파악할 수 있는 VOL3 code 등을 활용하였다.

또한, 터널 굴착면에서의 변위 결과를 별도로 분석할 수 있도록 하기 위해서 Geofit(Sellner 2000)이라는 3차원계측 분석 전용 프로그램을 활용하였다. Geofit은 ARGUS나 DEDALOS 등 3차원 계측 Raw Data 포맷을 받아 들여 내공변위 이력, 변위 Trend line, Deflection line, 변위 vector 및 vector orientation 등을 계산하고 가시화 시킬 수 있는 프로그램이다. 수치해석 결과를 3차원 계측 결과와 동일하게 변환할 수 있는 Geofit-in code를 개발 이를 활용하여 수치해석 결과를 실제 3차원 계측 결과와 유사하게 분석할 수 있도록 하였다.

3.1 해석모델

본 논문에서는 Fig. 7과 같이 터널 직경(D)이 10m, 터널 심도가 5D (50 m)로 설정하였고, 총 100 m를 굴진하는 것으로 모델을 구성하였고, 해석결과의 일관된 분석과 단순화를 위해서 탄성모델로 한정하였고, 록볼트와 슛크리트와 같은 터널 지보를 고려하지 않았다. 전 단면 굴착을 기본으로 하고, 매 막장 굴착 길이는 2.5m로 설정하였다. 총 10260개의 요소와 10912의 절점으로 구성된 이 모델은 터널 종방향으로 총 30단계의 굴착 순서를 설정하였다.

Table 3. Model parameters

파라미터	파라미터 변화	비고
초기응력 조건(Ko)	0.5, 0.75, 1.0	
강성비(MC)	2(500MPa), 5(200MPa), 10(100MPa)	암반 : 1000 MPa
연약대 두께(Tw)	5m(0.5D), 10m(1.0D) 20m(2.0D), 50m(5.0D)	
포아슨 비(v)	0.25, 0.35, 0.45	
연약대 방향성	주향; 0°~180° 경사 ; 30°, 60°, 90°	주향은 약 30°씩 변화

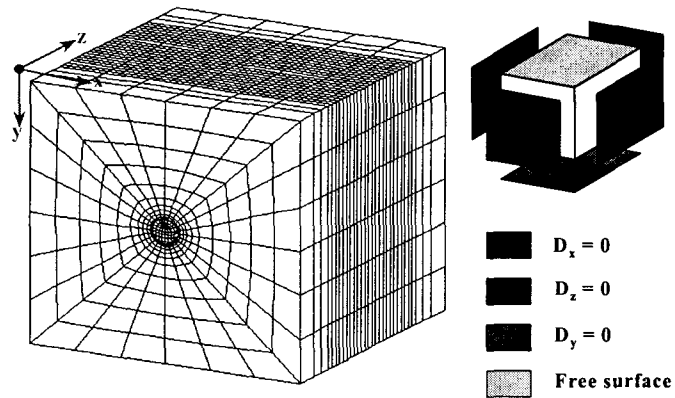


Fig. 7. 3 Dimensional Finite Element Model

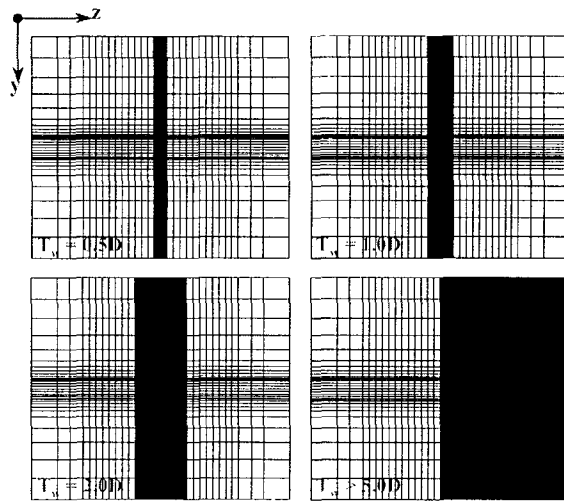


Fig. 8. Thickness of weak zones

Table 3은 본 논문에서 연약대의 특성을 반영하기 위해서 변화시킨 파라미터들을 보여주고 있다. 이 중 Fig. 8은 그 예로 연약대의 두께를 변화시킨 모델을 보여주고 있다.

3.2 해석과정

각 단계별 터널 굴착과정에서 발생하는 막장 후방의 계측지점의 초기변위를 3차원 계측과 동일하게 zero reading으로 설정하였고, 매 막장 굴착 시 누적변위를 계산하도록 하였고, Fig. 9과 같이 터널 굴착면 중 천단부와 Shoulder부의 절점 변위를 중점적으로 분석하였다. 먼저, 연약대를 포함하지 않는 균질/등방 모델을 대상으로 탄성해석을 수행하여 기본 모델을 설정하였고, Table 3에 보인 바와 같이 각 경우별로 해석을 수행하여 그 결과를 균질/등방 모델과 비교하였다. 특히, 방향성이 변화될 때의 모델은 Fig. 10와 같이 연약대가 통과될 때의 각 요소에 변형특성을 반영하였다. 그림은 주향이 180°이고 경사가 45°인 모델을 보여주고 있다.

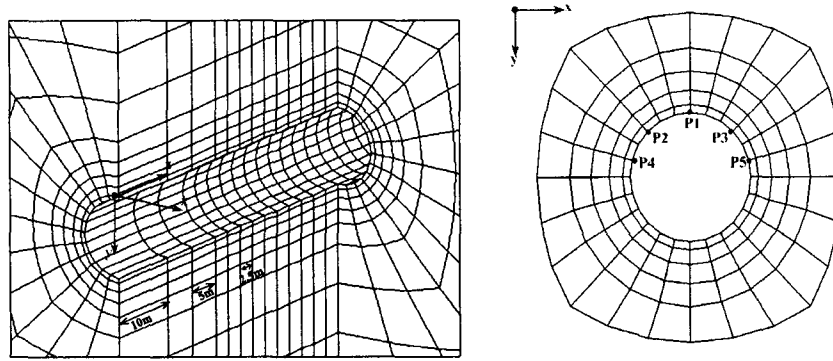


Fig. 9. Monitoring Points

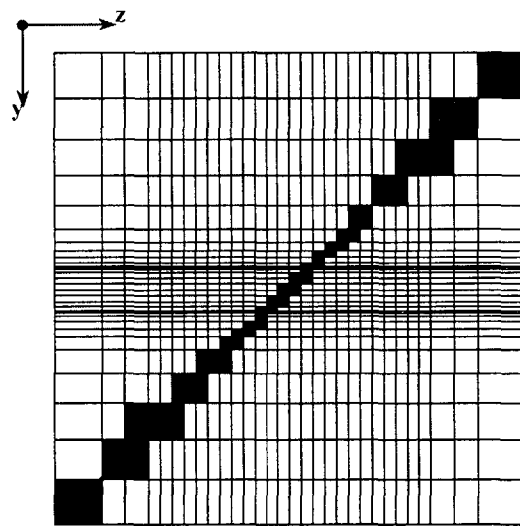


Fig. 10. Orientation of weak zones

4. 해석 결과

수치해석 결과는 크게 균질 암반에 터널 굴착한 경우와 비교를 위해서 각 모델 경우별로 해석결과를 비교 분석하였다. 특히, 비균질 암반의 터널 변위거동 특성을 정량적으로 파악하기 위해서 변위 vector orientation과 convergence function parameters를 분석 대상으로 하였다. 변위 vector orientation의 경우는 연약대의 물성(변형특성, MC; Modulus Contrasts), 연약대 두께(T_w), 연약대 방향성, 초기 응력조건 및 포아슨비 등을 변화시킨 결과를 비교하여 각 특성들이 터널 변위거동에 미치는 영향을 검토하였고, convergence function parameter의 경우는 연약대의 물성(변형특성, MC; Modulus Contrasts), 연약대 두께(T_w) 등 두 요소에 대해서만 결과를 비교·검토하였다.

