

[報 文]

地下鐵 터널 最適斷面 決定에 관한 研究

A Study on the Determination of Optimal Section
for the Subway Tunnels

金 景 鎬*

要 旨

본 고에서는 지하철 건설에 주로 적용되는 마제형 단선 터널의 최적단면 결정방법에 대하여 고찰하였다.

설계 기준은 서울 지하철 5호선의 차량한계 및 건축한계 규정을 사용하였으며, 내동단면의 결정은 구조적인 안전성을 확보하면서 굴착 단면적을 최소화하여 설계 및 시공에 있어서 경제성을 높일 수 있도록 하였다.

Abstract

This paper describes the method used to determine the optimal section for the horseshoe shaped single tunnel which is utilized widely in constructing subway tunnels.

Vehicle and structural gauges conform to the design criteria for the Seoul Subway Line 5. The tunnel sections are determined considering the structural stability, and the tunnel excavation area is optimized so as to minimize design and construction costs.

* (株) 大宇엔지니어링 土木事業本部 代理

1. 머리말

터널의 기본적인 형상으로 마제형, 계란형, 원형등의 단면이 있는데 서울 지하철 5호선에서는 대표적으로 마제형이 채택되었으며 일부 구간에서는 원형터널 단면도 사용되었다. 터널 단면 형상은 구조적으로 응력의 집중 현상을 완화하면서 굴착 단면적을 최소화 하는 것이 경제적이다. 따라서 본 연구에서는 단선 터널의 마제형 단면에 대해 지하철 5호선의 차량 형태와 건축규정을 만족하면서 가장 경제적인 내공단면의 결정 방법에 대해 고찰해 보고자 한다.

2 단면 결정시 고려사항

터널은 지하에서 수평으로 굴착하여 목적하는 용도에 제공하는 공간으로 정의되고 있는데 지하철 터널의 경우 단면 형상을 결정하기 위해서는 다음 사항들이 고려되어야 한다.

- (1) 사용 목적에 의한 필요 공간의 확보(건축 한계 및 부속설비, 여유 공간등의 고려)

- (2) 토피 및 토압

- (3) 굴착공법 및 굴착 단면적

- (4) 지질 상태

- (5) 경제성

내공 치수 결정시 고려된 조건들은 다음과 같다.

- (1) 응력의 집중 현상을 완화하기 위하여 단면의 변화 부분은 같은 반경 방향에서 변화시킨다.

- (2) 건축 한계로부터 구축 한계까지는 반경 방향으로 200~300mm의 여유를 확보한다.

$$W_1 \geq 200\text{mm}$$

$$W_2 \geq 300\text{mm}$$

$$W_3 \geq 200\text{mm}$$

- (3) 보도폭원은 보도기면에서 수직 상방으로 2.43m 되는 점까지 800mm 이상을 확보한다.

- (4) 레일면으로부터 바닥까지는 550mm를 유지한다.

- (5) 세부적인 사항은 지하철 5호선 설계 기준에 의한다.

서울지하철 5호선의 건축 한계도는 Fig1과 같다.

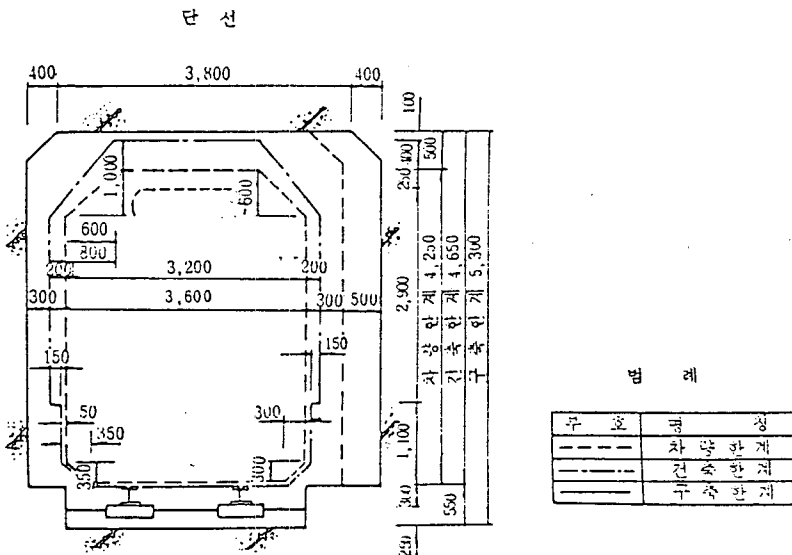


Fig1 본선 직선부 건축한계도(지하)

3. 단면 결정 방법

단면의 내공 치수는 구조물 형태별, 곡선 반경 별로 결정하기 위해 Computer program화 하였으며 Program을 위한 계산 과정은 다음 節次와 같다.

