

## 산악지 쌍굴 수로터널 해석에 대한 고찰

### A STUDY ON THE ANALYSIS ZONE OF MOUNTAIN TWIN WATER TUNNELS

백 영 식 YOUNG-SHIK PAIK

경희대학교 토목공학과 교수

김 흥 택 HONG-TAEK KIM

홍익대학교 토목공학과 부교수

임 수 빈 SOO-BEEN IM

신우 엔지니어링 상무이사

**SYNOPSIS** Using the well-known FLAC program an analytical parametric study was made to investigate the horizontal and vertical solution zone applied to the mountain water tunnel analysis. In the analyses two different heights(30m, 130m) of overburden soils measured from the center of a tunnel and three different coefficients of lateral earth pressure(0.25, 0.75, 1.5) were adopted. Also the effects of pillar width between twin tunnels, having two different heights of overburden soils as well as different soil conditions, were analyzed.

#### 1. 서론

본 연구에서는 경암 또는 보통암으로 지반이 구성되고 표토두께가 다양하게(30m ~ 130m) 변화하는 산악지 수로터널의 경우, 적절한 해석영역을 규명하기 위한 시도가 일차적으로 이루어졌으며, 쌍터널의 상호간섭효과에 대한 분석도 아울러 이루어졌다.

해석에 필요한 지반의 물성치 등을 결정하기 위한 현장조사로는 지표지질조사, 시추조사(수평 및 수직방향), 공내횡방향 재하시험, P.S. 검층 등이 실시되었으며, 실내시험으로는 시추에 의해 채취된 암 core를 시료로 하여 일축압축시험, 압밀인장시험, 탄성파속도시험(ultrasonic) 등이 실시되었다.

#### 2. 사용 프로그램 개요

본 연구에 사용된 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 프로그램에 적용된 수치해석 이론은 유한차분법으로서 해석대상지반이 연속체로 모델링되고 그것이 유한개의 요소로 분할되어 절점에서 서로 연결된다는 점에서는 유한요소법과 비슷하지만 절점에서 미지변수의 값을 구하기 위하여 사용된 접근방법에 있어서는 근본적으로 많은 차이가 있다.

이 접근방법으로 유한요소법에서는 implicit 알고리즘을 사용하는데 반하여 유한 차분법에서는 explicit 알고리즘을 사용한다.

implicit 알고리즘으로 해석하면 물체내 모든 절점에서의 미지량은 상호관련이 있기 때문에 평형상태의 해석에 있어서 해결하여야 하는 일련의 연립방정식으로 나타나지만 explicit로 접근하면 물체내 모든 절점에서의 미지량은 독립적이어서 어떠한 체계의 연립방정식도 형성되지 않는다.

천자의 경우 절점에서의 미지량에 대한 해석은 모든 절점이 평형상태에 도달한 특정한 시간에서 동시에 이루어지며, 후자의 경우 주어진 절점에 대한 해석은 바로 전시간에 주어진 이미 알고 있는 조건에 의하여 결정된다. 그러므로 어떠한 방정식도 해석하기 위해서는 많은 반복된 계산과정을 필요로 한다.