통상적으로 연약대가 존재하지 않는 균질/등방 암반 터널에서의 변위 vector orientation은 Schubert 등(1996)이 이미 수치해석 및 계측 결과를 통해서 약 $7^\circ \sim 12^\circ$ 정도로

일정한 값을 보임을 밝혔다. 그러나 연약대가 터널 막장 전방에 존재하는 경우에는 연약대에 근접할수록 그 값은 증가하여 연약대에 진입할 때, 가장 큰 값을 보인다. Fig. 11은 전형적인 변위 vector orientation의 각 chainage별 deflection line을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 "normal"의 경우는 등방/균질 암반에서의 결과이고, 연약대의 두께가 1D(10 m)정도인 경우의 deflection line을 보여주고 있다. 통상적으로 연약대가 존재할 경우에 "normal"인 등방/균질의 경우에 비교해서 그 차이가 결과적으로 막장 전방의 연약대의 강성비(MC), 방향성, 두께 등에 직접적으로 영향을 받기 때문에 그 차이를 분석하는 것이 전방 연약대의 특성을 예측하는 데 매우 유용하게 활용될 수 있다.

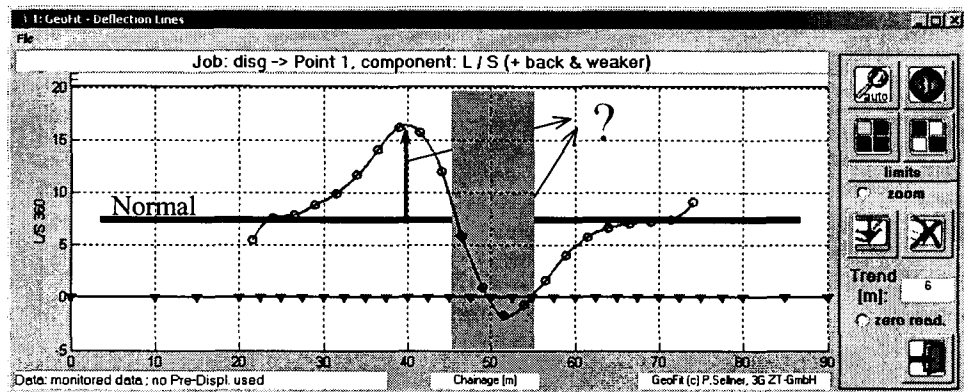


Fig. 11. Typical deflection line for displacement vector orientation

따라서 본 논문에서는 이와 같은 균질/등방 암반과 비균질/이방 암반의 거동차이를 변위 vector orientation의 차이, 즉 differential vector orientation(D.V.O)로 명명하고 이를 통해서 막장 전방 연약대의 특성을 예측하고자 하였다.

한편, convergence equation의 function parameter X, T, C, m도 연약대가 존재하는 암반에서는 그 특성이 연약대 존재로 인해서 달라지는 경향성을 보여 이를 이용해 전방 연약대의 특성을 파악할 수 있다. 특히, 터널 굴착에 영향을 직접적으로 받는 X, C의 경우는 그 경향성이 매우 일관되게 보여주고 있으며, 암반의 시간 의존성(time dependency)에 영향을 받는 T, m의 경우도 아울러 영향을 받지만, 본 해석 자체가 탄성해석에 국한되어 있기 때문에 T, m에 대해서는 추가적인 해석이 필요할 것으로 판단된다.

4.1 변위 벡터 Orientation

2절의 터널 변위 편에서 밝힌 바와 같이 변위 벡터 orientation은 다른 지표에 비해서 비교적 다양한 정보를 포함하는 결과를 준다. 특히, 전방에 연약대가 존재할 때의 특성은 정량적으로 매우 일관된 결과를 주기 때문에 분석이 용이하다고 볼 수 있다. 기본적으로 동일한 조건에서 연약대가 존재하지 않을 경우를 기본으로 하고 변위 vector orientation을 분석할 경우에는 연약대의 개략적인 특성들을 유추해 볼 수 있다.

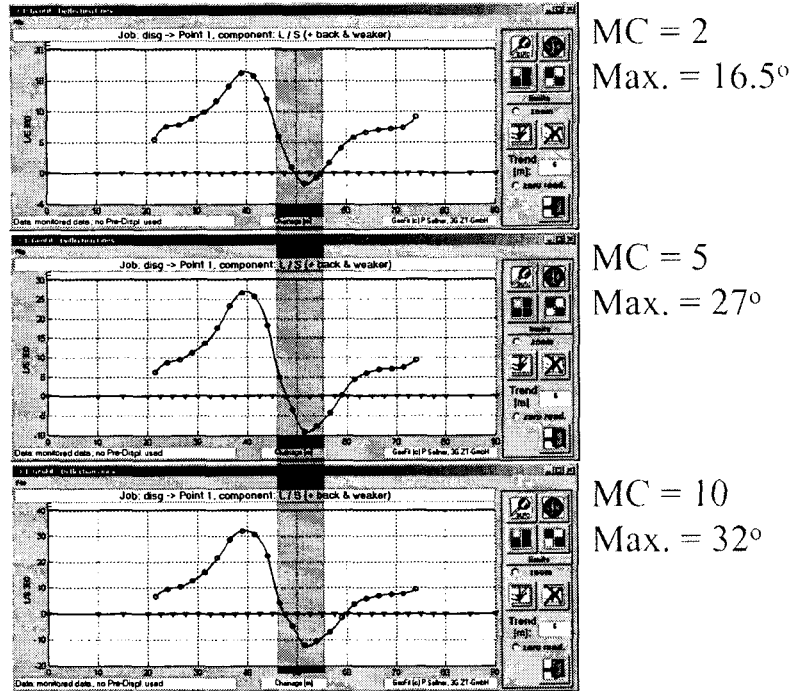


Fig. 12. Deflection line for displacement vector orientation($T_w=1D$)

4.1.1 연약대 강성비(MC) 및 두께의 영향

Fig. 12는 연약대의 두께가 터널 직경과 같이 10m 일 때 변위 벡터 orientation의 경향성을 보여주고 있다. 터널 막장으로부터 6m(0.5D)후방에서 동일한 경향선을 표시한 것으로서 연약대를 굴착하기 시작할 때 maximum치를 보이고 있다. 특히, 동일한 연약대의 두께(1D)에서 연약대의 강성비(MC; Modulus Contrasts)가 커질수록 즉, 연약대의 강성이 약해질수록 최대치가 커짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 연약대의 두께를 0.5D, 1.0D, 2.0D, 5.0D로 했을 경우에도 유사한 결과를 보여준다. 종합적으로 분석해 보면 Fig. 13과 같은 chart를 만들 수 있게 된다. 그림에서 가로축은 강성비(MC)이고, 세로축은 균질/등방일 경우의 변위 벡터 orientation과 연약대가 존재할 때의 변위 벡터 orientation과의 차이(D.V.O.; Differential Vector Orientation)를 나타내고 있다. 그림에서 MC가 1인 경우가 등방/균질 암반에 해당하며, 이때의 변위 vector orientation치는 약 7.25°로 Schubert 등(1996)이 제안한 값의 범위에 포함되며, MC가 커지면서 암반이 점점 약해지고 이에 따라 D.O.V치도 점점 커지게 된다. 아울러 동일한 강성비를 갖는 모델에서는 연약대의 두께가 커지면서 D.O.V치가 커져서 연약대의 강성과 규모가 동일하게 변위 거동에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 연약대의 두께와 D.V.O.치와의 상관관계를 보여주는 그림이다. 연약대의 두께가 0.5~2.0D까지는 급격히 증가하지만 그 이상부터는 비교적 완만하게 D.V.O.치가 수렴함을 알 수 있다. 이는 일정한 두께 이상부터는 연약대에 의한 영향이 완만하게 감소하는 경향성을 보여주는 것으로 Grossauer(2001)의 연구결과와 유사한 경향성을 보여주었다.

