

유한요소법을 이용하여 UAM의 보강메커니즘에 관여할 것으로 판단되는 지반물성, 상부지반의 두께, 삽입강관 크기, 강관의 중첩길이, 강지보의 적용 유·무에 대하여 굴착진행에 따른 강관의 거동분석을 통해 UAM의 보강 메커니즘을 규명하고자 한다.

## Umbrella 아치 적용시 강관의 거동에 관한 수치해석적 연구

글 | 최재진 지앤지컨설팅 상무이사 / 차민웅 지앤지컨설팅 터널부 사원 02-571-5582  
이메일 | chamu@gngcon.co.kr

### 1 머리말

국내의 경우 UAM에 관한 체계적인 연구가 부족하여 역학적 보강 메커니즘에 관한 이론정립이 되어 있지 않음은 물론 설계변수에 따른 보강효과에 관한 정성적, 정량적인 관계정립이 아직 부족한 관계로 대부분의 경우 공학적 근거보다는 외국자료나 현장 지질조건에 따른 경험적 방법에 의존한 시공이 이루어지고 있다. 이러한 실정을 감안할 때 합리적이고 이론적인 설계 및 해석기법의 도입이 요구되어지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 UAM의 보강 메커니즘에 관여할 것으로 판단되는 지반물성, 상부지반의 두께, 삽입강관의 사이즈, 강관의 중첩길이, 강지보의 적용 유·무에 대하여 굴착 진행에 따른 강관의 거동 분석을 통해 UAM의 보강 메커니즘을 알아보기 위한 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 강관이 삽입된 지반의 하부를 굴착하면서 강관에 발생하는 부재력을 분석함으로써 UAM적용 시 강관의 보강 메커니즘을 확인하였다.

### 2 사례분석

인구증가와 더불어 교통난 등의 문제해결의 일환으로 수많은 지하구조물들의 건설이 추진되어 왔으며, 이러한 이유로 인하여 과거와는 달리 터널 노선 결정에 상당한 제약을 받고 있는 실정이다. 따라서 시공조건이 매우 열악한 곳에서의 터널 건설이 불가피하게 되었는데, 이러한 경우에 터널의 안정뿐만 아니라 주변지반의 안정 또한 중요한 현안 문제로 대두되고 있다. 또한 인접 구조물의 손상과 붕괴사고는 인명, 시간 및 경제적 손실을 초래할 수 있으므로 지반조건이 일반적인 터널굴착공법이 부적합한 곳에서는 안정성 확보를 위한 지반보강공법의 선택이 중요한 의미를 가지게 된다. 특히 경제적인 측면을 무시할 수 없는 지하철 터널의 경우, 터널노선은 불가피하게 토피고가 낮거나 파쇄대 등의 연약한 지반을 통과하게 되므로, 이 경우 개착식 터널보다 NATM 등에 의한 굴착공법이 유리한 상황이 발생할 수 있고, 따라서 터널 보조공법을 동시에 고려하여야 한다(이준석 등, 2000).

일반적으로 강도가 낮고 자립도가 낮은 지반에서의 터널굴착을 수행하는 경우, 또는 지하수위가 높아 지하 굴착 시 지하수 배출에 따른 주변지반의 침하가 예상되거나 연약지반으로 인해 굴착 시 지반의 이완영역이 넓은 경우 등은 지하구조물 및 인접구조물의 안정성을 확보하기 위하여 굴착공법과 병행하여 적절한 보조공법을 적용하게 된다. 여러 보조공법 중 강관다단 그라우팅공법(UAM: umbrella arch method)은 기존 공법들의 문제점을 보완하기 위해 개발된 공법으로서, 70년대 중반 이탈리아에서 개발된 것으로 일본의 경우도 이러한 이탈리아의 UAM을 자국의 현장 여건에 적합하도록 설계하고 시공측면에서의 보완 연구를 통해 공법을 정착시켰으며 대규모 단층파쇄대, 하상 퇴적층 등 매우 열악한 지반 조건에서도 터널 시공을 무리 없이 수행하고 있다(대원지질개발(주), 1996). 국내의 경우 80년대 초에 지하철 일부구간에 시공된 이래 NATM 적용 시 연약대구간의 보강공법으로 일반화되고 있는 추세이다(이봉렬 등, 1996). UAM은 기존의 파이프 루프(pipe roof)공법을 주공법으로 이용하나 파이프 루프를 이루는 파이프들을 단지 지반 보강재로만 이용하지 않고 그 속에 인위적인 구멍들을 내어 파이프를 통한 그라우팅을 수행, 차수와 보강효과를 동시에 얻을 수 있는 공법으로 공비 및 공기면에서 타공법에 비해 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나 국내의 경우 본 공법의 적용 시 강관의 종류 및 배열방법 주입방식 등이 개발적, 획일적으로 결정되고 있어 공학적 근거에 의한 설계가 이루어지지 않고 있다. 이는 UAM 적용시 터널의 보강효과와 주변 지반의 거동역제에 관한 연구가 주로 침하량의 분석을 통해서만 주로 이루어졌고 UAM의 보강 메커니즘에 관한 연구가 체계적으로 수행되지 않았기 때문으로 사료된다.

