

地下空間開發技術에 있어 岩盤力學의 役割

李正仁¹⁾

A Role of Rock Mechanics in Underground Space Technology

Chung-In Lee¹⁾

1. 서 론

최근 우리나라에도 원유, 제품석유, 액화가스 등의 에너지 자원을 지하에 비축하거나 피크전력 공급조절을 위한 지하양수발전소가 건설되고 있으며 원자력발전소의 핵폐기물을 영구 보관하는 지하시설의 건설도 시급한 실정이다.

이와 같은 시설은 지하 100m 이상에서 1000m깊이의 심층 지하 암반내에 500m²-1200m²의 대단면의 공동을 포함한 부속터널 등을 굴착하여 이를 반영구적으로 안전하게 유지 시켜야 하므로 그 설계 및 시공과정에서는 암반역학 및 암반공학적 해석과 검토가 필수적이다. 또한 도시지하철, 고속전철, 도시지하차도 등의 교통시설과 지중송전선, 통신선 등 지하공동구, 지하상가등이 40m이내의 지하 천부에서 건설되고 있으나 앞으로 도시화의 과밀현상에 따른 교통난을 해결하고 이에 따른 여러가지의 지하공간을 적극적으로 활용하기 위해서는 막대한 토지보상비를 줄일 수 있고 지상구

조물과 교통에 지장을 주지 않는 지상구조물의 지하시설 기반지층 이하의 대략 50m에서 100m 사이의 심부 지하공간(일본에서는 이를 대심도 지하로 명명하고 있다)을 이용하는 계획이 이웃나라 일본을 위시하여 추진되고 있고⁷⁾, 우리나라에서도 지하철, 지하차도 시설을 중심으로 계획되고 있다. 이와같은 지하공간의 이용은 심부화와 더불어 이용단면의 대형화로 가는 추세에 있어 서울시를 중심으로 한 우리나라의 지질조건에서는 거의 대부분이 암반터널공법으로 개발되어야 하므로 역시 설계 및 시공과정에서는 암반역학 및 암반공학적 검토가 대단히 중요하다.

일반적으로 지하공간 이용을 위한 당면과제로서는 토지소유권의 지하한계에 대한 법제도의 사회적 합의 형성이 필요하지만, 기술적인 면에서는 (1) 조사, 설계기술, (2) 굴착, 시공 기술, (3) 안전대책으로서의 지하환경, 재해방지, 운용관리 기술, (4) 경제성 등이 구체적으로 당면한 기술적 과제라고 볼 수 있다.

*1992년 6월 접수

1) 正會員. 서울대학교 공과대학 교수

이러한 기술적 당면과제를 해결하기 위해서는 암반역학, 암반공학, 물리탐사, 지질공학, 지하환경공학(지하수, 환기, 소음, 재해 등) 등 자원공학, 토목공학, 지질학의 광범위한 응용이 필요하지만, 이 중 지하공간 개발기술에 있어 조사, 시공, 설계 단계에서 가장 핵심이 되는 암반역학의 응용 및 역할을 중심으로 설명한다.

2. 지하공간 개발을 위한 터널의 설계순서

지하공간 개발을 위한 대형 암반터널의 설계에서는 대상 후보지에 대한 예비자료를 수집하여 지표지질조사와 물리탐사, 극히 한정된 시추조사에 의하여 암반역학적인 실험실시험과 현장시험으로 후보지의 각 지역에 대한 암반을 공학적으로 분류하여 경험적인 방법에 의하여 타당성을 조사하며 타당성이 입증된 부지에 대해서는 다시 상세한 부지특성을 조사하여 설계를 위한 각종 지질, 암반의 입력자료를 얻고, 이 자료를 사용하여 안정성 해석을 한 후 설계가 이루어진다. 일반적으로 개발목적과 용도에 따른 터널의 기능, 크기, 형태, 배열, 굴착방법에는 공학적 제약조건이 있으며 설계의 목적은 어디까지나 안전성과 안정성, 경제성에 바탕을 두어야 한다.

그림 1에서 그림 6까지는 이와같은 대형 암반터널의 상세한 설계순서를 표시하고 있다.⁶⁾

한편 지하공간을 굴착, 시공하면서 안정성을 확인하고 설계시 고려했던 부지특성과 굴착과정에서 확인된 암반과의 차이점에서 오는 설계의 보완을 위하여 관찰과 계측을 하게되는데 그 결과를 역해석하여 다시 정확한 암반특성을 구하여 다시 설계변경 등에 반영하는 피드백(feed back)과정을 그림 7에 표시하였다.

이상의 설계 및 시공과정의 각 단계에서 암반역학의 응용내용을 구체적으로 소개한다.

3. 설계의 입력자료를 얻기위한 시험, 조사 단계에서의 암반역학의 적용

지하공간개발을 위한 대형터널을 설계하는데 있어 가장 어려운 작업중의 하나가 신뢰성 있는 입력자료를 얻는 일이다. 잘못된 입력자료에 의한 설계는 불합리한 설계의 원인이 되기 때문이다. 설계에 필요한 입력자료에는 지질학적 부지의 특성, 암반의 초기응력, 암반의 강도와 변형계수, 지하수 등의 정보가 포함되는데, 이를 얻기 위해서는 각종 암반역학적인 시험과 조사가 수행되어야 한다.

표 1은 국제암반역학회(ISRM)에서 국제 표준화를 위해서 제안한 시험 및 조사법의 항목을 일괄표로 나타낸 것이다. 표 1의 시험법중 실험실시험(index 시험과 design 시험)은 국내에서 거의 모든 항목에 대하여 시험이 가능하고 실제 각종 터널공사 사업에도 시추코어에 대한 여러가지 항목에 대하여 시험이 실시되고 있으므로 무결암(intact rock)의 강도, 변형계수 및 기타물성을 얻을 수 있다. 그러나 현지 암반은 여러가지 불연속면을 포함하고 있어 치수 및 형상효과 등으로 실험실에서 얻어진 결과를 직접 설계에 적용 할 수 없다.

현장시험(design시험, 각종 시추공 물리검층)은 공내 재하시험이나 탄성파탐사, 지하수 측정 등을 제외하고는 국내 실적이 있다고 할지라도 극히 제한된 터널공사나 광업분야에서의 실적이다. 신뢰성 있는 입력자료를 얻기 위하여는 현장시험을 수행하는 것이 중요하며 특히 설계에 필요한 현지암반의 변형계수 및 강도를 얻기 위하여 현장 변형계수 시험과 원위치 전단시험은 세계의 주요 공사에는 필수적으로 시행되고 있다. 현재 우리나라의 주요 터널공사에서는 전체 공사비의 1%미만의 이들 시험비를 책정하지 않고 추정치를 해석에 사용함

으로써 불합리한 설계로 인하여 몇 배, 몇 십 배의 공사비를 부담하는 어리석음을 범하지 말아야 할 것이다. 시험은 많이 할수록 공사의 질을 높일 수 있다는 교훈이 중요하다.

한편 암반내에 터널을 굴착하게 되면 암반내에 존재하던 초기응력의 교란을 야기시켜 터널 주위에 응력의 재배치가 일어난다. 따라서 공동주위 암반의 응력분포, 변위, 이완대 등을 수치해석적 방법으로 산정하기 위하여 입력자료로써 초기응력의 측정은 대단히 중요하다. 초기응력의 측정방법은 여러가지가 있으나 오우버코어링에 의한 응력개방법, 수압과쇄법에 의한 방법이 가장 많이 이용되고 있다.

