

## 내진 설계기준 상향에 따른 터널 구조물 영향평가 - 경주지진을 고려한 터널구조물의 내진안정성 검토를 중심으로 -



정우철

(주)건화 지반터널부  
차장



이준환

(주)건화 지반터널부  
부장



박사원

(주)건화 지반터널부  
이사



김영근

(주)건화 지반터널부  
전문

### 1. 개요

지난 2016년 9월 12일 경북 경주시 남남서쪽 약 9km 지역에서 규모 5.8의 지진이 발생하여 1978년 계기 관측 이래 우리나라에서 발생한 지진 중 최대의 규모를 기록하였다. 이로 인하여 많은 국민들이 건물의 흔들림을 체감하고 놀라 대피하는 실제 상황이 발생하였고, 또한 건물의 균열, TV의 전도, 도로 파손 및 이로 인한 부상 등 다수의 피해상황이 접수되기도 하였다. 이번 경주지진을 계기로 한반도는 더 이상 지진의 안전지대가 아님을 인식하고 지진시 재난방지와 국민안전성을 확보하기 위한 기술적 노력과 대응에 대한 요구가 증가하고 있는 실정이다.

이와 관련하여 건축, 토목 및 플랜트 구조물을 담당하는 관련 기술자들에게는 경주지진으로 인해 기존 구조물의 안전성에 미치는 영향이 과연 얼마나 되는지에 대한 기술적 관심이 증가하고 있으며, 특히 현행 내진설계기준

에 따른 구조물의 내진 설계가 적정한 수준인지에 대한 공학적 논의가 활발히 진행되고 있다. 또한 국민안전의 관점에서 내진설계기준을 재검토(상향)하여 시설물이나 구조물에 대한 내진안전성을 더욱 안전한 수준으로 확보하려는 노력이 진행되고 있다. 그리고 발주처를 중심으로 구조물에 대한 내진설계의 현황과 기준 그리고 내진 안전성을 전면적으로 재평가하고, 구조물에 대한 내진설계방향과 방안에 대하여 검토하고 있음이다.

이러한 국내의 사회 환경적 배경을 바탕으로 본 고에서는 지진이 터널 구조물에 미치는 영향을 공학적으로 평가하기 위하여 현행 기준보다 내진기준을 상향했을 경우에 미치는 구조적인 영향과 보강방안에 대한 검토를 수행하고자 하였다. 이를 위하여 먼저 터널 설계시 반영되는 내진설계 기준 및 설계방법을 검토하고, 경주지진의 발생 현황 및 특성을 고찰하였다. 또한 국내 도로터널(콘크리트 라이닝)을 대상으로 하여, 현행 설계기준, 내진규모

7.0 및 7.5 등으로 내진검토를 수행함으로써 터널 내진기준 상향에 따른 터널 라이닝구조물에서의 철근 보강량을 비교 검토하였다.

둘러싸여 있기 때문에 발산감쇠가 커서 진동이 발생하여도 짧은 시간 안에 진정되는 특성을 갖고 있다. 이는, 터널 구조물이 지중에 있고 대부분의 경우 지반운동과 연동하여 구조물이 진동하므로 큰 증폭이 나타나지 않기 때문이다. 반면, 지표면에 있는 갱구부 구조물은 지반운동의

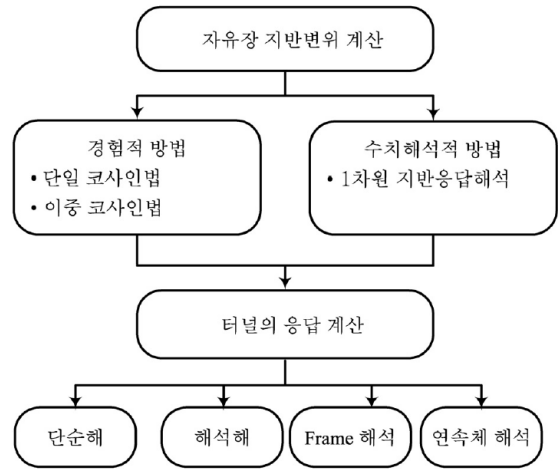
## 2. 현행 터널 내진설계 기준 고찰

### 2.1 국내외 터널 내진설계기준

터널 내진설계를 위한 적용기준 및 내진해석 방법 등은 기관별, 국가별로 상이하며, 국내외 기준들의 주요 내용(표 2.1)과 차이점들을 살펴보면 다음과 같다.

