

# 강지보재 최적 설치방향을 고려한 경사터널의 거동특성에 대한 수치해석적 연구

박상찬<sup>1\*</sup>, 김성수<sup>2</sup>, 신영완<sup>3</sup>, 신휴성<sup>4</sup>, 김영근<sup>5</sup>

## A numerical study on the analysis of behavior characteristics of inclined tunnel considering the optimum direction of steel rib

Sang-Chan Park, Sung-Soo Kim, Young-Wan Shin, Hyu-Soung Shin, Young-Geun Kim

**Abstract** The steel rib, one of the main support of tunnel, plays a very important role to stabilize tunnel excavation surface until shotcrete or rockbolt starts to perform a supporting function. In general, a steel rib at the horizontal tunnel is being installed in the direction of gravity which is known favorable in terms of constructability and stability. However, as the direction of principal stress at the inclined tunnel wall is different from that of gravity, the optimum direction of steel rib could be different from that at the horizontal tunnel. In this study, a numerical method was used to analyze the direction of force that would develop displacement at the inclined tunnel surface, and that direction could be the optimum direction of steel rib. The support efficiency of steel rib could be maximized when the steel rib was installed to resist the displacement of the tunnel. Three directions which were recommended for the inclined tunnels in the Korea Tunnel Design Standard were used for the numerical models of steel rib direction. In conclusion, the results show that all displacement angle of the models are almost perpendicular to the tunnel surface regardless of face angle. So if the steel rib would be installed perpendicular to the inclined tunnel surface, the support efficiency of steel rib could be maximized..

**Keywords:** Inclined tunnel, steel rib, face angle, displacement angle

**요 지** 터널 주지보재의 하나인 강지보재는 굴착 후 슛크리트 또는 록볼트의 지보기능이 발휘되기까지 터널 굴착면의 안정을 도모하는데 매우 중요한 역할을 수행한다. 일반적으로 수평터널의 강지보재는 중력방향으로 설치되고 있으며 시공성 및 안정성 측면에서 모두 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나 경사터널의 경우는 터널 벽면에 작용하는 주응력 방향과 중력 방향이 서로 다르기 때문에 최적의 강지보재 설치방향은 수평터널에서의 중력방향과는 다를 수 있다. 본 연구에서는 수치해석 방법을 이용하여 경사터널 벽면에 작용하는 힘의 작용방향을 규명하였으며 그 방향이 최적의 강지보재 설치방향이 될 수 있다. 즉, 강지보재의 지보효율은 터널 변위가 발생하는 방향으로 저항하도록 설치하는 경우에 최대가 될 수 있다. 국내 터널설계기준에서 제안하고 있는 경사터널에서의 세 가지 강지보재 설치방향을 모델로 설정하여 단계별 해석을 통한 비교검토를 수행하였다. 연구결과 경사터널 벽면에서의 변위 발생각은 막장경사와 관계없이 모두 터널 굴착면에 수직인 방향과 유사한 각도로 발생하므로 경사터널에서의 강지보재는 터널 굴착면에 수직인 방향으로 설치하는 경우가 지보효율 측면에서 보다 유리한 것으로 검토되었다.

**주요어:** 경사터널, 강지보재, 막장경사, 변위 발생각

## 1. 서 론

우리나라의 경우 좁은 지형과 넓은 산지분포로 인하여 지상 공간의 활용도가 매우 낮으므로 지하공간 활용에 대한 다양한 연구 및 시도가 활발히 이루어지고 있

며, 기술의 발달과 더불어 점차 지하공간 시설의 대형화, 장대화 및 심부화가 이루어지고 있다. 석유가스 등의 저장을 위한 지하 유류비축기지, 지하 양수발전소 및 방사성폐기물 처분장 등의 대형 지하시설물 또는 장대터널 등의 시공시 진입터널로서 일반적인 수평터널과는 다른 경사터널이 시공되는 경우가 증가하고 있다. 또한 최근에는 지구 온난화 등 세계적인 이상기후로 인한 집중호우에 대비하여 기존 댐의 치수능력 증대를 위한 터널식 보조여수로 건설이 매우 활발히 진행되고 있으며 수리적 특성을 고려하여 대단면의 경사터널로 건설되는 등

<sup>1</sup>정회원, 하경엔지니어링 터널/지반부 부장

<sup>2</sup>정회원, 하경엔지니어링 터널/지반부 대리

<sup>3</sup>정회원, 하경엔지니어링 터널/지반부 상무

<sup>4</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원

<sup>5</sup>정회원, 삼성물산(주) 건설부문 토목ENG팀 부장

\*교신저자: 박상찬 (psc9898@hanmail.net)

경사터널의 시공이 점점 증가하고 있는 추세이다.

NATM에 있어 지보재의 설계개념은 굴착 후 지반 자체의 지보능력이 최대한 발휘되도록 슛크리트, 록볼트 그리고 강지보재 등의 주지보재를 이용하여 터널의 안정성을 유지하는 것이며 경사터널의 경우도 현재는 일반적인 수평터널에 준하여 설계가 이루어지고 있다. 그러나 터널 주지보재의 하나인 강지보재는 굴착 후 슛크리트 또는 록볼트의 지보기능이 발휘되기까지 터널 굴착면의 안정을 유지하는데 매우 중요한 역할을 수행하며 강지보재의 보강효과는 터널변위가 발생하는 방향으로 강지보재가 저항하도록 설치되는 경우에 최대로 발생하게 된다. 즉, 수평터널의 경우는 굴착면에 직각인 중력방향으로 설치하는 경우가 터널벽면에서의 주응력 방향과 강지보재 방향이 일치하여 터널 안정성 및 시공성 측면에서 모두 유리하다. 그러나 경사터널의 경우는 터널경사에 의하여 터널벽면에서의 주응력 방향과 중력 방향이 일치하지 않으므로 강지보재의 설치 방향에 따른 터널의 거동 특성이 수평터널과는 다르게 나타나므로 경사터널에서의 강지보재 설치방향 결정에 있어서는 주의가 요구된다.