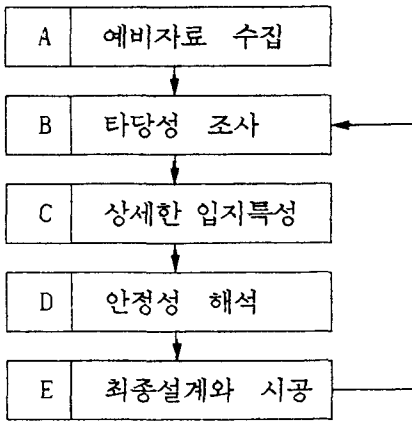


Fig. 1 암반터널의 상세설계 순서

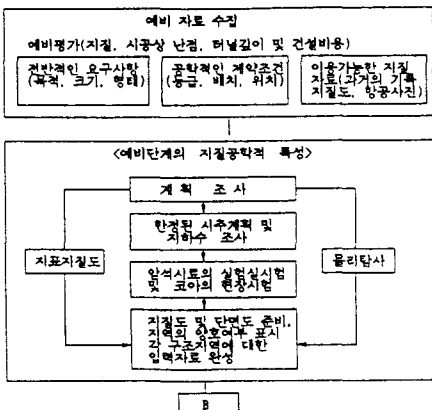


Fig. 2 A단계의 설계내용

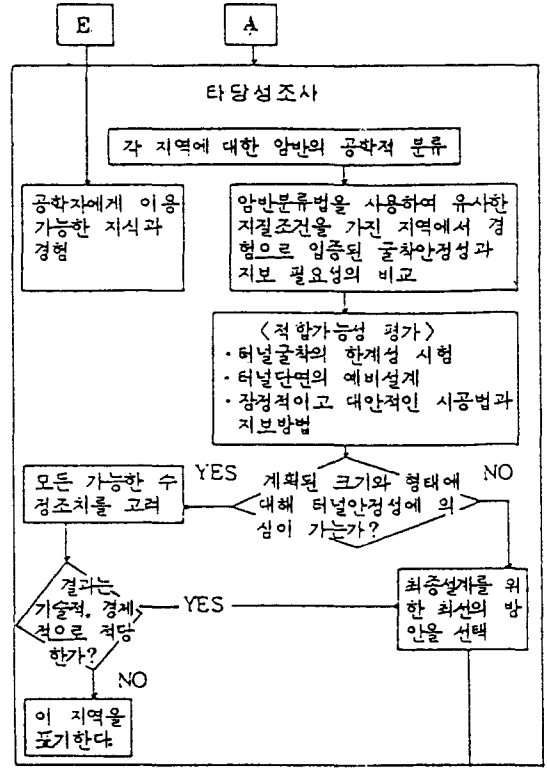


Fig. 3 B단계의 설계내용

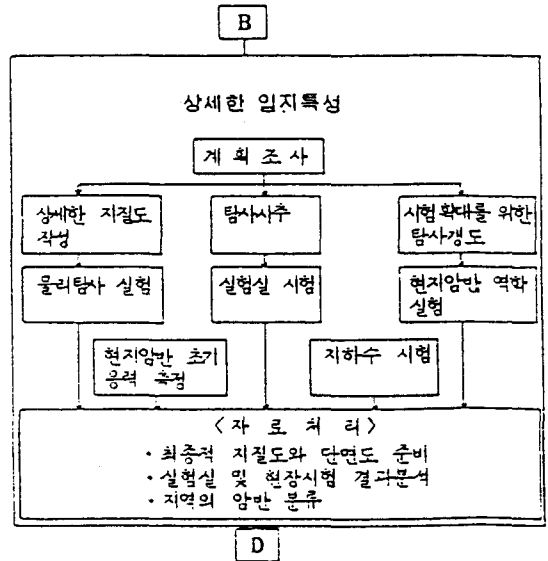


Fig. 4 C단계의 설계내용

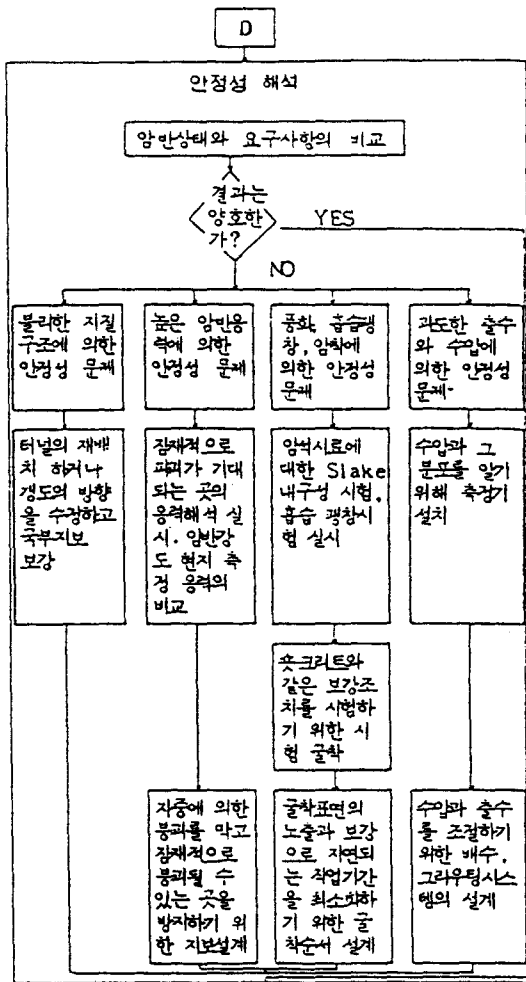


Fig. 5 D단계의 설계내용

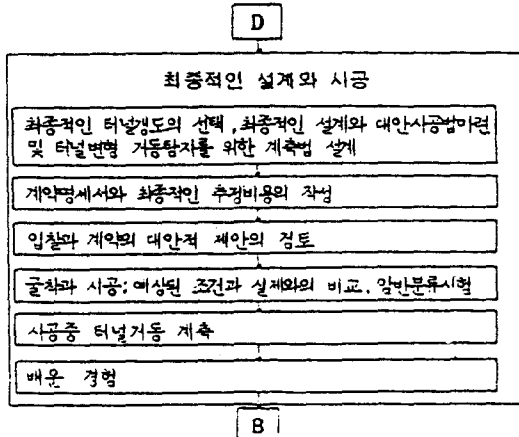


Fig. 6 E단계의 설계내용

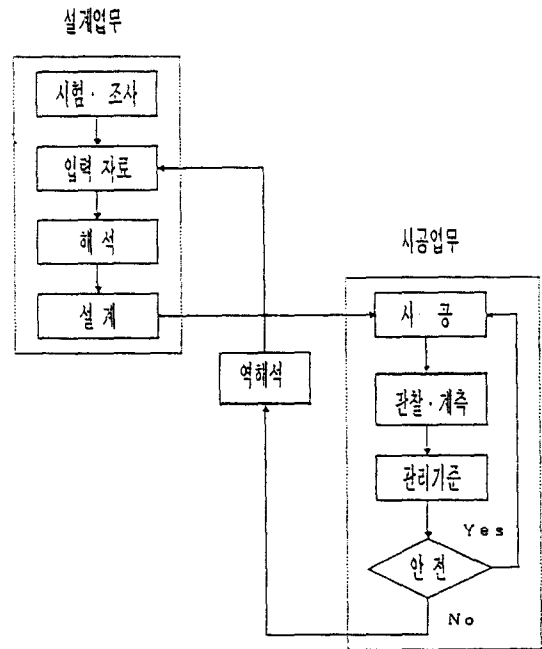


Fig. 7 정보화 시공에서의 설계, 시공과 계속, 해석과의 관계

Table. 1 국제 암반역학회(ISRM)가 제안한 시험조사법

FIELD INDEX TESTS FOR CHARACTERIZATION	국립 적용	국내 시험 여부
Discontinuity orientation	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity spacing	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity persistence	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity roughness	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity wall strength	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity aperture	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity filling	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity seepage	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity No. of sets	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity block size	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Discontinuity grill core recovery R _{Q,D}	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Geophysical logging of borehole	x	<input type="checkbox"/>
Seismic refraction (2 method)	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Acoustic logging	x	<input type="checkbox"/>
Seismic measurements between boreholes	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>
Sonic log	x	<input type="checkbox"/>
Caliper log	x	<input type="checkbox"/>
Temperature log	x	<input type="checkbox"/>
SP log	x	<input type="checkbox"/>
Resistivity log (2 method)	x	<input type="checkbox"/>
Focused current log	x	x
Induction log	x	x
Gamma ray log	x	<input type="checkbox"/>
Neutron log	x	x
Gamma - gamma log	x	x

