

해저터널의 특성을 고려한 계측 개념 및 관리 방안

박의섭¹ · 신희순¹ · 천대성² · 정용복^{2*}

¹정회원, 한국지질자원연구원 지하공간연구팀 책임연구원

²정회원, 한국지질자원연구원 지하공간연구팀 선임연구원

Management and concept of the monitoring system considering the characteristics of subsea tunnels

Eui-Seob Park¹, Hee-Soon Shin¹, Dae-Sung Cheon², Yong-Bok Jung^{2*}

¹Underground Space Research Team, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Principal Researcher

²Underground Space Research Team, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Senior Researcher

ABSTRACT: In order to ensure the safety of the subsea tunnel during its construction and operation, unlike the underground structures on land, the special monitoring system is essential which considers the characteristics of subsea tunnels in addition to conventional stress and displacement measurements applied to existing land tunnels. Therefore, the concept applied to NATM is reorganized to evaluate the stability of subsea tunnels. And the observation system for making a monitoring plan, the critical strain theory for tunnel safety management and MS monitoring methods for detecting the local failure and crack initiation of rock and supports, are introduced. Finally, the scheme of monitoring and management for subsea tunnels by using these methods is suggested.

Keywords: Subsea tunnel, Monitoring system, Critical strain, Warning level, Observation system

초 록: 해저터널은 육상의 지하구조물과 달리 시공 및 운영 중의 안전성을 확보하기 위해서는 기존의 육상터널에 적용된 응력과 변위계측과 더불어 해저터널의 특성을 고려한 계측이 필수적으로 요구된다. 따라서 해저터널의 안정성을 평가하고자 NATM에 적용되는 개념을 정리하고, 계측계획 수립을 위한 관측 시스템(observation system), 터널의 안전관리를 위한 임계변형을 이론과 국부적으로 발생하는 암석과 지보재의 파괴나 균열의 생성을 파악할 수 있는 미소파괴계측을 소개하고, 이러한 방법들을 사용한 해저터널 계측 및 관리방안을 제시하였다.

주요어: 해저터널, 계측시스템, 한계변형률, 경고 수준, 관측 시스템

1. 서 론

해저터널은 일반적인 육상터널과 달리 해수면 하부 지반에 위치하므로 기획, 조사, 설계 및 시공방법에 있어서 많은 차이점을 갖고 있다. 또한 해저터널은 지상터널과는 비교할 수 없는 초장대 터널로 시공되는 사례가 많기 때문에 예상치 못한 지층의 변화 또는 고수압에 의한 돌발적인 사태 발생에 대비한 고도의

시공 및 유지관리 기술이 요구되며, 지역적으로 크고 작은 단층대가 발달되어 있어 지상터널건설과는 다른 새로운 개념의 굴착 및 위험 대처기술이 필수적이다(Park & Shin, 2008). 특히 해저터널은 육상의 지하구조물과 달리 매우 높은 수압을 받는 구조물이다. 따라서 차폐 및 보강기술이 필수적으로 요구되며 시공 및 운영 중의 안전성을 확보하기 위해서는 기존의 육상터널에 적용된 응력과 변위계측과 더불어 해저터널의 특성을 고려한 계측이 필수적으로 요구된다.

일반적으로 해저터널이 가지는 주요 특성은 다음과 같다(Park & Shin, 2008).

*Corresponding author: Yong-Bok Jung

E-mail: ybjung@kigam.re.kr

Received September 13, 2013; Revised September 19, 2013;

Accepted September 24, 2013

- 1) 사업지역 대부분이 바닷물로 덮여 있어 외부로의 접근이 매우 제한적이라 해저지반특성을 파악하기가 매우 어려워 지질학적 불확실성과 위험에 더 큰 영향을 받는다. 따라서 해저지반의 지질학적 불확실성 및 위험요인을 최대한 배제할 수 있는 특수한 조사기술들이 적용되어야 하며, 조사결과 해석에서도 불확실성을 최대한 줄일 수 있는 기법들이 사용되어야 한다.
- 2) 해저터널이 통과하는 해협은 위치는 종종 기반암 내에 대규모 단층이나 연약대를 포함하고 있어, 어려운 시공조건을 야기한다. 이러한 구간에서의 해수유입은 터널 자립시간을 극적으로 감소시키며 심한 경우 막장 붕괴를 유발하기도 한다.
- 3) 해저터널의 양쪽 출입구로부터 경사져 진입해야 하므로, 지반상태의 파악이 매우 중요하다. 한편 터널 시공 중에 모든 장비 진출입 및 환기, 배수 등이 이 출입구를 통하여 행해지는 불리한 시공환경을 가지고 있다.
- 4) 터널 상부에 해수가 위치하고 있어 잠재적인 해수 유입은 무한정이고, 모든 유입수는 펌프를 이용하여 터널 외부로 배출해야 한다.
- 5) 유입된 해수는 염분을 함유하고 있어 터널 시공장비 및 암반 보강재료에 상당한 문제를 유발하므로 시공 및 운영 중에 심각한 영향을 준다.

이와 같이 많은 불확실성과 위험성을 가지고 있는 해저터널의 시공 및 운영 중에 발생 가능한 현상들을 예측하고, 이로부터 안정성을 평가함으로써 안정하고 경제적인 해저터널 프로젝트를 추구할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 해저터널의 안정성을 평가하고자 NATM에 적용되는 개념을 정리하고, 예측계획 수립을 위한 관측시스템(observation system), 변위속도와 함께 일반화가 가능한 것으로 알려진 임계변형률 이론과 해저터널에서 국부적으로 발생할 수 있는 파괴나 균열의 생성을 파악할 수 있는 미소파괴음 예측을 소개하고, 이러한 방법들을 사용한 해저터널 예측 및

관리방안을 제시하고자 하였다.

2. NATM 개념에서의 예측

해저터널은 해수면 하부지반 내에 존재하는 선형구조물로, 전체 길이에 대해 모든 조건을 사전에 조사한다는 것은 경제적 또는 기술적으로 한계가 있고, 사전 설계단계에서 획득되는 정보 역시 질과 양적인 측면에서 한계가 있을 수밖에 없다. 또한 해저지반거동은 지반조건뿐만 아니라 굴착방법이나 복공구조와 같은 설계조건, 그리고 시공조건에 따라 좌우되기 때문에 매우 복잡한 양상을 갖고 있다. 따라서 설계단계에서는 사전 조사결과와 시공경험을 기초로 대체를 그리지 않을 정도의 표준을 정하는 수준에 머무르고 있는 실정이다.