현재 국내의 경우 경사터널에서의 강지보재 설치방향에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이며 터널설계기준(2007)에서 세 가지 방법으로 강지보재의 설치 방향에 대한 기준을 제시를 하고는 있으나 초기응력 및 지반 상태를 고려하여 가장 적합한 방법을 선택하여야 한다는 다소 모호한 기준을 제시하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 수치해석적 방법을 이용한 경사터널에서의 강지보재 설치방향에 대한 매개변수 연구를 수행하여 강지보재의 지보효과가 최대로 발휘 가능한 최적 설치방향의 결정에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 해석모델 및 조건

### 2.1 개요

국내 터널설계기준(건설교통부, 2007)에서는 경사터널에서의 강지보재 설치방향에 대하여 “강지보재는 경사개의 직각방향, 연직방향, 직각방향과 연직방향의 중간방향으로 설치할 수 있으며 초기응력 및 지반 상태를 고려하여 가장 적합한 방법을 선택하여야 한다.”고 기술하고 있다. 국내의 본 기준은 일본의 기준과 매우 유사하며 일본의 경우 터널시방서(2006)에서 경사터널에서의 강지보재 설치방향으로서 그림 1과 같이 세 가지 방법을 제시하고 있다. 그리고, 하향굴착시는 굴착면에 직각과 연직의 중간방향으로 설치하는 경우(그림 1(b))가 다수인 것으로 기술하고 있으며, 상향굴착시는 연직방향의 설치(그림 1(c))가 시공성 및 작업 안전성 측면에서 우수한 것으로 기술하고 있다.

경사터널에서의 강지보재 설치방향은 터널의 안정성 뿐 만 아니라 시공성 측면을 고려하는 경우 굴착방향에 의한 영향도 매우 크게 작용한다. 즉, 상향 굴착시는 강지보재의 조립 및 설치를 고려한 경우 그림 1의 (c)와 같이 연직방향으로 설치하는 경우가 시공성 측면에서 유리하게 되나 하향 굴착시는 막장경사에 의하여 결정되는 경우가 많다. 국내의 경사터널의 강지보재 시공 사례는 표 1과 같이 다양한 굴착방향 및 강지보 방향이 적용되고 있으나 이와 관련된 연구 자료는 매우 미흡한 실정이며 국내의 경우는 경험적으로 그림 1의 (a) 또는 (c)의 방법으로 시공되는 경우가 다수인 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 현재 국내 및 일본에서 일반적으로 제시하고 있는 그림 1의 세 가지 방법에 대하여 수치해석을 이용한 터널 거동 특성 분석을 통하여 경사터널 굴착

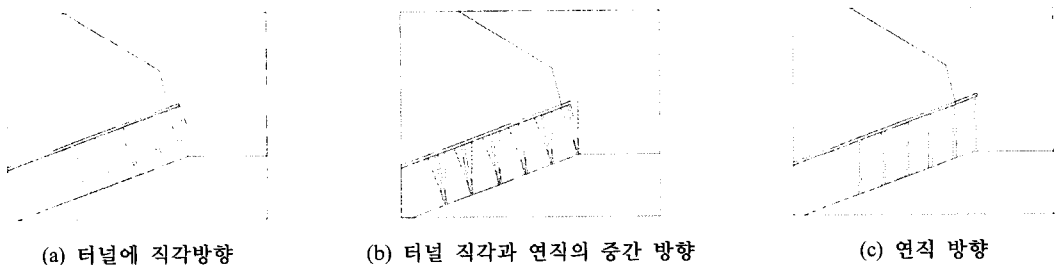


그림 1. 경사터널 강지보재 설치방향 예(일본 터널표준시방서, 2006)

표 1. 경사터널의 강지보재 시공사례

구 분		굴착방향	강지보재 설치방향		
			터널직각	중간	터널연직
보조 여수로	소양강댐 보조여수로 터널	상향 ↗			○
		하향 ↘	○		
	대압댐 보조여수로 터널	하향 ↘			○
경사갱	태백선 제천-쌍용 1공구	하향 ↘	○		
	영동선 솔안터널 경사갱	하향 ↘			○
	경부고속철도 14-2공구	하향 ↘			○
	경부고속철도 13-3공구	상향 ↗			○
	경부고속철도 13-4공구	하향 ↘			○
	00추가비축기지 접근터널	하향 ↘	○		
	일본사례(터널표준시방서)	상향 ↗			○
하향 ↘			○		

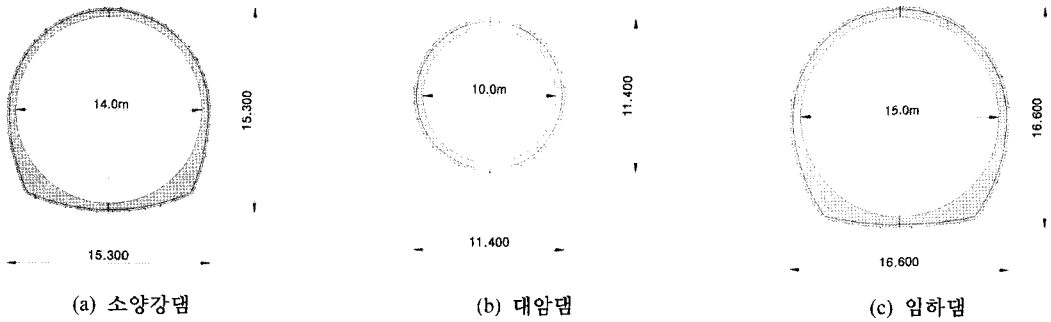


그림 2. 국내 보조여수로 본선터널 단면형상

시의 터널 벽면에서의 힘의 작용방향을 규명하였으며 강지보재의 지보효율이 최대로 발휘되는 최적의 강지보재 설치방향을 평가하였다. 경사터널에서의 강지보재 설치방향은 일반적으로 막장경사와 동일하게 시공되므로 단계별 굴착시의 막장경사는 강지보재의 설치방향과 동일한 것으로 가정될 수 있다. 따라서 막장경사를 매개 변수로 하는 단계별 수치해석을 수행하여 경사터널에서의 막장경사와 터널 거동특성과의 상관관계를 분석하고 최적의 강지보재 설치방향을 결정하였다.

## 2.2 해석 모델

### 2.2.1 단면가정

경사터널의 경우 시공 목적에 따라서 다양한 단면형상, 규모 및 경사를 가지며 일반적으로 지반조건이 불량

하거나 단면규모가 큰 경우에 터널 지보재로서 강지보재가 적용된다. 현재 국내 최초의 터널식 보조여수로인 소양강댐 보조 여수로 터널을 시작으로 다수의 터널식 보조여수로가 시공 또는 계획 중에 있으며 기존 댐의 치수능력 증대를 위한 터널식 보조여수로의 시공은 계속 증가할 것으로 예상된다.