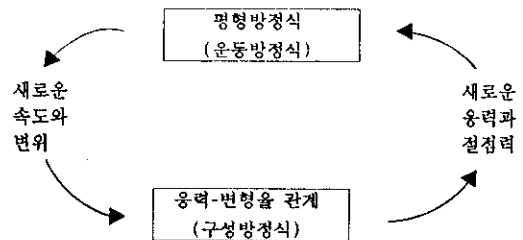


그림 1. Explicit 계산 Cycle

본 프로그램에서 사용된 일반적인 해석절차는 그림 1에서 보여준다. 상기절차에 따르면 우선 운동방정식은 이미 알고 있는 응력과 절점력으로부터 새로운 속도와 변위를 유도해 낸다. 그런다음 그 속도로부터 변형율이 유도되고 그 변형율로부터 대상재료의 구성법칙을 통하여 새로운 응력을 유도한다. 이와같이 1 cycle의 계산과정을 1 time step으로 기본단위화하고 각각의 time step 과정에서는 인접요소에 대한 변수에 전혀 영향을 주지않고 오로지 독립된 요소로서 운동방정식을 통하여 새로운 속도와 변위를 계산하고 구성방정식을 통해서 새로운 응력과 절점력을 산출하게 된다. 여기서 1 time step 과정에서 인접요소에 영향을 끼치지 않는 이유는 단위 time step을 아주 작게 선택하면 그 기간동안 다른 요소에 물리적으로 영향을 전파할 수 없기 때문이다. 다시말하면 이것은 계산을 위한 파동속도가 물리적인 파동속도보다 항상 앞서기 때문에 time step 즉 계산기간 동안에는 지지점이 고정된 상태에서 평형방정식과 구성방정식이 작용하기 때문이다.

이러한 explicit 해석절차는 단위 time step을 매우 작게 채택하기 때문에 선형거동의 경우 또는 비선형거동의 경우 모두 상대적으로 많은 time step이 요구되므로 선형거동과 미소변형 문제에 적용하는것 보다 매우 복잡한 거동체계 즉 비선형, 대변형, 물리적 불안정 문제 등에 적용하는 것이 더욱 효율적이다.

### 3. 해석영역의 설정

본 분석에서는 보통암으로 지반이 구성되고, 일시굴착시공 및 굴착된 단면형상이 원형인 외터널(single tunnel)의 경우를 다루었다. 비교분석을 목적으로 표토두께는 30m 와 130m 인 2가지 경우로 서로 달리하였으며, 터널해석시 초기응력장정의 중요성을 감안하여 축압계수 K값은 0.25, 0.75 및 1.5 등의 3가지로 가정하였다. 해석에 적용된 보통암 지반의 물성치 등은 표 1과 같다. FLAC 프로그램을 이용해 얻어진 터널천단부 연직변위 등 결과치에 대한 분석내용은 아래와 같다.

표 1. 해석에 적용된 지반의 물성치(외터널)

	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	내부마찰 각 (°)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	인장강도 (t/m <sup>2</sup> )	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )	포아손비
보통암	2.6	43	55	240	8×10 <sup>5</sup>	0.25

#### 3.1 L/R 및 H/R의 영향분석

터널단면해석에 있어서 해석영역의 설정은 물성치 등의 결정 못지않게 중요한 문제이나, 일반적으로는 수평영역경계 L과 터널 중심부 아래쪽 연직영역경계 H를 터널반경 R의 6배 정도로 하여 해석이 이루어졌다(그림 2).

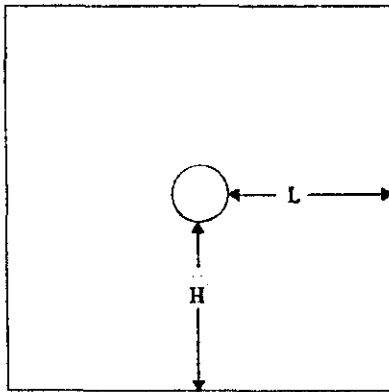
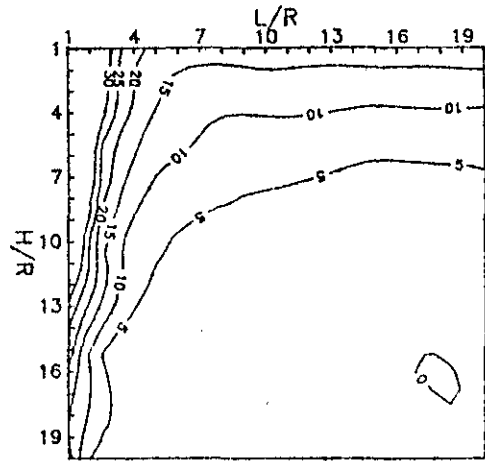