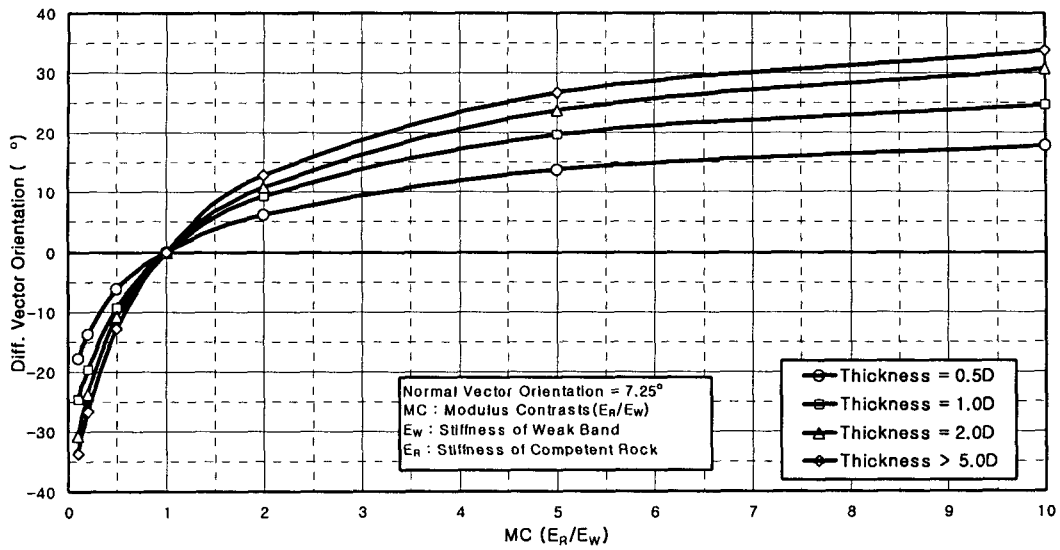


Fig. 13. Relationship between D.V.O. and Modulus Contrasts(stiff to weak)

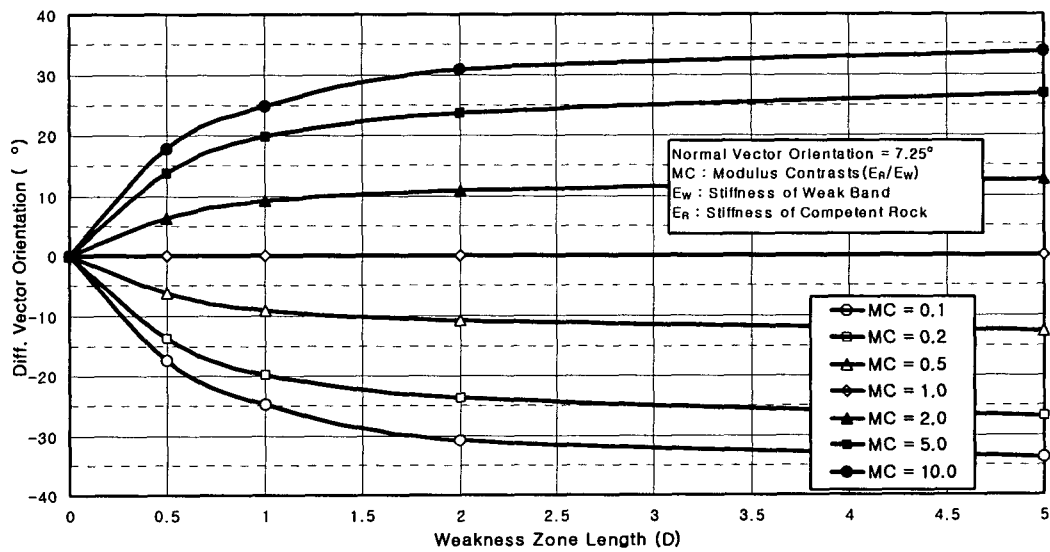


Fig. 14. Relationship between D.V.O. and weak zone length(stiff to weak)

이러한 결과는 Fig. 15와 같이 초기 연약대 진입 시 발생하는 D.V.O.치 25°를 개략적으로 파악하고, 이에 해당하는 연약대의 강성비와 두께를 쌍으로 묶어서 case1(MC=10, $T_w=1.0D$), case 2(MC=5.6, $T_w=2.0D$), case 3(MC=4.5, $T_w>5.0D$)로 설정하고 가장 보수적인 case 1부터 순차적으로 적용함으로써 연약대의 규모와 특성에 따른 적절한 지보 type과 지보량을 결정하는데 중요하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

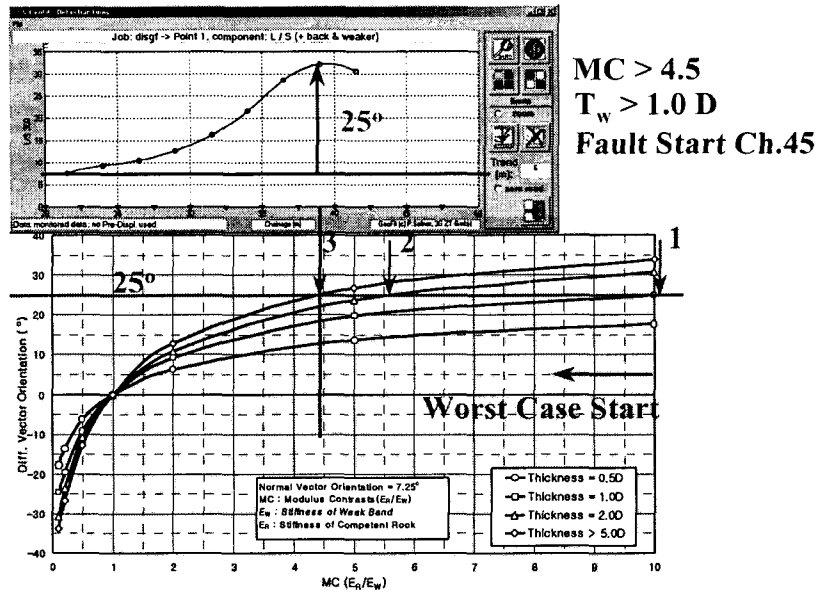


Fig. 15. The use of the D.V.O. charts

4.1.2 초기 응력의 영향

Fig. 16은 초기 응력조건이 변했을 경우의 D.V.O.치와 강성비와의 관계를 보여주는 그림으로서, 초기 축압계수는 터널 굴착 시 종방향 변위와 침하에 매우 민감하게 영향을 주기 때문에 이에 대한 영향분석이 필요하다. 그림에서 보는 바와 같이, 등방/균질 암반의 경우, 축압계수 K_0 가 0.5, 0.75, 1.0일 경우 normal vector orientation치가 각각 약 7.25°, 6.55°, 6.37°로서 축압계수가 커질수록 작아지는 경향성을 보였다. 이와 더불어 D.V.O.치는 앞서와 마찬가지로 동일한 축압계수에서는 MC가 커질수록 즉, 연약 암반일수록 그 수치는 커졌고, 동일한 강성비(MC)에서는 축압계수가 커질수록 D.V.O.치가 커짐을 알 수 있다.