보조여수로 터널과 같은 수로터널은 원형단면의 경우가 수리적 및 역학적 측면에서 가장 안정하므로 유입부 또는 유출부와 같이 수리적 특성을 고려하여 특수한 형태가 요구되는 구간 이외의 본선구간은 원형단면을 적용하는 것이 일반적이다. 현재 국내의 시공 중인 3개소의 터널식 보조여수로 단면은 유입부의 경우 폭 20~30 m, 높이 14~20 m의 대단면 마제형으로 계획되어 있으며, 본선구간은 그림 2와 같이 내경 10~15 m의 원형단

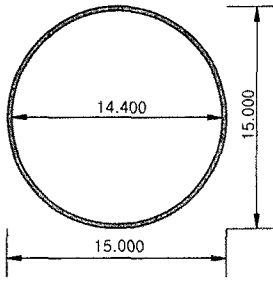


그림 3. 해석모델 단면가정

면 형태로 계획되어 있다.

본 연구는 경사터널에서의 강지보재 최적 설치방향 결정을 위한 경사터널 거동특성 분석에 중점을 둔 모델 실험으로서 터널의 단면형상 및 규모는 그림 3과 같이 국내 보조역수로 터널의 본선터널 단면과 유사한 크기인 의경 15 m의 원형단면을 가정하였다. 또한 강지보재는 분할굴착 공법이 적용되는 조건에서 적용되는 것이 일반적이나 해석모델의 단순화를 위하여 전단면 굴착공법 및 H-250의 강지보재가 1.0 m 간격으로 슛크리트 30 cm와 함께 시공되는 조건을 가정하였다.

### 2.2.2 굴착방향 및 터널경사

경사터널의 굴착방향은 현장조건에 대한 세밀한 검토 후 시공성 및 안정성을 모두 고려하여 상향 또는 하향의 굴착방향을 선정하게 된다. 시공성의 요소로는 갱구위치, 장비 운용성, 환기 및 배수 효율 등을 들 수 있으며, 안정성의 요소로는 발파효율, 지보효과 및 낙반 가능성

등을 주로 들 수 있다. 한편 경사터널의 시공은 일반적으로 하향굴착방식을 적용하는 경우가 많다.

그림 4와 같이 일반적으로 상향굴착은 자연배수가 가능하여 막장 작업조건이 양호한 장점이 있으나 분할굴착을 위한 등판로 설치가 매우 불리하며 하향굴착은 분할굴착 및 터널 천단부의 안정 확보를 위한 보조공법의 효율 측면에서 유리하나 공사중 배수측면에서 불리한 특징이 있다.

경사터널의 기울기에 대하여 국내 터널설계기준에서는 “경사갱의 기울기는 용도, 연장, 본선터널과의 위치관계, 지반조건, 시공법, 공기, 운반방법의 특성, 환기방법, 경제성 등에 대하여 검토하고 정하여야 하며, 버력반출용 경사갱의 경우에는 장비의 등판능력을 고려하여 계획하여야 한다”고 명시되어 있다. 경사터널의 기울기가 급할수록 연장은 짧아지지만 시공 및 운반작업이 매우 어렵게 되며 경사터널의 기울기는 환기용 경사갱과 같이 특별한 경우를 제외하고는 공사용 장비의 등판능력보다 작은 기울기로 계획한다. 일반적으로 5°~7°(약 12%)로 계획되고 있으나 작업 장비의 등판각도를 고려하여 결정할 경우 적용 장비의 특성에 따라 달라질 수 있다.

본 연구에 적용된 수치모델의 터널 경사는 소양강댐 보조역수로 터널의 유입부 단면에 적용된 경사인 14°(25%) 조건을 가정하였으며 굴착방향은 일반적으로 보조공법의 효율성 및 대단면 터널의 분할굴착시의 장비운용적인 측면에서 유리한 하향굴착 방식을 가정하였다.

터널경사와 강지보재의 자중은 시공측면에서 매우 중

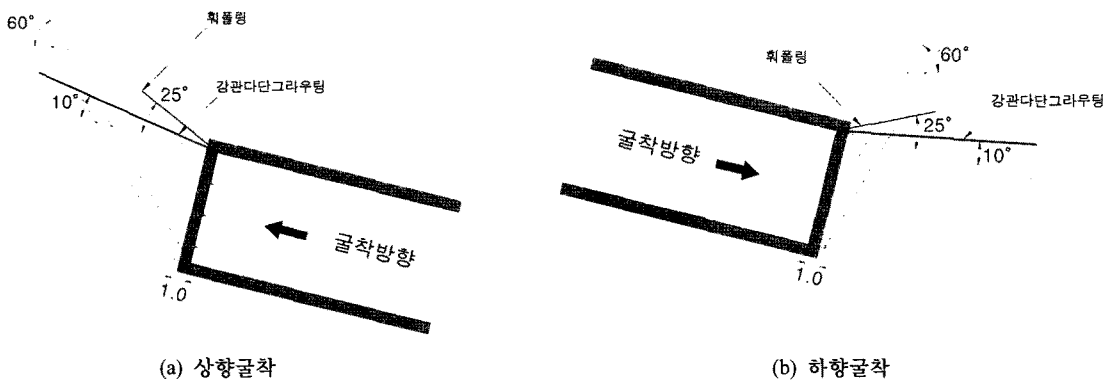


그림 4. 경사터널의 굴착방향에 따른 시공특성

요한 요소로 작용할 수 있으나 하향굴착 및 강지보재는 막장면과 평행하며 즉시 설치되는 조건으로서 강지보재의 자중영향이 작용하지 않는 조건을 가정하였다.

### 2.2.3 모델 CASE 설정

일반적으로 경사터널의 강지보재 설치 방향은 하향굴착시에는 굴착 막장면에 평행하게 설치하는 것이 시공 안정성 측면에서 유리하므로 막장면의 경사와 강지보재의 설치 경사는 동일한 것으로 가정하여 막장 경사를 매개변수로 하는 모델을 설정하였다.