3.1 기본공식

$$\text{Cant } C = 11.8 \frac{V^2}{R} - 40$$

완화곡선 길이 $L = 600C$

$$\text{화폭량 } W = \frac{24,000}{R}$$

$$\text{확도 } S = \frac{2,250}{R}$$

$$\text{편각 } \theta = \tan^{-1}\left(\frac{C}{G}\right)$$

구심과 궤심의 이격거리 $D1 = 1.5C - 0.278$

$$D2 = 1.5C + 0.278$$

단, 여기서 V : 반경별 설계속도(km/hr)

R : 곡선 변경(m)

G : 軌間(=1,500mm)

3.2 내공치수 결정

마제형 단선 터널에서 결정하여야 할 각 치수를 일반적으로 나타내면 Fig.2와 같다.

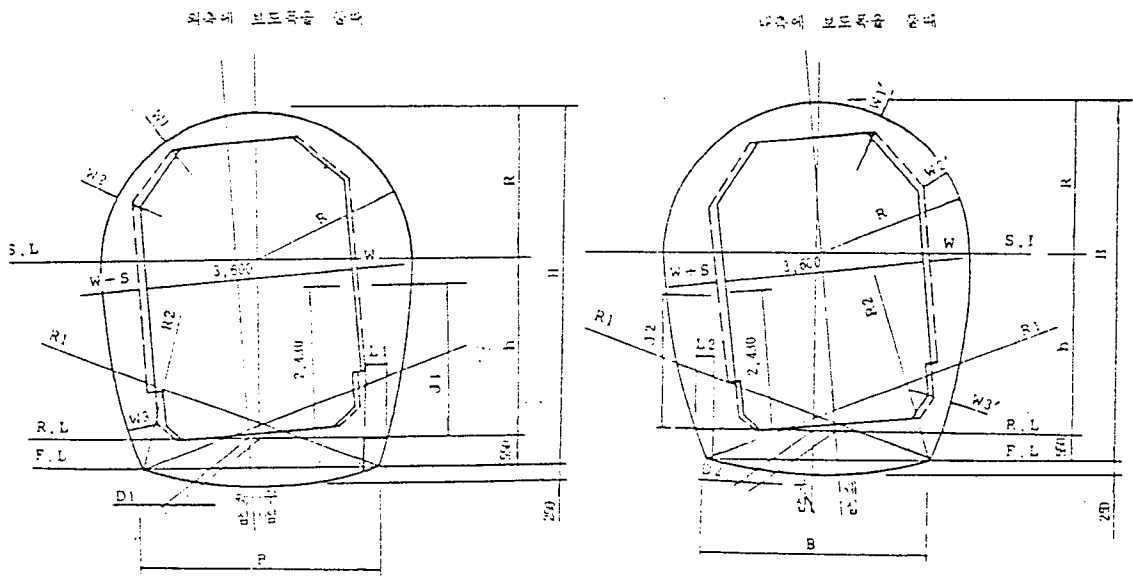


Fig.2 단선터널 내공 치수도

(1) SL의 설정 및 R의 결정

건축 한계의 주요 치수를 표시하면 Fig.3과 같다.

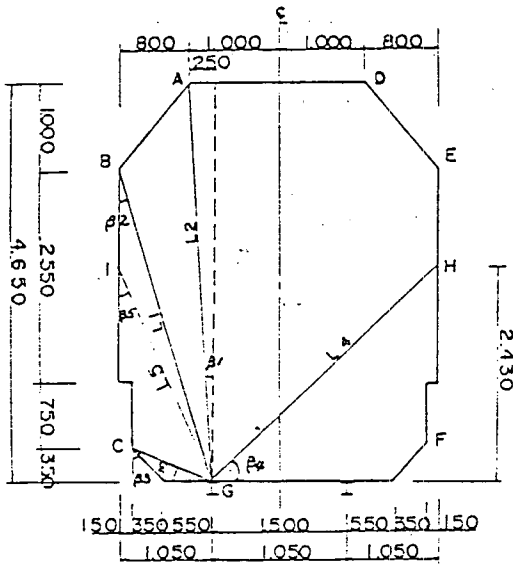


Fig.3 건축한계의 주요 치수

Fig.3 에서

$$\beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{250}{4,650}\right) = 3.0774554$$