따라서 설계단계의 해석은 많은 경우 실제 거동과 다르기 때문에 시공하면서 터널을 관찰, 예측하고 이로부터 얻어진 정보를 근거하여 설계와 시공법의 타당성을 검토하고 필요에 따라 이를 변경, 수정한다. 즉, 현장예측의 결과를 설계, 시공에 적절하게 반영하면 경제적이고 합리적인 터널을 안전하게 시공할 수 있다는 것이다.

일반적으로 NATM 터널에서 실시하는 예측 목적은 다음과 같다.

- 주변 지반의 변형 거동과 상황 파악
- 지보(숏크리트 두께, 록볼트의 타설 길이, 간격 등) 효과 확인
- 최종 복공 시기의 결정
- 구조물로서 터널의 안전성 확인
- 인접, 중요 구조물 등 주변 환경에 미치는 영향 파악
- 지보 및 복공 구조의 설계, 시공의 최적화
- 설계 및 시공에 예측 결과를 반영한 성과 등을 비롯하여 향후 공사 계획의 참고자료로 활용

무엇보다 중요한 것은 터널 시공 중 유의사항과

획득자료의 상관성을 고려하여, 먼저 계측자료를 통해 공사상황과 안전성을 파악할 수 있고 공사 및 관리의 최적화를 이룰 수 있는 방법을 염두에 두고, 이어 시공 및 지질조건을 감안하여 가장 대표적인 지점이나 현상이 가장 드러나기 쉬운 곳에서 엄선된 항목을 계측해야 한다. 즉, ① 어디서, ② 무엇이, ③ 무엇이 위험해지는가를 파악하고, 문제가 발생하기 전에 그 징후를 파악하기 위해서 ④ 무엇을 대상으로, ⑤ 어떤 항목을, ⑥ 어떻게 계측해야 좋은가를 계획 시 명확히 설정해야 한다. 이는 불확실성과 위험성이 육상터널에 비해 매우 높은 해저터널에서는 매우 중요한 사항이므로, 조사 및 설계단계에서 파악된 조사정보를 최대한 활용하여야 한다.

계측항목의 선정에 있어서는 기존의 NATM 터널에 적용된 계측항목은 모두 적용해야 하고, 추가적으로 해저터널의 특수성인 해수 유입 가능성 및 유입량

을 판단할 수 있는 특수 계측이 추가되어야 한다. 또한 장기간의 해수 유입은 암반 및 지보재에 염분으로 인한 손상을 가할 수 있으므로 이에 대한 검토도 수행되어야 한다. 이와 동시에 선정된 계측센서에 대한 부식 가능성 또한 존재하므로 센서 선정시 센서 내구성을 육상터널에 비하여 더 엄격히 적용해야 한다.

계측위치는 일반적으로 터널규모, 지반조건, 시공법을 고려하여 계측목적에 부합하도록 선정하며 아울러 계측 상호간의 연관성이 파악될 수 있도록 배려한다.

일반적으로 육상터널에 적용되는 계측 A항목의 측정 간격은 다음 Table 1과 같다. 지표면 침하는 토피가 극히 얇은 터널 및 갱구부에서 매우 중요한 계측 항목이므로 일반적으로 5~10 m 간격으로 실시된다. 계측 B는 지반 조건에 따라 계측 A에 추가로 실시되는 것이기 때문에 일상적인 계측 관리의 보조 자료에 불과하지만, 계측 결과의 활용이라는 측면에

Table 1. Monitoring interval for vertical displacement and convergence (KTA, 2003)

Rock class	Condition	At Portal (from portal to 50 m)	Overburden < 5 D (D: tunnel diameter)	Initial stage of construction*	Some progressed stage of construction
Hard rock (except for fault zone)		10 m	10 m	20 m	30 ~ 50 m
Soft rock		10 m	10 m	20 m	30 m
Soil / Weathered rock		10 m	10 m	10 ~ 20 m	20 m

*Progressed stage of tunnel construction of about 200m

Table 2. Monitoring plans to be adopted for different ground conditions (modified from Singh & Goel, 1999)

No.	Ground condition class		Monitoring Plans
1	Competent Self-supporting		Conventional monitoring / section plan / criteria is applied
2	Incompetent Non-Squeezing		Conventional monitoring / section plan / criteria is applied
3	Ravelling		Conventional monitoring / section plan / criteria is applied
4	Squeezing	Minor squeezing (ua/a = 1-2.5%) Severe squeezing (ua/a = 2.5-5%) Very severe squeezing (ua/a = 5-10%) Extreme squeezing (ua/a >10%) (Hoek, 2001)	Short- / long-term monitoring shall be carried out Intensive inspection of allowable displacements and stresses Criteria is determined during design stage
5	Swelling		Complete a support ring / monitoring of water leakage / Initial closure of shotcretes
6	Running		Conventional monitoring / section plan / criteria is applied Monitoring of the amount of leakage / pore pressure / temperature of water (possibility of seawater invasion)
7	Flowing / sudden flooding		
8	Rock burst		Monitoring the Micro Seismic events

서 볼 때, 대표적인 구간에서 가능한 한 시공 초기 단계에 실시하는 것이 중요하다. 실시 단계에서는, 지반 상황의 변화 및 지보공의 변형 상태에 따라 수시로 계측 항목 및 측정 단면을 변경하여 현장에 맞게 계측을 실시함과 동시에 그 대비책을 정비해 두는 것이 중요하다.

하지만 불확실성과 위험성이 높은 해저터널의 경우엔, 해저지반 조사를 통하여 분석된 기반암의 형태 및 연약대의 위치 등 다양한 지반조건별 해수 유입 및 터널 붕괴 가능성을 검토한 이후에 이 결과에 근거하여 계측위치를 최종 설계하여야 한다. 그리고 향후 시공단계에서 더 많은 지질정보 및 계측자료를 통하여 계측위치는 상황에 맞게 수정 가능해야 한다.

Singh & Goel (1999)이 제시한 8가지의 다양한 지반 조건별로 취해야 할 대응방안을 해저터널에 맞게끔 수정하여 Table 2에 제시하였다. 기존 육상터널의 계측계획과 다른 점은 변위가 많이 발생하는 Squeezing, Swelling, Running 및 Rock burst 등의 지반 조건에서 장기간 계측, 다양한 해수 측정방법 및 미소지진음을 이용한 방법이 추가되었다는 것이다.

물론 계측 결과는 굴착에 따른 주변 지반 및 지보공의 거동을 나타내는 것으로, 현장 기술자가 현장 상황을 파악하여 정확한 판단을 내리기 위한 자료이다. 따라서 측정 후 곧 바로 시간별 변화도와 분포도, 막장 진행과의 관계(경로 변화도), 계측 위치, 시기, 단면 폐합 등의 특기 사항을 기입하여 알기 쉽게 정리하고 계측 항목 상호간의 관련성을 파악해야 한다.