본 연구에서는 그림 5와 같이 지표면은 수평한 것으로 가정하였고 터널경사는 수평면과 터널이 이루는 각도로서  $\alpha$ 로, 강지보재의 설치 방향과 동일한 의미의 표현인 막장경사는 중력방향과 터널 막장이 이루는 각도로서  $\beta$ 로 정로, 그리고 터널 벽면에서 변위가 발생하는 방향을 의미하는 변위 발생각은 중력방향과 터널 벽면의 변위 방향이 이루는 각도로서  $\theta$ 로 정의하였다. 각 해석 모델

에서의 단계별 터널 거동특성은 지표로부터 50 m 깊이의 터널 천단부를 검토위치로 설정하여 상호 비교 분석하였다.

일반적으로 경사터널이 시공되는 지역의 지표면은 수평하지 않은 산지조건인 경우가 많으며 터널 위치에서의 초기응력 조건도 지표면이 수평인 조건과는 다를 수 있으나 본 연구는 초기응력조건 보다는 막장경사 변화에 의한 터널 거동특성 검토를 위한 모델의 단순화를 위하여 지표면이 수평인 조건을 가정하였다.

그림 5에서 정의된 막장경사를 변수로 하여 그림 1의 강지보재 설치방향과 동일한 조건을 갖는 모델을 설정하여 그림 6과 같이 3가지 모델 CASE를 설정하였다.

그림 6에서 모델 1은 막장면이 터널에 직각방향인 경우로서 그림 1(a)와 같은 조건이며, 모델 2는 그림 1(b)와 같은 조건으로 막장면이 터널의 직각방향과 중력방향과의 중간에 형성되는 경우이며, 모델 3은 막장면이 중력방향과 동일한 경우로 그림 1(c)와 같은 경우로 모두 3가지 모델에 대한 검토를 수행하였다.

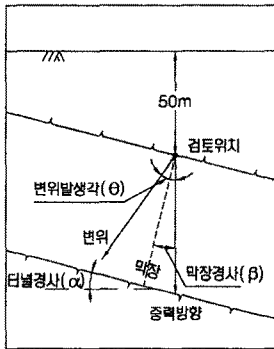
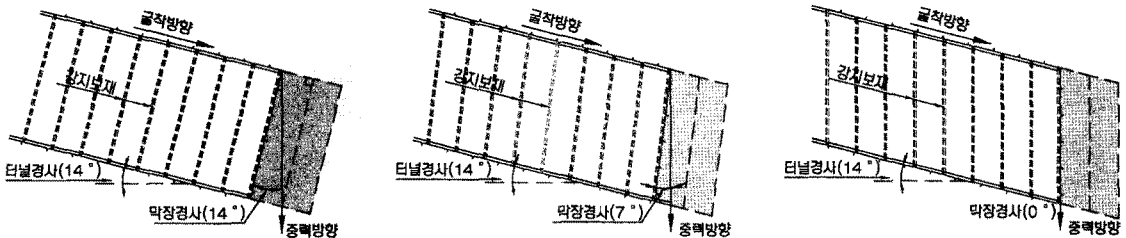


그림 5. 용어 및 방향의 정의

### 2.3 지반 및 지보재 조건

본 연구는 강지보재의 설치방향인 막장경사의 차이에 의하여 기하학적으로 구분된 세 가지 모델에 대하여 매개변수 연구를 통한 굴착단계별 거동특성의 상대적 비교분석을 목표로 하였다. 따라서 지반조건, 하중의 크기 및 지보재 특성치 등은 기 설계 및 시공된 자료를 참조하여 임의의 가정 조건을 적용하였다.

지반조건은 연암 수준의 균질한 연속체 조건으로서 소양강댐 보조여수로 구간에서의 양호한 운모편암 조건에 적용되었던 지반 물성값과 동일하게 적용하였으며



(a) 모델 1

(b) 모델 2

(c) 모델 3

그림 6. 해석 모델 CASE 설정

표 2. 지반 물성값

구분	E(MPa)	$\nu$	r(kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c(MPa)	K <sub>o</sub>
암반등급	2,500	0.27	23	35	0.25	1.0

표 3. 지보재 물성값

구분		단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (MPa)	비고
-shotcrete 리트	연성	23.5	5,200	t = 300 mm
	강성	23.5	15,000	
강지보		78.5	210,000	H-250×250×9×14

표 2와 같다. 터널 지보재의 경우 본 연구에서의 주 검토 지보재 형식은 강지보재이나 강지보재는 일반적으로 shotcrete와 함께 시공되므로 본 모델실험에서는 H-형강 강지보재를 shotcrete 라이닝과 함께 개별적으로 모델링 하였다. 적용된 지보재의 제원 및 물성값은 표 3과 같다.

중소 단면의 터널에서 가정된 shotcrete 두께 30 cm 및 강지보재 규격 H-250은 일반적인 지보재 제원은 아니나, 대단면 터널 등에서는 터널 안정성 확보를 위하여 필요하게 되는 경우도 있다. 강지보재의 설치간격은 1.0 m로 가정하였다.

### 3. 해석방법

터널해석을 수행함에 있어 수평터널의 경우는 일반적으로 하중분담율을 고려한 이차원 평면변형 조건의 해석이 가능하나 본 연구와 같이 경사터널을 대상으로 하는 경우는 터널경사와 강지보재 설치를 고려한 막장경사가 모두 고려된 삼차원적 거동을 반영할 수 있는 해석이 필수적이다.

본 연구에서는 3차원 범용 지반해석프로그램인 MIDAS-

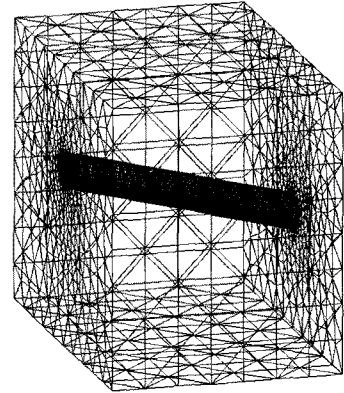
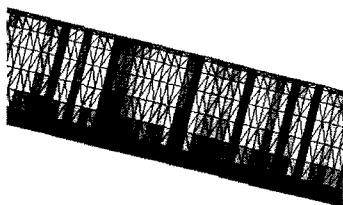


그림 7. 수치모델링 개요

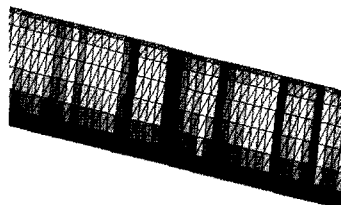
GTS를 이용하여 경사터널에서의 굴착단계별 막장경사와 터널변위 발생방향과의 상관관계 분석을 수행하여 경사터널에서 터널벽면의 변형을 유발시키는 힘의 작용 방향을 규명하였다.

