

개착터널 설계 하중조합 및 단면 검토



전한철
한국도로공사
건설본부장



이의준
한국도로공사
구조설계팀장



배병훈
한국도로공사
차장



김세열
수성엔지니어링
이사

1. 서론

개착터널은 터널갱구부 및 터널중간 계곡부 개착부분이나, 터널과 터널 사이의 연장이 짧아 터널로 연장시키기 위해 지반을 개착(Open Cut)하고 라이닝 콘크리트를 설치한 후 성토하는 방법으로 복개시키는 모든 터널을 말하며, 굴착터널에 비해 토피고가 낮기 때문에 성토 하중, 온도변화, 지진의 영향을 받기 쉬운 구조물이다.

굴착터널의 콘크리트 라이닝에 대해서는 굴착단면적 35m²인 마제형 또는 난형 터널의 경우 라이닝 두께 300mm 정도를 표준으로 정하는 등 일반적인 기준치를 제시하고 있으나 개착터널의 콘크리트 두께에 대해서는 별도로 규정하지 않고 있다. 또한 단면력을 산정할 때 고려해야 할 하중들의 종류 및 계수도 명확히 정립되지 않아 구조물마다 다른 방법으로 설계되고 있으며, 단면

결정을 위한 적절한 기준이 없기 때문에 안전율이 과도한 비경제적인 설계가 될 우려가 있다.

이에 본 연구에서는 관련기준 및 문헌들을 참고하여 안전성과 경제성을 고려한 개착터널 상시설계 방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 기존의 개착터널 설계사례를 검토하여 현행 설계법의 문제점을 짚어보았으며, 문제해결을 위해 적절한 하중조합 방법을 산정해보고, 경제적인 단면설계를 위한 방안을 도출하고자 했다.

2. 관련기준 및 문헌 검토

2.1 콘크리트 구조설계기준(건설교통부, 2003)

콘크리트 구조설계기준에서는 지하구조물에 대해 다음과 같은 하중조합의 검토를 요구하고 있다.

- (1) 고정하중(D)과 활하중(L), 횡방향토압(H)이 작용하는 경우의 하중조합

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.8H \quad \text{식(1)}$$

$$U = 0.9D + 1.8H \quad \text{식(2)}$$

- (2) 고정하중(D)과 활하중(L), 건조수축 또는 온도변화(T) 등의 하중이 작용하는 경우의 하중조합

$$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.5T) \quad \text{식(3)}$$

$$U = 1.4D + 1.5T \quad \text{식(4)}$$

- (3) 지하구조물과 같이 고정하중이 지배적인 구조물은 1.4D항의 D 대신에 1.1D를 대입
 (4) 지하구조물 등에서 시공 중 또는 시공 후 횡토압이 실제보다 작게 작용하여 구조물에 불리하게 작용하는 경우에는 실제 감소된 토압과 하중계수가 1 이하인 값을 사용하여 검토

2.2 도로교 설계기준(한국도로교통협회, 2005)

도로교 설계기준에서는 콘크리트 구조물에 대해 다음과 같은 하중조합에 의해 설계하도록 하였다.

$$U = 1.2D + 1.55H$$

$$U = 1.25D + 1.65H + 1.25G$$

$$U = 1.3D + 1.7H$$

$$U = 1.3D + 2.15L + 1.7H$$

$$U = 1.3D + 1.3L + 1.7H$$

$$U = 1.3D + 1.3L + 1.7H + 1.3G$$

$$U = 1.25D + 1.25L + 1.65H + 1.25G$$

여기서, G는 부등침하, 크리프, 건조수축, 제작 또는 시공시 치수의 착오, 습도변화 또는 온도변화 등으로 인

한 팽창 또는 수축변형으로 유발한 변형력.

2.3 철도설계편람(대한토목학회, 2004)

철도설계편람에서는 콘크리트 라이닝의 설계 예에서 다음과 같은 하중조합을 적용하였다.

$$U = 1.54D + 1.8H'$$

$$U = 0.99D + 1.8H'$$

$$U = 1.54D + 0.9H'$$

$$U = 0.75(1.54D + 1.8H' + 1.5T)$$

여기서 H' =이완하중.