UAM의 보강 메커니즘에 관한 기존의 연구로는 Harazaki et al.(1998), Oreste et al.(1998), 장석부 등(2002), 차민웅과 문현구(2003) 등의 연구가 있다.

Harazaki et al.(1998)은 지반조건이 상대적으로 취약한 충적층의 경우 강관에 작용하는 힘모멘트가 막장 전방에서 최대로 작용하며 이완영역이 막장 전방으로 확대되므로 막장전방에서 최대중이 우세하여 지반침하의 경감이 어려우므로 연약지반에서 UAM의 효과를 발현하기 위해서는 face bolting 등 막장의 보강에 의한 막장전방의 개량이 필요하다고 제시하였다.

Oreste et al.(1998)은 강관의 직경, 두께, 간격 등은 굴착 전 지반에서 터널의 심도, 지보재의 타입과 강성 등에 따라 결정되고, UAM에 의한 지반개량의 모델링이 어려운 이유는 본 공법이 많은 변수를 포함하며, 또 이 변수들이 주로 경험적인 방법에서 얻어지므로 정확한 영향의 고려가 불가능하고, 강관의 중첩길이 효과와

강지보와의 연결성 등의 분석이 어렵기 때문이라고 분석하였다. 이에 막장전방을 독립된 스프링 연속체로, 강관은 선형탄성 거동을 한다고 가정하고 강관의 부재력 분석에 관한 이론식을 제안하였다.

장석부 등(2002)은 UAM의 설계변수를 고찰하고 비교적 적은 전산용량과 모델링 노력으로 터널막장 지지에 요구되는 보강량을 정량적으로 구조계산 할 수 있는 빔-스프링 모델을 제안하였다.

차민웅과 문현구(2003)는 상이한 지반조건에 따른 강관의 역학적인 거동을 비교, 분석하여 강관에 의해 형성된 아치부 아래를 굴착하는 동안 강관은 빔으로 작용하게 되며, 형성된 빔의 축은 터널축과 함께 거동하고 강관의 모멘트는 터널의 수직인 축방향의 변형에 반응한다고 제시하였다.

상기한 연구들에서 강관의 보강 메커니즘에 관한 연구가 수행되었으나 굴착 진행에 따른 강관의 거동에 대해 UAM의 주요 설계 인자가 미치는 영향을 파악하기에는 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 UAM의 보강 메커니즘에 관여할 것으로 판단되는 지반물성, 상부지반의 두께, 삽입강관의 사이즈, 강관의 중첩길이, 강지보의 적용 유무에 대하여 굴착 진행에 따른 강관의 거동을 분석하여 강관의 보강 메커니즘을 알아보기 위한 해석을 수행하였다.

### 3 해석모델 및 조건

본 연구에서는 전산해석에 의한 매개변수 연구 결과의 신뢰도를 높이기 위해 현장의 실제 시공 방법 및 순서를 최대한 고려하여 3차원 유한요소 해석 프로그램인 PENTAGON3DTM를 이용하여 터널 굴착 시 적용되는 반단면 굴착공법의 시공순서와 보강 과정을 모델링하였으며, 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다. 터널 단면은 폭과 높이가 각각 11m와 9m로 환산직경(D)이 약 10m이며, 굴착에 의한 경계조건의 영향을 고려하여 측면경계와 하부경계를 터널직경의 5배 이상이 되도록 설정하였다. 경계조건은 상부지표면은 자유경계조건, 측면과 하부경계는 각각 면에 수직인 방향의 변위를 구속하는 변위 경계조건을 적용하였다.

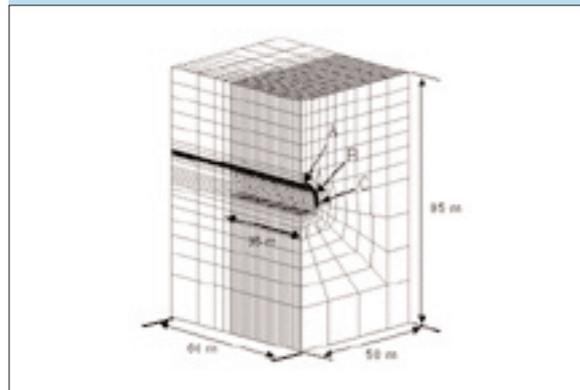
그림 1은 지층두께가 30m일 경우의 3차원 유한요소망으로 총 절점수는 12,958개, 지반을 구성하는 8절점 solid 요소는 12,099개 그리고 슛크리트를 모델링한 4절점의 shell 요소는 1,985개이며, 록볼트와 강관, 강지보를 모델링한 truss 요소와 frame 요소는 각각 198개와 460개, 510개이며, frame 요소로 모델링한 강관과 강지보의 접속지점은 hinge로 설정하였다. 요소

망은 터널의 단면형상, 지층, 시공순서, 강관 등을 고려하여 형성하였고, 요소는 일반적으로 굴착에 따른 응력변화가 크게 발생하는 터널 굴착면 주위에 조밀하게 배치하였으며, 지반물성의 경계는 지표면으로부터 35m로 분할굴착 경계선과 일치한다.