FIELD QUALITY CONTROL TEST	국내 적용	국내 시험 여부
Rockbolt anchor strength	△	□
Rockbolt tension (torque wrench)	x	□
Rockbolt tension (load cell)	x	□
Cable anchor test	x	□
Shotcrete- visual assessment	○	□
Shotcrete- pull tests	x	?
Shotcrete- box mould tests	x	□
Shotcrete-core testing	x	□
Gas level measurement	x	?

FIELD "DESIGN TEST"	국내 적용	국내 시험 여부
Deformability using a plate test	△	x
Deformability plate test down a borehole	x	x
Deformability radial jacking test	x	□
Deformability flexible borehole jack	○	□
Deformability rigid borehole jack	○	□
Deformability flatjack	x	x
Deformability in-situ uniaxial triaxial test	x	x
Shear strength- direct shear	x	x
Shear strength- torsional shear	x	x
Piezometric head (3 method)	○	□
Permeability transmissivity(5 methods)	○	□
Flow velocity logs	x	?
Flow velocity-tracer dilution	x	□
Flow path using tracers(4 methods)	x	?
Stress determination -flat jack	x	□
Stress determination-surface coring	x	x
Stress determination-doorstopper	x	x
Stress determination-strain gage cell	△	□
Stress determination-USBM type gage	△	□
Stress determination-hydraulic fracturing	△	□

FIELD MONITORING	국내 적용	국내 시험 여부
Movement- probe inclinometer	x	?
Movement- fixed in place inclinometer	x	?
Movement- tiltmeter	x	?
Movement-borehole extensometer	○	□
Movement- convergence meter	○	□
Movement- joints & faults	x	□
Movement- survey triangulation	○	□
Movement- survey levelling	○	□
Movement- survey offset	○	□
Movement- survey EDM	?	?
Vibration & blast monitoring	○	□
Pressure hydraulic cells	x	□
Rock stress vibrations	x	□
Pendulum & inverted pendulum	?	?
Strains in lining & steel ribs	△	□

LABORATORY INDEX TESTS FOR CHARACTERIZATION	국내 적용	국내 시험 여부
Water content	○	□
Porosity / density(4 methods)	○	□
Void index (quick absorption)	○	□
Swelling pressure	○	□
Slake-durability	○	□
Uniaxial compressive strength	○	□
Uniaxial deformability(E, ν)	○	□
Point load strength index	○	□
Resistance to abrasion (Los Angeles test)	○	□
Hardness(Schmidt rebound)	○	□
Hardness(Scleroscope)	○	□
Sound velocity	○	□
Petrographic description	○	□

LABORATORY, DESIGN TESTS	국내 적용	국내 시험 여부
Triaxial strength	○	□
Direct tensile strength	○	□
Indirect(Brazil) tensile strength	○	□
Direct shear test(+field method)	○	□
Permeability	x	□
Time dependent & Plastic Properties	x	□
Fracture toughness using sheveron bend specimens	x	□
Fracture toughness using short-rod specimens	x	□

* (주) 국내적용실적 ○ : 대부분하고 있다
 △ : 극히 일부 하고 있다
 x : 거의 하지 않는다

국내시험가능 여부 □ : 의뢰하면 가능
 x : 현재불가능
 ? : 잘모른다

표 2는 필자와 공동연구자에 의하여 우리나라에서 측정된 암반의 초기응력을 나타내고 있다⁹⁾. 표 2에서 평균응력성분의 X,Y,Z, 좌표축은 각각 동서, 남북, 연직방향이며 주응력 S₁(최대), S₂(중간), S₃(최소)의 방위각은 α₁, α₂, α₃, 경사각은 하향 연직방향으로 부터 β₁, β₂, β₃를 나타내고 있다. 깊이 Z(m)에 따른 연직응력 σ_z(Mpa), 평균 수직응력 σ_h(Mpa) 및 연직응력에 대한 수평응력의 비 K값이 주요한 입력자료가 된다. 이러한 측정결과 연직응력의 크기, σ_z = 1.36 + 0.0233Z로써 세계적 측정치 σ_z = 0.027Z와 거의 일치하나, 평균 수평응력은 변동이 심하여 K=0.17-1.43, 수평응력의 이방성(σ_{h,max} / σ_{h,min}), I_a = 1.09-2.21임을 알 수 있었다. 앞으로 계속적 측정이 이루어져 자료의 보완이 되기를 기대한다. 그외에도 암반터널의 안정성에 영향을 주는 암반내 불연속면의 방향, 상태에 대한 조사가 설계가 이루어지기 전의 시추조사 단계에서 파악할 수 있는 방법(정밀시추 및 검층조사)이 강구되어야 할 것이다.

4. 설계단계에서의 암반역학의 적용

지하공간 개발을 위한 대형 암반터널의 설계 방법은 암반이 갖는 지질학적, 역학적 특수성으로 인하여 (1) 암반분류에 의한 경험적 설계 방법, (2) 수치해석에 의한 해석적 방법, (3) 현장계측에 의한 관측적 방법, (4) 지질적 위험성에 의한 방법, (5) 법규 등에 따르는 추종적 방법 등이 있고 설계의 의사결정은 이들 방법의 종합적 방법으로 이루어진다.

(1) 암반의 공학적 분류에 의한 경험적 설계방법

암반을 암석역학적 시험결과와 지질공학적 요소에 의하여 공학적으로 분류하고 이 분류등급에 따라 경험적 설계지표나 지점으로 굴착 및 보강방법을 적절히 설계할 수 있는 방법이다. 최근 암반분류법의 발달과 설계지표의 정확성이 향상되어 쉬운 설계방법으로 세계적으로 현장 실무기술자에게 실용적으로 이용되고 있다.

암반의 분류는 터널보강을 위하여 초기에는 철재지보(steel rib)나 라이닝 설계를 목적으로 시작되어, 록볼팅(rock bolting), 샷크리트(shotcrete) 등 보강시공 기술의 발전과 더불어 그 영역을 넓혀가고 있다. 분류방법은 Terzaghi의 암반하중에 의한 분류법, RMR(Rock Mass Rating)분류법, Q-system분류법 등이 있고, 그 분류요소 및 설계에 이용되는 사항은 표 3와 같다⁶⁾. 국내 지하철 터널에 대한 경험적 설계방법은 암반분류 방법을 표 4에, 지보 설계 방법을 표 5에 나타난 바와 같다. 이 기준은 암반의 분류방법에 있어 터널의 안정성에 영향을 미치는 불연속면에 대한 요소가 고려되고 있지않고 정량적으로 분류되어 있지 않아 시공과정에서 안전사고나 보완 및 변경을 요하는 경우가 많다.