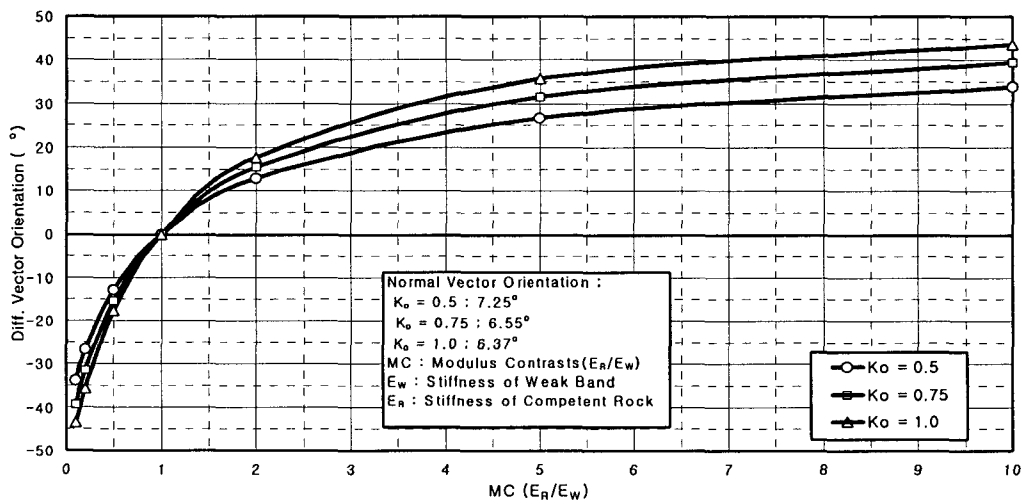


Fig. 16. Relationship between D.V.O. and Modulus Contrasts(K_0)

4.1.3 포아슨비의 영향

Fig. 17은 암반 및 연약대의 변형특성에 영향을 미치는 포아슨비의 변화를 통해서 D.V.O.치의 변화를 관찰하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 등방/균질 암반의 경우, 포아슨비가 각각 0.25, 0.35, 0.45일 경우 normal vector orientation치가 각각 약 12.0°, 6.37°, -1.5°로서 포아슨비가 커질수록 급격히 작아지는 경향성을 보였다. 아울러 더불어 D.V.O.치는 앞서와 마찬가지로 동일한 포아슨비에서는 MC가 커질수록 즉, 연약 암반일수록 그 수치는 커졌고, 동일한 강성비(MC)에서는 포아슨비가 커질수록 D.V.O.치가 커짐을 알 수 있다.

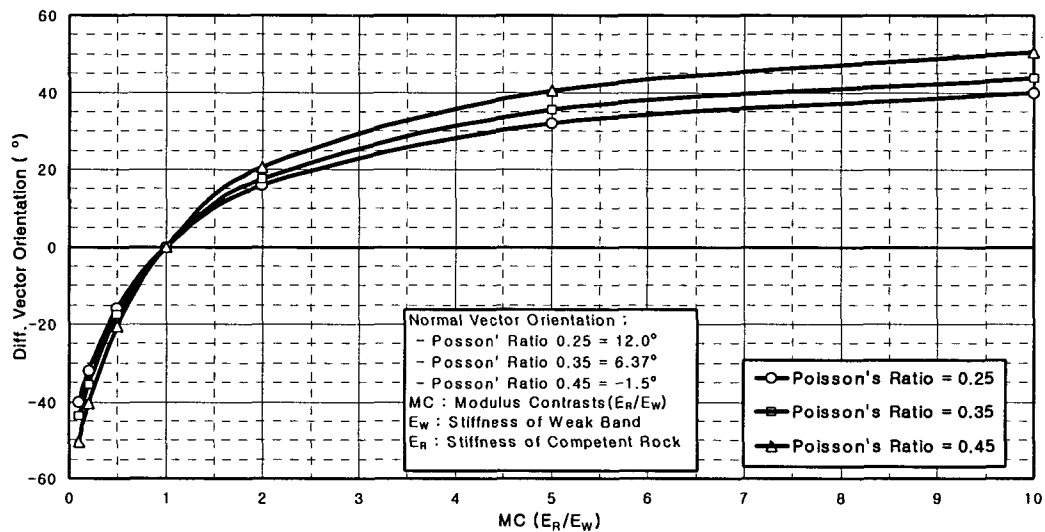


Fig. 17. Relationship between D.V.O. and Modulus Contrasts(Poisson's ratio)

4.1.4 연약대 방향성의 영향

앞서의 결과들은 모두 터널 굴진 방향과 수직으로 위치한 연약대에 대한 결과를 보여준 것으로 Fig. 18에서 경사각이 90°인 경우와 일치한다고 볼 수 있다. 통상적으로 경사 방향이 터널 굴진방향과 동일할 경우(Fig. 18에서 경사각 30. ~90.)에는 경사각이 90°에 가까울수록 D.V.O. 치가 급격히 증가하고, 약 60°이전에서는 천단부(Point 1)에서 가장 크게 영향을 받게 된다. 반면, 경사방향이 터널 굴진 방향과 반대인 경우에는 천단부는 계속 D.V.O.치가 증가하다가 경사각이 약 60°이후부터 급격히 감소하는 반면에 shoulder부(Point 2, Point 3)에서는 경사각이 90°이후부터 D.V.O.치가 급격히 감소하는 경향성을 보여주었다.