계측 결과를 정량적으로 처리하는 첫 번째 방법으로 내공 변위량의 시간별 변화도와 같은 시간별 계측 데이터로부터 시계열 해석을 통해 굴착에 따른 단면의 변위를 예측하여, 굴착 과정의 지보공 및 지반의 안정성을 확인하고 대책공법을 세우는 방식이 있다. 두 번째 방법은 계측으로 얻어진 구조계의 변위, 변형도, 응력 등을 통해 지반 및 시공 상태와 기타 영향 인자를 포괄한 형태로, 현상을 가장 잘 설명할 수 있는 최적 구조 모델을 구축하고, 같은 지질조건에서

계속 시공할 경우의 지반 거동을 예측하거나 그 안정 상태를 평가하는 것이다.

3. 변위개념의 안정성 평가기준

3.1 서론

해저터널의 안정성과 성능을 평가하기 위해서는 시공 중과 운영 중 계측을 통해 터널의 안정여부와 함께 변위, 변위속도 또는 변형률의 발생에 따른 경고 그리고 대처방안이 제시되어야 한다. 그러나 Park et al. (2007)에 의해 수행된 국내외 자료를 살펴보면, 계측항목, 빈도, 설치 위치 등에 대해서는 어느 정도 보편화된 내용이 있으나 평가기준에 대해서는 확립된 방법이 없는 것으로 나타났다. 즉, 나라마다 터널시공 현장마다 서로 상이하며 평가기준치 설정에 대한 근거가 뚜렷하지 못한 실정이다. 그럼에도 불구하고 해저터널을 굴착하기 전에 각 측정 항목에 대한 위험경고수준을 설정하고, 해저터널 굴착시 측정값과 위험경고수준을 비교함으로써 빠른 시간에 해저터널의 안정성을 평가할 필요가 있다. 측정값이 위험·경고수준보다 작을 경우에는 해저터널의 안정성은 보장되지만 측정값이 일정기간이 지난 후에 위험경고수준보다 크게 예측될 경우에는 당초 설계를 변경하여 해저터널의 안정성을 향상시켜야 한다. 위험경고수준은 터널작업에서 매우 유용하게 여겨지지만 주어진 해저터널에 대하여 어떻게 위험경고수준을 결정하느냐는 문제가 있다. 이를 위해 터널의 변위 계측 결과를 평가하기 위해 도입된 임계변형률이 제안되었다.

3.2 안정성 평가기준 사례

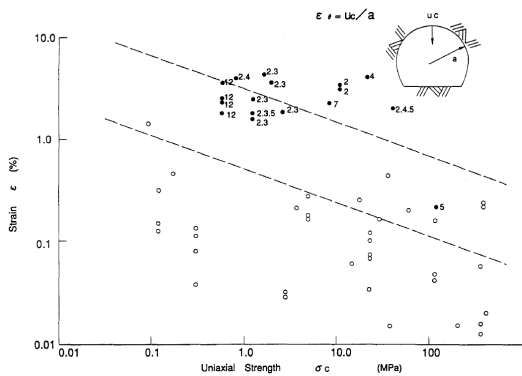
Sakurai et al. (1993)은 터널변형, 무결암의 일축압축강도 및 실제 터널사례를 통한 성능평가에 관한 자료로부터 제안한 임계변형률(critical strain) 개념에 근거한 경험적 안전 기준을 제시하였다. 이 기준은

일본의 터널사례를 중심으로 절리영향이 심하지 않은 암반강도를 가진 지반에서의 터널 안전을 평가하는데 주로 이용되어 왔다.

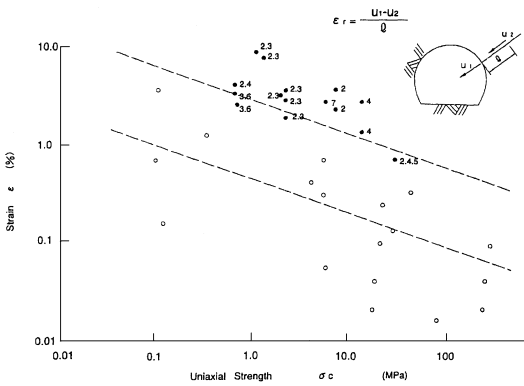
Fig. 1은 토질 및 암석의 일축압축강도와 식 (1)과 (2)로 계산된 변형률과의 관계를 나타내는데, 그림에서 점선은 실내실험으로부터 구한 임계변형률의 상한선과 하한선을 표시한 것이다(Sakurai, 1981).

Fig. 1 (a)와 (b)에서 굴착으로 인한 터널 주변의 변형률(ϵ_θ , ϵ_r)은 측정된 변위값을 이용하여 식 (1)과 (2)로부터 계산된다.

$$\epsilon_\theta = \frac{u_c}{a} \quad (1)$$



(a) Crown settlement



(b) Extensometer results

Fig. 1. Relationship between measured strain and warning levels (Sakurai, 1997)

$$\epsilon_r = \frac{u_1 - u_2}{l} \quad (2)$$

여기서, u_c : 천반침하량의 측정값

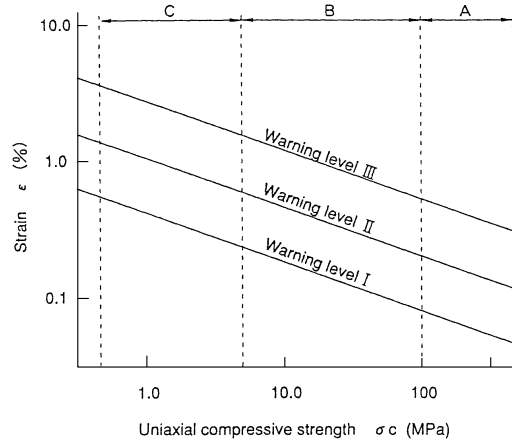
a : 터널의 반경

u_1, u_2 : 측정점 1과 2에서 측정된 내공변위량

l : 내공변위 측정점 사이의 길이

그림에서 숫자가 표시된 점들은 터널 굴착시 어려움에 직면하였던 터널 현장이고, 숫자가 표시되지 않은 점들은 그렇지 않은 현장의 자료이다. 터널 굴착시 터널의 안정성을 해치는 현상들은 막장면 유지의 어려움, 슛크리트의 파괴 및 분해, 강지보의 휨, 록볼트의 파괴, 천정 붕락, 그리고 인버트의 용기 등이다.