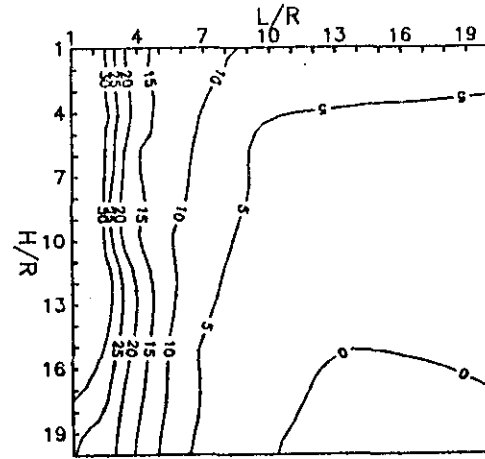
그림 2. 해석영역 개요

그러나 본 연구의 경우처럼 표토두께가 다양한 산악지역 터널의 경우 일반적으로 적용되는 해석영역을 택할 경우, 지반조건 등에 따라 많은 오차를 유발할 소지가 있다고 판단되어, 본 분석에서는 해석영역의 차이에서 발생할 수 있는 오차의 범위를 추적함으로써 산악지역 터널해석에 적합한 수평영역 및 연직영역의 결정을 위한 시도가 이루어졌다.

그림 3은 터널반경 R에 대한 수평영역경계 L 및 연직영역경계 H의 비율로 달리하여, 영역의 범위를 최대로 했을 경우(즉, L/R=20, H/R=20인 경우)에 해당되는 터널천단부 연직변위에 대한 상대오차를 나타낸 것이다. 그림 3-a에 표시된 표토두께가 30m인 경우의 H/R값 및 L/R값이 각각 8 이하 되는 범위에서는 H/R값 보다 L/R값을 크게 적용할 경우 상대오차가 작으며, 또한 H/R값과 L/R값이 각각 8 이상 되는 범위에서는 두 변수에 대한 영향은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 아울러, 표토두께가 130m인 경우(그림 3-b)에 대해서는, L/R값의 변화에 따른 영향이 H/R값의 변화에 비해 큰 경향을 보이고 있다.



(a) 표토두께=30m 인 경우



(b) 표토두께=130m 인 경우

그림 3. L/R - H/R - 상대오차 관계

그림 4는 표토두께가 30m이고 축압계수 K가 0.25일 경우, spring line상의 우측 최외곽 경계에서의 연직방향변위를 각 경계영역별로 도시한 것으로, 빗금친 부분은 계산된 연직변위값이 0.1mm 이하의 아주 작은값에 해당되는 영역이다.

그림 5와 그림 6은 표토두께가 30m이고 축압계수 K가 0.25일 때, 각 영역별로 계산된 spring line에서의 수평방향 변위와 지표침하량을 L/R=20, H/R=20 일 때 계산된 값과의 상대오차를 나타낸 것이다. Spring line에서의 수평방향 변위는 L/R값에 대한 영향이 지배적이며(그림 5), 지표침하량은 L/R값과 H/R값이 서로 같은 축 A에 대해 대체적으로 좌우대칭 형상이므로(그림 6), L/R 및 H/R에 대한 영향이 거의 동일한 것으로 판단된다.

위의 분석결과를 통해 볼 때, H/R값이 16 이상이고 L/R값이 13 이상 되는 범위에서는 해석영역을 최대로 했을 경우(즉, L/R=20, H/R=20 인 경우)와의 상대오차가 최대 10% 미만으로 격자망을 크게 하여도 해석결과에는 거의 변화가 없을 것으로 예상된다.