강지보재의 지보효율이 최대로 작용하는 경우는 터널 변형에 최대한 저항할 수 있는 방향으로 설치되는 경우 이므로 경사터널이 굴진함에 따라서 터널벽면의 변형이 발생하는 힘의 방향을 규명하는 것은 매우 중요하다. 수치해석 모델링의 개요는 그림 7과 같다.

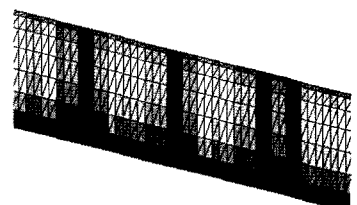
막장경사로 구분되는 각 해석 모델에 대하여 무지보 상태와 지보상태에서의 막장경사와 터널 최대변위 발생 방향과의 상관관계를 분석하였다. 막장경사를 고려한 각 해석 모델의 세부 수치모델링 상세는 그림 8과 같다. 단계별 해석에 있어서 막장경사와 지보설치시의 강지



(a) 터널에 직각방향(모델 1)



(b) 터널 직각과 연직 중간(모델 2)



(c) 연직 방향(모델 3)

그림 8. 모델 CASE별 수치모델링 상세

보재 설치방향은 동일한 조건을 적용 하였다. 지반은 4 절점 지반요소로 모델링 하였으며 지보재의 경우는 슛 크리트는 Plate 요소, 강지보는 beam 요소로 모델링 하였다.

무 지보시의 경우에 대한 검토는 지보설치시 강지보재 설치방향과 동일한 의미인 막장경사가 단계별 굴착에서의 변위발생 경향에 미치는 영향에 대한 사전 분석을 목적으로 수행하였다.

## 4. 해석결과

### 4.1 경사터널의 변위 발생경향 분석

2차원 수치해석 방법이나 원형터널과 같이 이론식을 통하여 산정 가능한 터널벽면에서의 변위는 터널 진행방향과 수직한 방향으로 발생하는 것으로 가정되며 수평터널의 경우는 중력방향과 변위발생방향이 평행한 것으로 평가될 수 있다. 그러나 경사터널과 같은 경우는 터널의 변위분석시 터널 진행방향과 터널 경사를 고려한 3차원적 거동의 평가가 필수적이다.

변위검토는 특정 검토위치(GL-50 m 천단부)에서의 천단침하량과 종방향변위(터널 진행방향의 수평변위)를 평가하여 변위발생각( $\theta$ )으로 표현되는 변위의 발생방향을 분석하였다. 천단침하는 중력방향을 (-)로, 종방향 변위는 터널 진행방향(+)로 정의 하였으며 굴착 및 보강이 진행됨에 따라 검토 위치에 초기 막장이 형성된 경우에서부터 막장위치가 검토 위치에서 충분히 이격된 경

우까지 단계별로 변위발생 경향을 검토하였다.

#### 4.1.1 무지보시의 변위발생 경향

막장경사의 변화에 따라 그림 5에서 설정한 모델 1~3의 경우에 대해 무지보시의 탄소성 해석을 수행하여 검토위치에서 발생하는 터널 천단부 변위의 크기 및 방향을 2차원적인 분포로 표현한 결과는 그림 10~그림 11과 같다.

그림 10은 해석 모델별로 굴착이 진행됨에 따라 검토위치(GL-50 m 천단부)에서의 변위발생 경향을 나타내고 있으며 그림 11은 모델별 굴착초기 단계와 굴착완료 단계에서의 변위발생경향을 비교한 결과이다. 그림 10의 초기굴착 단계에서는 세 가지 모델 모두 막장의 영향에 의하여 막장 후방으로의 변위인 종방향 변위가 천단침하량보다 크게 발생하는 것으로 나타나고 있다. 막장이 계속 진행함에 따라서 종방향 변위는 점점 감소하다가 미소하게 증가하는 추세로 나타났으며 천단침하량은 큰 폭으로 점점 증가하다 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 즉 약 3.0D(D: 터널 직경)이상 굴진된 이후의 변위 방향은 중력방향과 일정한 각도를 보이고 있다.

그림 11은 각 모델에 있어서 굴착 초기 막장 위치에서의 변위와 최종 단계의 변위 발생 경향을 함께 표현한 것이다. 그림에서 나타나듯이 초기 막장 위치에서의 변위발생 방향 및 크기는 막장효과에 의하여 서로 상이하며 변위의 크기는 막장경사가 클수록 작게 발생하는 것

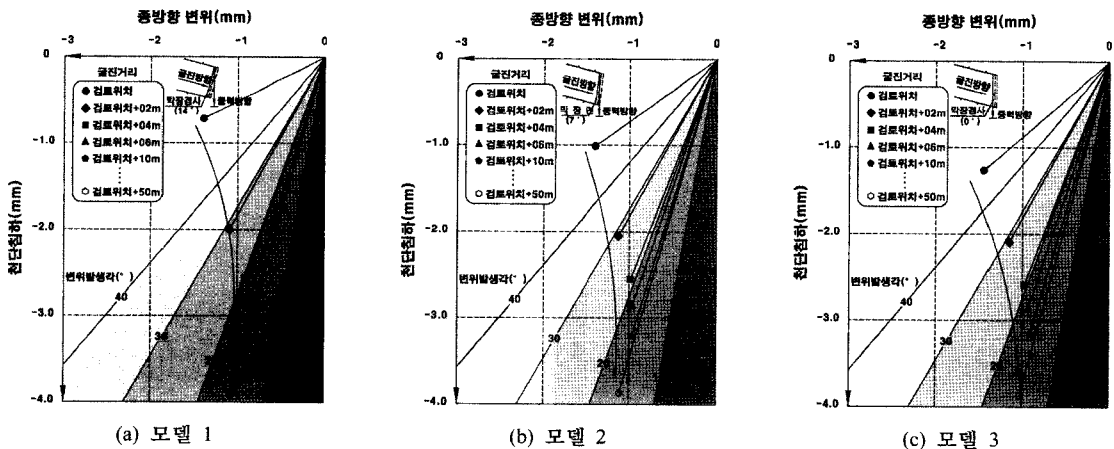


그림 10. 굴착 단계별 변위발생 경향(무 지보시)

