

강관삽입형 사전보강설계를 위한 DART 프로그램 소개



송기일
인하대학교
사회기반시스템공학부 조교수



조계춘
KAIST 건설 및 환경공학과 교수
(gyechun@kaist.edu)



장석부
삼성물산(주) 건설부문
지하토목팀 부장

1. 서론

1990년대 국내에 도입되기 시작한 강관다단그라우팅, UAM(Umbrella Arching Method) 등의 강관삽입형 보강공법과 같은 갱내 선진보강공법의 사용실적이 점차 증가함에 따라 근래에는 도심 천층 지하철 터널은 물론 산악터널의 갱구부 보강공사에도 일반적으로 적용되고 있다. 그러나, 선진보강공법은 그 적용수량에 따라 터널공사비와 공사기간에 큰 영향을 미치는 보조공법임에도 불구하고, 보강설계에 관한 일관성 있는 정량적 설계기준이 부족하여 기존 설계 및 시공사례나 기술자 개인별 판단에 의존하고 있는 실정이며 설계실무에 활용할 수 있는 기존의 연구성어나 체계적인 설계기법에 대한 연구는 현재까지 미진한 실정이다.

강관삽입형 보강 공법의 보강원리 및 효과에 대한

연구는 김창용 등 (1998), Song et al. (2006)에 의해 수행되었으며 3차원 유한요소해석을 통하여 터널크기, 지반조건, 강관길이, 강관의 설치간격 및 각도 등의 설계인자가 굴진면 안정성에 미치는 영향을 검토하였다. Bae et al. (2002), 방춘석 등(2001) 및 이준석 (1997)은 사전보강 영역을 균질화하여 보강영역을 정량화하고자 하였으며, 송기일과 조계춘(2006)은 효율적인 수치해석을 위한 사전보강 영역의 등가물성치를 결정할 수 있는 직병렬 강성 시스템을 제안하였다. 그러나 사전보강량의 결정을 위해서 3차원 수치해석은 과도한 시간과 노력이 요구되며, 강관의 기하학적 설치형태 및 그라우팅을 포함한 모델의 힘거동 분석에 있어서 여러 한계점을 안고 있다.

따라서, 본 기술기사에서서는 강관삽입형 선진보강공법의 설계변수를 우선 고찰하고 기본적인 가정조건을 바탕으로 단순화된 빔-스프링 구조해석 모델을 소개

코자 하며, 제안된 구조해석 모델을 기반으로 사전보강공법의 보강량을 결정할 수 있는 유한요소 프로그램 DART를 개발하였다. 풍화암과 토사지반 조건의 두 대표적 사례 해석을 통해 선진보강공법의 설계를 수행하였다. 본 프로그램 DART는 지반조건, 터널규모, 굴착방법과 지보조건 등을 정량적으로 고려할 수 있으며, 설계 초기단계에서 신속하게 사전보강량을 산정할 수 있는 장점이 있다.

2. 해석 모델의 이론적 배경

2.1 강관삽입형 선진보강공법의 설계조건과 설계변수

강관삽입형 선진보강공법의 설계조건으로는 지반조건, 터널크기 및 숏크리트나 강지보재와 같은 지보재의 특성이 우선 정의되어야 하며, 설계변수로는 그림 1의 강관 보강형 선진보강 공법의 개념도를 참조하면, 강관제원과 설치수량으로 대표된다. 강관제원에는 강관 구경 및 두께와 길이 등이 변수가 되며, 설치수량으로는 종방향 및 횡방향 간격 그리고 횡방향보강범위가 결정 되어야 한다. 강관의 타설각도는 시공여건을 감안하여 수평에 근사하도록 하여야 하므로 설계변수라기보다는 설계조건으로 고려하는 것이 적절할 것이다. 표 1에 선진보강공법의 설계를 위한 설계 조건과 설계 변수를 정리하였다.

일반적으로 강관제원은 크게 외경 60.5mm (두께=4mm)와 114.3mm (두께=4.5mm)가 많이 적용되고 있으며, 길이는 12m가 보편적으로 사용되고 있다. 타설각도는 15°이내를 원칙으로 하고 있으며, 천공직경은 강관규격에 따라 100mm~150mm 정도가 일반적으로 적용되고 있다. 강관의 횡방향 간격은 40~60cm, 종방향 간격은 터널굴착높이와 무관하게 통상 강관길이의 1/3 정도가 중첩되도록 하고 있다. 횡방향 보강범위는 120°가 가장 일반적이며, 지반조건

이 토사와 같이 연약한 경우에 한하여 측벽부 보강을 위하여 180°까지 적용하고 있다.

강관의 종방향 간격은 기본적으로 기설치된 강관에 의한 막장지지범위 이내이어야 한다. 즉, 그림 2에서 보는 바와 같이 파괴추정선은 강관선단이내에 위치하여야 한다. 통상적으로 강관길이의 1/3이 중첩되도록 설계되고 있으나, 터널높이와 지반조건이 고려되고 있지는 않다. 따라서, 강관의 종방향 설치간격은 강관의 길이와 종방향타설각도, 터널높이, 그리고 지반의 내부마찰각 등의 설계조건을 고려하여 결정하는 것이 적절하며 지지코어가 있는 경우에는 파괴선 시작지점을 터널막장면이 아닌 코어의 중심으로 설정하는 것이 보다 합리적이다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S_L < L_p \cos \theta_L - (H + L_p \sin \theta_L) \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (1)$$

위 식 (1)에서 사용된 변수에 대한 설명은 표 1을 참조하도록 한다.

선진보강 공법이 적용되는 지반조건은 저심도의 풍화암, 풍화토, 토사층이기 때문에 측압계수는 대부분 0.5이하로써 터널 천정부의 하중이 가장 크고 측벽부는 상대적으로 작다. 따라서, 상반천정부에 비하여 측벽부 보강시에는 강관의 간격을 증가시키거나 작은 단면의 강관을 사용하여 경제적인 설계를 도모할 수도 있다.

2.2 구조해석 모델의 도출

본 프로그램에서는 기존의 한계점을 극복하여 다양한 해석조건을 고려할 수 있는 이론적인 구조해석 모델을 도출하기 위하여 강관삽입형 선진보강공법의 지보 메커니즘을 합리적인 가정을 통해 단순화하였다. 특히, 터널내 지보구간은 숏크리트가 강지보에 비하여 강성이 크지만 숏크리트와강지보가 강관의 지지역할을 동시에 수행하므로 해석시 숏크리트와 강지보의 강성을 모두 고려하여 지보재의 반력을 고려하였다.