### 2.2 내진해석법

일반적으로 지중에서 굴착하여 시공하는 터널은 터널 구조물 전체가 견고한 지반에 둘러 쌓여있어 지진에 대한 영향이 적으므로 지진에 대해 취약하지 않다고 간주한다. 터널과 같은 지중구조물은 겉보기 중량이 주변 지반과 비교하여 가볍거나 혹은 동일한 정도이며 대부분 지반으로

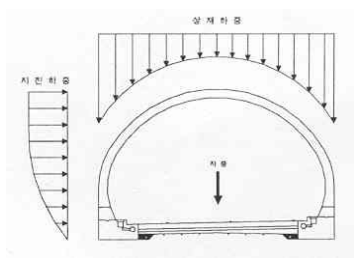
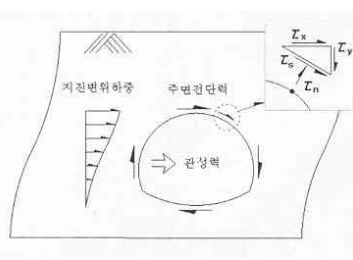
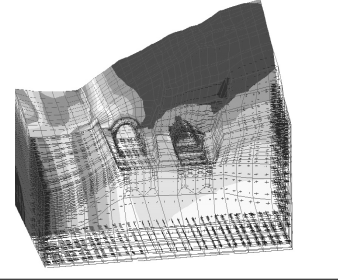


〈그림 2.1〉 응답변위법의 해석순서도

〈표 2.1〉 국내외 터널의 내진설계기준

구분	터널 내진해석구간	내진해석방법
내진설계기준 (건교부, 1998)	· 활동성 지각운동이 예상되는 구간 · 갱구 및 터널이 돌출되는 부위	· 응답변위법 · 등가정적해석법(구조물 중량이 큰 경우) · 동적해석법(내진1등급 구조물)
터널설계기준 (건교부, 1999)	· 토피가 작고 지반이 연약한 갱구부 · 갱구부 편토압 구간 · 지진으로 지내력이 감소될 수 있는 구간	· 응답변위법
도로설계기준 (건교부, 2001)	· 토피가 작고 지반이 연약한 갱구부 · 갱구부 편토압 구간 · 지진으로 지내력이 감소될 수 있는 구간	· 응답변위법
터널내진설계 적용방안 (도로공사 설계처, 2006)	· 개착하여 시공하는 개착부 · 토피가 작고 편토압이 발생하는 갱구부 · 단층대 등 활동성 지각운동이 예상되는 터널부	· 응답변위법 · 동적해석법(필요시)
신내진 설계법 (일본건설성, 1977)	· 주변지반의 관성력을 받을 수 있는 갱구부 · 개착부	· 응답변위법 · 동적해석법(필요시)
터널표준시방서 (일본토목학회, 1996)	· 주변지반의 관성력을 받을 수 있는 갱구부 · 개착부(구조물의 일부가 지상에 노출된 경우)	· 응답변위법 · 동적해석법(필요시)

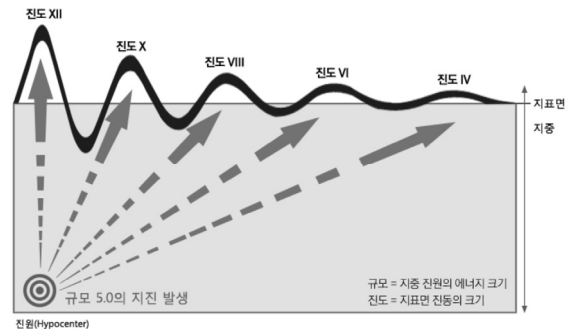
〈표 2.2〉 내진해석법의 특징(한국도로공사 설계처, 2006)