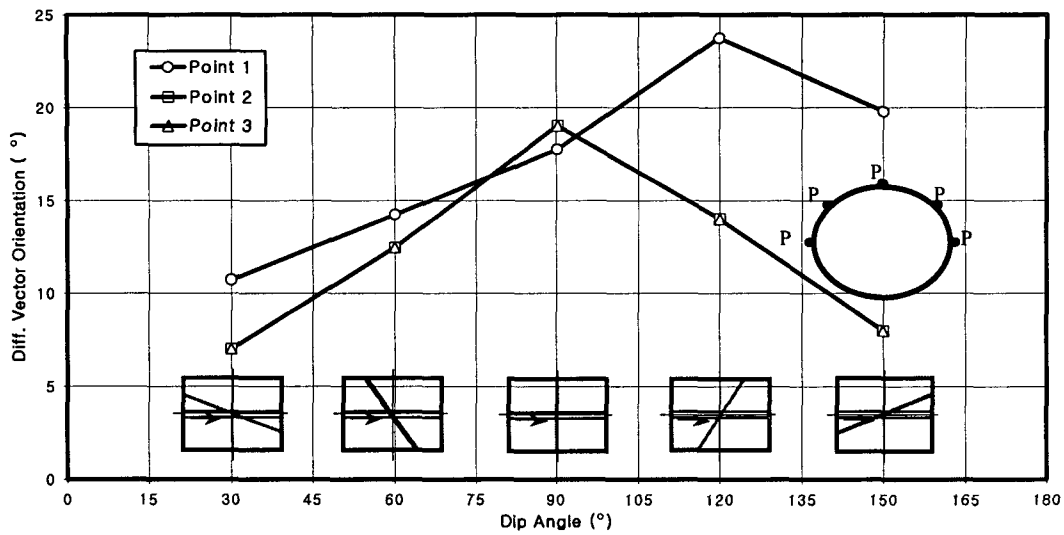


Fig. 18. Relationship between D.V.O. and dip angle

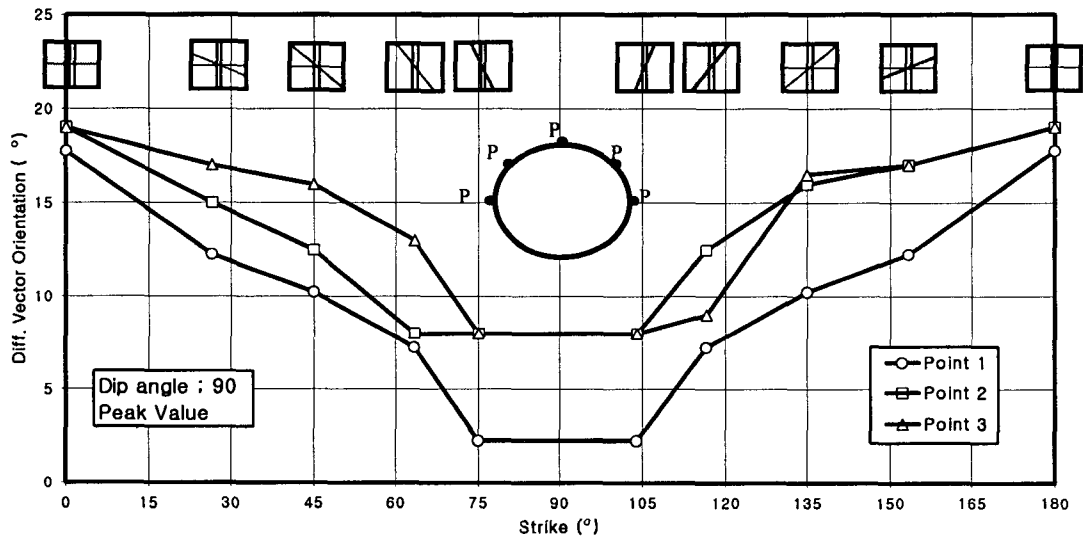


Fig. 19. Relationship between D.V.O. and Strike

또한, Fig. 19과 같이 경사각을 90°로 고정시키고, 주향을 변화시켰을 때는 주향이 0°인 경우가 터널 굴진방향에 수직으로 위치한 연약대로 볼 수 있고, 이때가 D.V.O.치가 가장 높게 나타나고 주향이 변화되면서 D.V.O.치가 급격히 감소하는 경향성을 볼 수 있다. 주향이 90°인 경우는 터널과 평행하게 연약대가 위치하고 있는 것으로서 이 때는 거의 등방/균질의 경우와 유사하게 약 D.V.O.치가 0에 가깝게 나타날 수 있을 것으로 예측되지만, 주향이 터널방향과 수직으로 있을 때 가장 크게 연약대의 영향을 받게 되고, 터널 굴진방향과 평행하게 위치할수록 D.V.O.치가 감소하게 된다는 경향성을 볼 수 있다. 이러한 결과는 주향이 90°이상일 경우에서도 대칭적으로 나타났다.

이러한 결과를 종합해볼 때 변위 vector orientation은 연약대가 수직으로 위치할 때 가장 영향을 크게 받고, 그 경사각이나 주향 등을 변위 vector나 변위 trend line 및 deflection

line 및 공간 vector orientation을 통해서 확인할 경우 그에 대한 보정을 위한 chart로서 Fig. 18 및 19를 활용하고, 이 결과를 앞서 연약대 강성비나 두께와 D.V.O.와 관련된 chart를 통해서 개략적인 연약대 특성들을 유추해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 Convergence Function Parameters

Panet(1982), Sulem, Panet, Guenot 등(1987)에 의해 제안된 convergence equation은 현재까지도 내공변위를 분석하는 데 유용하게 활용되고 있다. 식 (1)은 일반적인 convergence equation을 보여주고 있으며, 이 식에서 X는 터널 막장면 굴착 영향거리 관련 상수, T는 암반의 시간 의존적 변형특성 상수, C_{∞} 는 굴착면이 무한히 멀 때 굴착면 진행의 영향에 의해서만 발생하는 변위, m은 굴착과 시간 의존적 변형 상수를 나타낸다.

$$C(x,t) = C_{\infty} * \left[1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right] * \left\{ 1 + m * \left[1 - \left(\frac{T}{T+t} \right)^n \right] \right\} \quad (1)$$

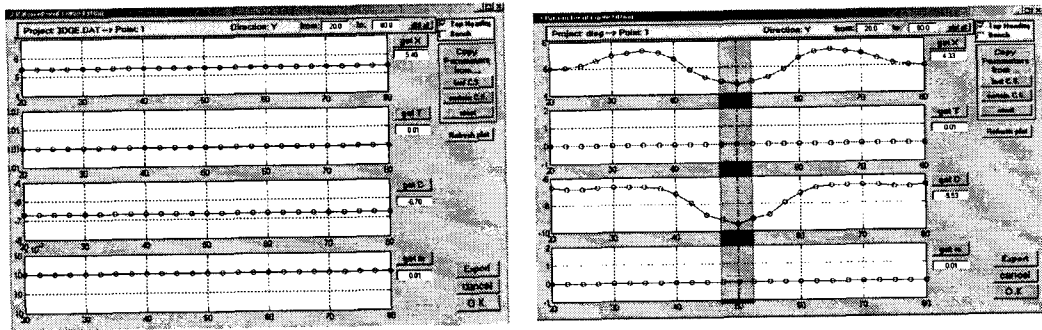
Sulem, Panet, Guenot 등(1987)은 Frejus 및 Las Planas 터널의 계측 결과와 수치해석 결과를 토대로 본 수식을 만들었으며, 그 이후에도 순차적인 터널 굴착과정 및 지보효과를 고려한 수정된 convergence equation을 Barlow(1986)가 제안하였고, Sellner(2000)는 Barlow의 수식을 기초로 매우 간편하고 현장 계측결과를 직접 분석할 수 있는 Geofit이라는 시스템을 개발하였다. 앞서의 연구들은 주로 등방/균질 암반에 대해서 수치해석 및 현장 계측 결과를 토대로 function parameter X, T, C, m을 단일 터널의 평균치로 활용할 수 있는 방법 적용이 주류를 이루었고, 국내에서도 김호영과 박의섭(1993)에 의해서 불모산 터널 및 심부 광산터널에 적용한 바 있다.

본 논문에서는 이들 function parameter들이 비균질 암반에서 터널을 굴착할 경우 어떠한 변화를 보여주는 지에 대해 앞서 변위 vector orientation과 같이 다양한 분석을 시도하였다. 특히, 수치해석의 특성상 시간 의존적인 특성을 반영할 수 없음으로 해서 터널 막장 굴착의 영향에 의한 X, C에 대한 분석을 시도하였고, 연약대의 강성비(MC)와 두께가 X, C에 미치는 영향을 동시에 보고자 하였다.

4.2.1 연약대 두께의 영향

Fig. 20은 일반적인 convergence function parameter 변화를 보여주는 그림이다. 균질 암반에서 터널을 굴착할 경우(a)에는 X, C 값이 일률적으로 일정한 값을 보이지만, 비균질 암반(b)에서는 연약대 특성에 의해서 일정한 값을 갖지 않고, 균질 암반에 비해 연약대 후방에서 X치가 다소 높게 발생하다가 연약대에서는 낮게 나타난다. 이는 연약대가 존재함으로써 인해서 굴착에 의한 영향거리가 더 크게 나타나서 막장 굴착에 의한 내공 수렴이 비교적 늦게 발생함을 의미한다. 즉, 연약대 내에서는 비교적 빨리 내공 수렴이 이루어지고, 그 전 후에는 연약대의 영향으로 내공 수렴이 비교적 늦게 발생됨을 의미한다. 최종 내공변위 C는 연약대 중심으로 갈수록 더 크게 발생하는 경향성을 보여준다. 이는 균질 암반에서는 일

정한 값을 보여주는 경향과는 다른 결과를 나타내준다.