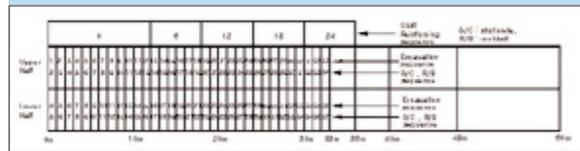
UAM에서 강관의 거동을 파악하기 위해 도로터널의 표준시방서를 참조하여 직경 114mm와 두께 6mm의 강관과 직경 60.5mm 두께 4mm인 강관, 두 경우에 대하여 길이 12m의 강관을 천단을 중심으로 횡방향 50cm 간격으로 배열하여 터널 갱구부로부터 종방향으로 각각 6m, 8m, 12m의 간격으로 180° 범위에 각각 5열, 4열, 3열을 10° 상향으로 설치하였다.

종단면상의 터널굴착 Step 및 Section number를 도시한 그림 2와 같이 굴착 및 보강과정의 해석순서는 현장의 시공 여건을 고려하여 「UAM 적용 및 굴착 → 연성 슛크리트 → 경성 슛크리트 + 록볼트 → UAM 적용 및 굴착」순으로 총 37단계를 설정하였으며, 굴진장은 1.0 m, 상반과 하반의 벤치길이는 터널 높이의 약 0.5배인 4.0 m로 하였다.

■ 그림 1. 3차원 유한요소 모델



■ 그림 2. 굴착 모식도



## 4 연구내용

기존의 연구에 의하면 주입재가 강관과 강관사이에서는 비교적 얇게 연결이 되어 있어서 차수재 역할을 담당하고, 강관 주변의 구근형성 부근은 강한 보강재 역할을 하게 된다. 따라서 본 연구에

서는 강관과 주입재가 천공홀 내에서 구근을 형성하여 하나의 복합체(composite material)로서 거동한다는 가정 하에 식 (1)에서 식 (3)을 이용하여 구근형성 부분의 유효면적과 각 재료의 탄성계수를 이용하여 등가 탄성계수를 도출하였다. 이를 강관의 물성치로 입력하여 강관과 구근 형성 부분의 주입재를 동시에 고려할 수 있도록 하였다.

이러한 방법을 적용할 경우 강관의 독립적인 역학적 거동을 파악할 수 있다. 복합체의 모식도는 그림 3에 나타내었으며 표 1은 지반과 슛크리트의 물성치를 나타낸다.

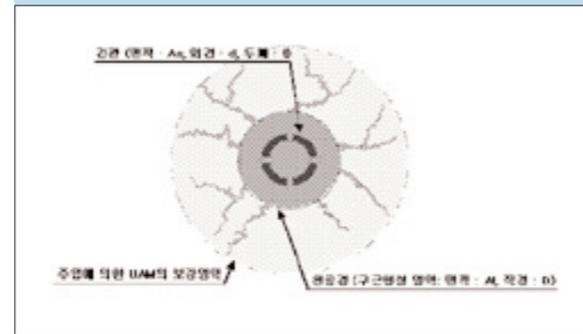
$$(1) A_s = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2$$

$$(2) A_t = \pi \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} - t \right)^2 \right]$$

$$(3) E_t = \frac{(A_t - A_s) \times E_g + A_s \times E_s}{A_t}$$

여기서,  $A_t$ 는 주입재가 구근을 형성한 부분의 면적이고,  $D$ 는 형성된 구근의 직경,  $A_s$ 는 강관부의 면적,  $d$ 는 강관의 외경,  $t$ 는 강관의 두께,  $E_t$ 는 주입재와 강관의 등가탄성계수,  $E_g$ 는 주입재의 탄성계수,  $E_s$ 는 강관의 탄성계수이다.

■ 그림 3. UAM의 등가물성영역



■ 표 1. 지반 및 지보재 물성

Mechanical Property	Deformation modulus E (MPa)	Poisson's ratio ( $\nu$ )	Cohesion (MPa)	Friction angle $\phi$ (degree)	Density ( $10^3 \text{kg/m}^3$ )	
Weathered soil	A	20	0.30	0.015	30	1.9
	B	50	0.30	0.03	30	2.0
	C	100	0.28	0.05	32	2.1
Weathered rock	D	300	0.27	0.07	33	2.2
	E	500	0.27	0.1	33	2.2
	F	1,000	0.26	0.2	34	2.4
Soft rock	G	3,000	0.25	0.3	35	2.5
Shotcrete	10,000	0.20	-	-	-	2.5

본 연구의 해석에 사용된 지반물성은 서울지하철에서 일반적으로 적용되는 물성기준을 참고하였다. 지반의 거동특성과 보강효과를 파악하기 위하여 표 1에서 사용한 7가지 지반물성중에서 A~B는 풍화토(weathered soil), C~E는 풍화암(weathered rock), F~G는 연암(soft rock)에 해당되며, 7가지 지반물성과 6가지 지층두께, UAM 적용 유·무, 강관의 규격, 강관의 중첩길이 그리고 강재지보의 유·무를 조합한 총 36가지 경우에 대하여 3차원 전산해석을 수행하였다.

## 5 해석 결과

### 5.1 변형계수의 변화에 대한 분석

변형계수의 변화에 따른 강관에 발생하는 모멘트의 양상을 알아보기 위하여 상반분할굴착 경계선을 기준으로 상·하부 지반물성을 달리하여 Case 1~Case 5까지 5가지 모델을 설정하였다(표 2).