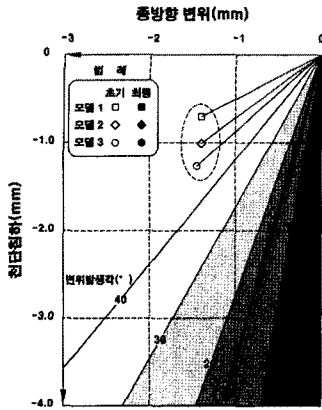


그림 11. 해석 모델별 변위발생경향 비교(무 지보시)

으로 나타났다. 즉, 막장면과 터널 벽면이 이루는 각도가 작을수록 곡률효과에 의한 변위제어 효과가 보다 큰 것을 알 수 있고 굴착 초기 막장면에서의 변위제어 효과는 막장경사가 큰 모델 1의 경우가 유리하다는 것으로 다시 표현될 수 있을 것이다. 충분한 굴착이 이루어진 후의 변위발생 크기와 방향은 단계별 해석에 있어서의 막장 경사의 크기와 관계없이 모두 유사한 경향을 나타내고 있어 결과적으로 막장경사와 변위발생 경향과는 상호 영향이 매우 미소한 것으로 검토 되었다.

그림 12는 각 해석 모델에서의 굴착 완료 후 터널 주위의 변위 벡터를 표현한 것으로서 모두 전반적으로 터널 벽면에 수직인 방향과 유사하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

표 4는 굴착초기 및 굴착완료 단계의 검토위치에서의 터널벽면 변위 발생각( $\theta$ )과 천단침하, 종방향변위의 크기를 나타낸 것이다.

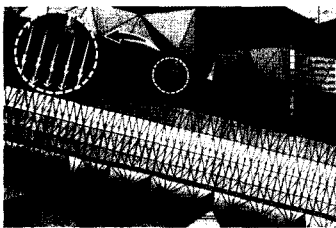
표 4. 변위발생 방향 및 크기(무 지보시)

구분		모델 1	모델 2	모델 3	
터널경사( $\alpha$ )		14°	14°	14°	
막장경사( $\beta$ )		14°	7°	0°	
굴착 초기	변위발생각( $\theta$ )	63.1°	54.2°	48.9°	
	변위 (mm)	천단침하	-0.71	-1.01	-1.26
		종방향	-1.40	-1.42	-1.45
굴착 완료	변위발생각( $\theta$ )	15.7°	16.2°	15.0°	
	변위 (mm)	천단침하	-3.91	-3.87	-3.87
		종방향	-1.09	-1.11	-1.03

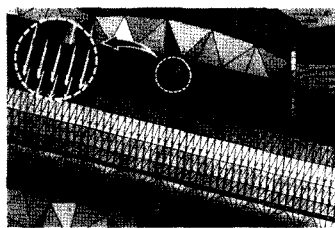
#### 4.1.2 지보설치시 변위발생 경향

모델 1~3의 경우에 대하여 슛크리트와 강지보로 보강된 경우의 탄소성 해석을 수행한 결과는 그림 13과 같다. 그림 13은 무 지보시 결과와 함께 표현하여 지보 설치에 따른 변위제어의 효과가 함께 표현되도록 하였다. 초기굴착 단계에서는 지보효과 보다는 막장효과에 의한 영향이 크고 지보설치에 의한 효과로서 천단침하량은 감소되나 종방향 변위가 증가하여 굴착 초기단계에서의 총변위량 제어 효과는 크지 않은 것으로 검토되었다. 굴착이 계속 진행됨에 따라서 지보 설치에 의한 변위 감소 효과도 점점 증가하며 굴착 완료 단계에서는 일정한 방향과 크기를 갖는 값으로 수렴하는 경향을 나타내나 지보설치의 경우 해석 모델별 변위 발생각( $\theta$ )이 무 지보시 보다 증가하는 경향을 나타내고 있다.

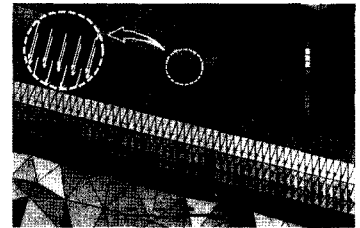
지보설치시의 변위 발생각( $\theta$ )이 무 지보시 보다 증가하는 원인은 굴착 최종단계에서의 강지보재 변형양상을 나타내는 그림 14로 설명될 수 있다. 즉, 무 지보시 해석 결과의 변위 발생 방향과 가장 유사한 방향으로 강지보재가 설치된 모델 1의 경우는 강지보재의 변형이 압축만



(a) 모델 1 결과



(b) 모델 2 결과



(c) 모델 3 결과

그림 12. 굴착 완료시 터널천단부 변위벡터(무 지보시)



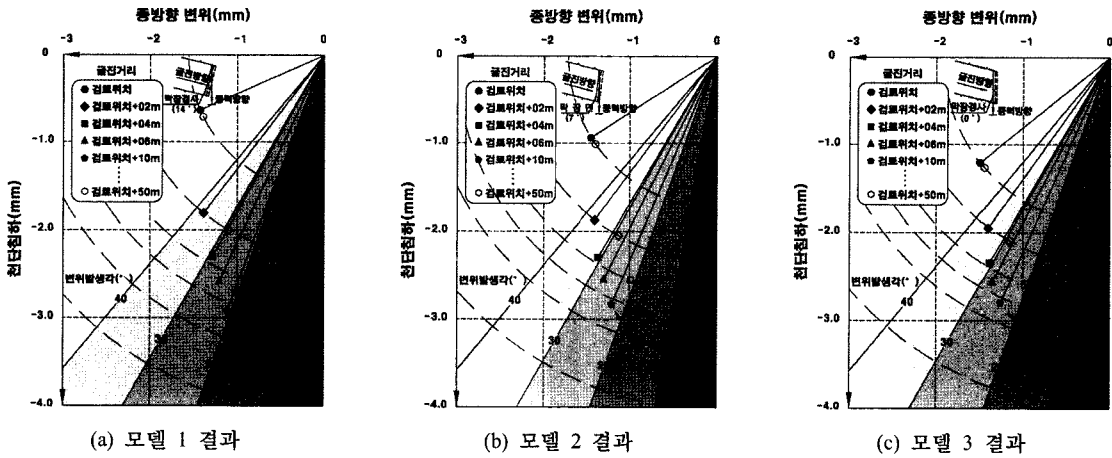


그림 13. 굴착 단계별 변위발생 경향(지보 설치시)