구분	등가정적해석법	응답변위법	동적해석법
정의	구조물에 작용하는 지진하중을 수평하중으로 산정하여 해석하는 방법(Mononobe-Okabe법)	지진시 발생한 지반의 변위분포를 가정하고 이를 하중으로 환산하여 성능수준별 부재력을 검토하는 방법	터널 및 주변지반을 모델링 하고 시간이력 지진운동을 입력 하여 지반구조물 상호작용을 해석하는 방법
개요도			
해석 프로그램	- 구조해석 Sap2000, Midas 등	- 구조해석 Sap2000, Midas 등 - 인공지진파 생성 SIMQKE 등 - 지진응답해석 Pro-Shake, Shake91 등	- 구조해석 Midas, FLAC 등 - 인공지진파 생성 SIMQKE 등 - 지진응답해석 Pro-Shake, Shake91 등
입력 항목	- 지역의 지진구역계수, 지진등급 - 지반의 단위중량, 내부 마찰각	- 지역의 지진구역계수, 지진등급, 지진계수(Ca, Cv) - 지층별 탄성파 속도(Vp, Vs), 감쇠비 - 지반의 동탄성계수, 동포아송비, 동전단계수	
현장 조사	시추조사	시추조사+시추공탐사(크로스홀 시험, 다운홀 시험, 탄성파 토모그래피)	
특징	- 지상구조물 해석에 적합 - 주변 지반특성 미고려 - 해석이 간단 - 해석 부정확(과다 설계)	- 지중구조물 해석에 적합 - 지반과 구조물의 거동을 비교적 정확하게 해석 - 동적해석에 비해 간단 - 등가정적해석에 비해 정확	- 복잡한 지반특성을 고려한 지중구조물 설계에 적합 - 시간에 따른 터널 및 주변 지반 거동을 상세 해석 - 주변지반 모델링 및 해석이 난해하고 시간이 과다 소요 - 해석이 비교적 정확

크기가 지표면에서 최대가 되며 지중구조물에 비해 상대적으로 큰 진폭을 가지므로 응답변위법 등을 토대로 내진 검토를 수행하는 것이 일반적이다. 이러한 내진해석법들의 특징을 살펴보면 다음의 표 2.2와 같다.

### 2.3 설계시 고려하는 지진의 척도(진도와 규모)

지진의 세기를 나타내는 척도 중에 가장 많이 언급되는 것이 규모와 진도(그림 2.2참조)이며 설계시 규모와 진도



〈그림 2.2〉 지진의 규모와 진도

〈표 2.3〉 규모와 진도

구분	규모(Magnitude)	진도(Intensity)
의미	지진발생시 그 자체의 크기를 정량적으로 나타낸 진동에너지, 규모의 종류에는 리히터규모, 표면파 규모, 실제파 규모 등이 있으며 리히터 규모(M)가 많이 사용됨	지진동의 세기를 사람의 느낌이나 주변의 물체 또는 구조물의 흔들림 정도를 수치로 표현한 것
특징	계기관측에 의하여 계산된 객관적 지수이며 지진계에 기록된 지진파의 진폭과 발생지점까지의 진앙거리를 이용하여 계산	지진의 규모와 진앙거리, 진원깊이 뿐만 아니라 지역의 지질구조와 구조물의 형태 및 인원현황에 따라 달리 평가될 수 있다
	리히터규모의 일반식 $M = \log(a/T) + B$ 여기서, M은 규모(1~약9.5), a는 지면진동의 최대폭, T는 진동주기, B는 감쇠관련 보정인자	MMI (Modified Mercalli Intensity : 1931, 1956) 사용(I~XII 단계)

의 경험적 상관관계를 이용하여 내진설계 및 내진해석 등에 반영할 수 있으며, 규모와 진도에 관해서 특징을 간략히 정리하면 표 2,3과 같다.