■ 표 2. 해석을 위한 모델설정

	Ground conditions	
	upper part	lower part
Case 1	upper part	weathered soil A
	lower part	weathered rock C
Case 2	upper part	weathered soil B
	lower part	weathered rock D
Case 3	upper part	weathered rock C
	lower part	weathered rock E
Case 4	upper part	weathered rock D
	lower part	soft rock F
Case 5	upper part	weathered rock E
	lower part	soft rock G

이는 서로 다른 물성을 가진 지반 내에서 강관의 역학적 거동 특성이 정확하게 규명되어 있지 않기 때문이며, 이러한 점을 고려할 수 있는 방안으로 지반조건을 달리 하면서 해석을 수행하였다. 분석지점은 천단부와 수평에서 45° 측벽, 그리고 수평에서 0°, 즉 좌우 측벽에 위치한 강관을 대상으로 설정하였고, 각각 Point A, Point B, Point C라고 명명하였다(그림 1).

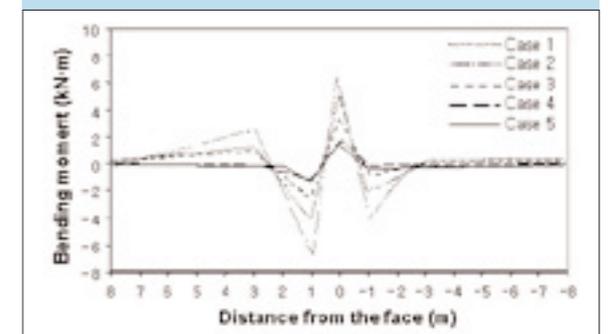
막장을 기준으로 천단부(Point A)의 강관에 발생하는 모멘트의 양상을 그림 4에 도시하였다. Bending moment의 부호는 부재의 중립축을 기준으로 아랫부분에 인장이 발생하는 방향을 (-)로 설정하였다. 지반조건이 가장 불량한 Case 1의 경우 막장 후방과 전방 1m 지점에서 각각 -2.5kN·m, -1.3kN·m의 최대모멘트가 발생하였고, 막장에서는 대략 2.3kN·m의 최대모멘트가 발생하였다. 이러한 경향은 지반의 물성이 양호해지는 Case 1에서 Case 5로 갈수록 줄어들어 설정 모델중 가장 양호한 지반인 Case

5의 경우에 막장후방에서 약 -0.36kN·m, 막장에서 0.65kN·m, 막장전방에서는 -0.02kN·m 정도로 나타났다. 이처럼 지반의 물성이 양호할수록 강관에 발생하는 모멘트는 감소하였고 막장을 기준으로 한 모멘트 발생범위도 줄어들었다.

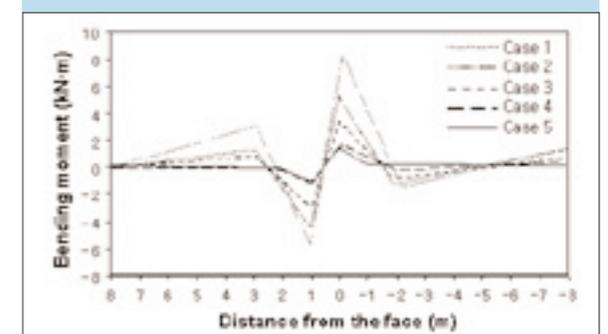
Point B에 위치한 강관에 발생하는 모멘트를 그림 5에 도시하였다. Case 1의 경우 막장 후방 1m 지점에서 강관에 발생하는 최대모멘트는 대략 -2.1kN·m이고 막장에서는 2.4kN·m, 막장 전방 1m 지점에서는 -0.05kN·m 정도의 모멘트가 발생하였다. Case 1부터 Case 5까지의 강관에 발생하는 모멘트를 도시한 결과 막장 전·후방에서 천단부의 강관에 비해 작게 발생하고 막장 부근의 모멘트는 천단부의 강관에 비해 크게 발생하는 양상을 나타내었다.

Point C의 모멘트 발생양상을 그림 6에 도시하였는데, Case 1의 경우 막장후방 1m 지점의 모멘트는 약 -2.1kN·m, 막장에서 4.53kN·m로 분석위치 중 가장 크게 발생하였고, 막장전방 1m 지점에서 약 0.14kN·m의 모멘트가 발생하였다. 결과적으로 수평에서부터 0° 지점인 Point C에 위치한 강관의 모멘트는 막장을 기준으로 좁은 범위에서 크게 발생하였다. 이는 불량한 지반 일수록 천단부보다 측벽부에 발생하는 하중이 상대적으로 크고, 또한 분할굴착선의 위치에 따른 모서리부의 응력집중에 대한 영향으로 사료된다.