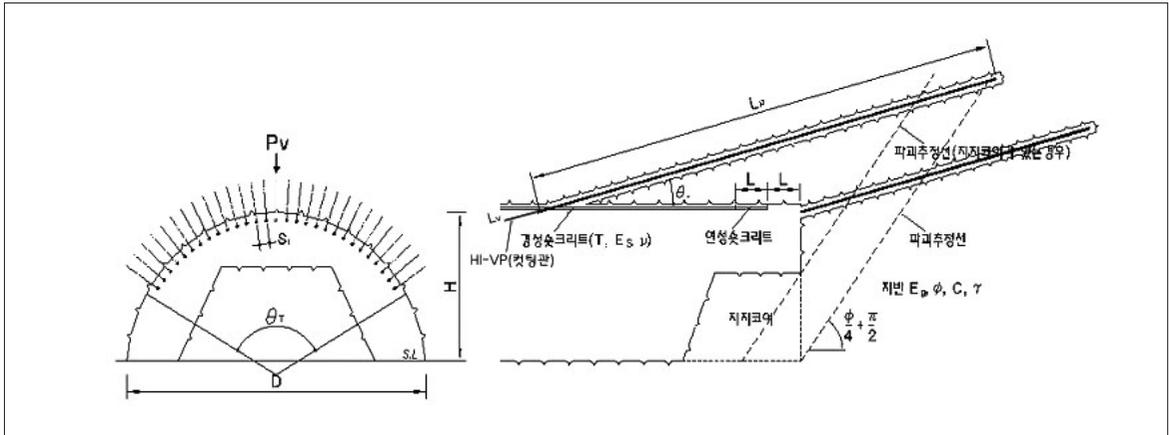


그림 1. 강관삽입형 선진보강공법의 설계조건과 설계변수에 대한 개념도

표 1. 강관삽입형 선진보강공법의 설계 조건 및 설계변수

설계 조건			설계 변수		
터널 관련	지반 관련	지보재	강관 관련	강관 종방향	강관 횡방향
터널폭 (D)	마찰각 (θ)	강지보 단면적 (A _설)	강관길이 (L _p)	종방향 간격 (S _z)	횡방향 간격 (S _h)
터널 높이 (H)	점착력 (c)	강지보 탄성계수 (E _설)	강관 직경 (D _p)	종방향 타설각 (θ _z)	횡방향 설치각 (θ _h)
1회 굴진장 (Le)	단위 종량 (γ)	강지보 설치간격 (d)	강관 두께 (T _p)		
	측압 계수 (K ₀)	숏크리트 두께 (T _{shot})	강관 탄성계수 (E _p)		
	지반 탄성계수 (E _g)	경성 숏크리트의 탄성계수 (E _{shot})			
	토피 (h)	숏크리트의 포와송비 (v)			

또한 횡방향설치각에 따른 강관의 안정성을 검토할 수

있도록 고려하였으며 이를 통해 적절한 횡방향 보강 범위를 결정할 수 있다. 강관삽입형 선진보강공법의 구조해석 모델을 도출하기 위한 기본적인 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 경사로 설치된 강관은 수평방향에 투영된 길이에 동일 강관으로 가정한다. (실제로 HI-VP관 등 절단 또는 제거되는 강관의 길이는 제외하기로 한다)
- 2) 구조계산에 고려되는 시공단계는 종방향의 다음 강관 설치공사 바로 전의 굴착상태를 대상으로 한다.
- 3) 막장면에서 추정 파괴선은 직선으로써 굴착면 하부로부터 $(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2})$ 의 각도를 이룬다.
- 4) 굴착구간과 연성숏크리트 구간에는 총지반하중이 작용하지 않고 아칭효과에 의한 하중분배율에 따라 일정량만이 적용한다.
- 5) 굴착면에서 지반측으로는 하중이 선형으로 감소하며, 파괴선 외측의 강관에는 지반하중이 작용하지 않는다.
- 6) 지반과 지보재는 축력에만 저항하는 반력 스프링으로 강관은 휨과 전단에 저항하는 빔요소로 모델링한다.
- 7) 강관삽입형 보강공법의 보강효과는 강관의 구조적 지지와 그라우팅 효과를 기대할 수 있으나, 다

음과 같은 사유로 강관만을 고려한다. 그라우팅 주입은 천공시 유출된 토사의 보충으로 고려한다. 천공홀에 주입된 주입재는 강관과 지반의 부착/밀착의 효과로만 고려하기로 한다. 즉, 주입효과 확인 및 품질관리가 곤란하므로 그라우팅 효과는 본 공법의 시공중 여분의 안전율로 고려하기로 한다.

그림 2는이러한 가정조건에 따라 도출된빔-스프링 구조해석 모델로써 기본적인 절점은 강관의 시점과 종점, 막장부, 하중변화 위치 등에 위치한다.

3. DART 프로그램의 개발

3.1 사전보강 설계 모델 개발

본 프로그램은 코어의 존재 유무에 따라 파괴추정선이 강관선단이내에 위치하는지를 먼저 선행 평가하여 설계 적정성을 판단하게 되어 있다. 강관에 작용하는 하중(Pv)을 산정하기 위해서는 먼저 지반하중(W)을 산정하여야 한다. 지반하중은Terzaghi의 이완토압식

이 적용되었다. 강관의 설치위치를 고려한 지반하중 W의 계산은 다음식과 같다.

$$W = \frac{B_1 \left(\gamma - \frac{c}{B_1} \right)}{K_0 \tan \phi} \left(1 - e^{-\frac{K_0 \tan \phi (h + R \sin \theta_T)}{B_1}} \right) \quad (2)$$

식 (2)의 B₁은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$B_1 = R \cdot \cot \left(\frac{\pi / 4 + \phi / 2}{2} \right) \quad (3)$$

여기서, γ는 지반의 단위중량, c는 점착력, K₀는 토압계수, φ는 지반의마찰각, θ_T는 강관의 횡방향설치각, h는 토피고이고, R은 터널의 반경이다.

강관에 작용하는 연직하중 σ_v와 수평방향하중 σ_h는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_v = S_T \cdot W \quad (4)$$

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot K_0 \quad (5)$$

터널 막장의 무지보 구간에 작용하는 토압은 연직방향과 수평방향 토압으로 구분할 수 있다. 터널 상부 지반에 설치된 강관의 경우는 연직방향의 토압이 지배적으로 작용하고 수평방향의 토압은 강관을 기준으로 반대편에 위치하는 지반의 반력스프링에의해 상쇄되는 것으로 볼 수 있다. 한편, 터널 측벽에 설치된 강관의 경우는 연직방향의 토압은 강관 아래 위치한 지반의 반력 스프링에 의해 상쇄되며 수평방향의 토압만이 강관의 휨거동에 지배적으로 작용하게 된다. 따라서, 이를 합성하여 강관에 작용하는 총토압P_v을 산정하려면 다음과 같은 주기함수의 특성을 이용할 수 있다.

$$P_v = \sqrt{\sigma_v^2 \cdot \cos^2 \theta_T + \sigma_h^2 \cdot \sin^2 \theta_T} \quad (6)$$