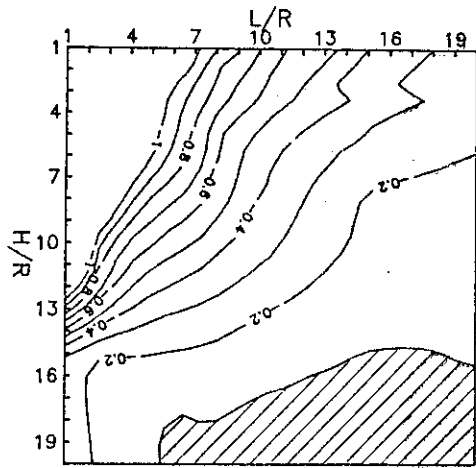


그림 4. L/R - H/R - 최외곽 연직변위 관계(표토두께=30m)

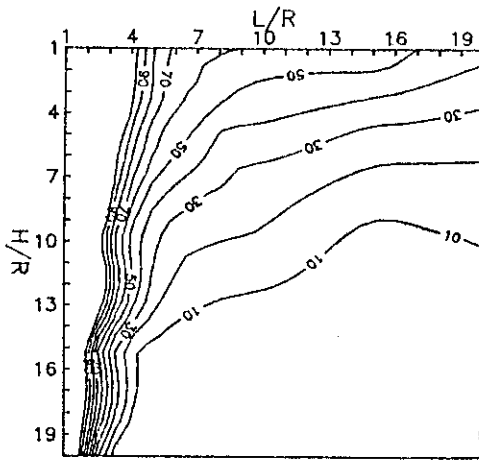


그림 5. L/R - H/R - 상대오차 관계(spring line에서의 수평변위)

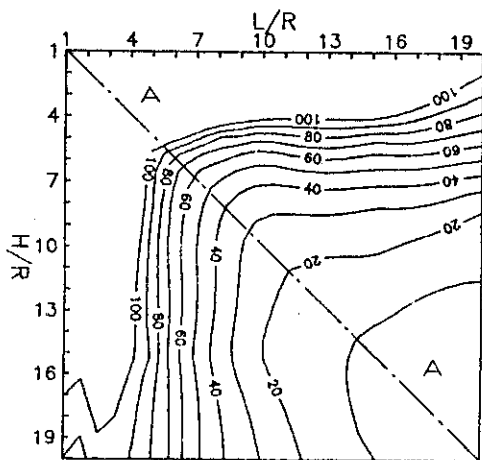


그림 6. L/R - H/R - 상대오차 관계(지표침하량)

### 3.2 축압계수 K의 변화에 따른 영향

그림 7은 표토두께 30m인 경우에 축압계수 K를 0.25, 0.75 및 1.5로 각각 달리하여 H/R=8인 경우, L/R값의 변화에 따른 터널천단부 연직변위의 상대오차를 나타낸 것이다. 그림 7에서 축압계수 K가 0.25인 경우 L/R=6 정도에서 수렴하며, K=0.75인 경우는 L/R=8 정도에서, K=1.5인 경우는 L/R=10 정도에서 각각 수렴하는 경향을 보이고 있다.

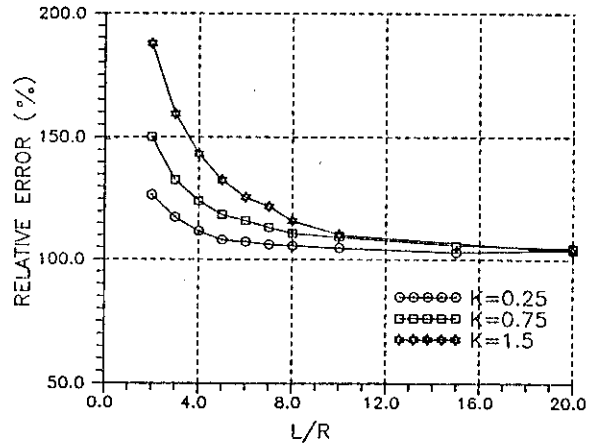
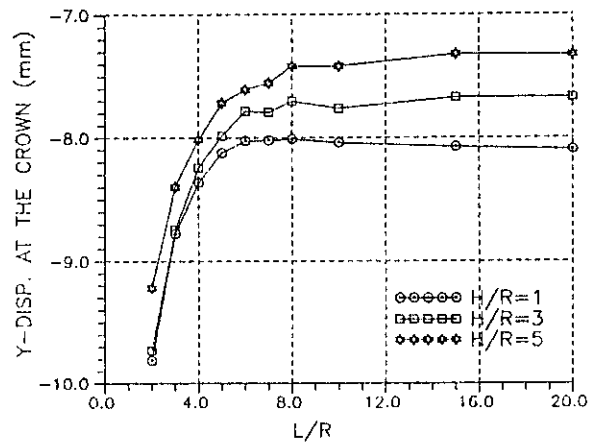