표 6은 금정 사당선 공사구간에서 당초 설계

에 의한 시공과정에서 안전사고가 난 지점에 대하여 다시 상세한 부지조사에 의하여 RMR, Q값에 의한 분류를 한 후 계측자료의 해석에 의하여 보완, 변경한 사례를 보인 것이다¹⁰⁾.

(2) 해석적 방법에 의한 설계

암반을 수치 모델화 하는데는 두가지 방법이 있다. 하나는 암반을 여러 지질학적 불연속면들에 의해 분리되어 있는 연속체로 생각하는 것이고 다른 하나는 암반이 독립적인 블록이나 입자들의 집합체로 이루어진 불연속체라고 생각하는 것이다.

연속체 모델의 대표적인 경우는 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM) 등이 있다. 불연속체 모델을 이용한 수치 모델링 기법으로는 서로 독립된 블록들의 운동방정식을 이용한 개별요소법(Distinct Element Method, DEM)을 들 수 있다.

오늘날 수치해석 기법의 발달로 광산용 갱도나 토목용 터널에 대하여 2차원 또는 3차원 해석이 가능해 졌으며 여러 형태의 암반거동 즉, 선형 탄성, 탄소성, 점탄소성 등을 모델화 할 수 있게 되었다.

그러나 이러한 수치해석 기법들은 입력자료의 불확실성 때문에 절대적인 설계방법이 될 수는 없다. 오늘날 가장 널리 이용되고 있는 방법이 유한요소법이며 설계시 여러변수들의 영향을 검토해 볼 수 있는 효과적인 방법이 되고 있다. 유한요소법은 지하 심부암반 구조물의 예상 파괴지점을 예측하거나 서로 다른 지질조건을 모델화 하는데 실제로 이용되고 있다.

적당한 파괴조건식을 이용함으로써 터널 주위의 이완대를 예측할 수 있으며 이로부터 지보설계를 할 수 있다. 표 7은 현재 우리나라에서 사용되고 있는 터널설계용 수치해석 프로그램

Table. 2 우리나라 측정지역의 암반초기응력

장 소	깊이 (m)	암 석	추정수	主 応 力						평 균 응 력 성 분					
				S ₁	S ₂	S ₃	$\frac{\alpha_1}{\beta_1}$	$\frac{\alpha_2}{\beta_2}$	$\frac{\alpha_3}{\beta_3}$	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
삼 랑 진	150	流紋岩 (rhyolite)	5	- 6.85	- 5.3	- 3.08	110.8	16.9	10.5	- 6.37	- 3.41	- 5.20	- 0.59	- 0.78	-0.27
							96.4	143.8	98.8						
계 2 연화	200	石灰岩 (limestone)	7	-12.17	- 5.3	- 3.20	71.0	137.7	180.4	-10.24	- 4.80	- 5.63	- 0.62	- 0.63	-0.74
							106.5	35.7	123.1						
	440	石灰岩 (limestone)	4	-39.12	-18.38	-13.41	134	298	224	-25.78	-24.59	-20.47	-11.3	- 3.32	-4.0
							76	43	91						
上東광산	285	石灰岩 (limestone)	4	-10.72	- 6.83	- 2.72	313.3	37.2	128.6	- 5.82	- 7.25	- 7.19	- 1.34	- 0.53	-0.57
							104.3	30.9	92.3						
	594	粘板岩 (slate)	3	-22.43	-14.78	-10.69	132.3	262.2	219.1	-14.83	-12.7	-15.28	- 2.29	- 2.87	-0.9
							73.1	25.2	103.5						
江原탄광	802	砂 岩 (sandstone)	3	-51.87	-30.82	-17.16	182	84	92	-22.03	-50.92	-25.9	- 4.0	- 2.45	-6.60
							88	63	122						
鳳鳴탄광	701	세 일 (shale)		-15.8	-10.7	- 5.6 -57	234	39	131	- 8.5	- 8.8	-14.9	- 2.7	0.8	1.9
							156	113	95						
大成탄파	854	세 일 (shale)		-29.9	-19.6	-17.2	137	42	262	-24.7	-23.7	-18.0	- 4.9	- 2.5	-1.6
							103	108	158						

Table. 3 암반의 공학적 분류

분류 방법	분 류 요 소	실계에 이용되는 사항
Terzaghi	절리간격, RQD 및 암석조건에 따라 10 등급으로 분류	각 등급에 따라 터널지보에 작용하는 이완대(사하중)의 높이 결정
R S R	일반지질(A), 절리발달(B), 지하수 조건(C)의 3가지 요소로 분류, A 요소는 암석종류와 강도에 따라 4등급, 단층 및 습곡의 발달정도에 따라 4등급으로 분류하여 3-30 점으로 수치화, B 요소는 절리간격, 절리방향과 터널굴착방향에 따라 7-45 점으로 수치화, C 요소는 지하수량과 절리상태에 따라 6-25 점으로 수치화	규격별 철재 지보의 간격, 록볼트 간격, 슛크리트의 두께 결정 TBM굴착에 대한 보정치 결정
R M R	무결암의 압축강도(15%), RQD(20%), 절리간격(20%), 절리면 상태(30%), 지하수 유입(15%) 및 절리 방향에 따른 감점	암반사하중 높이, 지보필요성 유무, 터널 너비와 평균자세 유지기간, 암반의 점착력 및 마찰각, 록볼트의 길이 및 간격, 슛크리트와 라이닝의 두께
Q-system (N G I)	RQD(암질지수), Jn(절리군의 수), Jr(절리면의 거칠기), Ja(절리면의 변질강도), Jw(지하수에 의한 계수), SRF(응력에 의한 계수)의 6개 항목으로 $Q = [RQD/J_n] \times [J_r/J_a] \times [J_w/SRF]$ 에 의하여 Q 값 산정 후 9 등급으로 분류	무지보 최대터널폭, 영구지보 압력, 터널너비에 따른 지보 필요성의 판정 및 무지보 유지기간, 록볼트의 간격 및 길이, 슛크리트와 라이닝의 두께