여기서, θ_T는 횡방향설치각으로 θ_T=0°이면 천단부이

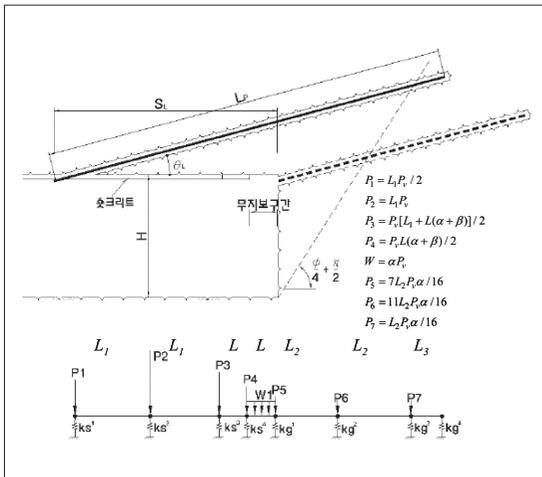


그림 2. 강관삽입형 선진보강공법의 구조계산을 위한 빔-스프링 구조해석 모델

고, $\theta_r=90^\circ$ 이면 측벽부가 된다. 즉, $\theta_r=0^\circ$ 이면 연직방향의 하중만 작용하고, $\theta_r=90^\circ$ 이면 수평방향의 하중만 작용하게 된다. 무지보구간과 연성숏크리트의 하중분배율 α 와 β 는 장석부와문현구(1998)의 연구에 의하면 다음과 같은 식으로 간편하게 구할 수 있다.

$$\alpha = 3.340L_e + 3.778 \ln E_g \quad (7)$$

$$\kappa = -3.126L_e + 3.391D \quad (8)$$

$$\beta = 100 - (\alpha + \kappa) \quad (9)$$

여기서, α , β , κ 의 단위는 %이고, L_e 는 무지보구간 굴진장이고, D 는 터널의 폭으로 단위는 meter이며, E_g 는 지반의 탄성계수로 단위는 tonf/m^2 이다. 따라서, 연성숏크리트구간에서 강관에 작용하는 하중은 $P_v' = (\alpha + \beta)P_v$ 와 같고, 무지보구간에서 강관에 작용하는 하중은 $P_v' = \alpha P_v$ 와 같다. 지반반력스프링계수는 다음식을 적용하여 구할 수 있다.

$$k_g = \frac{2E_g}{h} S_T \quad (10)$$

여기서, E_g 는 지반의 탄성계수, S_T 는 횡방향설치간격, h 는 토피고이다. 그리고, 숏크리트와 강지보의 반력스프링계수는 Oreste(2003)가 제안한 다음식을 적용하여 구할 수 있다.

$$k_{shot} = \left(\frac{1}{R} \right) \cdot \frac{E_{shot} \cdot \left[R^2 - (R - T_{shot})^2 \right]}{(1 + \nu) \left[(1 - 2\nu)R^2 + (R - T_{shot})^2 \right]} \quad (11)$$

$$k_{set} = \frac{E_{set} \cdot A_{set}}{d \cdot \left(R - \frac{h_{set}}{2} \right)^2} \quad (12)$$

여기서, E_{shot} 은 숏크리트의 탄성계수, R 은 터널반

경, T_{shot} 은 숏크리트의 두께, ν 는 숏크리트의 포와송비, E_{set} 은 강지보의 탄성계수, A_{set} 은 강지보의 단면적, d 는 강지보설치간격, h_{set} 은 강지보의 단면높이이다.

3.2 유한요소 알고리즘의 전개

강관삽입형 선진보강공법의 정량적 설계를 위해 도출된 빔 요소와 반력 스프링으로 구성된 구조해석 모델을 기반으로 유한요소 전산프로그램인 DART를 개발하였다.

그림 3은 시스템 방정식의 조합과정을 나타내고 있다. 그림 3a는 세계의 빔 요소와 세계의 강성 스프링을 포함한 구조해석 모델의 시작부이다. 시스템 강성행렬은 공동 절점에 대하여 인접한 각 요소가 기여하는 부분의 강성행렬을 합함으로써 그림 3b와 같이 얻을 수 있다. 마찬가지로 전체모델의 하중벡터도 공동 절점에 대하여 인접한 절점의 반력과 모멘트를 합함으로써 획득할 수 있다. 유한요소해석으로부터 획득한 전단력 S 와 강관의 단면적 A 로부터 발생 전단응력 σ_{shear} 은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\sigma_{shear} = \frac{S}{A} \quad (13)$$

전단응력에 대한 안전율은 다음과 같이 구할 수 있다.

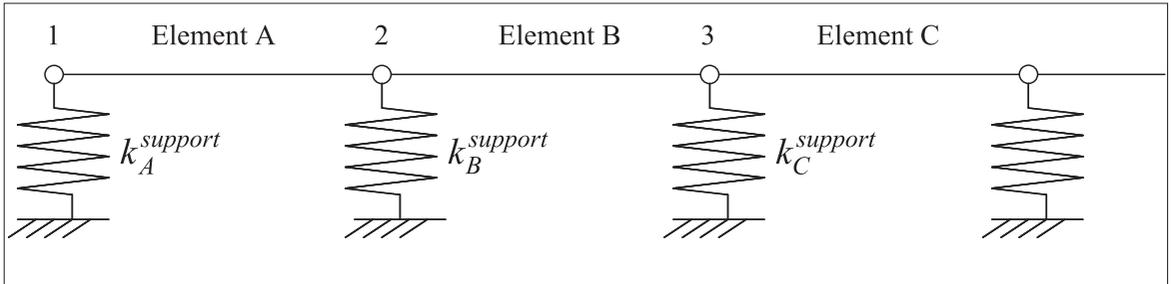
$$FOS_{shear} = \frac{\sigma_{allowable\ shear}}{\sigma_{shear}} \quad (14)$$

또한 휨응력 $\sigma_{bending}$ 은 모멘트 M 와 단면계수 Z 로부터 다음과 같이 획득할 수 있다.

$$\sigma_{bending} = \frac{M}{Z} \quad (15)$$

따라서, 휨응력에 대한 안전율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$FOS_{bending} = \frac{\sigma_{allowable\ bending}}{\sigma_{bending}} \quad (16)$$