2.4 도시철도기술자료집(서울시 지하철건설본부, 2005)

개착터널편에 콘크리트 구조설계기준에서 다른 항목이 모두 명시되어 있으며, “1.0 이하의 하중계수를 사용할 경우 설정할 수 있는 최소토압인 주동토압과 전토압의 1/2 중 작은 값을 사용하는 사례가 많다.” 라는 내용이 수록되어 있다.

2.5 검토결과

국내기준 및 문헌자료의 하중조합을 비교 검토한 결과 콘크리트 구조설계기준과 도시철도기술자료집에는 동일한 하중조합이 기재되어 있으며, 특히 콘크리트 구조설계기준은 일반적인 종류의 콘크리트 구조물에 적용이 가능하고 특수구조물의 경우에도 적용이 가능하다면 콘크리트 구조설계기준의 규정을 따라야 한다고 명시되어 있다.

철도설계편람 예제에서는 콘크리트 구조설계기준에서 규정한 하중조합과 유사하나 수평 토압이 아닌 이완

표 1. 사례별 하중조합

comb.	○ ○-○ ○간	○ ○-○ ○간	○ ○-○ ○간
1	$1.54D+1.8H$	$1.54D+1.8H$	$1.54D+1.8H$
2	$0.99D+1.8H$	$0.9D+1.8H$	$0.9D+1.8H$
3	$1.54D+0.9H$	$1.54D+0.9H$	$1.54D+0.9H$
4	$0.99D+0.9H$	$0.9D+0.9H$	$0.9D+0.9H$
5	$1.0D+1.0H+1.0T_2$	$1.54D+1.8H+1.5(T_1+T_2)$	$1.155D+1.155H+1.125(T_1+T_2)$
6	$1.0D+1.0H+1.0T_2+1.0T_3$	$1.54D+1.8H+1.5(T_1+T_2+T_3)$	$1.155D+1.155H+1.125(T_1+T_2+T_3)$
7	-	$1.54D+0.9H+1.5(T_1+T_2)$	$1.155D+0.9H+1.125(T_1+T_2)$
8	-	$1.54D+0.9H+1.5(T_1+T_2+T_3)$	$1.155D+0.9H+1.125(T_1+T_2+T_3)$
9	$1.54D+1.0T_2$	-	-
10	$1.54D+1.0T_2+1.5T_3$	-	-
11	$1.0D+1.0H+1.0(T_1+T_2+T_3)$	$1.0D+1.0H+1.0(T_1+T_2+T_3)$	$1.0D+1.0H+1.0(T_1+T_2+T_3)$

※ D=고정하중, H=수평토압, T₁=계절별 온도하중, T₂=내외면 온도차, T₃=건조수축

표 2. 사례별 설계단면

구 분	○ ○-○ ○간	○ ○-○ ○간	○ ○-○ ○간	
토피고(m)	1.0~6.0	2.0	1.0~2.0	
주 철 근	천 정 부	D19@125~D25@150	D22@200	D22@125
	측 벽 부	D19@125~D25@150	D22@200~D25@200	D22@125
	바 닷 부	D19@125~D25@150	D22@200~D25@200	D22@125
콘크리트두께(mm)	400~800	500	500	
안전율	1.00~3.84	1.05~1.32	1.03~3.16	

하중을 적용하여 다소 차이가 있다. 또한 도로교 설계기준은 콘크리트교나 콘크리트 교각, 교대와 같은 교량구조물의 설계에 맞춰 만든 규정이기 때문에 다른 문헌들과 하중종류 및 계수의 차이도 많이 있어 개착터널의 설계에 적용하기에는 무리가 있다고 사료된다.

따라서 개착터널에 적용하기 위한 하중조합은 콘크리트 구조설계기준을 따라서 정하는 것이 타당하다고 판단된다.

개착터널 안정성해석을 위한 하중조합 설계사례를 살펴본 노선은 총 3개 노선이며 각 노선 설계시 사용된 하중조합은 표 1과 같다.