따라서 터널 주변에 발생하는 변형률이 임계변형률의 하한선보다 작으면 터널은 안정하며 발생된 변형률이 임계변형률의 상한선에 도달하면 터널은 불안정하여 굴착시 많은 어려움에 직면하게 된다. 이에



	A	B	C
I	0.3-0.5	0.5-1	1-3
II	1-1.5	1.5-4	4-9
III	3-4	4-11	11-27

(Unit: cm, Radius of tunnel : 5.0 m)

Fig. 2. Hazard warning levels for assessing the stability of tunnel (Sakurai, 1997)

acc. history	support condition	normal	abnormal
Northern Area Second Freeway Project		○	●
D&B section of Pinglin tunnel		△	▲
New Tienlun headrace tunnel		☆	★

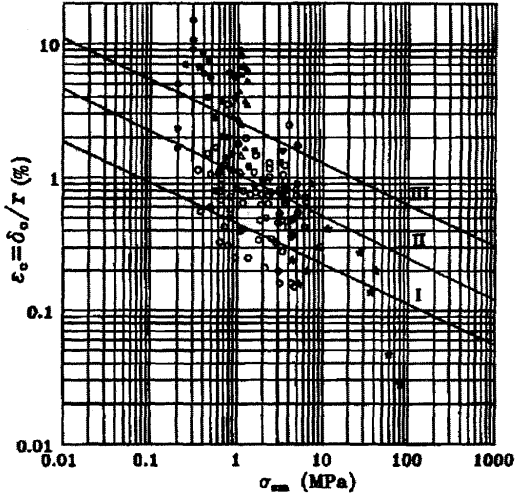


Fig. 3. Relationship between tunnel strain(ϵ_c) and uniaxial compressive strength of rock mass(σ_{cm}) from case histories studied (Chern et al., 1998)

Sakurai는 터널의 비정상적인 거동자료를 근거로 임계변형률을 적용하여 터널 안전관리를 위한 3단계 위험경고레벨을 제안하였다(Fig. 2). 터널 천단침하의 위험경고레벨은 식 (1)로 구한 변형률에 의해 결정될

수 있다. 예를 들면 반지름 5 m의 터널에서 천단침하에 대한 위험경고레벨이 Fig 2에 나타나있다.

Chern et al. (1998)은 Sakurai가 제안한 기준이 절리가 심하게 발달되어 파쇄된 암반에는 적용하기 곤란하다고 판단하였다. 이에 다양한 암반조건에 적용하기 위해 신선암의 일축압축강도(σ_c) 대신에 암반의 일축압축강도(σ_{cm})를 도입하였고, 암반 강도는 generalized Hoek-Brown criterion (1992)을 사용하여 구하였다. 그리고 대만의 터널현장 시공자료로부터 구한 결과를 근거로 터널안전관리기준과 발생한 터널 거동을 표시하였다(Fig. 3). 그림에서 흰색으로 표현되는 도형들은 정상(normal) 상태에 있는 터널단면이고, 검은 색 도형들은 다양한 수준의 비정상적인 거동을 보이는 터널단면을 의미한다. 일반적으로 측정 자료가 Sakurai (1993)가 제안한 터널안전관리기준의 경고레벨 II 이하로 떨어질 때에는 비정상적인 거동을 보이지 않는다고 언급하였다. 그리고 터널 거동이 이상할 경우 각 경고수준별 대책을 Table 3와 같이 제안하였다.

3.3 임계변형률 국내 데이터베이스

실내실험으로부터 구해진 일축압축강도와 영률로부터 임계변형률을 구할 수 있으며, 이때 임계변형률은 파괴시의 변형률보다 항상 작게 나타난다(Sakurai,

Table 3. Tunnel safety management criteria for different warning levels (Chern et al., 1998)

Warning level	Conditions	Necessary measures adopted
Below I	<ul style="list-style-type: none"> Tunnel is in stable condition 	<ul style="list-style-type: none"> No special measure is required
I ~ II	<ul style="list-style-type: none"> Tunnel is still in stable condition Construction work can be proceeded 	<ul style="list-style-type: none"> Frequency of monitoring and field observation shall be increased
II ~ III	<ul style="list-style-type: none"> Tunnel is susceptible of instability Construction shall be suspended temporarily 	<ul style="list-style-type: none"> Carry out detailed visual inspection on tunnel conditions and increase monitoring frequency Review the potential causes of tunnel instability including failure mechanism, quantity of support installed, excavation procedure and timing of support installation
Above III	<ul style="list-style-type: none"> Tunnel is in unstable condition Construction shall be suspended 	<ul style="list-style-type: none"> Carry out detailed inspection on tunnel conditions and increase monitoring frequency Review the causes of tunnel instability and carry out remedial measures Revise the support design or construction procedure Construction can be resumed only when the tunnel has been stabilized

1981). 또한 실험실과 현지암반사이의 임계변형률의 관계는 암종에 따라 달리 나타나는 것으로 알려져 있다. 따라서 해저터널 등의 안전기준을 수립하기 위해서는 국내 암석에 대한 많은 양의 임계변형률 자료가 필요하다.

국가공인시험기관(KOLAS)에서 수행된 국내 암석물성자료에 대해 일축압축강도, 탄성계수, 임계변형률, 초기응력 등의 자료를 포함하여 1,200여건을 조사하여 데이터베이스화하였다. 이를 분석한 결과, 일축압축강도는 최저 4 MPa에서 최대 325 MPa의 범위를 나타내었으며, 탄성계수는 0.2 GPa에서 80.1 GPa의 범위를, 임계변형률은 0.05%에서 2%의 범위를 보였다. Fig. 4는 실험실시험에서 얻어진 일축압축강도와 탄성계수에 대해 도시한 것으로, 알려진 바와 같이 일축압축강도와 탄성계수는 선형적인 관계를 보임을 알 수 있다. 이들에 대한 회귀분석에서 선형회귀분석이 가장 큰 상관관계($R^2=0.682$)를 보였으며, (탄성계수, GPa)= $6.271+0.216 \times$ (일축압축강도, MPa)의 관계를 보였다.

흙과 암석에 대한 임계변형률과 일축압축강도를 분석한 Park et al. (2007)의 연구에 따르면 임계변형률은 일축압축강도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 암석의 경우 임계변형률이 0.1%에서 1%의 범위를 보인다고 보고하였다. 또한 일축압축강

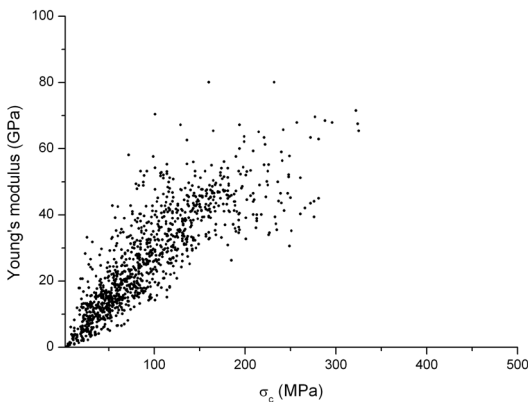


Fig. 4. Relationship between uniaxial compressive strength and young's modulus

도가 0.05 MPa인 토사에서 200 MPa인 경암에 이르기 까지 그 분산폭이 강도에 크게 영향을 받지 않으며 일정한 범위 내(약 10%)에서 연속적으로 변화하는 특징을 가지고 있는 것으로 보고한 바 있다.