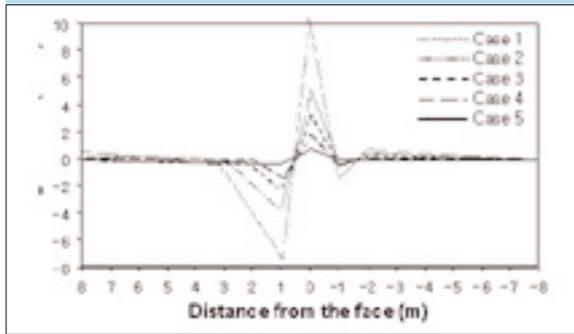
■ 그림 4. 막장거리에 대한 강관의 휨모멘트 변화 (Point A)



■ 그림 5. 막장거리에 대한 강관의 휨모멘트 변화 (Point B)



■ 그림 6. 막장거리에 대한 강관의 휨모멘트 변화 (Point C)

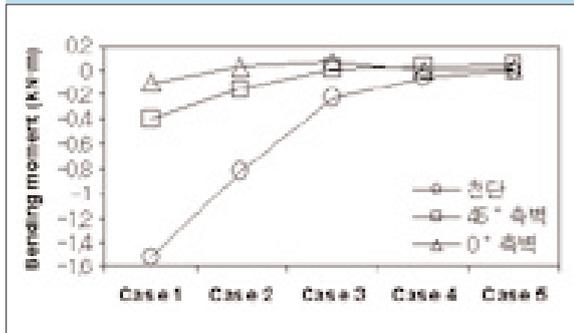


지반 물성에 따른 모멘트의 발생양상을 해석 위치에 대하여 분석하기 위하여 강관의 가운데 요소를 선택하여 막장 전방과 막장의 경우, 그리고 막장 후방에 대하여 각각 그림 7, 그림 8, 그림 9에 도시하였다.

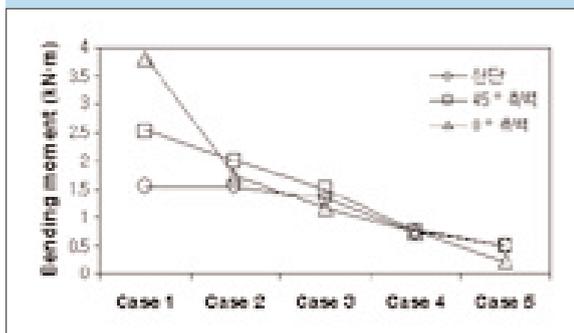
전반적으로 불량한 지반일수록 해석 위치별로 발생하는 모멘트의 차이가 크게 나타났으며 양호한 지반일수록 각 해석 지점에서 발생한 모멘트의 크기가 비슷한 양상을 보인다.

그림 8에서와 같이 막장에서 발생한 모멘트는 연약지반 일수록 측벽부에서 크게 발생하므로 이를 취약부라고 볼 수 있다.

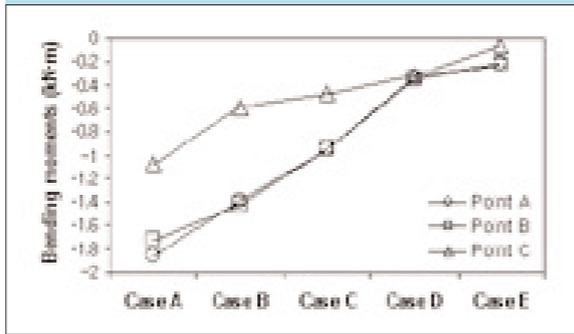
■ 그림 7. 지반조건에 따른 강관의 휨모멘트 변화 (막장 전방)



■ 그림 8. 지반조건에 따른 강관의 휨모멘트 변화 (막장면)



■ 그림 9. 지반조건에 따른 강관의 휨모멘트 변화 (막장 후방)



천단(Point A)의 강관에 발생하는 모멘트는 막장 전후방에서 비교적 비슷하게 발생하였으나 측벽으로 갈수록 막장 후방에 발생하는 모멘트가 수치적으로도 커지고 발생 범위 또한 넓어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Point C 지점에서 물성이 가장 불량한 Case 1의 경우 막장과 막장 후방에서 모멘트가 크게 발생하였다. 이를 통해 물성이 불량할수록 측벽부의 보강에 주의가 필요하고, 천단부의 경우에 막장 전·후방에 걸친 보강이 필요하다.

### 5.2 상부지반의 두께 변화에 대한 분석

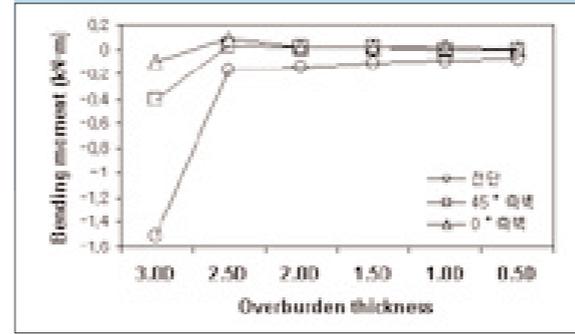
UAM 적용 시 상부지반의 두께가 강관에 작용하는 영향을 분석하기 위하여 상부지반의 두께를 0.5D에서 3.0D까지 변화시켜 총 6가지의 모델을 설정하였다. 여기서 D는 터널의 직경이고, 해석 모델의 물성은 Case 3과 같으며, 강관의 중첩길이는 1/3(4m), 대구경 강관을 적용하였다. 전체 강관요소에 대하여 해석을 수행하였으나 분석의 편의상 13개의 해석위치중 중간에 위치한 7번째 요소의 자료를 사용하였다.