하나의 지진에 대하여 규모는 동일수치이나 진도 단계는 달라질 수 있다. 따라서 진도단계는 세계적으로 통일되어 있지 않으며 나라마다 실정에 맞는 척도를 채택하고 있다. 규모와 진도의 관계식은 많은 연구자들에 의한 연구결과의 경험식을 소개하면 아래와 같다.

$$M = 1/2 \text{ MMI} + 1.75$$

(미국 동부, Nuuttli & Hermann, 1978) (1)

$$M = 2/3 \text{ MMI} + 1.00$$

(미국 서부, Gutenberg & Richter, 1956) (2)

$$M = 0.56 \text{ MMI} + 1.73$$

(기상청, 2006) (3)

진도는 다양한 불확실성을 포함하고 있기 때문에 MMI 진도와 최대가속도의 관계를 하나의 관계식으로 나타내는 것은 불가능하며, 많은 연구자들에 의한 연구결과의 경험식은 아래와 같다.

$$\text{Log}_{10} \text{PGA} = 0.3 \times \text{MMI} + 0.014$$

(미국 동부, Trifunac and Brady, 1975) (4)

$$\text{Log}_{10} \text{PGA} = 1/3 \times \text{MMI} - 0.5$$

(미국 서부, Gutenberg & Richter, 1956) (5)

여기서, PGA: 최대지반가속도 gal(cm/sec<sup>2</sup>), MMI: 수정 머칼리 진도

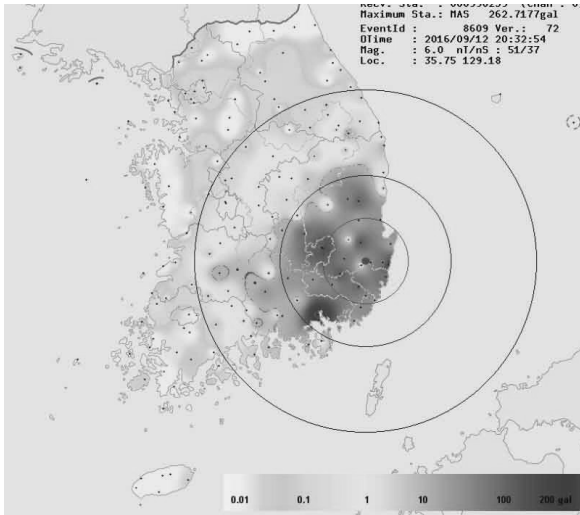
본 고에서 고려할 경북 경주지역은 현행 내진설계기준에 따라 지진구역은 I구역이고 지역계수는 0.11이다. 여기서, 지역계수는 50년 동안에 발생한 확률이 10%를 초과하는 지진(500년 재현주기)의 크기에 근거하여 결정한 것이다. 500년 재현주기의 지진은 우리나라에서는 리히터 규모 5.5~6.5 정도이다. 즉, 이 정도 규모의 지진이 경북지역에서 발생하면 가속도는 0.11 수준이 된다. 지역계수는 지진파의 크기와 연관된 최대지반가속도(PGA)가 아니라 구조물의 응답의 크기와 연관된 유효최대지반가속도(EPA)이며, 응답스펙트럼의 기본이 되는 단주기 구조물의 가속도 응답을 2.5로 나눈 것이다.

우리나라는 중약진 지역으로 미국의 동부지역과 지진 발생의 빈도와 규모가 비슷하다고 할 수 있으므로 기상청에서 발표한 M5.8(USGS기준 mb5.4)의 경주지진은 식(4)에 의해 MMI 진도 VII로 나타난다. 이는 기상청과 한국 지진공학회에서 발표한 최대 진도VII(경주)값과 일치하는 것으로 나타났다. 또한 진도VII를 토대로 식(5)에 적용하여 최대지반가속도(PGA, 0.133g)와 이를 2.5로 나눈 유효 최대지반가속도(EPA 0.053g)를 구할 수 있다.