(a) Homogeneous

(b) Heterogeneous

Fig. 20. Function parameter change

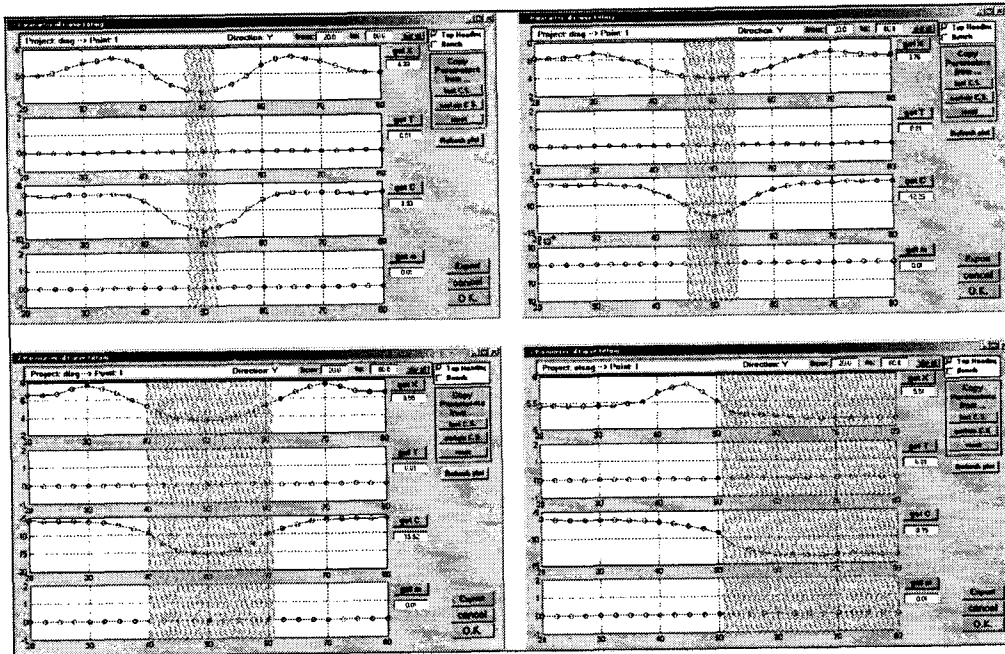


Fig. 21. Effects on the thickness of the weak zones

Fig. 21은 강성비를 동일하게 유지하고, 연약대 두께(T_w)를 각각 0.5D(5m), 1.0D(10m), 2.0D(20m), 5.0D(50m)로 변화시켰을 때, function parameter 변화를 보여주고 있다. 대체적으로 연약대 중심에서 0.5D~1.5D 정도의 전방에서 function parameter X값은 최대치를 보이며, 연약대 중심에서 최소치를 보이는 경향성은 동일하게 나타났고, 터널 굴착에 의한 최종 변위 C값은 연약대 중심에서 최대치를 보이고 있다. 이러한 결과를 좀더 구체적으로 볼 경우, Fig. 22은 각 chainage별 X값의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 연약대가 없는 경우의 X값은 약 5.4정도이고 연약대의 두께가 커질수록 연약대 후방의 위치에서의 X값은 더 커지는 경향성을 보여주고 있다. 연약대의 두께가 2.0D인 경우 X값이 최대 약 7.7정도를 보여서 연약대의 두께가 커질수록 굴착에 의한 영향거리가 커져서 최종 내공 수렴이 늦어지는 경향

성을 얻을 수 있었다. 반면에 연약대 중심에서는 반대로 두께가 커질수록 X값 최소치가 커지는 경향성을 보여서 연약대의 존재로 인한 convergence function parameter의 변화범위가 두께가 커질수록 커지는 경향성을 보여주고 있다. Fig. 23은 최종 내공변위 C값을 chainage 별로 나타내 주는 그림으로서 연약대 중심부에서 내공 최대 수렴치가 연약대 두께가 커질수록 커지게 됨을 확인하였다.

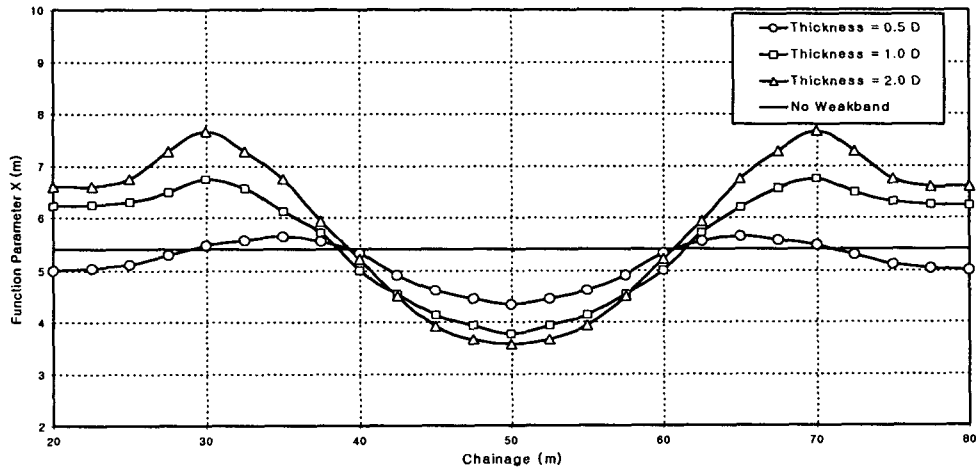


Fig. 22. Function parameter X on the thickness of the weak zones

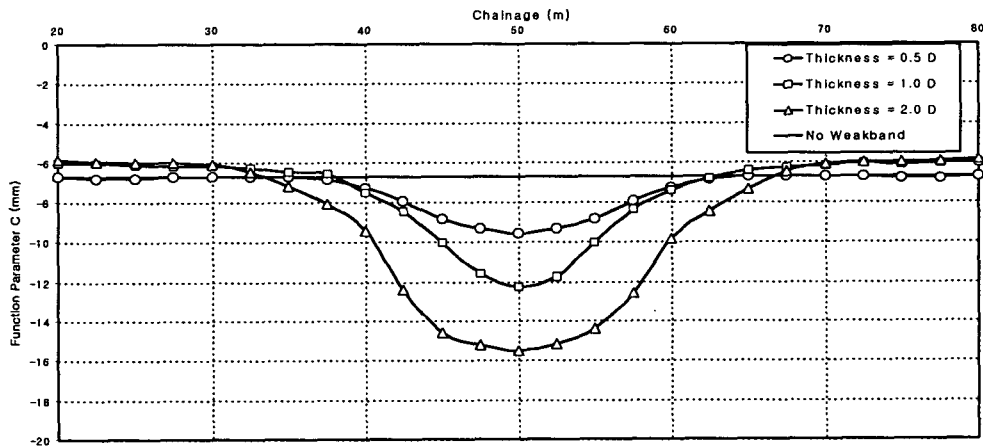


Fig. 23. Function parameter C on the thickness of the weak zones

4.2.2 연약대 강성비의 영향

앞서 연약대 두께의 영향과 마찬가지로 동일한 두께를 갖는 연약대일 경우, 연약대의 강성비가 커질수록, 즉 연약대가 약해질수록 Fig. 24와 같이 연약대 후방에서의 function parameter X값은 더욱 크게 나타나고, 동일한 두께의 연약대는 비교적 동일한 지점(0.5D)에서 X값의 최대치가 발생함을 확인할 수 있었다. Fig. 25는 function parameter C값의 변화 추이를 보여주는 그림으로 강성비(MC)가 커질수록 최종 내공수렴치도 커짐을 알 수 있다.