(a) 빔요소와 강성 스프링의 모형

	k_A^y	k_A^m	k_B^y	k_B^m	k_C^y	k_C^m
k_A^y	$12 \frac{EI}{L_A^3} + K_A^{support}$	$6 \frac{EI}{L_A^2}$	$-12 \frac{EI}{L_A^3}$	$6 \frac{EI}{L_A^2}$		
k_A^m		$4 \frac{EI}{L_A}$	$-6 \frac{EI}{L_A^2}$	$2 \frac{EI}{L_A}$		
k_B^y			$12 \frac{EI}{L_A^3} + K_B^{support} + 12 \frac{EI}{L_B^3}$	$-6 \frac{EI}{L_A^2} + 6 \frac{EI}{L_B^2}$	$-12 \frac{EI}{L_B^3}$	$6 \frac{EI}{L_B^2}$
k_B^m				$4 \frac{EI}{L_A} + 4 \frac{EI}{L_B}$	$-6 \frac{EI}{L_B^2}$	$2 \frac{EI}{L_B}$
k_C^y		symmetry			$12 \frac{EI}{L_B^3} + K_C^{support} + 12 \frac{EI}{L_C^3}$	$-6 \frac{EI}{L_B^2} + 6 \frac{EI}{L_C^2}$
k_C^m						$4 \frac{EI}{L_B} + 4 \frac{EI}{L_C}$

(b) 시스템 강성행렬의 정식화

그림 3. 시스템 방정식의 유도

휨응력과 전단응력에 대한 안전율이 모두 1보다 크면 설계조건상의 사전보강은 안정한 것으로 평가할 수 있다.

3.3 개발된 프로그램의 검증

개발된 프로그램(DART)의 정확성을 검토하기 위하여 토파 20m 정도의 풍화암에 위치하는 지하철 복선터널을 대상으로 다음과 같은 조건을 가정하여 개발된 유한요소해석 프로그램과 범용 구조해석 프로그램 MIDAS-CIVIL(2006)의 해석결과를 비교하였다.

먼저, 개발된 유한요소해석 프로그램으로 여섯 가지 조건에 대하여 해석을 수행한 후, 해석결과로부터 계산된 빔-스프링 모델링의 하중 및 반력계수를 이용하여 범용 구조해석 프로그램에서 모델링을 하여 해석을

수행하였고 전단력과 모멘트의 최대값 및 다이어그램을 비교 분석하였다. 설계 조건과 강관 설계 변수는 다음과 같다.

- 터널제원 : D : 10m, H: 5m, L: 0.8m, T: 16cm, Es : 15,000,000 kN/m², ν: 0.2
- 지반조건 : ψ : 30°, C: 100 kN/m², γ: 21 kN/m³, K: 0.5, Eg : 150,000 kN/m², h: 20m
- 강관설치조건 : Lp : 12m, SL : 7.2m, Ep: 210,000,000 kN/m², θL: 10°
- 강관규격
 - Case 1: 외경 60.5mm, 두께 4mm, 횡방향 설치간격 40cm
 - Case 2: 외경 60.5mm, 두께 4mm, 횡방향 설치간격 60cm
 - Case 3: 외경 80.0mm, 두께 4mm,

횡방향 설치간격 40cm

Case 4: 외경 80.0mm, 두께 4mm,

횡방향 설치간격 60cm

Case 5: 외경 114.3mm, 두께 5.6mm,

횡방향 설치간격 40cm

Case 6: 외경 114.3mm, 두께 5.6mm,

횡방향 설치간격 60cm

위의 해석 결과를 정리하여 보면 표 3과 표 4로부터 개발된 유한요소 프로그램과 이미 검증된 범용 구조해

표 2. 개발된 유한요소 프로그램으로부터 계산된 모델하중 및 반력 계수

하중및반력계수	Case 1,3,5	Case 2,4,6
ks1	209097.7	209097.7
ks2	352502.1	352502.1
ks3	169002.7	169002.7
ks4	32427.07	32427.07
kg1	4200	6300
kg2	8400	12600
kg3	9300	13950
kg4	5100	7650
P1(kN)	77.27437	115.9116
P2(kN)	154.5487	231.8231
P3(kN)	92.41811	138.6272
P4(kN)	15.14375	22.71562
P5(kN)	13.18511	19.77767
P6(kN)	20.71946	31.0792
P7(kN)	1.883588	2.825381
W1(kN/m ²)	21.52672	32.29007
L1(m)	2.8	2.8
L(m)	0.8	0.8
L2(m)	1.4	1.4
L3(m)	1.7	1.7

석 프로그램 MIDAS-Civil로부터 구한 전단력도와 모멘트도는 MIDAS-CIVIL로부터 구한 전단력도 및 모멘트도와 같은 거동을 하는 것으로 나타났다. 또한 모멘트와 전단력에 대한 개발된 프로그램의 오차를 표 5에 정리하였다. 모멘트의 오차는 3% 이내로 나타났으며 전단력의 오차는 0.9% 이내로 나타났다.

4. 대표 지반에 대한 사례 연구

본 연구에서는 풍화암, 심한 풍화암, 풍화토의 세가지 대표 지반에 대한 사례연구를 수행하였다. 세가지 대표 지반에 대한 지반 물성치는 다음 표 6과 같다.

터널 제원과 강관 설치 조건은 동일하게 가정하였고, 터널의 심도 (Overburden = 10, 20, 30, 40m) 횡방향 설치 간격(S = 40, 60cm)을 변화하였다. 또한 강관의 직경은 D = 60.5, 80, 114.3mm로 변화하였다. 강관의 횡방향 설치각도 (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90° from the tunnel crown)에 따른 안전율 변화 양상도 획득하였다.

- 터널제원: D: 10m, H: 5m, L: 0.8m, T: 16cm, Es : 15,000,000 kN/m², v: 0.2
- 지반조건: 풍화암, 심한 풍화암, 풍화토, 심도는 10, 20, 30, 40m로 변화
- 강관설치조건: Lp : 12m, SL : 7.2m, Ep: 210,000,000 kN/m², θL: 10°
- 강관규격
외경 60.5mm, 두께 4mm,
횡방향 설치간격 40cm, 60cm
외경 80.0mm, 두께 4mm,
횡방향 설치간격 40cm, 60cm
외경 114.3mm, 두께 5.6mm,
횡방향 설치간격 40cm, 60cm

표 3. 전단력 분포도(S.F.D)

조건	DART	MIDAS-Civil
Case 1		
Case 2		
Case 3		
Case 4		

표 3. 전단력 분포도(S.F.D)