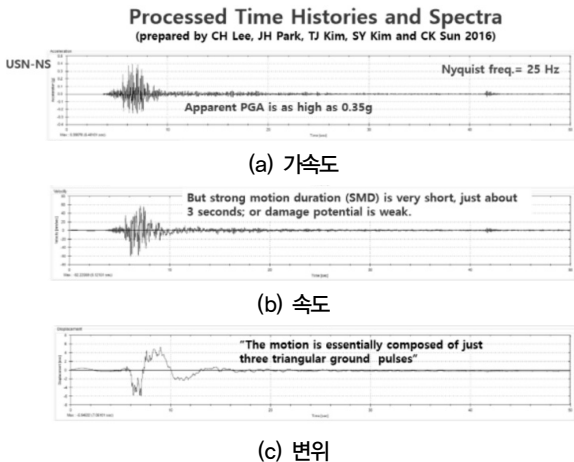
### 3. 경주지진의 공학적 분석

#### 3.1 규모 및 피해현황

지난 2016년 9월 12일 저녁 7시 44분 경, 경북 경주시 남남서쪽 약 9km 지역에서 규모 5.1의 지진이 발생하였으며, 약 50분 후인 8시 32분에는 전진(前震)의 진앙 인



〈그림 3.1〉 경주지진 발생위치 및 진도 분포도



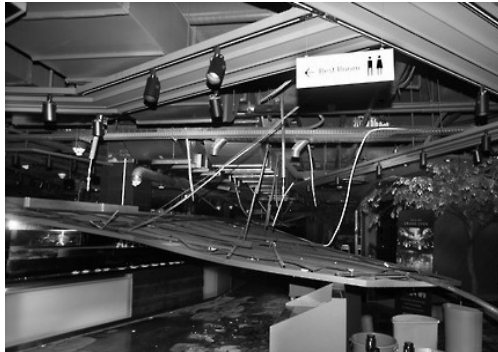
〈그림 3.2〉 울산관측소에서 관측한 경주 지진 특성 (이철호 등, 2016)

근에서 또다시 규모 5.8의 지진이 발생하여 1978년 계기 관측 이래 우리나라에서 발생한 지진 중 최대의 규모를 기록하였다. 이번 지진으로 119 종합 상황실에는 건물의 흔들림을 느꼈다는 시민들의 제보전화와 쇄도하였으며 건물의 균열, TV의 전도, 도로 파손 및 이로 인한 부상 등 다수의 피해상황이 접수되었다. 경주지진의 발생위치 및 진도 분포도는 그림 3.1에서 보는 바와 같다.

한국지질자원연구원 및 한국지진공학회에서 밝힌 경주 지진의 특징은 강한 진동의 지속시간이 짧고, 주파수는 10 Hz(Hz : 1초에 흔들는 횟수)이상으로 높았으며, 최고 가속도는 0.35g(울산관측소 기준)의 크기를 나타냈다. 그림 3.2는 울산관측소에서 관측한 경주 지진의 남북방향 지진파 가속도(a), 속도(b), 변위(c)를 각각 도시한 것으로 지속시간이 짧고 주파수가 높은 것이 주된 특징이다.

지진에 의해서 구조물이 피해를 받기 위해서는 지진의 가속도 크기도 중요하지만, 구조물이 반응하는 주파수 또한 중요하다. 일반적으로 구조물은 층수가 올라갈수록 주기가 길어지는 형태를 보이는 것이 특징이다. 이번 경주 지진은 앞서 언급된 바와 같이 다소 높은 주파수의 형태이기 때문에 고층보다는 저층 구조물에서 더 많은 피해가 발생했다. 실제 이번 경주 지진에 의한 피해를 살펴보면, 일부 저층 구조물의 구조부재에서도 피해현황이 조사되었으나 대부분 천장마감재 탈락, 담장 붕괴 및 기와 추락 등 비구조 부재의 피해가 컸다.