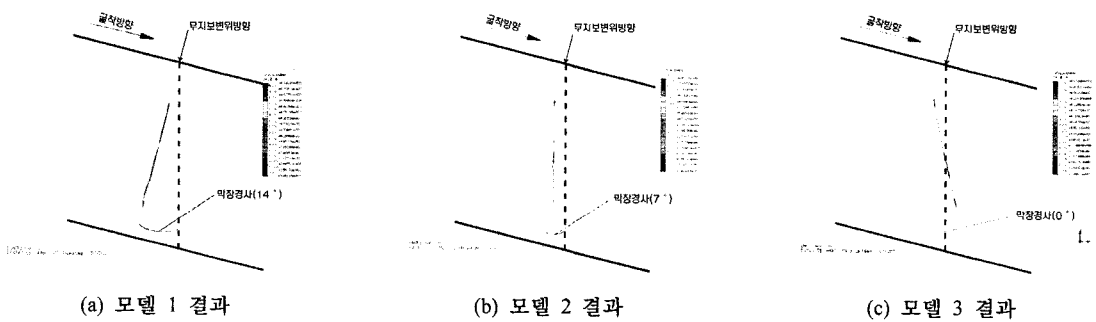


그림 14. 해석 모델별 강지보재 변형경향(지보 설치시)

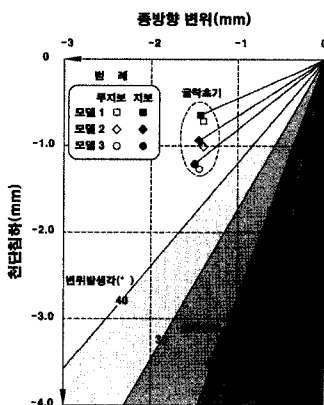


그림 15. 해석 모델별 변위발생경향 비교(지보 설치시)

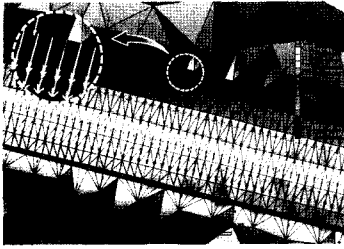
을 받는 것으로 나타나나, 모델 2, 3의 경우에는 강지보재 설치방향과 무지보시의 변위 발생방향과의 차이에 의하여 회전하는 변형양상을 나타내므로 변위 발생

각이 다소 크게 발생하고 있다.

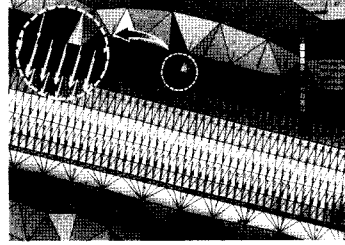
그림 15는 각 모델에 있어서 굴착 초기 막장 위치에서의 변위와 최종 단계의 변위 발생 경향에 대하여 무지보시와 지보설치시의 결과를 함께 표현한 것이다. 초기 막장위치에서는 막장효과에 의하여 지보효과가 크게 나타나지 않으나 충분한 굴착이 이루어진 후에는 지보효과에 의하여 변위의 감소를 나타내며 전반적으로 변위 발생각은 무지보시 보다 증가하였다.

그림 16은 각 해석 모델에서의 굴착 완료 후 터널 주위의 변위 벡터를 표현한 것으로서 전반적으로 무지보시의 결과와 해석 모델 모두 터널 벽면에 수직인 방향과 유사하게 발생하고 있음을 보여주고 있다.

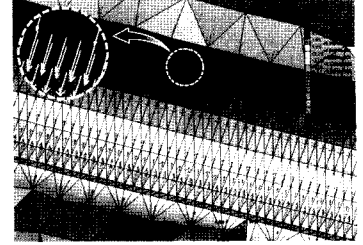
표 5는 굴착초기 및 굴착완료 단계의 점토위치에서의 터널벽면 변위 발생각( $\theta$ )과 천단침하, 종방향변위의 크기를 나타낸 것이다.



(a) 모델 1 결과



(b) 모델 2 결과



(c) 모델 3 결과

그림 16. 굴착 완료시 터널주위 변위백터(지보 설치시)

표 5. 변위발생 방향 및 크기(지보 설치시)

구분		모델 1	모델 2	모델 3	
터널경사( $\alpha$ )		14°	14°	14°	
막장경사( $\beta$ )		14°	7°	0°	
굴착 초기	변위발생각( $\theta$ )	64.7°	55.2°	49.1°	
	변위 (mm)	천단침하	-0.64	-0.93	-1.20
		종방향	-1.43	-1.45	-1.50
굴착 완료	변위발생각( $\theta$ )	15.9°	17.4°	18.5°	
	변위 (mm)	천단침하	-3.47	-3.44	-3.42
		종방향	-0.97	-1.08	-1.15

#### 4.2 지보효율의 평가

그림 15에서 나타나듯이 굴착초기에는 지보설치에 의한 변위제어 효과는 크게 나타나지 않으나 막장경사에 따른 막장효과에 의하여 모델별로 변위 발생량에서 차이가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 그림 17은 굴착초기 막장경사의 크기에 따른 변위 발생 크기를 막장경사( $\beta$ )가 0인 경우 즉, 연직방향인 경우를 기준으로 한 상대적인 증감율을 나타낸 것이다. 본 연구의 터널 경사( $\alpha$ )는 14°이며 그림 17의 결과에서 막장경사가 14°인 경우 즉, 터널과 직각방향인 경우의 변위량 감소량이 가장 큰 것으로 분석되어 굴착초기에 발생하는 원지반의 이완을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 18은 무 지보시와 지보 설치와의 굴착완료단계 변위 증감율을 나타낸 그래프이다. 막장경사에 따라 종방향 변위의 감소율은 막장경사 14°인 경우가 유리하고 천단침하 감소율은 막장경사 0°인 경우가 다소 유리한 것으로 검토 되었으며 최종변위의 감소효과는 미소하나 막장경사 14°인 경우가 가장 큰 것으로 검토 되어 지보효율이 가장 좋은 것으로 검토 되었다.