Fig. 5는 국내 암종별 일축압축강도와 임계변형률 사이의 관계를 나타낸 것이다. ISRM (1981)에서 제시한 암석과 흙의 경계기준인 1 MPa이상의 암석에 대해서 조사한 결과, 약 40 MPa 이하의 일축압축강도를 제외한 범위에서 임계변형률은 일축압축강도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4에서와 같이 일축압축강도가 탄성계수와 비례관계를 보이고, 임계변형률은 이들의 관계로 정의되기 때문으로 분석

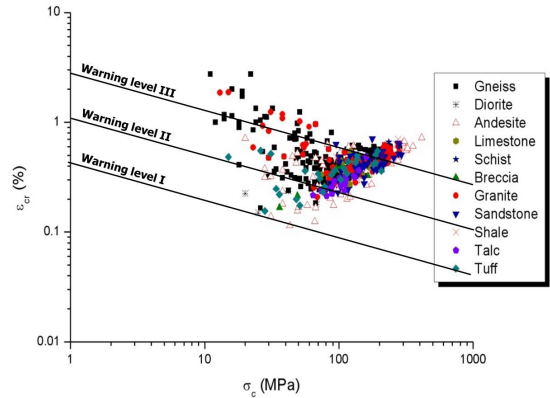


Fig. 5. Critical strains of different rock types and Sakurai's warning levels

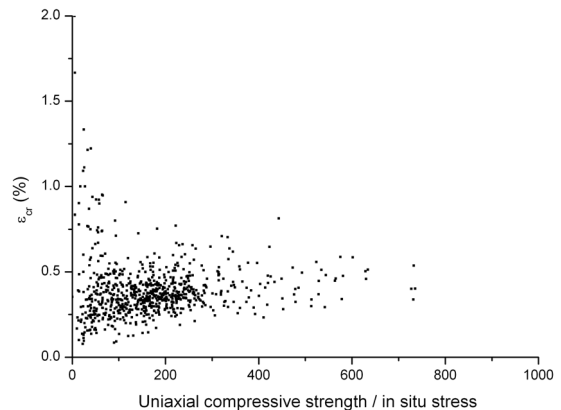


Fig. 6. Distribution of dimensionless critical strain by the in situ stress

된다. 임계변형률을 암종으로 구분하는 경우 암종에 따라 다른 형태의 경향성을 보일 수 있는 개연성이 있으나, 실험자료의 부족으로 명확한 경향성을 판단하기는 무리가 있는 것으로 판단된다.

따라서 임계변형률과 암석의 일축압축강도와와의 관계, 그리고 암종에 따른 변화경향 등은 지속적인 자료 추가를 통해 보다 명확한 관계를 규명해야 한다. 또한 향후 시공현장에 대한 자료의 수집을 통해 국내 지질 조건과 시공조건을 고려할 수 있는 자료의 추가가 필요하다.

Fig. 6은 Hoek (2006)이 제안한 초기응력과 일축압축강도를 고려한 무차원 임계변형률에 대해 분석한 그래프이다. 낮은 일축압축강도/초기응력의 조건에서는 임계변형률의 분포가 넓게 나타났으나 일축압축강도/초기응력이 높은 경우 일정한 임계변형률 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 미소지진음을 이용한 안정성 평가 기준

4.1 미소지진음의 개념

미소파괴음(Acoustic Emission, AE)과 미소지진음

(Micro Seismic event, MS)은 미세한 파괴를 동반해서 발생하는 탄성파동으로, 일반적으로 대규모 파괴에 앞서 그 발생이 현저하게 증가하는 경향이 있다. 또한 초동이 명료한 AE와 MS 파형을 기록할 수 있다면 단층면해석을 수행하여 AE와 MS 발생 원인이 된 주향/경사나 그 파괴를 발생시킨 주응력의 방향도 명확하게 밝힐 수 있다(Ishida et al., 2010).

AE와 MS 계측기법은 광산에서의 암반돌출, 천반 붕괴예측과 지반공학에서의 암반사면 안정성, 암반손상평가 그리고 대규모 지하구조물의 안정성 모니터링과 같은 많은 곳에 사용되어왔다. AE와 MS를 이용한 연구와 개발은 토목구조물(다리, 파이프라인, 항구, 터널, 파워플랜트, 지하구조물 등)의 변형을 계측하거나 국부적인 파괴에 대한 장기간 모니터링에 적용되어 왔다(Cai et al., 2007).

AE와 MS 이벤트는 낮은 에너지의 지진이벤트로 기존에 존재하던 균열의 갑작스런 이동, 새로운 균열의 생성 또는 균열의 전파와 관련되어 있다. 이들 이벤트는 주어진 암반 체적 내에서 발생하고 이들은 계측가능한 지진파로 전파된다. AE와 MS 신호의 가장 큰 차이는 AE 신호가 MS 신호보다 더 높은 주파수라는 것이다(Fig. 7).

이들 파형은 매질을 통해 전파하고, 매질에서 나오

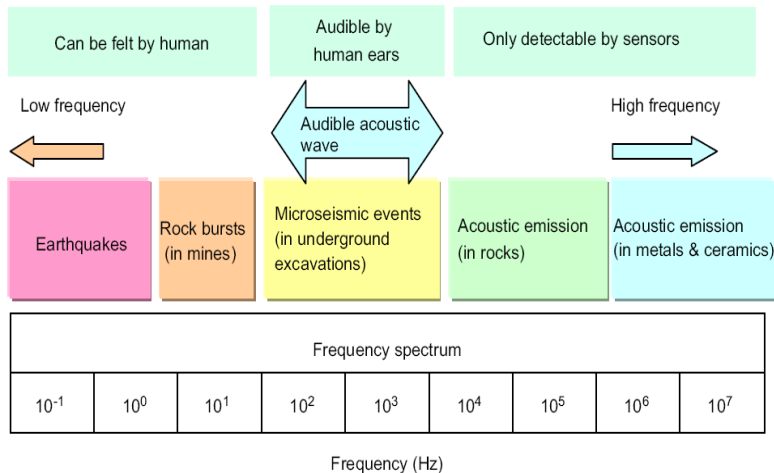


Fig. 7. Frequency spectrum of earthquakes and application range of AE/MS

는 탄성파를 계측하게 된다. 자료처리기술은 지진학자들이 수행하는 것과 유사하여 AE와 MS 이벤트의 특성, 즉 카운트의 수뿐 아니라 위치, 파라미터, 메커니즘을 결정한다. 이러한 방법으로 AE와 MS 이벤트를 생성한 균열이 간접적으로 조사된다. AE와 MS 카운트와 크기(에너지방출)는 암석에서 발생한 균열의 양과 크기를 의미하며, AE와 MS 이벤트의 발생위치는 암반구조물의 손상영역을 나타낸다. 미소균열의 분포는 시간에 따라 3차원으로 발생하고, 이는 손상의 누적과 균열의 결합, 매크로 균열의 전파를 나타낸다. 음원파라미터를 분석함으로써 파괴메커니즘이 규명되고, 손상상태 등을 정량화 할 수 있다.