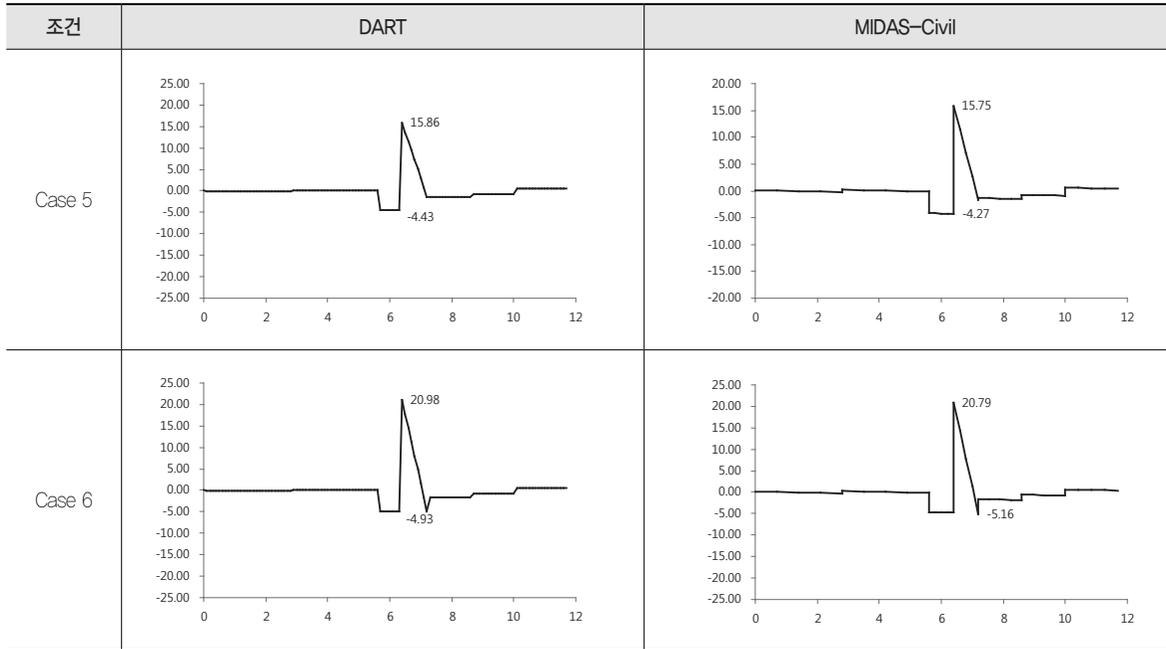


표 4. 모멘트 분포도(B.M.D)

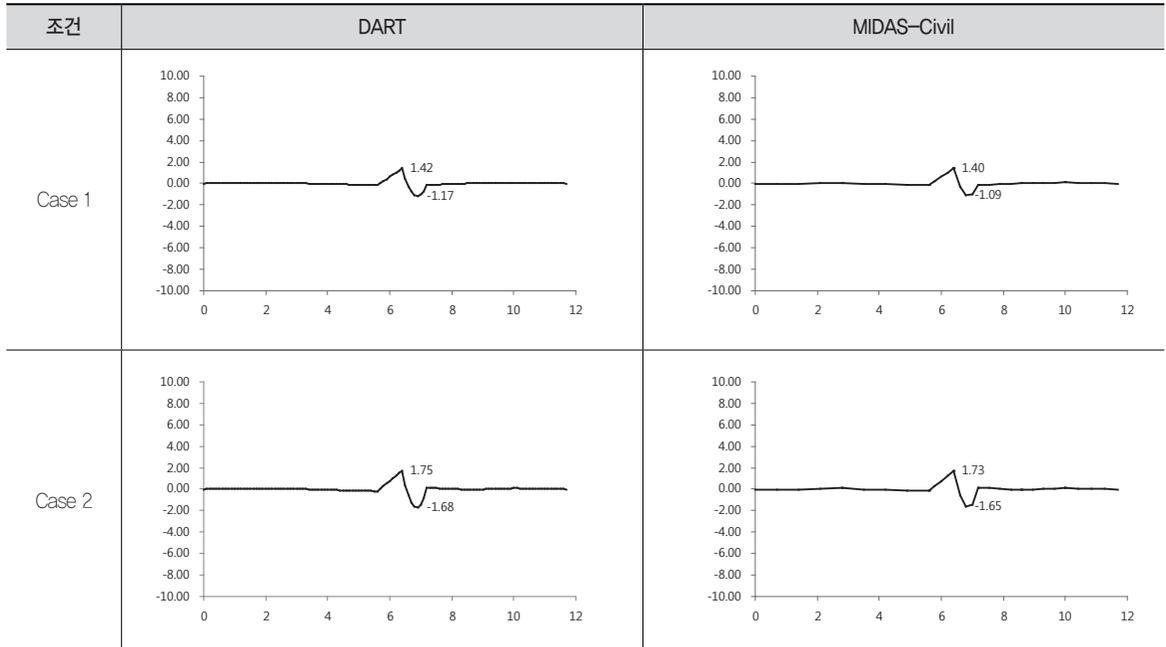


표 4. 모멘트 분포도(B,M,D)