$$L_1 = \sqrt{4.65^2 + 0.25^2} = 4.65671558$$

$$\beta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{1.050}{3,650}\right) = 16.04900479$$

$$L_2 = \sqrt{3.65^2 + 1.05^2} = 3.7980258$$

곡선부에서 차량이 경사지게 될 때의 각 좌표들의 변환점은 RL상의 구심을 기준 원점으로 해서 다음과 같은 방법으로 구해진다. 차량이 경사지게 되면 A A' 점으로 변환되는데 변화된 A' 점의 좌표를 (x₃, y₃)라 하면,

Fig.4에서 $\triangle AA'G$ 의 기하학적인 관계를 이용

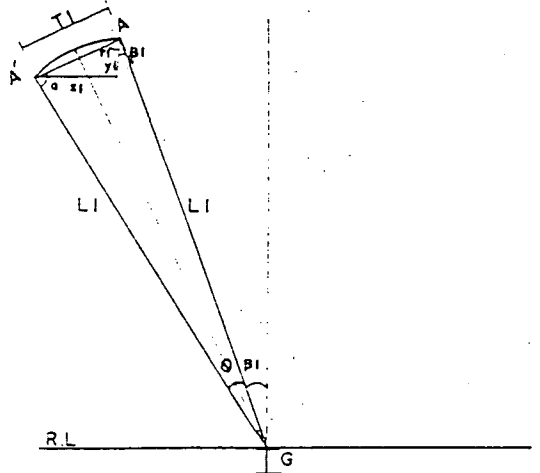


Fig.4 A점의 변화좌표

하면,

$$\theta + 2\alpha = 180$$

$$\alpha = \frac{1}{2}(180 - \theta)$$

$$\gamma_1 = \alpha - \beta_1$$

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{T_1/2}{L_1}$$

$$T_1 = 2L_1 \sin \frac{\theta}{2} = 2L_1 \cos \alpha$$

$$x_1 = T_1 \sin \gamma_1$$

$$y_1 = T_1 \cos \gamma_1$$

화폭에 의한 변위량은

$$x_2 = (W+S) \cos \theta$$

$$y_2 = (W+S) \sin \theta$$

RL상의 구심을 원점으로 해서 軸을 이동시키면

$$x_3 = -1 - x_1 - x_2 + D_1$$

$$y_3 = 4.65 - y_1 - y_2$$

같은 방법으로 B점의 변화 좌표를 B' (x_{33}, y_{33})라 하고 구해 보면

$$\gamma_2 = \alpha - \beta_2$$

$$T_2 = 2L_2 \sin \frac{\theta}{2} = 2L_2 \cos \alpha$$

$$x_{11} = T_2 \sin \gamma_2$$

$$y_{11} = T_2 \cos \gamma_2$$

$$x_{22} = (W+S) \cos \theta$$

$$y_{22} = (W+S) \sin \theta$$

$$\therefore x_{33} = -1.8 - x_{11} - x_{22} + D_1$$

$$x_{33} = 3.65 - y_{11} - y_{22}$$

다음에는 Fig.2에서 S·L을 처음에는 $h=3.0$ 인 위치로 가정하고 S·L상의 구심에서 A' 점과 B' 과의 거리의 차가 0.1이 되도록 h를 수렴시킨다.

$$\text{Test} = \sqrt{x_3^2 + (y_3 - h)^2} - \sqrt{x_{33}^2 + (y_{33} + (y_{33} - h)^2}$$

$$\Delta = |\text{Test} - 0.1|$$

Δ 가 0에 근접하도록 h를 상·하로 수렴시키고, 그 h값에 의해 R이 다음과 같이 결정된다.

$$R = 0.2 + \sqrt{x_3^2 + (y_3 - h)^2}$$

(2) W_1, W_2 의 결정

(1)의 과정에서 h와 R이 결정되면 W_1, W_2 는 다음과 같이 계산된다.

$$W_1 = R - \sqrt{x_3^2 + (y_3 - h)^2}$$

$W_1 \geq 200\text{mm}$ 이므로 $W_1 < 200\text{mm}$ 이면 R을 조금씩 증가시켜 W_2 도 최소한 300mm 이상을 확보하도록 한다.