그림 7. L/R - K - 상대오차 관계(표토두께=30m)

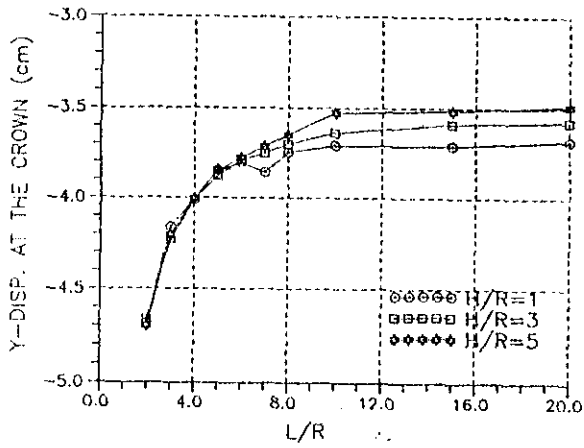
### 3.3 해석범위의 제시

적절한 해석범위의 결정을 위해 축압계수 K=0.25인 경우, 표토두께, L/R값 및 H/R값을 변화시켜 터널천단부의 연직변위(그림 8-a 및 8-b)와 측벽부의 수평변위(그림 9-a 및 9-b) 변화를 각각 도시하면 그림 8 및 9와 같다.

그림 8 및 9의 결과를 살펴볼 때, 표토두께(30m 또는 130m)와 상관없이 L/R값과 H/R값이 8인 부근에서 거의 수렴하는 현상을 알 수 있다. 또한 그림 3의 분석결과를 토대로 살펴보면, L/R값과 H/R값이 8인 부근에서의 상대오차는 표토두께 30m인 경우 5.5% 정도, 표토두께 130m인 경우 6.5% 정도의 범위임을 각각 알 수 있다.