막장 전방에서의 지반두께에 따른 모멘트의 발생양상은 그림 10에 도시되었다. 그 결과 상부지반이 가장 두꺼운 3.0D의 경우 각 해석 위치별로 매우 큰 차이를 보였으며, 이는 천단에서 가장 크게 발생하고 측벽으로 갈수록 작게 발생하는 양상을 보인다.

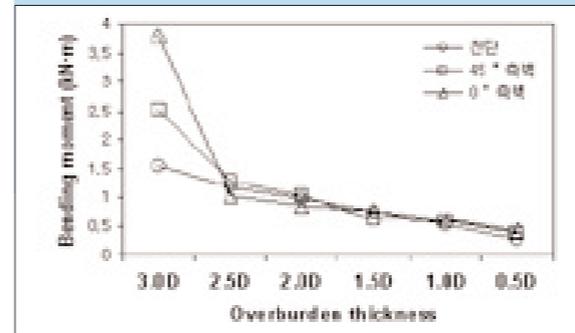
2.5D의 경우 3.0D의 천단에서 크게 발생하던 모멘트는 크게 줄어들어 측벽부의 모멘트와 비슷한 수치를 보인다. 3.0D를 제외한 2.5D~0.5D의 경우 막장 전방의 모멘트는 비슷한 수치를 나타내는 것으로 보아 막장 전방의 모멘트 발생에 영향을 미치는 요인은 지반두께보다는 지반물성이 크게 작용한다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 그림 11과 그림 12에서 보는바와 같이 막장과 이미 굴착이 진행된 막장 후방에서는 상부지반의 두께가 감소함에 따라 발생한 모멘트의 값이 점진적으로 줄어드는 경향을 보인다. 이를 통해 막장과 막장 후방에서는 지반의 물성뿐 아니라 상부지반의 두께도 매우 중요한 요인으로 작용함을 알 수 있다.

### 5.3 강관의 규격 변화에 대한 분석

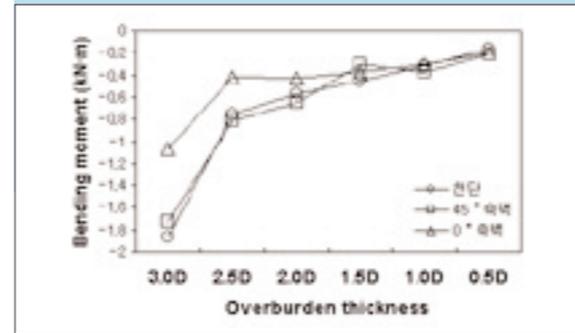
■ 그림 10. 상부지반 두께에 따른 강관의 휨모멘트 변화 (막장 전방)



■ 그림 11. 상부지반 두께에 따른 강관의 휨모멘트 변화 (막장 후방)



■ 그림 12. 상부지반 두께에 따른 강관의 휨모멘트 변화 (막장 후방)



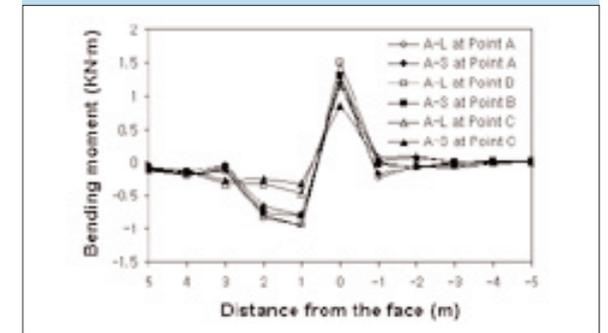
UAM 적용 시 강관의 규격과 감지보 설치 유·무에 따른 강관의 모멘트 발생 경향을 분석하기 위해 표 3과 같은 모델을 설정하여 해석을 수행하였다.

■ 표 3. 감지보의 적용 유·무와 강관의 규격에 따른 모델 설정

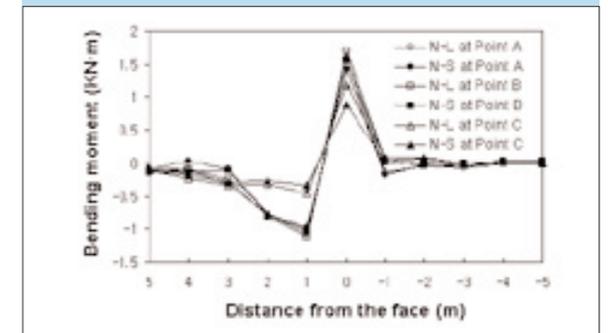
	Steel rib	Steel pipe	Overlap	Ground conditions
A-L	Applied	Large	1/3	Case 3
A-S	Applied	Small	1/3	Case 3
N-L	Not-applied	Large	1/3	Case 3
N-S	Not-applied	Small	1/3	Case 3

그림 13과 그림 14를 종합적으로 분석한 결과 강관에 발생하는 모멘트는 강관의 규격이 클수록, 그리고 감지보가 설치되지 않은 경우 크게 나타났다. 이는 강관의 규격이 커지면 동일한 지반조건에서 강관이 부담하는 하중이 커지기 때문으로 사료된다. 또한 감지보가 설치되지 않은 경우 강관의 발생모멘트가 커지는 이유는 감지보가 설치되지 않은 경우 상대적으로 감지보가 설치된 경우에 비하여 변위가 크게 발생하기 때문에 강관축의 수직변위에 반응하는 모멘트의 발생에 영향을 미치기 때문으로 사료된다. 강관의 규격이 강관의 거동에 미치는 영향은 지반의 물성이나 지반의 상부 두께가 미치는 영향보다 작은 것을 확인할 수 있었다.