이 때, 결정되는 R이 상반부의 최종적인 R값이 된다. 같은 방법으로 W_3, W_1', W_2', W_3' 도 구할 수 있다.

(3) L_1, R_1 의 결정

위의 과정으로부터 상반부 단면의 R값이

결정되면 하반부 단면의 R_1 과 보도폭 L_1 을 결정할 수 있다.(Fig.5 참조)

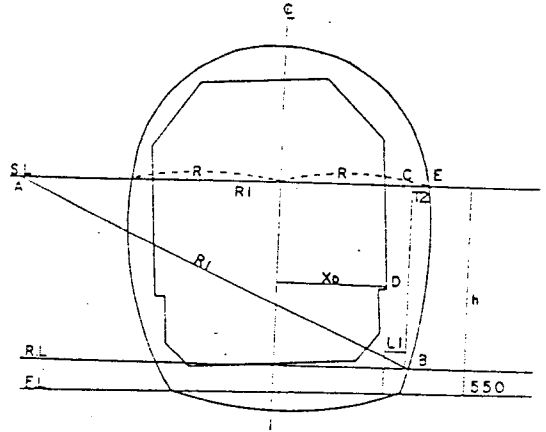


Fig.5 L_1, R_1 의 결정도

S·L상에 $\overline{CE} = T_2$ 라 하고, 구심으로부터 D 점의 x좌표를 x_D 라 하면 보도폭 L_1 은 800mm 이상을 확보해야 하므로

$$\begin{aligned} T_2 &= R(X_D + 0.8) \\ &= R - X_D - 0.8 \\ &= R - \sqrt{R_1^2 - h^2} \end{aligned}$$

$\triangle ABC$ 에서 피타고라스 정리를 이용하면,

$$(R_1 - T_2)^2 + h^2 = R_1^2$$

위 식을 정리하면

$$R_1 = (T_2^2 + h^2) / 2T_2$$

$$L_1 = R - T_2 - X_D$$

$$= R - (R - \sqrt{R_1^2 - h^2}) - X_D$$

$$= \sqrt{R_1^2 - h^2} - R_1 + R - X_D \text{로 된다.}$$

(4) L_2, J_2 의 결정

L_2 도 L_1 과 같은 방법으로 Fig.6으로부터 구할 수 있다.

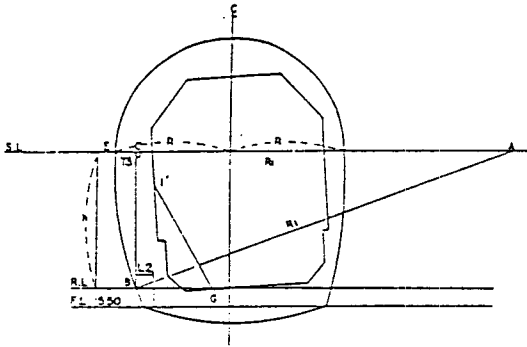


Fig. 6 L₂ J₂의 결정도

(1)의 Fig. 3에서 R·L로부터 243m 되는 점을 I라 하고 곡선부에서 차량이 경사지게 될 때의 I점의 변화좌표를 Y(x₃, y₃)라 하고 구해보면,

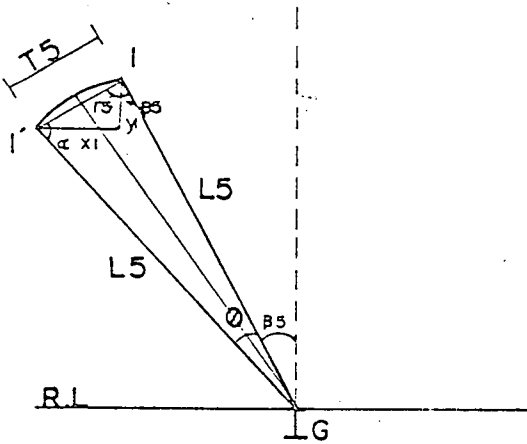


Fig. 7 I점의 변화좌표

Fig. 7에서

$$\beta_5 = \tan^{-1}\left(\frac{1.050}{2.430}\right) = 23.36911316$$

$$\gamma_5 = \alpha - \beta_5$$

$$L_5 = \sqrt{2.43^2 + 1.05^2} = 2.64714941$$

$$T_5 = 2L_5 \cos \alpha = 2L_5 \sin \frac{\theta}{2}$$

$$x_1 = T_5 \sin \gamma_5$$

$$y_1 = T_5 \cos \gamma_5$$

$$x_2 = (W+S) \cos \theta$$

$$y_2 = (W+S) \sin \theta$$

$$x_3 = -1.8 - x_1 - x_2 + D_2$$

$$y_3 = -y_1 - y_2 - h + 243$$

Y(x₃, y₃)의 좌표가 구해졌으므로 J₂는 다음 식으로 구해진다.