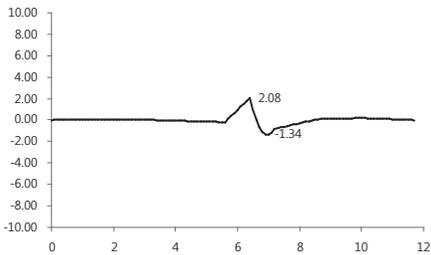
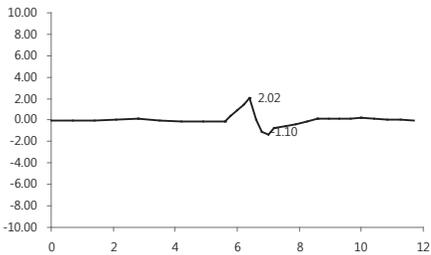
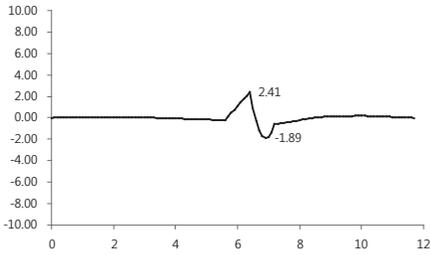
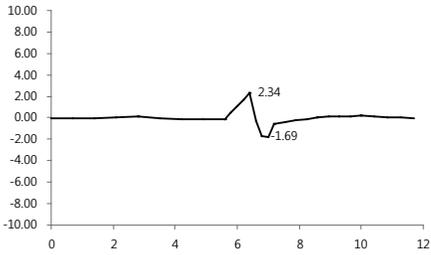
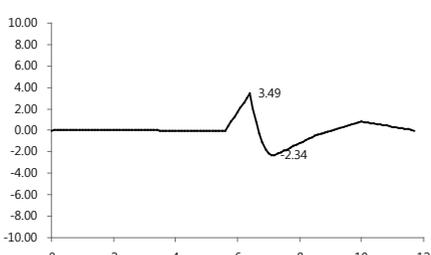
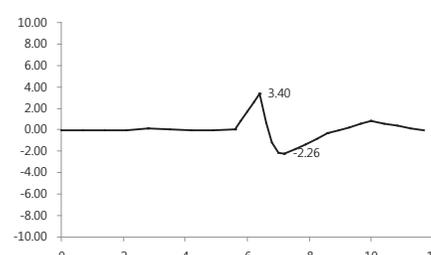
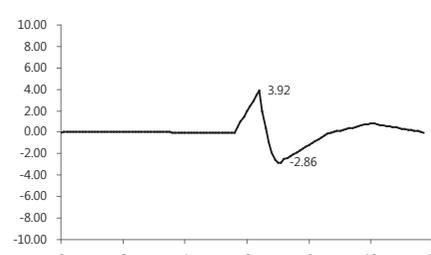
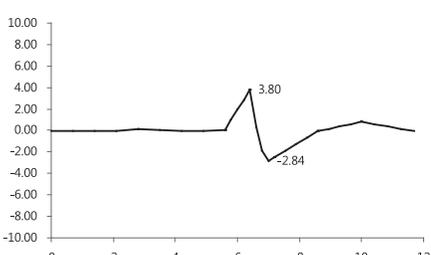
조건	DART	MIDAS-Civil
Case 3	 <p>Detailed description: A line graph showing the moment distribution for Case 3 using the DART program. The x-axis represents distance from 0 to 12, and the y-axis represents moment from -10.00 to 10.00. The moment is zero until approximately x=5.5, then rises to a peak of 2.08 at x=6.5, drops to a trough of -1.34 at x=7.5, and returns to zero by x=10.</p>	 <p>Detailed description: A line graph showing the moment distribution for Case 3 using the MIDAS-Civil program. The axes and overall shape are similar to the DART result. The peak moment is 2.02 at x=6.5, and the trough moment is -1.10 at x=7.5.</p>
Case 4	 <p>Detailed description: A line graph showing the moment distribution for Case 4 using the DART program. The peak moment is 2.41 at x=6.5, and the trough moment is -1.89 at x=7.5.</p>	 <p>Detailed description: A line graph showing the moment distribution for Case 4 using the MIDAS-Civil program. The peak moment is 2.34 at x=6.5, and the trough moment is -1.69 at x=7.5.</p>
Case 5	 <p>Detailed description: A line graph showing the moment distribution for Case 5 using the DART program. The peak moment is 3.49 at x=6.5, and the trough moment is -2.34 at x=7.5.</p>	 <p>Detailed description: A line graph showing the moment distribution for Case 5 using the MIDAS-Civil program. The peak moment is 3.40 at x=6.5, and the trough moment is -2.26 at x=7.5.</p>
Case 6	 <p>Detailed description: A line graph showing the moment distribution for Case 6 using the DART program. The peak moment is 3.92 at x=6.5, and the trough moment is -2.86 at x=7.5.</p>	 <p>Detailed description: A line graph showing the moment distribution for Case 6 using the MIDAS-Civil program. The peak moment is 3.80 at x=6.5, and the trough moment is -2.84 at x=7.5.</p>

표 5. 해석결과 비교 분석

구분	계산조건		단면력(DART)		단면력(MIDAS-Civil)		오차분석	
	강관규격	횡방향 간격	모멘트 (kN-m)	전단력 (kN)	모멘트 (kN-m)	전단력 (kN)	모멘트 (%)	전단력 (%)
Case 1	외경 60.5mm, 두께 4mm	40 cm	1,417	10,561	1,404	10,555	0.917	0.057
Case 2	외경 60.5mm, 두께 4mm	60 cm	1,745	14,927	1,728	14,915	0.974	0.080
Case 3	외경 80.0mm, 두께 4mm	40 cm	2,080	12,227	2,024	12,136	2.692	0.744
Case 4	외경 80.0mm, 두께 4mm	60 cm	2,409	16,677	2,344	16,563	2.698	0.684
Case 5	외경 114.3mm, 두께 5.6mm	40 cm	3,493	15,863	3,404	15,752	2.548	0.699
Case 6	외경 114.3mm, 두께 5.6mm	60 cm	3,920	20,980	3,802	20,793	3.010	0.891

표 6. 대표 지반 물성치

Parameters	풍화암	심한 풍화암	풍화토
Elastic Modulus (kPa)	500,000	150,000	2,000
Poisson's Ratio	0.3	0.32	0.35
Cohesion (kPa)	250	100	30
Friction angle (Degree)	35	30	30
Unit Weight (kPa)	22.6	21	18
K_0	0.5	0.5	0.5

4.1 전단력에 대한 안전율 변화

전단력에 대한 안전율 분석 결과, 그림 4로부터 강관의 외경이 증가할수록 안전율도 증가함을 알 수 있다. 그리고, 터널의 깊이가 깊어짐에 따라 안전율은 수렴성을 갖고 감소하는 것으로 나타난다. 또한 그림 4에서 횡방향 설치 간격에 따른 안전율을 각각 비교해보면 강관의 횡방향 설치간격이 증가할수록 안전율은 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 5로부터 전단에 대한 안전율은 지반의 탄성계수가 작을수록 감소하는 것으로 나타난다. 그림 4와 5를 종합적으로 살펴보면 풍화암, 심한 풍화암 및 풍화토 모두 전단에 대해서는 안전율이 큰 것으로 나타난다.

4.2 모멘트에 대한 안전율 변화

모멘트에 대한 안전율 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 그림 6으로부터 강관의 외경이 증가할수록 안전율은 증가하며 강관의 횡방향 설치간격이 좁아 질수록 안전율은 증가한다. 터널의 깊이가 깊어짐에 따라 안전율은 수렴성을 갖고 감소하는 것으로 나타난다. 그림 7로부터 모멘트에 대한 안전율은 지반의 탄성계수가 작을수록 감소하는 것으로 나타난다. 특히, 심한 풍화암이하 연약한 지반의 경우 터널 심도가 증가하면 안전율이 1보다 작아지므로 안정성에 문제가 발생될 수 있음을 알 수 있다.

위의 해석결과를 분석적으로 살펴보면, 풍화암의 경우 토피고가 30m이하인 경우는 직경 60mm의 강관을 60cm의 시공간격으로 적용하여도 안전율 1이상을 획득할 수 있다. 하지만 풍화토의 경우는 토피고가 10m 인 경우 114.3mm의 대구경 강관을 40cm의 시공간격으로 적용하여야 안전율 1이상을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 풍화토의 토피고가 커지면 터널 굴착면 안정성 확보를 위해 대구경 강관과 더불어 추가적인 지보가 요구될 것으로 사료된다. 전단력에 대한 안전율 보다는 모멘트에 대한 안전율 분석을 통해 강관 설계 인자를 결정하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

4.3 횡방향설치각에 따른 안전율 변화

터널이 10m 깊이의 풍화토 ($E_g=2000\text{kPa}$)에 위치한 경우 외경 114.3mm의 강관을 40cm의 간격으로 설치했을 때 횡방향설치각에 따른 안전율의 변화 양상을 도시하면 다음 그림 8 및 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 그림 8로부터 전단력에 대해서는 안전한 것으로 나타나며 터널 천단부로부터 설치각도가 증가할수록 안전율이 감소하지만 설치각도가 45° 보다 커지면 안전율도 상승하는 것으로 나타난다. 이러한 특성은 수평토압계수가 달라지더라도 동일하게 나타난다. 측벽부에 위치한 강관의 안전율은 수평토압계수가 증가함

에 따라 감소된다.