Table. 4 서울시 지하철 4호선(413공구)에 대한 암질분류

명칭	1 종	2 종	3 종	4 종	비 고
암류					
암 종	경 암	중 경 암	연 암	중 화 암	
강도(탄성파속도)	4.5 km/sec 이상	4.4-4.0 km/sec	4.0-3.5 km/sec	3.5 km/sec 이하	
암질 상태	균열 및 절리가 거의 없고 견고하며 중화변질 및 불리적, 화학적 교대작용을 거의 받지 않은 신선한 암질체로서 대리석의 암상	균열 및 절리가 다소 발달되어 있고 약간의 파쇄대 가 존재하며 다소의 소단층이 발달되어 있는 상태에서 소의 약간의 편리도 포함하며 층상물 이루는 암상	중화작용에 의해 암상이 교대작용을 받아 층리 및 편리, 절리가 발달되어 있 는 암체로서 소의 상물 이루는 파쇄된 암상	물리, 화학적 교대작용에 의하여 파쇄대가 매우 발달된 상태에서 여러방향의 절리 및 다소의 단층을 포함하며 점토질이 많이 발달되어 있는 암상	절리 및 단층은 그 크기와 여러 방향성에 따라 암중의 분류를 결정하며 특한 단층의 경우 상반과 하반의 간격으로도 결정된다.
보링 코아상태	코아 채취물은 거의 90% 이상으로 추상을 이루며 압력은 20cm 이상으로 세 편은 거의 없는 상태 (RQD > 50%)	코아 채취물은 70%로서 완전한 추상은 되지 않고 다소의 세편이 포함되어 있는 상태 (30% < RQD < 50%)	코아 채취물은 40-70% 토 서 규암이 많고 5cm 이하 의 세편이 다량 포함되어 있는 상태 (RQD < 30%)	코아 채취물은 40% 이하로 서 서 거의 세편을 이루며 특히 각력암이 포함된 모 래상 또는 점토의 상태	
지하수 영향	용수량에 의한 영향물 거의 받고 최대 20 l/sec 이상일 경우 그라우팅 실시	용수량의 영향물 약간 받 으며 최대 15 l/sec 이상 일 경우 그라우팅 실시	용수량에 의하여 crack자 채가 영향을 받으며 최대 10 l/sec 이상일 경우 그라우팅 실시	용수량에 의해 암반자체가 상당한 영향으로 풍화되며 최대 10 l/sec 이상일 경 우 그라우팅 실시	용수량에 의해 암중구분은 곤란하나 용수량이 많을 경우 보통 암중은 1단계 낮게 사용될 수 있음
암 중 의 물성치	E	> 100,000 t/m ²	10,000 - 300,000 t/m ²	< 2,000 t/m ²	플성치에 의한 암중구분은 일반적으로 상층에 따라서 암중의 변화가 가능함
	ν	< 0.23	0.23 - 0.28	> 0.33	
	C	> 10 t/m ²	5 - 10 t/m ²	< 2 t/m ²	
	φ	> 35°	> 35°	< 35°	
	γ	> 2.4 t/m ³	2.2 - 2.4 t/m ³	2.0 - 2.2 t/m ³	
N지	> 100	> 100	> 50	< 50	
암 중 명	화강암, 섬록암, 규암	반려암, 편마암, 대리석, 슬레이트	조립현무암, 돌로마이트	석회암, 사암, 셰일, 석탄	암명에 따른 일반적인 분류로서 불성지에 따라 화가 큼

Table. 5 최대폭 11m, 높이 9m의 아치형 지하철 터널에 대한 암종 분류 및 지보방법

암종 분류	굴착 및 보강 순서	지 보 방 법		
		록 볼 트	강 지 보	숫크리트 및 라이닝
풍 화 암 (PD-3A)	굴착-1차와이어 메시-1차숫크리 트-강지보-2차 와이어메시-2차 숫크리트-록볼 트-3차숫크리트 -방수막-라이닝	-전면접착식 -직경 25mm, 길이 3m -16EA/단면 -간격 1-1.2m -와이어메시와 함께 체계적인 시공	-규격 H 125 -간격 1-1.2m	-1차숫크리트 T 50mm -2차숫크리트 T 150mm -3차숫크리트 T 50mm -콘크리트 라이닝 T 300mm
연 암 (PD-3B)	굴착-1차와이어 메시-1차숫크리 트-강지보-2차 와이어메시-2차 숫크리트-록볼 트-3차숫크리트 -방수막-라이닝	-전면접착식 -직경 25mm, 길이 3m -16EA/단면 -간격 1-1.2m -와이어메시와 함께 체계적인 시공	-규격 H 125 -간격 1-1.2m	-1차숫크리트 T 50mm -2차숫크리트 T 100mm -3차숫크리트 T 50mm -콘크리트 라이닝 T 300mm
중 경 암 (PD-4)	굴착-1차와이어 메시-1차숫크리 트-강지보-2차 와이어메시-2차 숫크리트-록볼 트-방수막-콘크 리트 라이닝	-전면접착식 -직경 25mm, 길이 3m -11EA/단면 -간격 1-1.2m -와이어메시와 함께 체계적인 시공	-규격 H 125 -간격 1-1.2m	-1차숫크리트 T 50mm -2차숫크리트 T 100mm -콘크리트 라이닝 T 300mm
경 암 (PD-5)	굴착-1차와이어 메시-1차숫크리 트-록볼트-방수 막-콘크리트 라 이닝	-전면접착식 -직경 25mm, 길이 3m -9EA/단면 -간격 1-1.2m -와이어메시와 함께 체계적인 시공	-	-1차숫크리트 T 100mm -콘크리트 라이닝 T 300mm

램의 기능 및 보유기관을 표시하고 있다.

(3) 현장계측 결과를 이용한 설계 및 시공관리 방법

계측을 이용하여 지하터널을 설계하는 것은 터널굴착 동안의 계측자료를 해석하여 그 결과에 부합하는 지보 및 굴착 방법을 결정하는 것이다. NATM공법에서와 같이 굴착, 시공과정

에서 계측을 실시하여 시공의 안정성 여부를 확인하고 다른 한편으로는 당초 설계에서 고려하였던 지반특성과 시공과정에서 확인된 암반과의 차이점에서 오는 설계의 보안을 위하여 계측결과를 역해석하여 정확한 암반의 변형계수나 초기응력을 재평가하여 다시 설계 변경

Table. 6 RMR과 Q값에 의한 암반분류 후의 지보방법 변경

암반 분류	굴착 방법	지 보 방 법	
		초기설계시 지보패턴	해석결과에 의한 설계
매우 불량 RMR < 20 Q < 0.01	*지반개량후 천반굴착 (1회 굴착량 0.5-1.5m) 또는 천반의 분할굴착 *굴착후 신속한 단면보강	*록 볼트 직경 25mm 록 볼트 길이 3m 록 볼트 간격 1-1.5m 와이어메시와 함께 체계적인 시공 *숏크리트 두께 (천반부 : 200mm) * 1-1.2m 간격으로 강지보 설치 (단면적:29.5 cm) *콘크리트 라이닝 (두께 300mm)	*록 볼트 직경 25mm 록 볼트 길이 3-4m 록 볼트 간격 1-1.5m 와이어메시와 함께 체계적인 시공 (그라우팅에 의한 지반개량 필요) *숏크리트 두께 (천반부 : 250mm 측벽부 : 150mm 막장면 : 50mm) * 0.75m 간격으로 강지보 설치 (단면적 > 29.5 cm) (steel lagging 실시) *invert 폐합 *콘크리트 라이닝 (두께300mm) *forepoling 실시

및 보완에 반영하는 피드백 과정이다.

1) NATM공법에서 암반거동의 계측

암반거동의 계측은 암반과 지보재 사이의 거동에 대한 정량적인 자료를 얻어 지하 터널굴착의 안정성을 결정하려는 것이 주요 목적이다. 여러가지 계측 방법 중 변위계측은 직접 계측할 수 있고 연속적인 측정이 가능하며 불안정한 거동의 정보를 알 수 있으므로 가장 효과적이다. 그림 8은 암반내 터널을 굴착했을 경우의 지압과 암반변위 사이의 관계를 나타낸 것이다⁹⁾. 그림에서 OA는 지보가 설치되기 전에 발생한 변위를 나타낸다. 설치전 지보가 완전 비압축성이라면 지보에 걸리는 하중은 선

AA'에 의해 표현된다. AC는 지보의 설치시기가 가장 적절한 경우이며 지보가 갱도벽과 함께 변형을 일으키다가 점 C에서 평형이 이루어진다. 이는 록볼트와 숏크리트에 의하여 가능한 한 굴착 후 빠르게 지보를 설치함으로써 암반자체의 지지력을 최대한으로 이용할 수 있음을 보여준다. 계측은 터널단면의 변형 즉, 내공변위와 암반내의 변위 즉 지중변위를 측정하며 때로는 암반 또는 콘크리트 내의 매설 압력계에 의해 응력을 측정한다.

2) 계측자료를 이용한 안정성 평가와 시공관리 계측결과를 이용하여 갱도의 안정성을 평가하는 방법은 첫째, 현지암반의 물성을 비교적

정확히 알 경우 이를 이용한 수치해석 결과와 계측결과를 비교하는 방법이다.