$$J_2 = y_3 + h$$

Fig. 6에서 S·L상의 $\overline{CE} = T_3$ 라 하면, 보도폭 L₂는 상방 243m 되는 점까지 800mm 이상을 확보해야 하므로 L₂는 다음과 같이 구해진다. ΔABC의 기하학적인 관계를 이용하면,

$$T_3 = R_1 - \overline{AC}$$

$$= R_1 - \sqrt{R_2^2 - h^2}$$

x₃가 (-)좌표값이므로

$$\therefore L_2 = R - T_3 + x_3$$

$$= R - (R_1 - \sqrt{R_2^2 - h^2}) + x_3$$

$$= \sqrt{R_2^2 - h^2} - R_1 + R + x_3 \text{로 된다.}$$

(5) J₁의 결정

Fig. 3에서

$$\beta_4 = \tan^{-1}\left(\frac{2.430}{2.550}\right) = 43.61964593$$

$$L_4 = \sqrt{2.43^2 + 2.55^2} = 3.52231395$$

곡선부에서 차량이 경사지게 될 때 H점의 변환점 H'의 좌표를(x₄, y₄)라 하면,

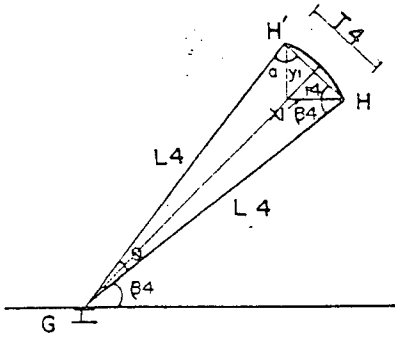


Fig.8 H점의 변환좌표

Fig.8의 $\Delta H H' G$ 에서

$$\theta + 2\alpha = 180$$

$$\alpha = \frac{1}{2}(180 - \theta)$$

$$\gamma_4 = \alpha - \beta_4$$

$$T_4 = 2L_4 \sin \frac{\theta}{2} = 2L_4 \cos \alpha$$

$$x_1 = T_4 \cos \gamma_4$$

$$y_1 = T_4 \sin \gamma_4$$

화폭에 의한 변위량은

$$x_2 = W \cos \theta$$

$$y_2 = W \sin \theta$$

R·L상의 구심을 원점으로 해서 좌표를 변화시

키면,

$$x_4 = 1.8x_1 - x_2 + D_1$$

$$y_4 = 2.43 + y_1 + y_2$$

$$\therefore J_1 = y_4$$

(6) R_2 , B의 결정

R_2 는 Fig.9로부터 다음과 같이 구해진다.

ΔABC 에서

$$(R_2 - 0.25)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 = R_2^2$$

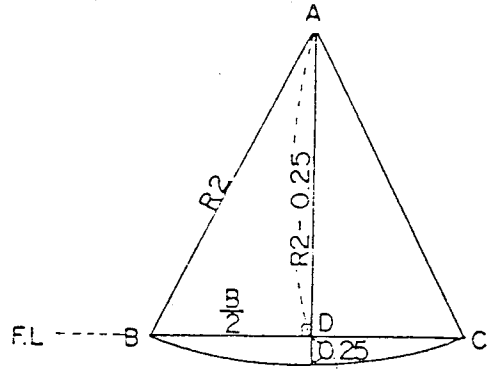


Fig.9 R_2 결정도

위 식을 정리하면

$$R_2 = \frac{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + 0.25^2}{0.5}$$

B는 Fig.10로부터 구해지는 $\overline{AC} = x_1$, $\overline{EF} = \overline{CD} = x_2$ 라 하면,

$$\sin \theta = \frac{H_1}{R_1}$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{H_1}{R_1} \right)$$

$$x_1 = R_1 \cos \theta$$

$$x_2 = R_1 - x_1$$

$$\therefore B = 2R_1 - 2x_2$$

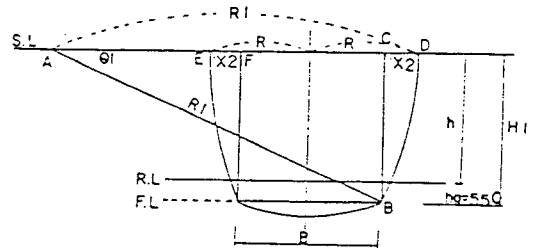


Fig.10 B 결정도

4. 내공 치수 결과

위의 계산 과정을 Program화하여 각 곡선 반경별로 구한 내공 치수의 결과는 Table1과 같다.