■ 그림 13. 막장거리에 대한 강관의 휨모멘트 변화 (감지보재 적용시)



■ 그림 14. 막장거리에 대한 강관의 휨모멘트 변화 (감지보재 미적용시)



### 5.4 강관의 중첩 길이 변화에 대한 분석

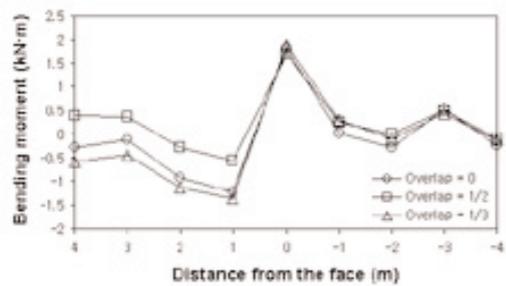
UAM 적용 시 강관의 중첩길이가 감지보 설치 유·무에 따른 강관의 모멘트 발생 경향을 분석하기 위해 표 4에서 설정한 모델을 사용하였다.

■ 표 4. 강관의 중첩길이가 감지보의 적용 유·무에 따른 모델 설정

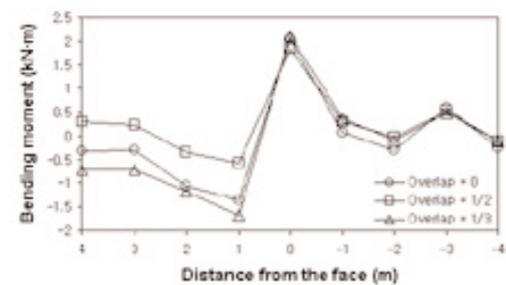
	Overlap	Steel rib	Ground condition
A-0	0	Applied	Case 3
A-2	1/2		
A-3	1/3		
N-0	0	Not-applied	
N-2	1/2		
N-3	1/3		

중첩길이의 변화가 천단부 강관에 미치는 영향을 알아보기 위하여 막장을 기준으로 모멘트의 발생양상을 그림 15와 그림 16에 도시하였다. 강지보가 설치된 경우(그림 15)와 강지보가 설치되지 않은 경우(그림 16) 모두 중첩길이가 가장 긴 A-2, N-2 모델에서 발생하는 모멘트가 가장 작게 나타났다. 이러한 경향을 따르면 중첩길이가 가장 짧은 A-0, N-0 모델에 발생한 모멘트가 가장 크게 나타나야 하지만 해석결과 강관의 중첩길이가 세 모델 중 중간인 A-3, N-3에서 가장 크게 나타났다. 이는 설정한 강관의 요소가 A-0, N-0, A-2, A-0 모델과는 다르게 A-3, N-3 모델의 경우 상부 강관의 중첩이 끝나 물성이 갑자기 변화하는 부분으로 강관에 발생하는 모멘트는 지반의 물성조건이 크게 작용하기 때문에 사료된다.

■ 그림 15. 강관의 중첩길이에 따른 휨모멘트의 변화 (Point A, 강지보재 적용시)

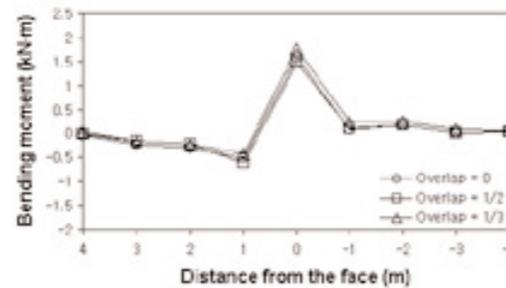


■ 그림 16. 강관의 중첩길이에 따른 휨모멘트의 변화 (Point A, 강지보재 미적용시)

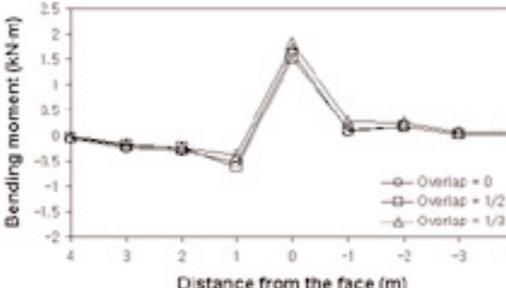


이러한 경향은 수평에서 45° 지점인 Point B의 경우에도 비슷하게 나타나지만, 수평에서 0° 지점인 Point C의 경우(그림 17, 그림 18)에는 강관의 중첩길이가 모멘트 발생 양상에 미치는 영향이 거의 나타나지 않는다. 이를 통해 강관의 중첩길이가 강관의 보강효과에 미치는 영향은 천단부에 근접할수록 크다는 것을 확인할 수 있었다.