각각의 설계사례는 콘크리트 구조설계기준에 준하여 하중조합을 산정하였으며, 모두 유사한 하중조합을 사용하였으나 적용된 하중종류가 일정하지 않고 하중계수 또한 각각 조금씩 다르게 적용된 것을 알 수 있다. 이는 개착터널의 하중조합에 대한 명확한 규정이 없기 때문인 것으로 판단된다.

3. 개착터널 설계사례

3.1 하중조합

3.2 설계단면

개착터널의 단면 설계사례를 살펴보면 표 2와 같다.

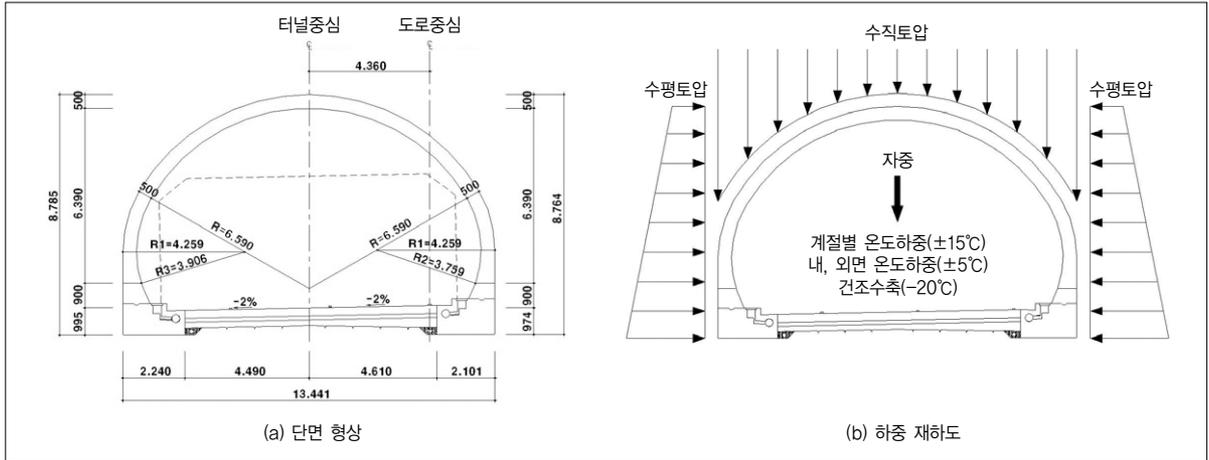


그림 1. 검토단면 형상 및 하중재하도

표 3. 지반조건

토포고	흙의 특성			지반 변형계수
	단위중량	내부마찰각	정지토압계수	
2.0m	19.0 kN/m ³	30°	0.5	500 MPa

설계단면을 살펴보면 콘크리트 두께를 400mm에서 800mm까지 다양하게 적용한 것을 볼 수 있다. 일반적으로 500mm 단면을 많이 사용하고 있지만 특별한 규정은 없기 때문에 이와 같이 설계자에 따라 다양한 단면으로 설계된 것으로 판단된다. 또한 단면의 위치에 따른 구분 없이 구조물 전체에 동일한 철근을 사용하고 있으며, 그에 따라 부위별로 안전율이 1.0에서 3.8까지 크게 차이나는 비경제적인 설계가 되었음을 알 수 있다.

그림 1 (b)에 보이는 바와 같이 수직토압, 수평토압, 자중, 건조수축, 계절별·내외면 온도하중을 재하하였다. 또한 수직토압과 수평토압에 관여하는 지반조건들은 표 3과 같다. 콘크리트의 자중은 25.0kN/m³으로 프로그램에서 자동 계산되도록 하며 활하중, 터널내부 하중, 시공시 하중, 지하수압은 고려하지 않았다. 구조해석에는 범용해석프로그램인 MIDAS/Civil 2006을 이용하였다.