구분 반경 m	속도 V km/h	완화 곡선이 Lm	캔트 C mm	확폭량 W mm	확도 S mm	편기각 ° ' ."	(-)D (+)D mm	h H mm	R R ₁ mm	R ₂ mm	W ₁ W ₁ ' mm	W ₂ W ₂ ' mm	W ₃ W ₃ ' mm	L ₁ L ₁ ' mm	J ₁ J ₁ ' mm	B mm	비고
150	45	71	119	160	15	4-32-9	99.5 456.5	2460 5910	2900 9201	11585	202 262	305 364	664 458	800 858	2637 2325	4788	STEP 폭 =80mm
200	55	83	138	120	11	5-15-23	71.0 485.0	2510 5910	2850 10221	11465	205 276	307 377	699 445	800 873	2664 2311	4762	STEP 높 이는 R
250	65	95	159	96	9	6-3-2	39.5 516.5	2540 5910	2820 11113	11470	202 284	304 386	737 433	800 888	2695 2295	4764	L과 같다. J ₁ 는
300	70	92	153	80	8	5-49-26	48.5 507.5	2550 5900	2800 11218	11294	202 282	305 385	727 433	800 885	2684 2302	4726	대피공간 높이
350	75	90	150	69	6	5-42-38	53.0 503.0	2560 5890	2782 11505	11205	200 279	303 382	724 431	800 885	2679 2306	4707	
400	80	89	149	60	6	5-40-21	54.5 501.5	2570 5890	2770 11690	11132	202 281	303 384	722 430	880 885	2676 2308	4592	
450	80	77	128	53	5	4-52-38	86.0 470.0	2570 5870	2753 11575	10933	200 269	301 371	686 435	800 874	2643 2327	4649	
500	80	67	111	48	5	4-13-55	111.5 444.5	2570 5870	2750 11096	10726	210 270	310 372	658 443	800 864	2615 2342	4605	
600	80	52	86	40	4	3-16-52	149.0 407.0	2560 5840	2730 10855	10476	201 248	304 352	615 449	800 849	2574 2363	4550	
700	80	41	68	34	3	2-35-44	176.0 380.0	2560 5820	2714 10778	10300	200 237	302 340	584 452	800 840	2545 2378	4511	
800	80	32	54	30	3	2-3-42	197.0 359.0	2560 5820	2710 10457	10132	207 237	308 339	560 457	800 831	2521 2390	4474	
1000	80	22	36	24	2	1-22-29	224.0 232.0	2560 5800	2690 10492	9968	202 222	303 324	529 460	800 820	2491 2403	4437	
1200	80	14	23	20	2	0-52-42	243.5 312.5	2550 5790	2686 10117	9799	201 214	304 318	507 464	800 812	2469 2413	4399	
1500	80	6	10	16	2	0-22-55	263.0 293.0	2550 5780	2675 10036	9666	200 207	303 310	483 466	800 804	2447 2423	4368	
2000	80	0	0	12	1	0-0-0	278.0 278.0	2550 5770	2670 9845	9536	205 205	307 308	467 468	800 799	2430 2430	4338	
직선	80	0	0	0	0	0-0-0	278.0 278.0	2560 5760	2650 10155	9474	200 200	303 303	467 467	800 800	2430 2430	4324	

주 : W₁, W₂는 최소 기준치임.

5. 맺음말

이상으로 마제형 단선 터널의 내공단면을 결정하는 방법을 고찰하여 보았는데 각 곡선 반경별로 반복적인 계산과정을 Program화하여 효율을 기할 수 있었다.

이러한 과정에 의해 구한 내공 단면은 구조적

인 안정성과 함께 굴착 단면적을 최소화하여 설계 및 시공에 있어서 경제성을 높일 수 있도록 하였다.

위의 계산 과정을 응용하면 마제형 복선이나 원형 단면등 단면의 형태에 따라서도 각각 최적의 내공 단면을 결정할 수 있다.