그림 9로부터 모멘트는 터널의 천단부에서는 1보다 크지만 설치각도가 증가하면서 안전율이 1보다 작아진다. 설치각도가 45° 보다 커지면 안전율이 점차 증가하고 60° 이후 안전율이 1보다 커진다. 이러한 거동특성으로부터 사전보강 설계시 안전율이 1보다 작은 터널 천단으로부터 $15^\circ \sim 60^\circ$ 사이 구간에서 시공간격을 감소시키거나 더 큰 강관을 적용하여 안정성을 확보할 수 있는 방안을 강구해야 한다. 또한 이러한 토사지반의 경우는 강관의 설치범위를 $180^\circ (90^\circ \times 2)$ 까지는 해야 안정성을 도모할 수 있는 것으로 평가할 수 있다.

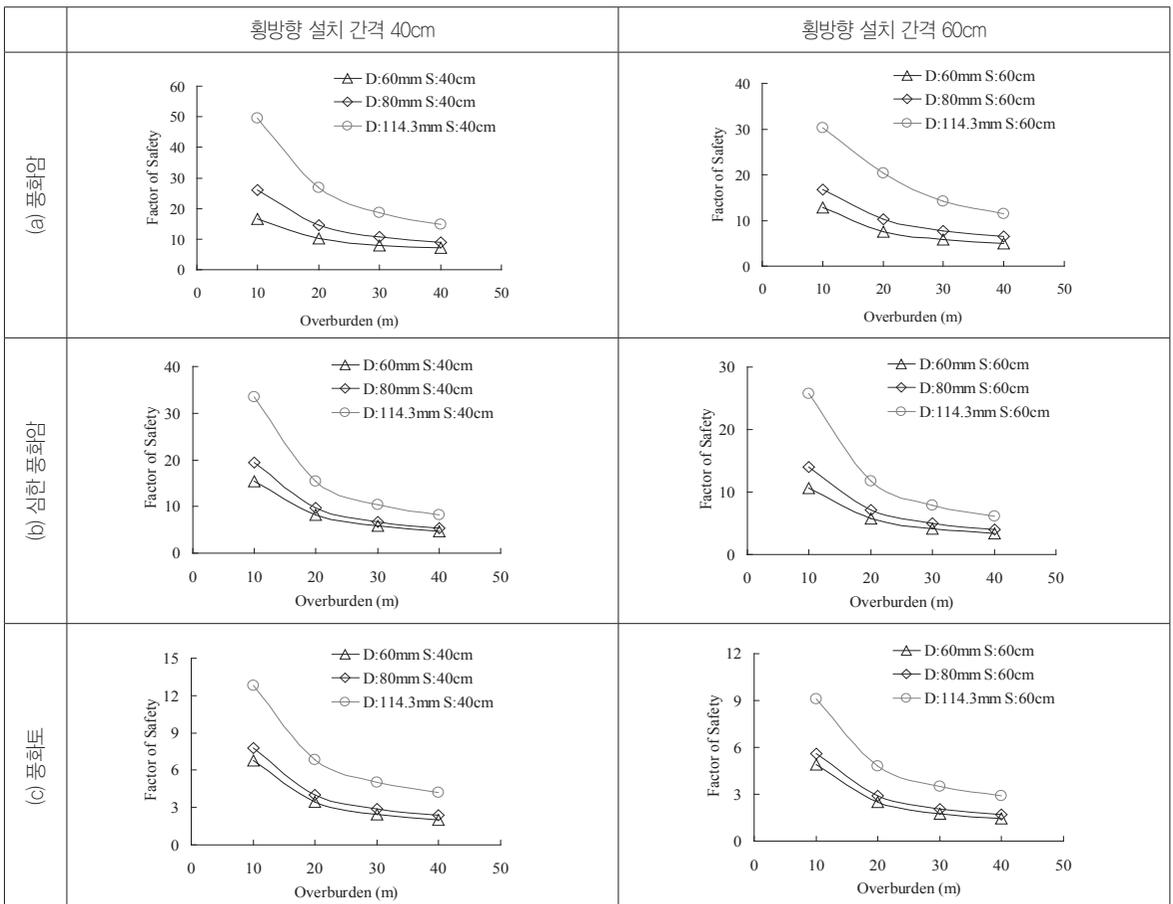


그림 4. 전단력에 대한 안전율 변화 양상

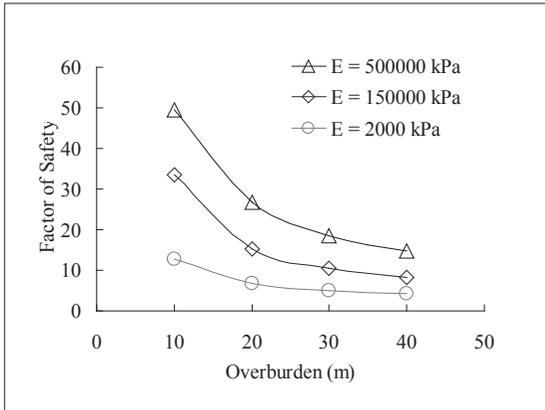


그림 5. 지반조건에 따른 전단력에 대한 안전을 변화 양상 (외경:114.3mm 횡방향 설치간격: 40cm인 경우)

5. 결론

본 기술기사에서는 저토피고의 갱구부 구간 및 파쇄대와 같은 연약한 지반 관통시 터널 굴진면의 안정성확보를 위해 적용되고 있는 선진보강공법의 정량적 설계를 위해 개발된 DART 프로그램을 소개하였고 프로그램의 검증과 대표사례 지반에 대한 정량적 분석을 수행하였다. 이를 위해 강관삽입형 선진보강공법의 설계변수를 고찰하고 사전보강공법의 보강량을 최적화하기 위한 이론적 빔-스프링 구조해석 모델을 제안하였으며, 제안된 구조해석 모델을 기반으로 비교적 적은 전산용량과 모델링 노력으로 사전보강량을