4. 개착터널 안정성 검토

4.1 해석조건

하중조합 및 단면설계 검토를 위한 단면은 그림 1 (a)와 같으며 해당 단면을 단위길이 1.0m로 모델링하고,

4.2 하중조합

본 연구에서는 콘크리트 구조설계기준에서 제시한 하중조합을 기준으로 하중의 종류 및 계수를 결정하여 총 15개의 하중조합을 검토하였으며 결과는 표 4와 같다. 사용성 검토를 위한 comb. 15를 제외하면 크게 전토압이 작용하는 경우와 반토압이 작용하는 경우, 수평토압

표 4. 검토용 하중조합

하중조합	고정하중		횡방향 토압	계절별 온도하중		내외면 온도차		건조수축	비고
	자중	연직토압		+ 15℃	-15℃	+5℃	-5℃		
comb. 1	1.54		1.8	-	-	-	-	-	식(1)
comb. 2	0.9		1.8	-	-	-	-	-	식(2)
comb. 3	1.54		0.9	-	-	-	-	-	comb. 1 반토압
comb. 4	0.9		0.9	-	-	-	-	-	comb. 2 반토압
comb. 5	1.155		1.35	1.125	-	1.125	-	-	식(3) + 횡토압
comb. 6	1.155		1.35	-	1.125	-	1.125	1.125	식(3) + 횡토압
comb. 7	1.155		0.675	1.125	-	1.125	-	-	comb. 5 반토압
comb. 8	1.155		0.675	-	1.125	-	1.125	1.125	comb. 6 반토압
comb. 9	1.54		1.8	1.5	-	1.5	-	-	식(4) + 횡토압
comb. 10	1.54		1.8	-	1.5	-	1.5	1.5	식(4) + 횡토압
comb. 11	1.54		0.9	1.5	-	1.5	-	-	comb. 9 반토압
comb. 12	1.54		0.9	-	1.5	-	1.5	1.5	comb.10 반토압
comb. 13	1.54		-	1.5	-	1.5	-	-	식(4)
comb. 14	1.54		-	-	1.5	-	1.5	1.5	식(4)
comb. 15	1.0		1.0	-	1.0	-	1.0	1.0	사용성 검토

※ 상기 온도승강은 특별히 조사 검토되었거나 부재별 위치와 토피고 등에 따라 조정할 수 있다.

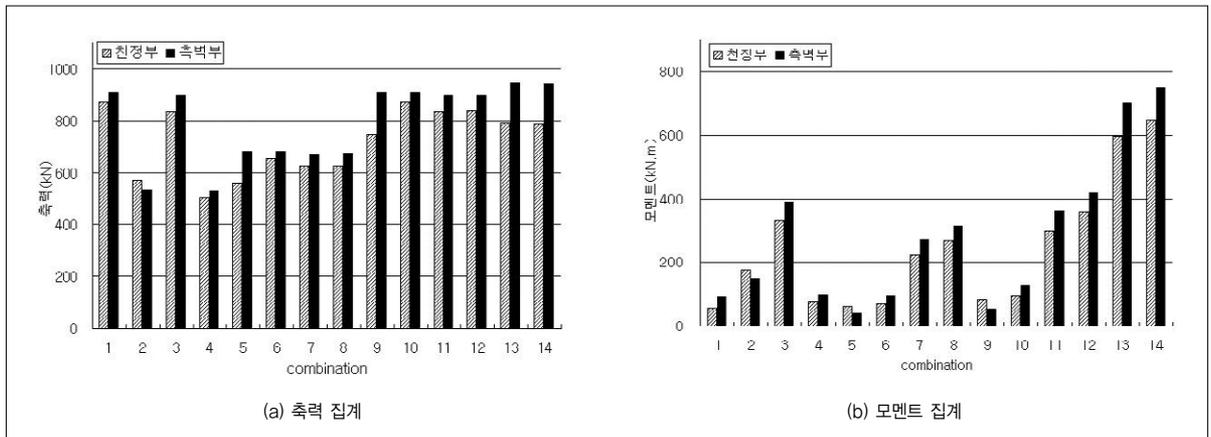


그림 2. 하중조합별 단면력 집계

이 작용하지 않는 경우로 분류할 수 있다.