즉, AE와 MS 모니터링 기법은 비파괴 평가기법으로, 다른 비파괴검사에 비교하여 터널에 대해 어떠한 교란을 발생시키지 않고 하중이 작용하는 동안에 발생하는 손상과정과 파괴과정을 모니터링할 수 있으며, 파괴예측을 위한 방법론으로 사용할 수 있다. 또한 AE와 MS를 이용한 계측은 터널 막장면으로부터 일정거리 떨어진 원격위치에서도 수행이 가능한 장점이 있다. 따라서 AE와 MS를 이용한 계측기법은 초기 단계에서 파괴의 시작을 감지하는 데 사용될 수 있으며, 그리고 터널이 완전히 파괴되기 바로 직전까지

또는 손상변형이 발생하기 전까지의 장기간에 걸쳐 사용할 수 있다. 또한 유지·관리 측면에서 터널의 건전도를 평가하는 데 사용할 수 있다.

기존의 내공변위나 응력 등의 계측이 터널의 전반적인 거동을 분석하기 위한 것이라면, AE와 MS 모니터링은 예상치 못한 국부적인 암반블록의 미끄러짐이나 균열 생성 등을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 변위와 같은 기존 계측항목과 더불어 AE와 MS 계측을 해저터널의 안정성 평가기준의 항목으로 적용할 경우 변위계측을 통한 해저터널의 전반적인 거동과 더불어 국부적인 파괴나 변형 거동에 대해서도 모니터링이 가능하다.

4.2 미소지진음에 의한 안정성 평가기준

MS 계측시스템으로부터 실시간으로 전송된 MS의 발생시간 및 위치, 파괴음의 크기를 바탕으로 MS의 시간당 발생빈도(일정시간내 발생한 이벤트의 수)와 MS의 시간당 합산크기(일정시간 내에 발생한 MS의 개개 크기의 합)를 안정성 평가기준으로 사용할 수 있다. 이들 기준은 변위속도와 단면변형률과 같이 발생수준에 따라 평가기준을 3단계로 구분하게 되며,

Table 4. Stability evaluation criteria based on MS event data (Hong et al., 2006)

Event location		Event magnitude (uMag)	Event frequency	
			Normal Level	Alert Level
Within blast damaged zone	Events occurring within the first 3 hours after blast (frequency / 1 hr)	-3.2 ~ -2.2	≤ 30	31 ~ 50
		-2.2 ~ -1.2	≤ 2	3 ~ 4
		-1.2 ~ -0.2	≤ 1	2 ~ 3
		> -0.2	0	1 ~ 2
	Events occurring continuously beyond the first 3 hours after blast (frequency / 3 hrs)	-3.2 ~ -2.2	≤ 10	11 ~ 30
		-2.2 ~ -1.2	≤ 2	3 ~ 4
		-1.2 ~ -0.2	≤ 1	2 ~ 3
		> -0.2	0	1 ~ 2
Outside blast damaged zone	Events occurring within 10x10x10m volume of rock irrelevant to blast (frequency / 3 hrs)	-3.2 ~ -2.2	≤ 10	11 ~ 30
		-2.2 ~ -1.2	≤ 2	3 ~ 4
		-1.2 ~ -0.2	≤ 1	2 ~ 3
		> -0.2	0	1 ~ 2

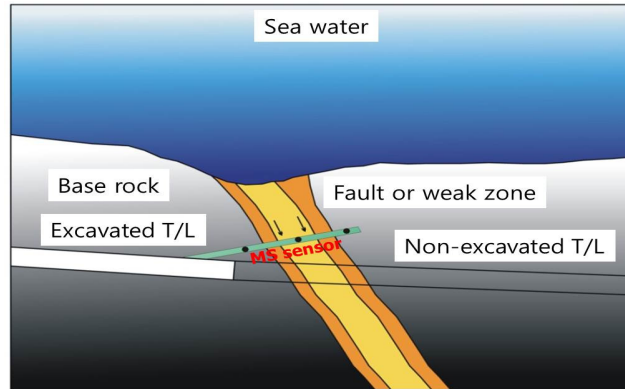


Fig. 8. Suggested MS monitoring plan for detecting the behavior of fault or weak zone during tunnel construction

경고항목에 따라 대처방안이 각각 달리 수립되어야 한다.

Table 4는 국내에 적용된 MS 계측시스템의 평가기준과 그에 따른 대처방안을 제시한 것이다.

표에서 보는 바와 같이 해저터널의 경고기준을 설정하기 위해서는 시공 중 일정기간의 계측을 통해 이벤트의 발생과 터널의 손상 및 위험정도에 관련되는 기준을 수립하여야 한다. 또한 발생하는 이벤트의 음원에 대한 분석을 통해 시공 중인 해저터널인 경우 발파나 천공 등의 터널작업에 의한 잡음여부를 판단해야 한다.

Fig. 8은 해저터널 공사 중에 예상되는 단층 및 파쇄구간 등의 연약대를 통과할 경우에 가능한 MS 계측(안)을 보여준다. 이와 같이 MS 센서를 연약대 통과 이전에 설치함으로써 굴착작업과 해수유입으로 인한 연약대의 거동 및 터널 막장의 안정성을 사전에 평가할 수 있다.

5. 터널용수량 기준에 의한 안정성 평가

해저터널의 경우 무한한 양의 용수가능성이 있으므로 육상터널에 비하여 파쇄대나 단층대 등을 통한 대형 출수가능성이 훨씬 높다. 따라서 선진수평보링을 통한 전방 예측이 필수적이며 적절한 용수량 측정을 통해 사전에 지수 및 차수를 통해 터널 안정성

및 작업자의 안전을 확보하는 것이 필요하다.

해저터널 시공경험이 많은 노르웨이는 Table 5와 같은 해저도로터널의 시공자료로부터 1차 경고기준으로 100 L/min/km, 2차 관리기준치로 300 L/min/km를 제시하였다. 이 값은 펌핑비용과 그라우팅 비용의 최적화에 기반하여 도출된 것이다.