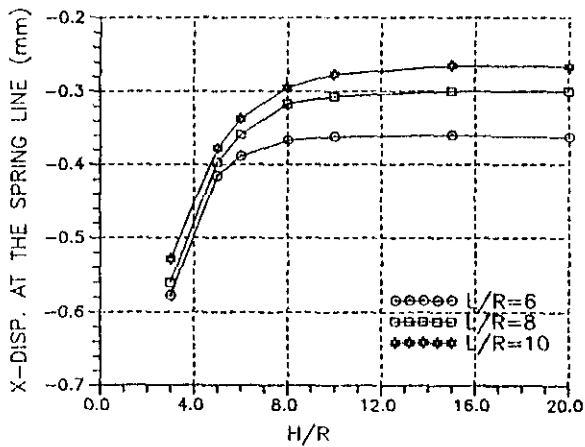


(a) 표토두께=30m

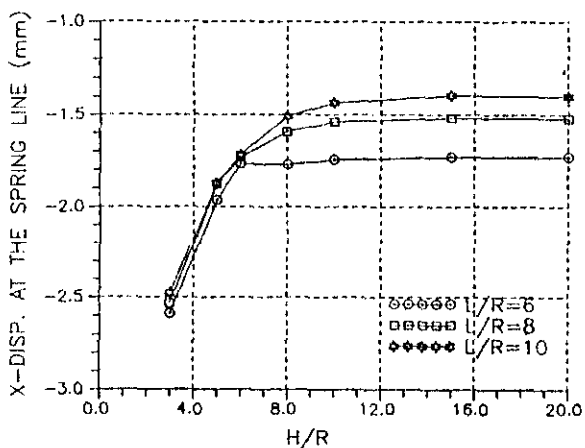


(b) 표토두께=130m

그림 8. L/R - H/R - 터널천단부의 연직변위 관계



(a) 표토두께=30m



(b) 표토두께=130m

그림 9. L/R - H/R - 측벽부의 수평변위 관계

#### 4. 쌍터널 굴착시공시 상호간섭효과

쌍터널의 단면형상은 모두 원형으로 가정하였으며(그림 10), 지보는 shotcrete 및 rockbolt 등의 일반적인 형태를 띠하였다. 또한 3차원적 터널거동의 영향을 적절히 다루기 위해, 실무에 일반적으로 적용되고 있는 시공단계별 하중분담율을 고려하였다(표 2). 해석모델은 굴착시공에 따른 응력변화가 비교적 클 것으로 예상되는 터널굴착면 주변과 pillar 영역의 격자망을 세분화하여 보다 정확한 결과가 얻어지도록 노력하였으며, 개략적인 격자망 형상 및 경계조건 등은 그림 9에 표시되어 있다. 아울러 축압계수 K값은 0.5로 가정하였으며, 해석에 적용된 지반의 물성치 등은 표 3에 명시되어 있다.

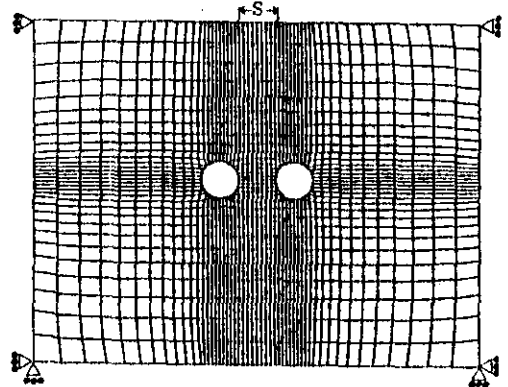


그림 10. 쌍터널 단면, 해석격자망 및 경계조건 개요

표 2. 시공단계별 하중분담율(쌍터널)

시공단계	상태
0	초기응력상태
1	좌측터널 상부반단면 굴착 - 40% 하중제하
2	1차 지보 : Soft sbhotcrete + Rock bolts - 30% 하중제하
3	2차 지보 : Hard shotcrete - 30% 하중제하
4	좌측터널 하부반단면 굴착 - 50% 하중제하
5	지보 : Rock bolts + Hard shotcrete - 50% 하중제하
6	우측터널 상부반단면 굴착 - 40% 하중제하
7	1차 지보 : Soft sbhotcrete + Rock bolts - 30% 하중제하
8	2차 지보 : Hard shotcrete - 30% 하중제하
9	우측터널 하부반단면 굴착 - 50% 하중제하
10	지보 : Rock bolts + Hard shotcrete - 50% 하중제하

표 3. 해석에 적용된 지반의 물성치(쌍터널)

	표토 두께 (m)	단위 중량 ( $t/m^3$ )	내부 마찰각 ( $^\circ$ )	점착력 ( $t/m^2$ )	인장 강도 ( $t/m^2$ )	탄성 계수 ( $t/m^2$ )	포아송 비
경암	130	2.65	45	136	760	$1.6 \times 10^6$	0.2
보통암	30	2.6	43	55	240	$8 \times 10^5$	0.25

쌍터널의 시공에 있어서, 좌측터널을 일차적으로 굴착·지보한 다음 우측터널의 굴착이 계속해서 시행될 경우, 우측터널의 굴착이 좌측터널 천단부(그림 10) 침하 및 pillar에서의 지표침하에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해, 좌우측 터널 사이의 이격거리 S는 5가지 경우(즉, D x 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 여기서 D는 터널직경을 나타낸다, 그림 10)로 서로 달리하였다.