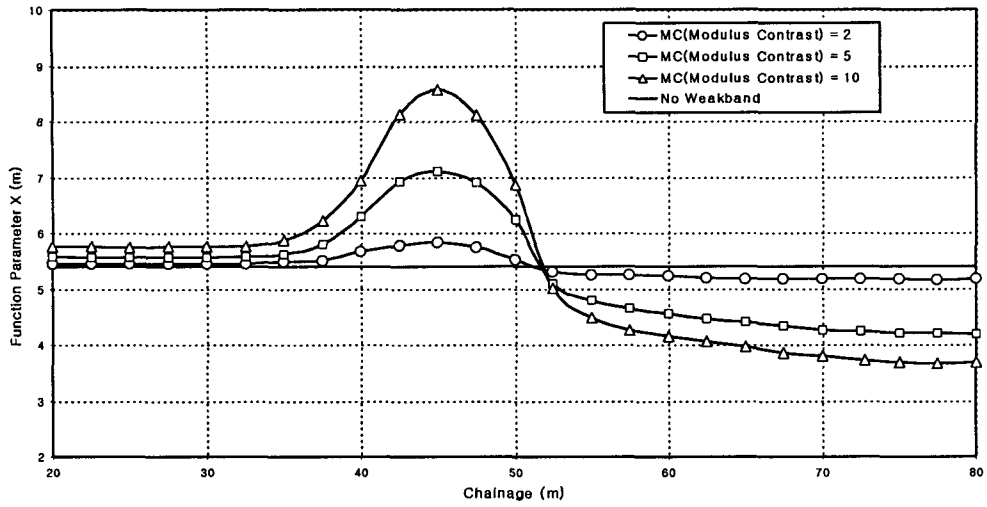


Fig. 24. Function parameter X on modulus contrasts of the weak zones

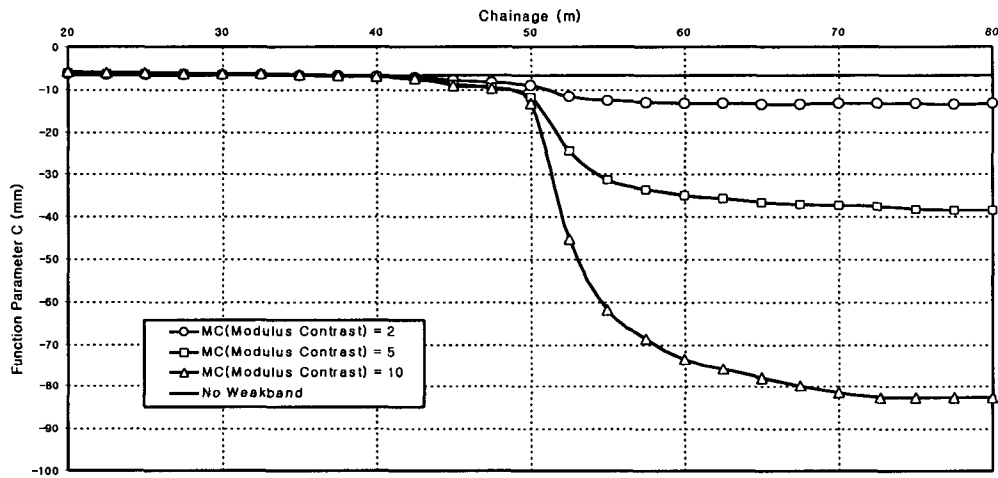


Fig. 25. Function parameter C on modulus contrasts of the weak zones

4.2.3 현장 계측 사례

이와 같은 수치해석 결과와 더불어 실제 현장에서 계측된 사례를 토대로 비교·분석코자 하였다. 오스트리아 알프스 산악 터널 중 파쇄대를 통과하는 지역에서 대규모 내공 변위가 발생되었던 두 개의 현장에 대해서 그 결과를 비교하였다. 먼저 Fig. 26은 최대 약 400 mm이상의 내공변위가 발생된 STRENGEN 터널의 경우로서 그림에서와 같이 chainage 1140~1190사이의 50 m구간에 대규모 파쇄대가 형성되어 있고, chainage 1170~1190사이에 주 파쇄대가 존재하며, 평균 30~40mm정도의 내공변위를 발생하는 균질한 구간에 비해 최대 10배정도의 내공변위가 발생되어서 지보를 변경한 사례이다. 그림에서 상부는 변위 경향선과 영향선을 보여주고 있고, 동일한 지점에서의 function parameter 분석결과는 하부와 같다. Function parameter X값은 chainage 1150지점에서 최대치를 보이며, 파쇄대가 극명히

발달된 chainage 1170~1190에서 X값이 최소치를 보이고 있다. 아울러, C값도 chainage 1140에서부터 시작해서 chainage 1170~1190에서 최대치를 보여서 앞서 수치해석 결과에서와 같은 결과를 보여주고 있다. 수치해석에서는 파악할 수 없었던 function parameter T, m 값은 chainage 1140에서부터 급격히 증가하여 chainage 1170~1190 구간에서 최대치를 나타내는 경향성을 보였다.

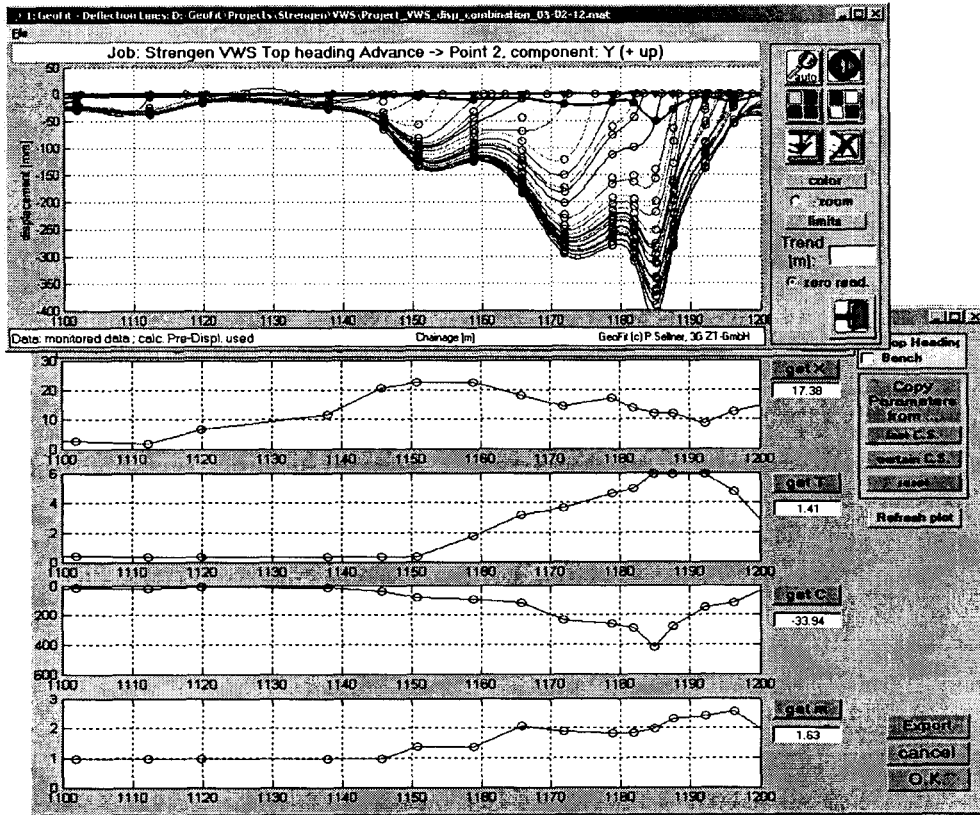


Fig. 26. STRENGEN tunnel case history for function parameters

Fig. 27은 최대 약 600mm이상의 내공변위가 발생된 INN TAL 터널의 경우로서 그림에 서와 같이 chainage 2650~2750사이의 100m구간에 대규모 파쇄대가 형성되어 있고, chainage 2730~2760사이에 주 단층대가 존재하며, 평균 100mm내외 정도의 내공변위를 발생하는 균질한 구간에 비해 최대 6배정도의 내공변위가 발생된 사례이다. Function parameter X값은 chainage 2700지점에서 최대치를 보이며, 파쇄대가 극명히 발달된 chainage 2730~2760에서 X값이 최소치를 보이고 있다. 아울러, C값도 chainage 2650에서부터 시작해서 chainage 2750에서 최대치를 보였다.