물론 용수량 기준에 의한 안정성 평가는 국내 해저터널의 조사단계에서 해저지반의 수리특성 및 다양한 현장시험이 수행되어 용수량 추정이 비교적 정확하다면 문제가 없을 것이다. 하지만 아직까지 국내에서는 해저터널 관련자료가 적은 상황이므로, 조사자료가 불충분하다면 노르웨이의 터널용수량 기준을 참고로 하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다. 최근 보령-태안 해저터널의 공사가 진행되고 있으므로, 조사 및 설계 단계에서 산정한 터널용수량과 실제 시공 중에 발생하는 터널용수량을 비교할 수 있을 것이다. 향후에는 국내 해저지반 조건 및 공사조건에 맞는 기준을 설정하는 연구가 추가적으로 수행될 필요가 있다.

6. 해저터널에 대한 경고기준을 적용한 관측법(안)

경고기준(alarm threshold)을 가진 관측시스템은 보호 시스템으로 여길 수 있다. 여기서는 다음과 같이 정의한다(Olsson, 2002).

Table 5. Key data for completed subsea road tunnels in Norway (Blindheim & Øvstedal, 2002)

Tunnel	Year of opening	Length, m	Largest depth, m	Water ingress at opening, l/min-km	Grouting, kg/m	Water & frost protection, m ² /m
Vardo	1983	2,892	88	460	25	16
Ellingsoy	1987	3,520	140	310	10	14
Valderoy	1987	4,222	145			
Kvalsund	1988	1,650	56	200	0	9
Godoy	1989	3,844	153	300	430	7
Flekkeroy	1989	2,327	101	100	50	6
Hvaler	1989	3,751	120	100	15	6
Nappstraum	1990	1,780	60	200	40	8
Fannefjord	1991	2,743	100	140	15	7
Mausund	1991	2,122	92	210	5	4
Byfjord	1992	5,875	223	100	10	8
Mastrafjord	1992	4,424	132	25	5	8
Freifjord	1992	5,086	132	75	15	13
Hitra	1994	5,645	264	60	20	14
Tromsoysund	1994	3,376	101	265	30	18
Bjoroy	1996	2,000	85	400	665	13
Sloverfjord	1997	3,200	100	150	0	13
Nordkapp	1999	6,826	212	65	15	4
Oslofjord	2000	7,252	134	250	360	18
Froya	2000	5,305	164	105	200	17
Ibestad	2000	3,398	122	110	15	2
Bomlafjord	2000	7,900	260	70	30	8

“경고기준은 미리 결정된 하나 또는 몇 개의 계측변수의 조합으로 이루어진 값으로 만약 초과될 경우 손상 방지를 위해 사전에 결정된 대처법을 유발(trigger)시킨다”

경고기준은 단독 측정값일 필요는 없으나 관측하고자 하는 것과 관련이 있어야 하며 모호하지 않게 정의되어야 한다. 즉 우리가 무엇이 안전하고 무엇이 위험한지에 대한 경계를 구성하는 것이며 대처방법을 제시하는 기준으로 사용해야 한다. 관측시스템은 경고기준을 초과할 경우에 대비한 사전 대처방법이 없다면 불완전한 시스템이 된다. 이러한 방법들은 확인된 위험요인을 다룰 수 있어야 하나 정확한 손상기구가 확립되지 않은 경우에 대비하여 때때로 일반적인 대

처방법을 포함시킬 필요가 있다.

시스템적 접근법이 안전감시용 계측시스템 설계에 사용되어야 하며 기본적 요구사항은 항상 충족되어야 한다. 이 절차는 관련 프로젝트의 ‘자유도’에 의존한다. 여기서 ‘자유도’란 엄밀한 수학적 자유도를 의미하는 것이 아니라 말 그대로 현 단계에서의 대안 선택 가능성을 말하는 것이다. 예를 들면 위치를 바꿀 수 있는가? 최종설계로서 변경 불가인가? 다른 시공법을 사용할 수 있는가 등 현재 해당프로젝트 단계에서의 선택가능성을 의미하는 것이다. 따라서 프로젝트의 설계와 위치가 확정되고 시공법이 결정된 경우 제안된 관측법의 일반적인 절차는 Fig. 9와 같다.

시설물의 관리 및 유지를 위해 경고기준을 가진

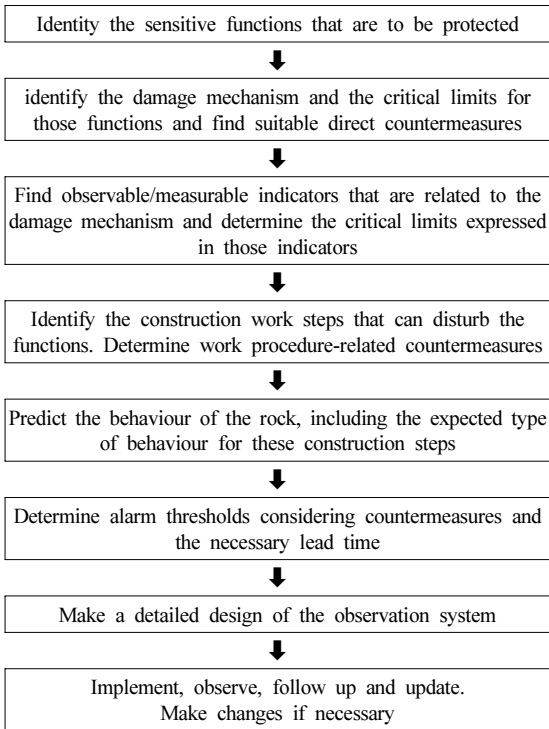


Fig. 9. Proposed procedure for observation system (Olsson, 2002)

관측시스템이 필요하며, 경고기준은 ‘손상이 발생할 지점을 정의한 한계값’과 ‘대처방법이 효과를 나타낼 때까지 걸리는 시간’의 양에 의해 결정된다.

본 논문에서는 해저터널에서 요구되는 보호기능과 손상기구에 따른 관측시스템(안)을 시공 중과 운영 중에 대해 Fig. 10과 같이 제안하였다. 제안된 관측시스템(안)은 계측시스템의 전반적인 정확성에 대한 평가, 경고기준 측정량의 예상거동에 대한 명확한 기술, 계측기기 선정과 구현, 품질보장에 대한 시스템의 확립, 적절한 목적값의 결정 등이 세부설계단계에서 적용되어야 할 것이다.

7. 결론

해저터널의 안전한 시공 및 유지관리에 있어서 계측과 계측관리수준 결정은 매우 중요한 사항이며 해저터널 굴착시 계측자료를 즉각 평가할 수 있도록 해저터널 시공 전에 관리기준을 결정해야 한다.