개착터널은 고정하중이 지배적인 지하구조물이기 때문에 모든 하중조합에 1.4D항의 D대신에 1.1D를 적용하였다. 또한 구조물의 특성상 성토에 의한 연직토압과

횡토압이 항상 작용하기 때문에 콘크리트 구조설계기준의 하중조합 중에서 횡토압이 없는 경우에는 횡토압을 고려한 하중조합을 추가로 검토하였다.

여기서 comb. 1, 2는 각각 식 (1)과 식 (2)를 사용했

표 5. 제안 하중조합

comb.	하중조합	비고
1	$U = 1.54 D + 1.7 L + 1.8 H$	
2	$U = 0.9 D + 1.8 H$	
3	$U = 1.54 D + 1.7 L + 0.9 H$	comb. 1 반수평토압
4	$U = 0.9 D + 0.9 H$	comb. 2 반수평토압
5	$U = 1.155 D + 1.275 L + 1.35 H + 1.125 (T_1 + T_2)$	
6	$U = 1.155 D + 1.275 L + 1.35 H + 1.125 (T_1 + T_2 + T_3)$	
7	$U = 1.155 D + 1.275 L + 0.675 H + 1.125 (T_1 + T_2)$	comb. 5 반수평토압
8	$U = 1.155 D + 1.275 L + 0.675 H + 1.125 (T_1 + T_2 + T_3)$	comb. 6 반수평토압
9	$U = 1.54 D + 1.8 H + 1.5 (T_1 + T_2)$	
10	$U = 1.54 D + 1.8 H + 1.5 (T_1 + T_2 + T_3)$	
11	$U = 1.54 D + 0.9 H + 1.5 (T_1 + T_2)$	comb. 9 반수평토압
12	$U = 1.54 D + 0.9 H + 1.5 (T_1 + T_2 + T_3)$	comb. 10 반수평토압
13	$U = 1.0 D + 1.0 H + 1.0 (T_1 + T_2 + T_3)$	사용성 검토

※ U=소요강도, D=고정하중(자중 및 연직토압 등), H=수평토압, L=활하중, T₁=계절별 온도하중, T₂=내외면 온도차, T₃=건조수축
 ※ 상기 제안된 하중조합 중에서 설계조건에 따라 단면력이 현저히 낮은 조합은 기술자가 판단하여 검토조합에서 고려하지 않을 수도 있다.

고, comb. 5는 식 (3)의 (+)온도하중에 횡토압을 추가한 경우, comb. 6은 식 (3)의 (-)온도하중에 횡토압을 추가한 경우에 해당한다. comb. 13, 14는 각각 식 (4)의 (+)온도하중, (-)온도하중에 해당하며, comb. 9, 10은 식 (4)에 횡토압을 추가한 경우이다. 그리고, comb. 3, 4, 7, 8, 11, 12는 각각 comb. 1, 2, 5, 6, 9, 10의 횡토압에 전토압 대신 반토압을 적용한 경우이다. comb. 15는 사용성 검토를 위한 하중조합으로 하중계수를 사용하지 않았다.

4.3 하중조합 검토 및 제안

4.1절에서 설정한 단면을 이용해 구조해석을 하고 4.2절의 하중조합을 이용해 단면력을 산정한 결과는 그림 2와 같으며, 검토결과 수평토압이 반영되지 않은 하중조합 13과 14는 다른 경우에 비해 150%이상의 과도한 단면력이 발생하였다. 연직토압을 고려한 상태에서 수평토압을 고려하지 않는 하중조합은 예제에서와 같이 과도한 단면력이 발생할 뿐만 아니라 실제 발생 하기도

어려운 하중조합으로 사료된다.

또한 식 (3)에서 활하중을 고려하지 않게 되면 단순히 식 (4)에 0.75의 계수만 곱해준 형태가 되므로, 식 (3)을 기준으로 만들어진 comb. 5~8의 단면력은 식 (4)를 기준으로 만들어진 comb. 9~12 경우의 75%만 발생하고 있다. 따라서 comb. 5~8은 활하중을 설계에 반영할 경우에만 고려하는 것이 타당하다고 판단된다.