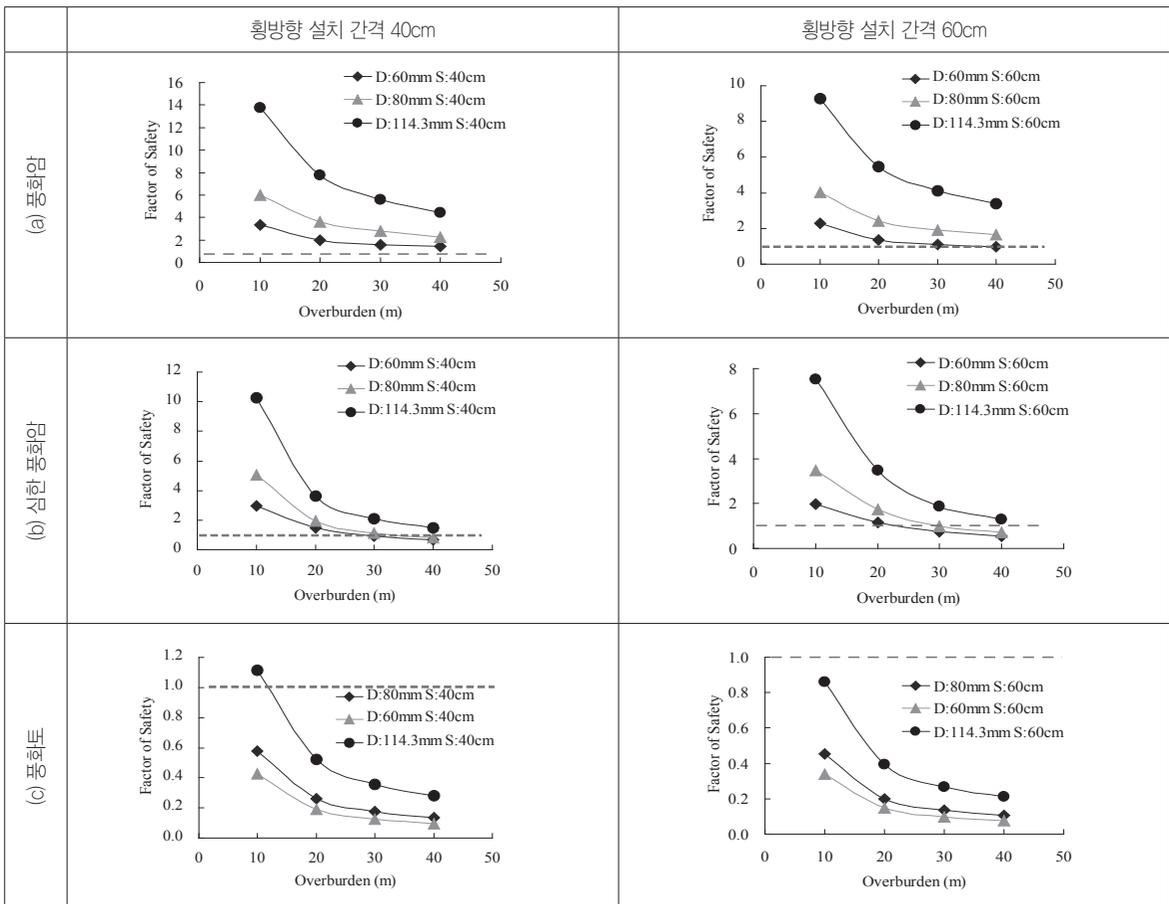


그림 6. 모멘트에 대한 안전을 변화 양상

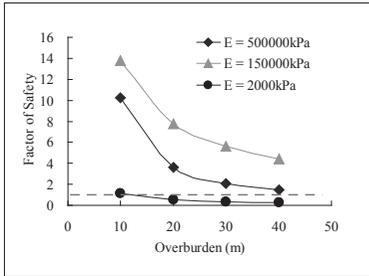


그림 7. 지반조건에 따른 모멘트에 대한 안전을 변화 양상 (외경:114.3mm 및 횡방향 설치간격: 40cm인 경우)

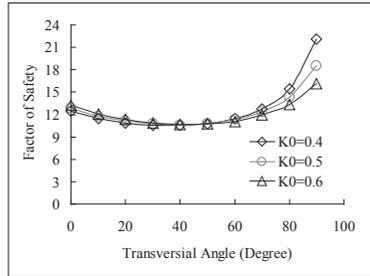


그림 8. 전단력에 대한 안전을 변화 양상 (외경: 114.3mm, 횡방향 설치 간격: 40cm)

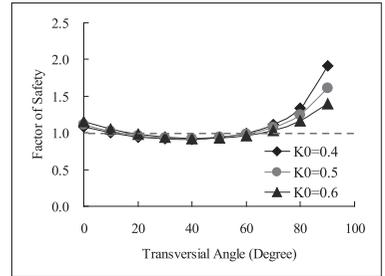


그림 9. 모멘트에 대한 안전을 변화 양상 (외경: 114.3mm, 횡방향 설치간격: 40cm)

정량적으로 결정하기 위한 유한요소해석 프로그램인 DART를 개발하였다. DART는 지반조건은 물론 터널설계조건을 종합적으로 고려하여 강관보강량을 정량적으로 산정할 수 있는 큰 장점이 있다.

따라서, DART프로그램은 터널의 사전보강설계에 대한 일관성 있고 정량적인 설계기법이 될 수 있을 것으로 판단되므로 많은 활용을 기대한다. 또한, 후속 연구들이 수반되어 본 프로그램보다 우수한 프로그램이 개발되기를 바란다.

참 고 문 헌

1. 김창용, 배규진, 문현구, 최용기 (1998), "Umbrella Arch 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구", 암반공학회 논문집터널과 지하공간, 제8권, pp. 209-225.
2. 방춘석, 이준석, 이상덕 (2001), "그라우팅 및 강관단단 병용공법의 설계기법에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제17권, 제III-6호, pp.487-494.
3. 이준석 (1997), "그라우팅 및 강관단단 공법에 의한 터널의 보강효과에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제17권, 제III-6호, pp. 629-639.
4. 송기일, 조계춘 (2006), "터널 사전보강 영역의 효과적 수치해석을 위한 등가 물성치 결정 기법", 한국터널공학회논문집 터널기술, 제8권, 제2호, pp. 151-163.
5. 장석부, 권승, 김기림, 허도혁(2002), "터널막장 보강을 위한 합리적인 선진보강공법 설계기법", 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 제4권, 제3호, pp. 6-13.
6. 장석부, 문현구 (1998), "터널설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제14권, 제5호, pp. 5-15.
7. Song, K.I., Cho, G.C., Chang, S.B., Lee, I.M. (2013), Beam-spring structural analysis model for the design of tunnel pre-reinforcement support system, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 59, pp. 139-150.
8. Song, K.I., Cho, G.C., Sim, Y.J., and Lee, I.M. (2006), "Optimization of a pre-improvement support system for large underground excavation", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.21, Nos.3-4, May-July, pp.374-374.
9. Bae, G.J., Shin, H.S., Sicilia, C., Choi, Y.G., and Lim, J.J. (2005), "Homogenization framework for three-dimensional elastoplastic finite element analysis of a grouted pipe-roofing reinforcement method for tunneling", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 29, pp. 1~24.
10. Oreste P.P. (2003), "Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence-confinement approach", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, Issue 4, pp. 347-363.
11. MIDAS Civil (2006) Online Manual, MIDAS Information Technology Co., Ltd. 2005.