굴착초기 막장경사에 의한 변위제어 효과

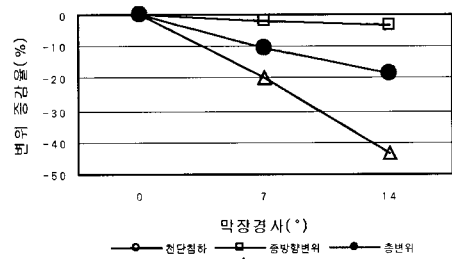


그림 17. 굴착초기(막장위치) 막장경사별 변위 제어효과

지보설치에 의한 변위제어 효과

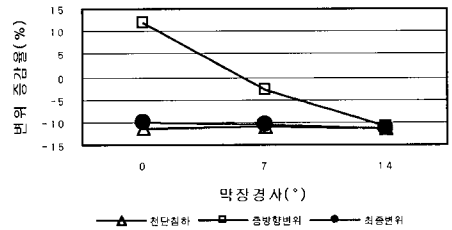


그림 18. 지보설치(최종단계)에 의한 막장경사별 변위 제어효과

원지반 자체가 지보효과를 최대로 발휘하기 위해서는 굴착초기 발생하는 이완을 최소화 하여야 한다. 즉, 강지보재의 역할 중 슛크리트 또는 록볼트의 지보기능 발휘 전에 터널 굴착면의 안정을 유지하는 기능으로서 터널 굴착 직후의 초기 변위 억제 측면에서는 막장경사가 14°로서 터널에 직각인 모델 1의 경우가 가장 유리한 것으로 평가되었다. 굴착완료 후의 변위 발생각은 무 지보시나 지보재 설치시 모두 터널경사 이14°상의 각도로 발생하였으며 모델 1의 경우가 막장경사와 변위 발생각이 가장 유사하게 나타났으며 지보효율도 가장 큰 것으로

검토되었다. 강지보재의 최적 설치방향은 터널변위 발생방향으로 설치하는 것이 하중지지 효과가 가장 우수하게 되므로 강지보 설치방향이 터널 굴착면에 수직인 모델 1의 경우가 가장 유리한 것으로 검토되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 수치해석적 방법을 이용하여 경사터널에서의 변위발생 경향을 분석하였으며 검토된 경사터널에서의 변위발생 경향과 최적의 강지보재 설치방향에 대한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 국내 터널설계기준에서 제안하고 있는 경사터널 강지보재 설치방향의 세 가지 모델에 대하여 하향굴착 방식을 적용한 경우의 무 지보시와 지보 설치시의 터널 벽면변위의 발생경향 분석결과 모두 터널의 경사 방향에 수직한 방향과 유사하게 발생하는 것으로 분석되었다.
2. 굴착초기 변위제어를 통한 지반이완의 최소화로 원지반의 지보효과가 최대로 이용 가능한 막장경사 방향은 세 가지 모델 중 막장경사가 터널경사방향과 수직한 방향으로 강지보재를 터널 벽면에 수직한 방향으로 설치하는 경우가 가장 유리한 것으로 분석되었다.
3. 세 모델에 있어서 최종적으로 발생하는 변위 크기의 차이는 매우 미소한 것으로 나타났으나 강지보재를 터널벽면에 수직한 방향으로 설치한 경우가 변위방향과 강지보재의 방향이 일치하여 압축저항을 통한 지보효율이 가장 좋은 것으로 나타났다.
4. 경사터널에서의 강지보재 최적설치방향은 막장경사를 터널 경사방향에 수직하게 굴착 시공하고 강지보재를 터널 벽면에 수직한 방향 즉, 막장경사와 같은

방향으로 설치하는 것이 최적의 강지보재 설치 방향으로 판단된다.

본 연구 결과는 지표면이 수평이며 양호한 지반조건에서 터널경사( $\alpha$ ) 14°의 하향굴착방식을 적용한 경사터널의 경우에 대하여 제한된 조건에서 한정된 모델로 수행된 수치해석 결과이므로 지반조건이 매우 불량하여 과도한 지반이완의 발생이 예상되는 경우나, 상향굴착 방식을 적용하는 경우 등 본 연구에서 제한한 조건 등이 고려되어야 하는 경우에 대하여는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 “특수 대단면 터널의 시공 및 평가기술의 전략상품 개발 연구” 중 “대단면 경사터널 안정성 확보를 위한 지보패턴 및 보조공법 설계기술 개발” 연구의 일환으로 작성되었으며, 삼성건설 및 건설기술연구원의 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 건설교통부 (1999), 도로설계편람(터널편), pp. 615-10-615-14.
2. 삼성물산주식회사 (2005), 소양강댐 보조여수로 상부터널 굴착공사 기술검토 보고서.
3. 삼성물산주식회사 (2007), 소양강댐 보조여수로 유입부 천이구간 보강공사 설계보고서.
4. 한국터널공학회 (2007), 터널설계기준, pp. 95-96.
5. 土木學會 (2006), トンネル標準示方書(山岳工法・同解説), Japan, pp. 315-316.
6. MIDAS Information Technology Co., Ltd. (2005), MIDAS-GTS, Geotechnical & Tunnel Analysis System.



**박 상 찬**  
하경엔지니어링  
터널/지반부  
부장  
E-mail: psc9898@hanmail.net

---



**김 성 수**  
하경엔지니어링  
터널/지반부  
대리  
E-mail: kims1209@lycos.co.kr

---



**신 영 완**  
하경엔지니어링  
터널/지반부  
상무  
E-mail: ywshin@hakyong21.co.kr

---



**신 휴 성**  
한국건설기술연구원  
지하구조물연구실  
선임연구원  
E-mail: hyushin@kict.re.kr

---



**김 영 근**  
삼성물산(주)  
건설부문 토목ENG팀  
부장  
E-mail: babokyg@hanmail.net

---