#### 4.1 우측터널굴착에 의한 좌측터널 천단부침하의 영향

쌍터널에서 1차로 좌측터널을 굴착한 후, 2차로 우측터널을 굴착할 경우에, 좌측터널 천단부의 침하는 상호간섭의 영향으로 표4와 같이 추가적인 침하가 발생한다.

표4는 표토두께가 30 m인 보통암과 표토두께가 130m인 경암에 각각에 대해 이격거리 S(그림 10)를 달리할 경우 좌측터널의 천단부 침하량의 변화를 나타낸 것이다. 표4에서 총침하량은 1, 2차 굴착이 모두 완료된 후에 발생한 좌측터널 천단부의 최종침하량을 의미하며, 증가량은 1차 굴착이 완료된 후 2차굴착에 의해 유발된 추가적인 침하량이다. 또한, 침하율은 총침하량에 대한 증가량의 백분율로 그림 11.에서 알 수 있듯이 이격거리 S가 클수록 침하율은 점차적으로 감소하는 추세를 나타내고 있으며, S/D=2.0 부근에서 수렴하는 경향을 보이고 있다.

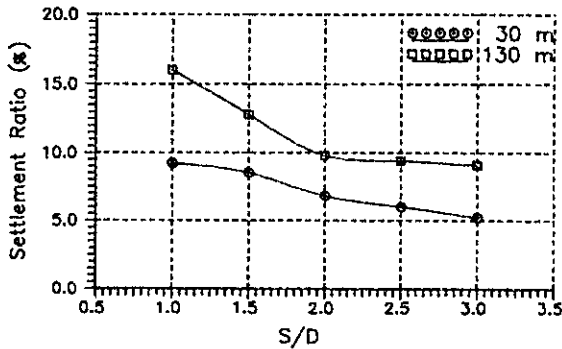


그림 11. 침하율 - S/D 관계

표 4. 좌측터널 천단부의 침하량

S/D	30m, 보통암			130m, 경암		
	총침하량 (mm)	증가량 (mm)	침하율 (%)	총침하량 (mm)	증가량 (mm)	침하율 (%)
1.0	-6.584	-0.607	9.2	-1.477	-0.236	16.0
1.5	-6.541	-0.557	8.5	-1.416	-0.181	12.8
2.0	-6.391	-0.433	6.8	-1.364	-0.134	9.8
2.5	-6.390	-0.388	6.0	-1.358	-0.127	9.4
3.0	-6.273	-0.322	5.1	-1.346	-0.122	9.1

표토두께가 30m인 경우에 비해 표토두께가 130m인 경우가 침하율이 5% ~ 7% 가량 크게 나타났으나, 두 경우 모두 S/D = 2.0 이상에서는 10% 이내로 우측터널굴착에 의해 좌측터널천단부에 추가적인 침하가 크게 발생하지 않음을 알 수 있다.

#### 4.2 좌측 및 우측터널굴착에 의한 pillar 중앙에서의 지표침하 영향

쌍터널굴착시 좌·우 터널굴착에 의한 pillar 중앙의 지표침하 영향은 표 5와 같다. 여기서 침하율은 총침하량에 대한 좌·우 굴착 침하량의 백분율이다.