일반적으로 수치해석 결과에 비해 5-10배 가량의 변위가 발생하면 지보와 굴착방법을 재고해야 한다. 현장에서 계측되는 최대변위는 대개 12-57mm정도이다. 둘째, 변위증가 속도를 지침으로 삼는 방법이다. 경험으로 볼 때 0.001mm/day 정도이면 안전하고, 0.05mm/day 정도이면 불안한 상태이고, 1.0mm/day 이상이면 너무 과도한 변위가 발생하고 있음을 보여주며 보강을 필요로 한다. 셋째, 암반이나 지보재의 가능 변형량을 기준으로 삼는 방법이다. 계측된 변위는 지보재의 파괴범위를 넘지 않아야 한다.

그림 9는 변위측정을 정량적으로 평가하여 안정성 평가와 시공관리를 하는 과정을 나타낸 것이다.

3) 계측자료의 역해석에 의한 설계 보완 및 정보화 시공

그림 7 및 그림 9에 나타난 바와 같이 선진국에서는 최근에 계측자료를 이용하여 실측한 변위를 응력해석의 반대의 수준으로 역해석하여 암반의 변형계수와 초기응력을 구하고 이를 다시 입력자료로 하여 유한요소해석을 함으로써 시공중의 계측치를 설계변경에 반영하고 이를 토대로 터널의 역학적 안정성을 정확히 검토함과 동시에 초기설계를 보다 합리적으로 보완하여 시공의 경제성을 높이게 되었다. 이와 같은 방법을 정보화 시공이라고 부르기도 한다. 이 역해석의 방법을 간단히 소개하면 먼저 지하공동의 굴착면에서 암반의 초기응력 $\{\sigma^0\}$ 과 계측한 절점변위 $\{U^m\}$ 와의 관계를 다음과 같이 구한다.

$$\{U^m\} = \frac{1}{E} [A] \{\sigma^0\} = [A] \{\bar{\sigma}^0\}$$

여기서 $[A]$: 지하 공동의 형상과 암반의

포아송비에 의하여 결정되는 행렬

$\{\sigma^0\}$: 암반의 초기응력 ($\{\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0\}^T$)

$\{\bar{\sigma}^0\}$: 정규화 초기응력 (normalized initial stress, σ^0/E)

초기연직응력은 지표로부터 깊이 H와 암반의 단위중량 γ 의 곱에 비례하므로 정규화 초기응력 중 초기 연직응력을 이용하면 다음과 같이 탄성계수를 구할수있다.

$$E = \frac{\gamma H}{\sigma^0 - \bar{\sigma}^0}$$

위의 식에 의하여 탄성계수를 구하면 σ_x^0, τ_{xy}^0 를 다음과 같이 정규화 초기 응력으로부터 계산할수 있다.

$$\sigma_x^0 = E \bar{\sigma}_x^0$$

$$\tau_{xy}^0 = E \bar{\tau}_{xy}^0$$

즉 계측된 변위로 부터 암반의 탄성계수와 지하공동에 작용하는 초기응력값을 구할수 있다. 여기서 구한 탄성계수는 암반의 평균탄성계수를 나타낸다. 사용된 역해석의 순서도는 그림 10과 같다. 그림11은 서울시 지하철터널과 유류비축기지 지하공동에 대하여 실험실 및 현장 실험을 통하여 구한 암반의 탄성계수와 역해석으로 구한 탄성계수를 비교한 것이다^{3) 4)}. 그림 12는 지하철터널에서 계측변위를 이용한 역해석과 응력해석에 의하여 터널 주위에 분포하는 최대전단 변형율을 도시한 것으로¹⁰⁾ 이 결과와 암석의 임계전단변형율을 비교함으로써 이완영역을 결정할 수 있다. 그림13은 유공 울산 LPG저장터널에서 계측된 한단면의 역해석에 의한 유한요소해석에서 얻어진 변위와 실측변위를 비교한 것으로 ^{3) 4)} 오히려 실측치의 오차를 보완할수 있음을 알 수 있다.

Table. 7a 우리나라에서 사용하고 있는 각종 컴퓨터 프로그램

프로그램	기능 개요	보유기관
ADINA	<ul style="list-style-type: none"> - 구조해석 및 열전달 해석용 범용 유한요소프로그램 - 선형탄성, 재료비선형, thermo-plasticity, creep - 대변형, 대변형을, 선형 및 비선형 파괴역학, dynamic - Drucker-Prager 항복조건, Curve description model - 요소의 생성(Birth) 및 제거(Death) 기능을 이용한 터널의 굴착 및 보강순서에 따른 거동 해석 - Pre-Processor(ADINA-IN), Post-Processor(ADINA-PLOT) 	서울대
MR. SOIL	<ul style="list-style-type: none"> - 16 BIT PC 의 MS-DOS 상에서 운용되는 2차원 유한요소 프로그램 - 지반의 탄성, 완전소성, 불연속성 고려 - 성토 및 굴착, 절리, 압반과 구조물의 상호작용, 터널의 굴착보강순서 반영 - Goodman type joint 요소 - Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 항복기준 - CRT 및 Plotter 를 통한 결과 출력 	서울대 삼안건설 기술공사 대림 Eng.
VISCO - ELASTIC	<ul style="list-style-type: none"> - 터널 해석을 위한 점탄성 2차원 유한요소 프로그램 - 등방성/이방성 해석, 막장 진행 효과를 반영 - Voigt-spring creep Model - Griffith 파괴포락선과 Mohr 원의 관계에 의해 안전을 계산 	서울대 대우 Eng.
ELASTO - PLASTIC	<ul style="list-style-type: none"> - 지하공동의 안정성 해석을 위한 2차원 유한요소 프로그램 - 탄소성 거동, plain strain, strain softening - Hoek-Brown 경험파괴식 	서울대
MISES 3	<ul style="list-style-type: none"> - 터널의 굴착에 따른 응력 및 변형을 해석하는 범용 유한요소 프로그램 - 점탄소성 해석, 3차원 해석 - Associated flow rule, 이방성/등방성 - Von-Mises, Tresca, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 파괴조건식 - 불연속면의 반영, 온도와 seepage 해석, 굴착과정의 모델화 	삼우기술단
GEOSYS	<ul style="list-style-type: none"> - 지하구조물 주위의 응력 및 변형을 해석하는 범용 유한요소 프로그램 - Associated/non-associated flow rule, 이방성, 점탄성, 3차원 - elastic/strain hardening cap model, 일반화된 Mohr - Coulomb 파괴조건 - joint 요소 - 굴착보강 단계별 해석 - 유한요소망의 자동 생성, 그래픽 기능 	한국건설 기술연구원
U2 U2HT U2EQ U3 U3EQ	<ul style="list-style-type: none"> - 지하암반구조물의 안정성해석을 위한 유한요소 프로그램 - 등방/이방성 압반에 대한 2,3차원 탄소성 응력해석 - 선형/비선형 이방성 소성 항복조건, 열응력 해석 - 굴착 보강 단계별 해석, 탄취성(elastic-brittle) 파괴해석 - 온도-굴착-절리 연결 프로그램 - 3차원 불연속암반의 응력해석 	한양대