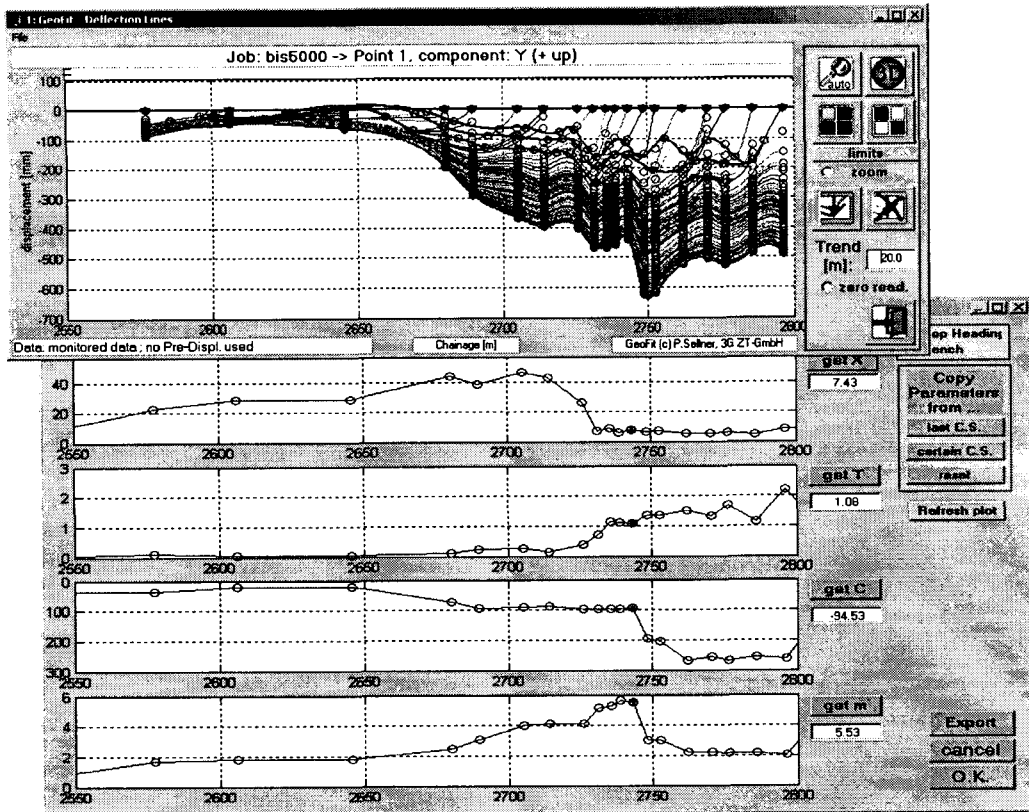


Fig. 27. INNTAL tunnel case history for function parameters

이러한 현장 사례 결과는 수치해석 결과와 더불어 convergence function parameter가 파쇄대나 단층대와 같은 연약대가 존재할 경우는 터널 전체를 단일 function parameter로 내공특성을 규정할 수 없음을 알 수 있고, 연약대 후방에서 이미 연약대의 특성으로 인해 function parameter X와 C값이 변화됨을 확인시켜주고 있으며, 수치해석을 통해서 전방 연약대의 규모와 강성차이를 사전에 파악할 수 있다는 것을 주지시켜 주고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 비균질 암반 즉, 파쇄대 및 단층대 등과 같은 연약대를 통과할 때 발생 되는 내공변위 결과를 이용해서 비균질 특성을 정량적으로 추정할 수 있는 방법에 대해서 연구하였다. 정량적인 지표로 터널 막장 후방에서 발생하는 변위 vector orientation과 convergence function parameters를 활용할 수 있음을 밝혔고, 균질 암반에서의 변위 vector orientation(normal)과 비균질 암반에서의 변위 vector orientation과의 차이를 나타내는 D.V.O.(differential vector orientation)개념을 제안하였다. 특히, D.V.O.와 연약대의 강성비(MC), 두께, 초기 응력, 포아슨비, 방향성(orientation)과의 상관관계를 규명할 수 있는 도표를 제안하였다. 아울러, convergence function parameter와 연약대의 강성비, 두께 등과의 연관성이 있음을 확인하였고, 연약대가 존재하는 터널에서는 단일 function parameter로 내공특성을 표현하는 것보다는 연약대의 특성이 반영된 function parameter로 표현하는 것이

더 합리적임을 확인하였다.

이러한 일련의 연구결과는 향후 과쇄대와 단층대 등 연약대를 포함하는 산악터널 등에서는 3차원 절대 계측이 필요함을 시사하고 있고, 3차원 계측 결과에 대한 분석도 계측 목적에 따라 다각도로 이루어져야 함을 알 수 있었다.

사사

본 연구는 1999년도 선정 국가지정연구실 사업(NRL)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Schubert W., Budil A., 1996, The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation, 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo 1995, Vol 3, Balkima.
2. Steindorfer A., 1998, Short Term Prediction of Rock Mass Behavior in Tunnelling by Advanced Analysis of Displacement Monitoring Data, Doctoral Thesis, TU-Graz.
3. 이인모, 손영진, 박광준, 1998, 터널 막장 전방의 지반 변화 예측을 위한 3차원 해석, 대한토목학회논문집, 제 18권 제 III-4호, pp. 505~519.
4. 이인모, 강기돈, 박광준, 1998, 3차원 절대 내공변위를 이용한 터널 막장 전방의 지반변화 예측기법, 한국지반공학회지, 제 14권, 제 4호, pp. 17~31.
5. Sellner P.J., 2000, Prediction of Displacement in Tunnelling, Doctoral Thesis, TU-Graz.
6. Grossauer K., 2001, Tunnelling in Heterogeneous Ground-Numerical Investigation of Stress and Displacement, Diplomarbeit, TU-Graz.
7. Tonon F., Amadei B., 2002, Effect of Elastic Anisotropy on Tunnel Wall Displacements Behind a Tunnel Face, Rock Mech. Rock Eng., Vol. 35, No. 3, pp. 141~160.
8. Panet M., Guenot A., 1982, Analysis of Convergence Behind the Face of a Tunnel, Tunnelling 1982, The Institution of Mining and Metallurgy, pp. 197~204.
9. Sulem J., Panet M., Guenot A., 1987, Closure Analysis in Deep Tunnels, Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 24, pp. 145~154, Pergamon Press.
10. Schubert W, Steindorfer A., Button E. A., 2002, Displacement Monitoring in Tunnels- an Overview, Felsbau 20 No. 2, pp. 7~15.
11. Barlow, J.P., 1986, Interpretation of Tunnel Convergence Measurements, MSc Thesis, Dep. of Civil Engineering, University of Alberta, Canada.
12. 김호영, 박의섭, 1993, 터널 내공변위의 이론과 계측결과의 분석, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, Vol. 3, pp.80~95.
13. 문현구, 김창용, 김선홍, 1991, 지하 양수발전소 설계를 위한 불연속 암반의 2차원 및 3차원 응력해석, 한국자원공학회지 Vol.28, No.4, pp. 273~283.
14. Fejzo I., 2002, Untersuchung der GeoFit-Parameterverlaeuft am Beispiel Inntaltunnel, Diplomarbeit, TU-Graz.