경험적 방법 외에 합리적으로 이러한 관리기준을 결정하기 위해서 임계변형률을 소개하였으며 기존의 계측항목 외에 AE와 MS와 같은 새로운 계측기법을

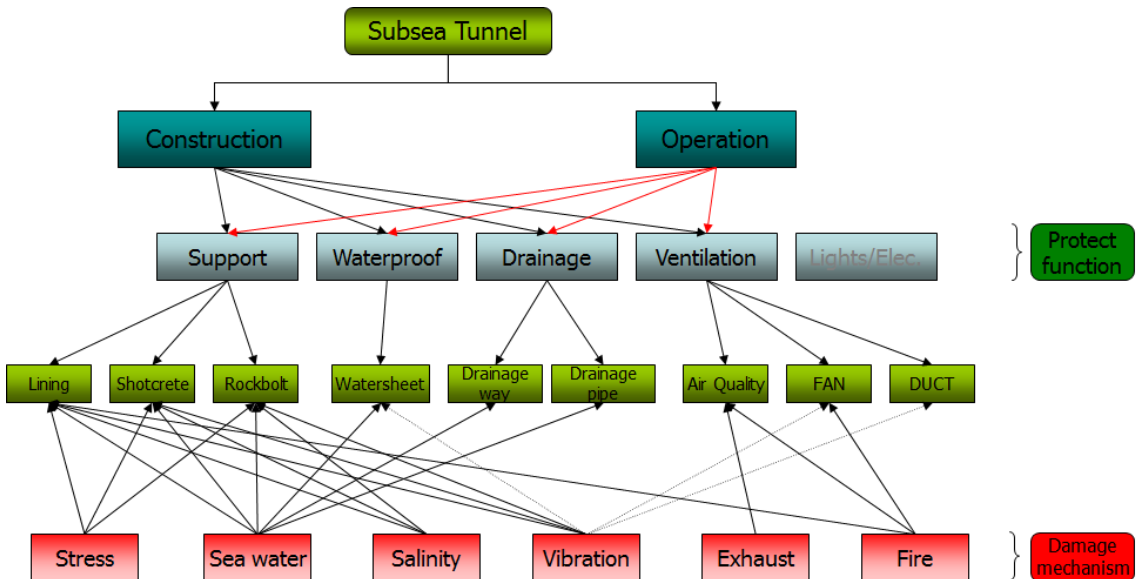


Fig. 10. Suggested monitoring system for subsea tunnels

소개하였다. 특히 습도, 온도 등과 같은 여러 환경요인에 영향을 받지 않는 장점이 있는 임계변형률은 신선암의 실험실 시험으로부터 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 측정된 변위(천단침하, 내공변위 측정)로부터 얻은 변형률과 임계변형률로부터 산정한 위험경고수준을 비교함으로써 터널의 안정성을 평가할 수 있다.

관측법 또는 정보화시공 개념을 적용한 계측시스템 설계방법론을 이용하여 시공 중과 운영 중에 대한 관측시스템(안)을 제시하였으며 이를 기반으로 실내 실험에서 획득한 임계변형률과 해수침투와 관련된 계측정보를 경고수준으로 포함해서 해저터널에 대한 관측시스템의 실시설계를 수행하는 것이 가능하다.

끝으로, 해저터널은 불확실한 지반자료와 막대한 해수 유입의 위험으로 인하여 일반적인 육상터널에 비하여 시공 중 계측자료가 매우 중요하다. 따라서 해수로 인한 염해 및 터널 상부로의 센서설치의 제약 등으로 인한 매우 어려운 작업환경에서 시공되기 때문에 계측기 선정에서부터 결과해석에 이르기까지 철저한 센서 내구성 검증 및 엄격한 안전관리기준을 적용할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지하 암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발’으로부터 지원되었습니다.

참고문헌

1. Blindheim O.T., Øvstedal, E. (2002), “Design principals and construction methods for water control in subsea road tunnels in rock”, Water control in norwegian tunnelling, Publication No. 12, Norwegian Tunnelling Society, pp. 43-49.
2. Cai, M., Kaiser, P.K., Morioka, H., Minami, M., Maejima, T., Tasaka, Y., Kurose, H. (2007), “FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavation”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 44, pp. 550-564.
3. Chern, J.C., Shaio, F.Y., Yu, C.W. (1998), “An empirical safety criterion for tunnel construction”, Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, pp. 325-330, Taipei, Taiwan.
4. Evert Hoek (2006), *Practical Rock Engineering* Course note, Rock mass properties, pp. 1-47.
5. Hoek, E., Wood, D, Shah, S. (1992), “A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses”, Proc. rock characterization: Eurock’92, pp. 209-213.
6. Hong, J.S., Lee, H.S., Lee, D.H., Kim, H.Y., Choi, Y.T., Park, Y.J. (2006), “Microseismic event monitoring of highly stressed rock mass around underground oil storage caverns”, Tunnelling & Underground Space Technology, 21(3-4), pp. 292.
7. Ishida, T., Kanagawa, T., Kanaori, Y. (2010), “Source distribution of acoustic emissions during an in-situ direct shear test: Implications for an analog model of seismogenic faulting in an inhomogeneous rock mass”, Engineering Geology, Vol. 110, No. 3-4, pp. 66-76.
8. ISRM (1981), “Basic geotechnical description of rock masses”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol 18, pp. 85-110.
9. Korean Tunnelling Association (2003), *Theory and Practice of Tunnel*, Goomi Book (in Korean). pp.309-354.
10. Lars Olsson (2002), *Observation systems with alarm thresholds and their use in designing underground facilities*, SKB R-02-45, SKB. pp. 47
11. Park, E.S., Shin, H.S. (2008), “Technical state of subsea tunnels-status and characteristics in domestic and oversea”, Journal of Korean Tunnelling Association, Vol. 9, No. 4, pp. 80-90.
12. Park, S.H., Shin, Y.S., Bae, G.J., Ahn, M.W., Woo, S.B. (2007), “Back analysis technique for tunnel safety using critical strain concept”, Korean Tunnelling Association Annual Conference, pp. 47-57.
13. Sakurai, S. (1981), “Direct strain evaluation technique

- in construction of underground openings”, Proc. 22nd US Symp. Rock Mech., Cambridge, Massachusetts, M.I.T., pp. 278-282.
14. Sakurai, S. (1997), “Lessons learned from field measurement in tunnelling”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 453-460.
15. Sakurai, S., Kawashima, I., Otani, T. (1993), “A criterion for assessing the stability of tunnels”, EUROCK '93, Lisboa, pp. 969-973.
16. Singh, B., Goel, R.K. (1999), *Rock mass classification: A practical approach in civil engineering*, Elsevier, pp. 48-49.