Table. 7b 우리나라에서 사용하고 있는 각종 컴퓨터 프로그램

프로그램	기능 개요	보유기관
UDEC, 3DEC	<ul style="list-style-type: none"> - 개별요소법(Distinct Element Method)에 의한 절리성 암반의 거동 해석하기 위한 2차원 및 3차원 해석 프로그램 - 비선형, 비탄성 joint 거동, 암반자체의 소성거동, joint 요소에서의 유체의 흐름, 무한경계 조건 - Newton의 운동방정식 이용 - 지진응답해석, 침투류해석, 열해석, 사면안정해석, 핵폐기물 저장해석, 지반의 지지력해석 	동일 Eng.
FLAC	<ul style="list-style-type: none"> - 유한차분법을 이용한 암반 및 흙의 2차원 거동해석 - 탄성, 이방탄성, 탄소성(Mohr-Coulomb), 점탄성 해석 - 라이닝, 록볼트 등의 모델화 - Darcy 법칙에 의한 침투류 해석, 열전도 해석 - 사면, 성토의 설계 및 안정해석, 터널설계, 핵폐기물저장 해석, 기초설계 	동명기술단
BO2, BO3, BO4, BO9, B10, B11, B12	<ul style="list-style-type: none"> - Block theory 를 이용한 사면 및 터널해석 프로그램 - 사면이나 터널단면에서 불안정한 암석블럭인 key 블럭을 규명, 보강량 결정 - 사면의 최대 안전각 결정 - Joint 방향에 대해 안전한 터널방향의 결정 - 터널단면 모양의 결정 	서울대
Slope Stability	<ul style="list-style-type: none"> - 절리군의 수, 주향, 경사각, 경사방향, 마찰각 등의 매개변수를 이용하여 사면의 파괴형태 및 사면의 안전각을 결정 	서울대
GEOKST	<ul style="list-style-type: none"> - 터널, 성토, 기초 등 여러 지반공학 관련문제를 해석하는 범용 유한요소프로그램 - Newton의 반복해석법 이용, Hyperbolic, Cam-clay, Cap모델 - 대칭/비대칭 강성 매트릭스 해석 가능 - Mesh generation, 굴착단계 simulation 가능 	한국과학 기술원
REA	<ul style="list-style-type: none"> - 흙-구조물 상호작용문제를 해석하는 유한요소 프로그램 - 선형 등방/이방성 탄성 모델, 쌍곡선/수정쌍곡선 모델 - Laplacian-Isoparametric scheme 이용한 요소망 자동 생성 - 시공조건 단계별 simulation 가능 	한국건설 기술연구원
TAFEM	<ul style="list-style-type: none"> - NATM을 이용한 터널굴착시 지반거동해석을 위한 탄소성 유한요소 프로그램 - Mohr-Coulomb 및 Drucker prager 항복조건 - Auto mesh generation과 plotting에 의한 요소망 검색 - 굴착 단계별 simulation 가능 	서명기술단
RAM	<ul style="list-style-type: none"> - 강체블록 개별요소 프로그램 - 블록성 암반내 터널의 안정성, 낙반, 블록의 미끄럼 및 운동 거동 해석 - 절리암반사면의 안정성, 붕괴양상, 암반사태(avalanche)에 의한 피해영향권 예측에 사용 	한양대

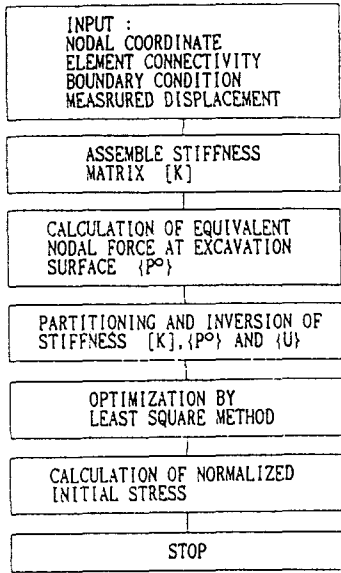
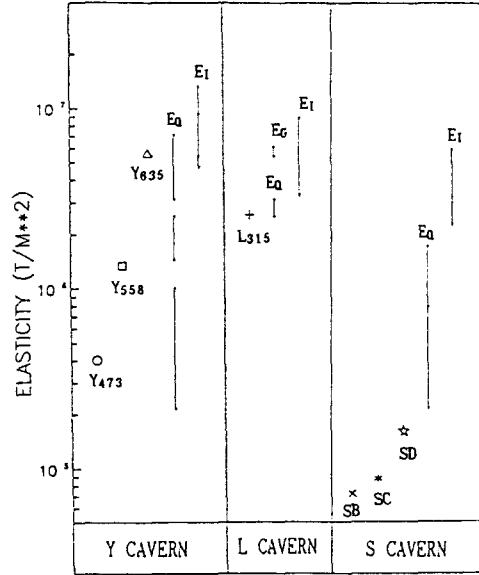


Fig. 10 역해석 프로그램의 흐름도

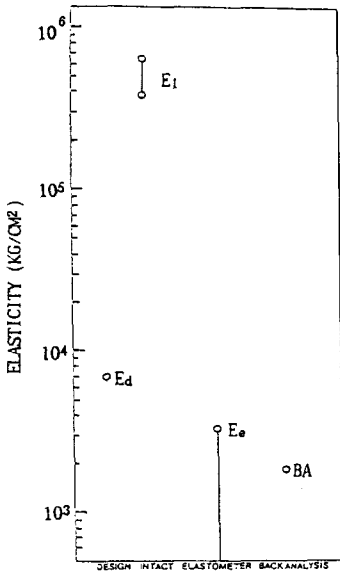


*주 E₁ : Elasticity in intact rock
 E₀ : Elasticity by Q value
 E_G : Elasticity measured by Goodman jack

SB, SC, SD, L₁, Y₁ : 각 지역 계측치의 역해석 값

(b) 유평비축기지 지하공동

Fig. 11 탄성계수 값들의 상호 비교



*주 E_d : 설계시 가정한 값
 E₁ : 무결암에 대한 측정치
 E₀ : 시추공 재하시험의 측정치
 BA : 역해석에 의한 탄성계수

(a) 서울시 지하철 터널 (5-41공구)

5. 굴착 및 시공에서의 암반역학의 응용

1) 발파설계 및 발파진동 조절방법에의 응용

smooth blasting, presplitting, line drill등의 조절발파법을 터널발파에 응용하여 터널벽면의 파잉파손을 방지함으로써 보강비를 절감하며 무장약을 이용한 심발발파의 표준설계에 암석 역학을 응용함으로써 발파효과를 높일 수 있다. 사실 지하공간 개발을 위한 터널굴착에 있어서 가장 경제적인 방법은 발파공법이다. 발파에 의한 진동소음의 경감법을 연구함으로써