이러한 검토결과를 근거로 본 연구에서는 개찰터널의 상시설계시에 표 5와 같은 하중조합을 사용할 것을 제안하고자 하며 지금 개정중인 콘크리트 구조설계기준에 따라 추후 변경하여야 한다.

4.4 단면설계 검토

4.3절에서 제안한 하중조합을 통해 구한 부재력을 기준으로 콘크리트 두께를 변경해가면서 필요 철근량을 산정하고 계산된 단면의 단위면적당 공사비를 산출하여 비교하였다. 이 때 공사비는 직접공사비 기준으로 콘크리트는 53,000원/m³, 철근은 1,000,000원/ton으로 가

표 6. 단면설계 및 공사비산출 결과

단면두께(mm)	천 정 부		측 벽 부		바 닥 부	
	철근배근	공사비(원/m ²)	철근배근	공사비(원/m ²)	철근배근	공사비(원/m ²)
400	D25 @ 125	84,880	D29 @ 125	101,840	D29 @ 125	123,040
450	D22 @ 125	72,490	D25 @ 125	87,530	D25 @ 125	108,730
500	D19 @ 125	62,500	D22 @ 125	75,140	D22 @ 125	96,340
550	D19 @ 125	65,150	D22 @ 125	77,790	D22 @ 125	98,990
600	D19 @ 125	67,800	D19 @ 125	67,800	D19 @ 125	89,000

정하였다.

위치별 단위면적당 공사비 산출결과는 표 6과 같으며 검토결과 단면두께가 500mm일 때 가장 경제적인 설계가 가능한 것으로 나타났다. 또한 천정부, 측벽부, 바닥부는 발생하는 단면력의 성격 및 크기가 상이하기 때문에 철근량도 각각 분리해서 산정하여 배근하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 여기서도 적절한 철근량을 분리 배근하여 경제성을 높인 것을 볼 수 있다.

5. 결론

개착터널은 굴착터널과 달리 낮은 토피고를 갖고 있어 성토하중, 온도변화, 지진의 영향을 받기 쉬운 구조물이다. 현재 굴착터널의 라이닝에 대해서는 표준단면을 제시하는 등의 규정이 정립되어 있지만 개착터널에 대해서는 하중조합 및 콘크리트 두께에 대한 특별한 규정이 없는 실정이다.

현재까지 설계 및 시공된 개착터널의 경우 설계자에 따라서 하중조합과 콘크리트 두께, 철근량 등이 다양하게 설계되었다. 이는 아직까지 개착터널에 대한 설계기준이 정립되지 않았기 때문인 것으로 판단되어 본 연구에서는 몇 가지 사례를 통해 그러한 문제점들을 찾아내고, 문제 해결을 위한 방안을 도출하고자 했다.

그 결과 다음과 같은 1, 2항의 결론을 얻었으며, 이를

참고하면 보다 합리적이고 경제적인 개착터널 설계가 가능하리라 본다. 단, 본 연구에서는 상시에 대해서만 논하고 있으며 지진시는 별도의 검토가 필요하다.

1. 하중조합은 연직토압과 함께 수평토압을 적용하고, 반수평토압이 작용할 경우를 고려하여 표 5와 같은 13개의 조합을 적용한다.
2. 개착터널의 콘크리트 두께는 가급적 500mm를 표준으로 정하고, 철근량은 천정부, 벽체부, 바닥부로 분리 산정하여 경제적인 설계를 하도록 한다. 다만, 토피고와 활하중의 영향으로 단면력이 증가할 경우는 지진시를 고려하여 철근량으로 조정하고 단면증가는 지양하여야 한다.

참고문헌

1. 콘크리트 구조설계기준(2003), 건설교통부
2. 콘크리트 표준시방서(1996), 건설교통부
3. 터널설계기준(1999), 건설교통부
4. 도시철도기술자료집 개착터널편(2005), 서울시 지하철건설본부
5. 도로교설계기준(2005), 한국도로교통협회
6. 도로설계요령(2001), 한국도로공사
7. 철도설계편람(2004), 대한토목학회