표 5. 좌·우 터널굴착에 의한 pillar 중앙의 지표침하

S/D		30 m			130 m		
		좌측굴착	우측굴착	총침하량	좌측굴착	우측굴착	총침하량
1.0	침하량(mm)	-1.388	-1.511	-2.899	-0.195	-0.272	-0.467
	침하율 (%)	47.9	52.1	-	41.8	58.2	-
1.5	침하량(mm)	-1.309	-1.391	-2.7	-0.187	-0.246	-0.433
	침하율 (%)	48.5	51.5	-	43.2	56.8	-
2.0	침하량(mm)	-1.235	-1.292	-2.527	-0.181	-0.201	-0.382
	침하율 (%)	48.9	51.2	-	47.3	52.7	-
2.5	침하량(mm)	-1.133	-1.189	-2.322	-0.182	-0.198	-0.380
	침하율 (%)	48.8	51.2	-	47.8	52.2	-
3.0	침하량(mm)	-1.040	-1.075	-2.115	-0.166	-0.210	-0.376
	침하율 (%)	49.2	50.8	-	44.2	55.8	-

표 5 및 그림 12에서 보는 바와 같이 표토두께가 30m인 경우(보통암) 이격거리 S가 증가함에 따라 총침하량은 -2.899 mm ~ -2.115mm로 감소하였으나, 침하율은 좌측굴착의 경우 47% ~ 49%, 우측굴착의 경우 50% ~ 52%로 거의 일정하였다. 또한, 표토두께가 130m인 경우(경암) 총침하량은 -0.467mm ~ -0.376mm로 감소하였으나, 이격거리에 의한 침하율의 변화는 6% 이내로 나타났다.

위의 결과로 볼 때, 이격거리의 증가에 따라 총침하량은 감소하나 침하율은 암종 및 표토두께에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다.

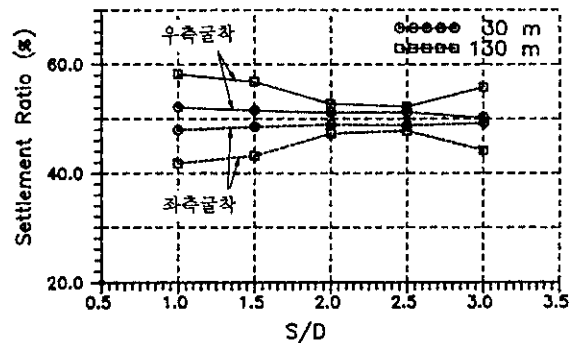


그림 12 좌·우 터널굴착에 의한 pillar 중앙의 지표침하율

### 5. 결론

본 연구에서는 경암 또는 보통암으로 지반이 구성되고 표토두께가 서로 다른(30m, 130m) 산악지 터널의 경우, 적절한 해석영역을 규명하기 위한 시도 및 쌍터널의 상호간섭효과에 대한 분석이 이루어졌다. 얻어진 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- (i) 표토두께에 따라 수평해석영역 L과 연직해석영역 H의 변화에 따른 영향이 차이가 있으며, 표토두께가 두꺼울수록 연직해석영역보다 수평해석영역을 크게 적용해야 경제적인 해석이 이루어질 것으로 판단된다.
- (ii) 해석영역은  $L/R=8$  ( $R$ =터널반경) 부근에서 표토두께에 상관없이 해석결과치의 변화가 거의 일정해지는 것으로 볼 때, 수평해석영역과 연직해석영역을 터널반경의 8배 정도로 하여 적용하는 것이 적당할 것으로 판단된다.
- (iii) 쌍터널의 상호간섭효과는 이격거리 S가 터널직경 D의 2배이상 범위에서 거의 일정해지는 것으로 나타났다.

## 6. 참고문헌

- ITASCA(1991), FLAC-User's Manual.
- Chung, I.L.(1991), Determination of State of Regional Stress in Korea and Its Application to Design of Underground Caverns, 자원-소재관계 학협회합동추계대회 (盛岡) 특별강연.
- Sinha, R.S.(1989), Underground Structures, Design and instrumentation, Elsevier Science Publishers.
- 지하구조물의 해석 및 설계(1992), 제5회 전산구조공학기술강습회 교재 5-3.
- 불평터널매수지실시설계 보고서(1993), 서울특별시 상수도사업본부.