■ 그림 17. 강관의 중첩길이에 따른 휨모멘트의 변화 (Point C, 강지보재 적용시)



■ 그림 18. 강관의 중첩길이에 따른 휨모멘트의 변화 (Point C, 강지보재 미적용시)



강관의 중첩길이가 보강효과에 미치는 영향에서 강지보의 설치 유무에 따른 영향은 확인할 수 없었으며 이를 통해 강지보의 유무는 강관 중첩길이에 따른 보강효과의 변화에 미치는 영향이 작다는 것을 알 수 있었다.

## 6 결론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 UAM의 보강 메커니즘과 상관관계가 있을 것으로 판단되는 지반물성, 상부지반의 두께, 삽입강관의 사이즈, 강관의 중첩길이, 강지보의 적용 유·무에 대하여 각 요인들이 UAM의 보강효과에 미치는 상대적인 영향을 확인하고, 굴착 진행에 따른 강관의 거동 분석을 통해 강관의 보강 메커니즘을 알아보기 위한 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 강관에 의해 형성된 아치부 하부를 굴착하는 동안 강관은 빔으로 작용하게 되며, 형성된 빔의 축은 터널축과 함께 거동하고 강관의 모멘트는 터널의 굴착방향에 수직인 축방향의 변형에 반응한다.



UAM의 보강 메커니즘에 관한 기존의 연구로는 Harazaki et al(1998), Oreste et al.(1998), 장석부 등(2002), 차민웅과 문현구(2003) 등의 연구가 수행되었다.

- (2) 해석결과를 통해 지반의 조건에 따라 강관에 발생하는 모멘트의 분포영역 및 최대 모멘트의 위치가 다른 것을 확인할 수 있었으며 이는 불량한 지반일수록 이완영역의 하중전달 영역이 막장 전방으로부터 후방까지 넓게 분포하기 때문에 사료된다. 특히, 지반조건이 불량한 경우일수록 측벽부 강관의 모멘트가 커지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 연약지반 일수록 이완영역이 넓어짐으로 인해 측벽에 작용하는 하중이 커지기 때문에 조건이 불량한 지반일수록 측벽부의 지반하중을 고려한 설계를 적용해야 함을 의미한다.
- (3) 막장과 이미 굴착이 진행된 막장 후방에서는 상부지반의 두께가 감소함에 따라 발생한 모멘트의 값도 줄어드는 경향을 보인다. 이를 통해 막장과 막장 후방에서는 지반의 물성뿐 아니라 상부지반의 두께도 매우 중요한 요인으로 작용함을 알 수 있다.
- (4) 지반에 설치된 강관의 하부를 굴착하면서 일어나는 강관의 거동은 지반물성 등에 따라 미소한 영향을 받지만 대체로 막장을 기준으로 굴진장 길이만큼의 전·후방에서 강관 하부에 인장이 발생하는 경향을 보이고 막장에 위치한 강관은 상부에 인장이 발생하는 경향을 나타낸다.
- (5) 물성이 불량할수록 측벽부의 보강에 주의가 요구되고 천단부

- 의 경우에 막장 전·후방에 걸친 보강이 필요하며 막장 전방의 모멘트 발생에 영향을 미치는 요인은 지반두께보다 지반물성이 크게 작용한다는 것을 확인할 수 있었다.
- (6) 강관의 중첩길이는 지반물성의 변화에 비교적 큰 영향을 미치지만, 강관의 규격이 지반 물성에 미치는 영향은 작다고 판단되며, 강관의 중첩부를 벗어나는 순간 막장부근의 모멘트가 크게 발생하는 것을 통해 지반의 물성이 강관의 거동에 미치는 영향은 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

### ◎ 참고문헌

1. 대원지질개발(주), 1996, 강관보강형 다단그라우팅공법의 개발, pp. 3~124.
2. 이봉렬, 김형탁, 김학문, 1996, 3차원 터널해석에 의한 강관다단 그라우팅의 보강효과, 한국지반공학회지, Vol. 12, No.4, pp. 5~20.
3. 이준석, 방춘석, 최일윤, 염주현, 2000, 터널용 강관다단공법의 설계기법에 관한 연구, 대한토목학회논문집, Vol. 20, No.3, pp. 305~314.
4. 장석부, 권승, 김기림, 허도학, 2002, 터널막장 보강을 위한 합리적인 선진보강공법설계기법, 한국터널공학회지, Vol. 4, No. 3, pp. 6~13.
5. 차민웅, 문현구, 2003, 상이한 지반조건에 따른 umbrella pipe 거동에 관한 수치해석적 연구, 2003년도 춘계학술발표회 논문집, pp. 425.
6. Harazaki, I., H.Aono, A.Matsuda, T. Aoki and Y. Hakoishi, 1998, Field Observation of Large Tunnel Supported by Umbrella Method: Case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan, Proc. of the World Tunnel Cong. 98 on Tunnels and Metropolises, Vol. 2, pp. 1009~1014.
7. Oreste, P. P. and D. Peila, 1998, A New Theory for Steel Pipe Umbrella Design in Tunnelling, Proc. of the World Tunnel Cong. 98 on Tunnels and Metropolises, Vol. 2, pp. 1033~1039.