또한 많은 기술자들에게 있어 우려가 되었던 도로, 교량 및 터널과 같은 토목구조물에 대해서는 특별한 피해나 별다른 손상 등에 대해서는 아직까지 보고되지 않았으나, 지속적인 관찰 및 조사가 필요하다. 특히 토목구조물의 경우 손상이나 붕괴발생시 국민안전에 대해 미치는 영향이 매우 중대하므로 경주지진이 발생한 지역주변의 주요 구조물에 대한 안전점검 및 안전진단과 같은 기술적인 조치가 요구된다 할 수 있다. 뿐만 아니라 상대적으로 지진에 대하여 안전하다고 알려진 터널 구조물에 대해서도 터널 구조물과 주변 지반에 대한 변상 등을 점검 할 필요가 있다.



(a) 천장마감재 탈락



(b) 기둥 전단파괴

〈그림 3.3〉 경주 지진으로 인한 건물 피해현황

### 3.2 발생원인 및 시사점

경주 지진의 발생원인은 부산 경남일대에 분포되어 있는 단층들 중, 부산에서 울진으로 이어지는 길이 약 200km의 양산단층 때문이라는 주장이 지배적이다. 그러나 일각에서는 양산단층과 인접한 모량단층(한국 지질자원연구원) 또는 지금까지 알려지지 않은 새로운 단층이 원인이라는 주장이 제기되고 있다. 규모 5.1과 5.8이 연달아 발생한 경주 지진으로 인하여 약 50명의 부상자와 약 100억 원의 재산피해가 발생하는 등 지진의 피해가 상당했다.

이번 경주 지진은 규모에 비해서는 피해가 크지 않은 특징이 있다. 이는 앞서 언급된 바와 같이 진원이 매우 깊은 곳에 위치하고, 주기가 짧고 주파수가 높은 지진의 특징 때문으로 볼 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이, 경주 지진과 같은 고주파수의 지진이 한반도에서 발생한다면, 지중 구조물이 아닌 저층 구조물로 분류될 수 있는 개착터널과 터널의 개착부의 경우 구조적 피해가 발생할 가능성이 높다. 또한, 유사한 규모의 지진이 얕은 심도에서 발생했다면 엄청난 피해가 발생하였을 것이라는 것이 전문가들의 주된 의견이다.

전국에 분포된 고속도로와 일반도로 그리고 교량 역시 지진에 취약한 상태인 것으로 조사되었다. 약 1천 300여 곳의 도로와 교량은 내진설계가 전혀 반영되지 않았으며,

안전진단 결과 현재 내구성 및 기능 저하 방지를 위한 보강이 필요한 상태인 C등급이 150여 개소로 확인되었다.

이와 같이, 내진설계가 잘 이루어지지 않은 이유는 1988년 내진설계 의무화 시행 이후 매년 개정되어 오고 있지만, 이미 완공되었거나 착공에 들어간 경우에는 내진설계 의무대상에서 제외되기 때문이다. 또한 추후 내진보강 의무가 없기 때문에 현재 내진설계가 이루어지지 않은 건축물이 많은 것이다. 이번 경주 지진과 같은 대규모의 지진이 앞으로 발생하지 않는다는 보장이 없으므로, 현재 사용되고 있는 건축물 및 사회기반 시설물에 대해서도 내진에 대한 추가적인 보강이 필요한 실정이다.