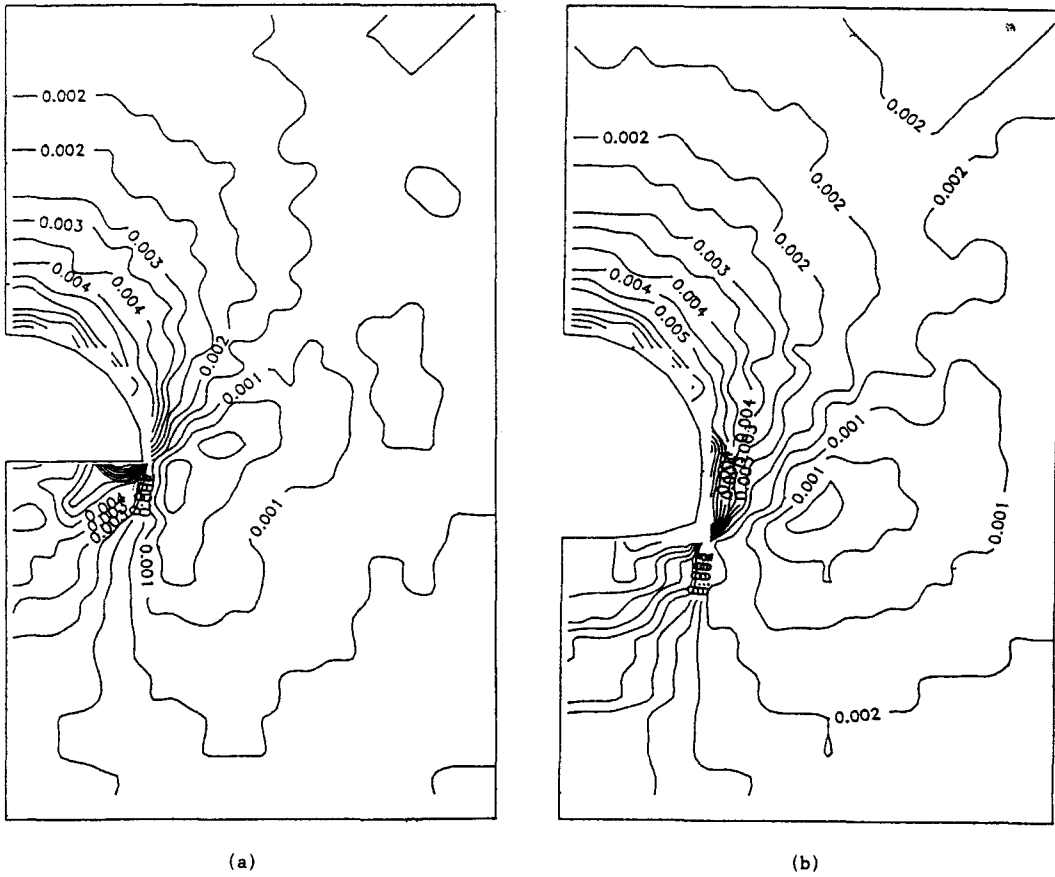


Fig. 12 터널 굴착후의 최대전단변형률(서울시 지하철 5-41 공구)

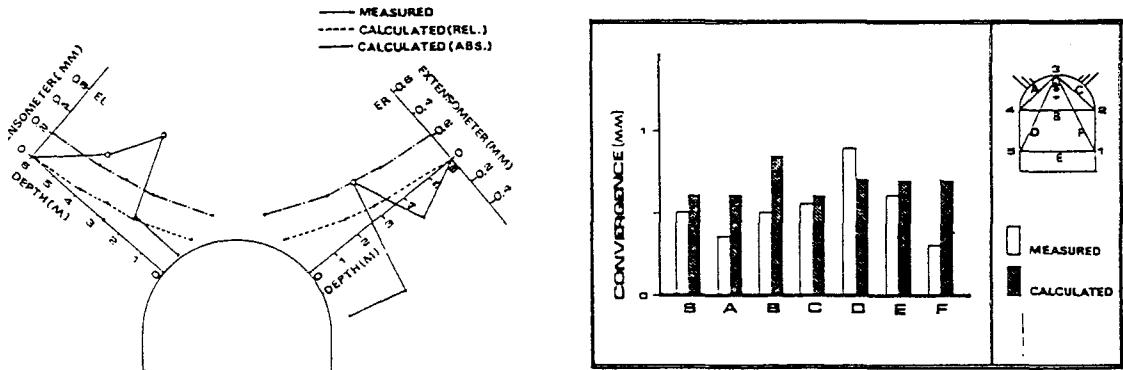


Fig. 13 유공 울산 LPG 저장터널 단면의 변위계측치의 역해석에 의한 계산결과와 실측치와의 비교

도심발파에도 충분히 이용될 여지가 있다. 최근에는 도심에서 건물해체를 위한 폭파공법의 적용이 그 가능성을 보여주고 있다. 암석의 균열전파와 관련한 파괴인성을 발파설계에 응용하거나 암반중의 탄성과 전파에 의한 발파진동의 조절법에도 암석역학의 응용이 기대된다.

2) TBM에 의한 터널굴착

지하공간 개발에 있어 TBM의 사용은 점차 늘어가고 있다. TBM에 의한 암반굴착에 있어 가장 중요한 인자는 굴진속도와 비트의 절삭마모이다. 이와같은 기계의 성능을 개선하는 방향의 연구에 있어 강도, 경도, 탄성계수, 파괴인성, 비에너지 등의 암석역학적 성질과 천공속도, 비트마모와의 관계에 대한 연구가 최근에 관심을 모으고 있다.

3) 지하환경 (지하수, 소음, 재해)에의 개발공학의 응용

지하자원을 개발하기 위하여 지하 1000m 심도까지의 복잡한 갱도망과 채굴공동을 갖고 있는 광산의 개발 및 지하환경을 위하여 적용하고 있는 개발공학의 기술과 이 분야에 종사하는 기술자를 앞으로 지하공간 개발에 활용할 수 있다. 특히, 석탄합리화 정책에 의하여 폐광되는 탄광의 기능공과 기술자를 3D현상에 의하여 인력부족에 허덕이는 터널건설 사업에 유도하는 정책이 필요하다.

6. 결 론

최근 암반역학의 눈부신 학문발전은 전자계산기와 각종 계측시험기구의 발달로 지하공간 개발을 위한 대형 암반터널 공사의 지반조사 및 시험에서 시공관리에 이르기까지 많은 기술 발전을 가져왔다. 즉 암석 및 암반의 조사 시험방법의 발달은 설계에 필요한 입력자료를 신뢰성 높게 구할 수 있으며 설계에서도 시공중

의 계측자료를 역해석하여 당초설계에서 고려하였던 암반특성과 시공과정에서 확인된 암반과의 차이점에서 오는 설계 보완을 가능하게 하여 소위 '정보화 시공'이 가능하게 되었다.

그러나 우리나라에서는 유류비축기지, 지하양수발전소, 지하철 등 공사가 활발히 진행되고 있음에도 아직도 설계를 위한 입력자료를 얻기 위한 시험과 조사에 대한 인식이 부족하여 설계에 이를 충분히 반영하지 못하며 시공과정에서도 암반조건의 변동을 신뢰성 있는 계측으로 확인, 이를 다시 설계보완에 반영하지 못하고 있는 실정이다.

암반역학과 관련 기술에 대한 보다 적극적인 연구로 앞으로 닥쳐올 지하공간 이용시대에 세계적으로 이 분야의 선진기술국으로 부상할 수 있는 날이 오기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. 이정인, 암석역학을 이용한 대형터널의 설계, 한국자원공학회 1991년도 춘계총회 특별심포지움 및 학술발표회 논문집
2. 임한욱, 지하대공동 구조물설계를 위한 암반조사, 한국자원공학회 1991년도 춘계총회 논문집
3. 이정인, 김치환, 1991, 현장계측치의 역해석에 의한 지하공동 주위암반의 응력해석 및 변형거동에 관한 연구(I), 터널과 지하공간 Vol. 1, pp. 75-90
4. 이정인, 김치환, 1991, 현장계측치의 역해석에 의한 지하공동 주위암반의 응력해석 및 변형거동에 관한 연구(II), 터널과 지하공간 Vol.1, pp. 204-217
5. 한국지반공학회, 1991, 지반공학에서의 컴퓨터 활용, 추계학술발표회 논문집
6. Bieniawski, 1984, Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling, A.A. Balkema

7. 地下 空間, 日本土木學會 編
8. Brown, 1981, Rock Characterization Testing & Monitoring, ISRM Suggested method
9. 임한욱, 이정인, 1991, 심도에 따른 암반내 초기응력의 변화와 그 경향성, 터널과 지하공간, Vol.1, pp. 91-101
10. 이정인 등, 1991, 현장계측치의 피드백에 의한 지하철터널의 안정성해석, 서울대학교 공학연구소