## 4. 지진규모 상향이 터널 구조물에 미치는 영향 평가

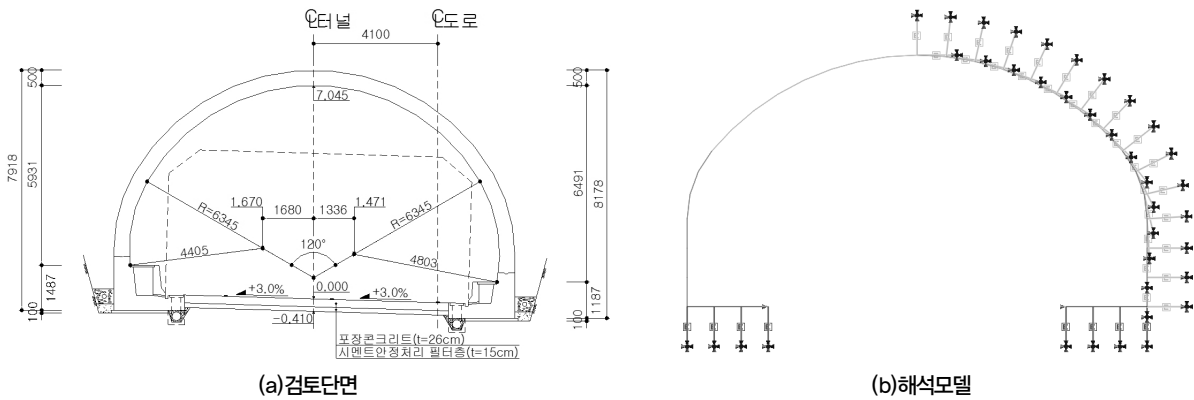
본 고에서는 지진이 터널 구조물에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 현행 기준보다 지진규모를 상향 조정했을 경우에 미치는 구조적인 영향과 보강방안에 대한 검토를 수행하고자 하였다. 이를 위하여 국내 도로터널(콘크리트 라이닝)을 대상으로 하여, 현행 설계기준의 내진규모(6.4)와 내진규모 7.0 및 7.5로 내진설계를 수행

함으로서 내진기준 상향에 따른 터널 라이닝 구조물의 철근 보강량 등을 비교검토하였다.

#### 4.1 현행 터널 내진설계 사례검토

본고에서 검토된 내진설계사례는 “국가지원지방도○○호선 건설공사 기본 및 실시설계”으로 일방향 2차로 병설 터널로 계획되었으며 검토단면의 형상과 해석모델은 그림 4.1과 같다.

터널 갱문부 및 개착터널 주변지반은 토피가 낮고 연약하게 되므로 주변지반의 지형 및 지질을 고려하는 내진설계를 수행하였다. 지진구역은 경상남도 I구역이며, 내진1등급으로 설계하고 1000년 재현주기의 위험도계수 1.4를 적용한다. 또한 지반종류는 보통암이상의 SB지반으로 분류되며 지반최대가속도는 0.063g(기능수행수준)과 0.154g(붕괴방지수준)이 적용되었다. 터널 종점부 개착터널의 경우 라이닝 단면은 천정부가 0.5m, 측벽부는



〈그림 4.1〉 검토단면 형상과 해석모델

〈표 4.1〉 내진등급 및 내진성능 수준에 따른 가속도 계수

지반종류	지진구역	내진등급 및 내진성능수준에 따른 가속도계수	
		I 등급	
		기능수행수준	붕괴방지수준
S <sub>A</sub>	I	0.051	0.126
	II	0.029	0.070
S <sub>B</sub>	I	<b>0.063</b>	<b>0.154</b>
	II	0.040	0.098
S <sub>C</sub>	I	0.074	0.182
	II	0.046	0.112
S <sub>D</sub>	I	0.091	0.224
	II	0.063	0.154
S <sub>E</sub>	I	0.125	0.308
	II	0.097	0.238

※ 가속도 계수 = 재현주기별 위험도 계수(I) × 지진계수(C<sub>a</sub>)

0.5m~0.75m 바닥부는 0.75m이며, 콘크리트 재료강도는  $f_{ck}=24\text{MPa}$ , 철근의 강종은 SD300의 일반철근을 사용하였다. 내진 1등급의 고속도로 터널에 속하며 성능수준에 따른 지반가속도는 다음 표 4.1과 같다. 본 개착터널은 SB지반(보통암)에 놓여있다.

Frame 해석은 지반을 연속체로 모사하는 것이 아니라 일련의 스프링으로 모사한다. 개착터널의 되메움토는 지반스프링으로 모델링되며 그 값은 지반반력계수이다. 지반반력계수는 내진설계시 변위에 의한 지진시 수평하중

〈표 4.2〉 지반반력계수를 이용한 지반 및 전단스프링 결정개요도

구 분	지반반력 계수(kN/m <sup>3</sup> )	
	수평방향	연직방향
지반 스프링	$K_h = K_{h,o} \times \left[\frac{B_v}{0.3}\right]^{-\frac{3}{4}}$	$K_v = K_{v,o} \times \left[\frac{B_h}{0.3}\right]^{-\frac{3}{4}}$
전단 스프링	$K_{h,s} = \lambda K_h$	$K_{v,s} = \lambda K_v$

〈표 4.3〉 각종 하중 입력값

구 분	입 력 값
자 중	· 프로그램내 자동계산
연 직 토 압	· 되메움 토피고 1m 적용
수 평 토 압	· 정지토압계수( $K_0=0.577$ ) 적용
지진시 수평하중	· 지진시 수평하중 $P(z) = k_h \{U(z) - U(z_B)\}$ (N/m) · 지진시 심도(z)별 지반변위 $U(z) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right)$ (m), $S_v = \frac{T_G}{2 \pi} \cdot g \cdot S_a$ (m/sec) 여기서, kh : 대상구조물이 위치한 지반의 수평방향 지반반력계수 $T_G$ = 설계고유주기 (sec), $S_v$ = 설계지반속도 (m/sec)
지진시 관성력	· 지진시 관성력 $P = W \times A$ 여기서 W : 구조물 중량, A : 설계수평지진계수
지진시 주면전단력	· 주면전단력 $\gamma(z) = \frac{G_D}{\pi H} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \sin\left(\frac{\pi z}{2H}\right)$ $G_D$ : 동적전단변형계수(kN/m <sup>2</sup> )

과 주면전단력이 작용하므로 수평스프링 및 전단스프링을 설치, 해석을 수행한다. 터널의 아치부는 곡면의 부재이므로 수평스프링과 전단스프링을 터널곡면에 대해 법선방향과 접선방향으로 분리하여 설치한다.

지진구역과 재현주기에 따른 위험도계수, 지반종류와 지진계수를 이용하여 설계응답스펙트럼을 작성하고 이를 이용하여 작성된 가속도 및 속도 응답스펙트럼을 이용하여 단일 코사인법의 경험적 방법을 이용하여 지반변위를 계산하였다. 개착터널 내진설계시 적용하는 각종 하중은 다음의 표 4.3과 같다.

상기의 입력값을 토대로 계산된 변위를 이용하여 각종 지진시 하중을 결정하고 콘크리트구조기준에 맞는 각종 하중조합을 FRAME 해석시에 적용하였다.

지진하중 하중조합 (콘크리트 구조설계기준, 2012)

(1) 철근콘크리트 구조물을 설계할 때는 아래에 제시된 하중계수와 하중조합을 모두 고려하여 해당 구조물에 작용하는 최대 소요강도에 대하여 만족하도록 설계

$$U = 1.2(D + H_v) + 1.0E + 1.0L + 0.2S + (1.0H_h \text{ 또는 } 0.5H_h)$$

$$U = 0.9(D + H_v) + 1.0E + (1.0H_h \text{ 또는 } 0.5H_h)$$



〈표 4.4〉 성능수준별 하중조합

구 분	자 중	연직도압	수평도압	지진시 수평하중	지진시 관성력	지진시 주면전단력
기능수행 수준	Comb. 1	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0
	Comb. 2	1.2	1.2	0.5	1.0	1.0
	Comb. 3	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
	Comb. 4	0.9	0.9	0.5	1.0	1.0
붕괴방지 수준	Comb. 1	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0
	Comb. 2	1.2	1.2	0.5	1.0	1.0
	Comb. 3	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
	Comb. 4	0.9	0.9	0.5	1.0	1.0

〈표 4.5〉 하중조합을 토대로 계산된 철근량(국가지원지방도○○호선 건설공사 기본 및 실시설계 사례)

구 분	모멘트(kN·m)		축 력(kN)		전단력(kN)		비 고	
	상시	지진시	상시	지진시	상시	지진시		
천정부	M <sub>max.</sub>	281.98	135.55	584.43	561.7	191.59	104.18	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D-19@125mm(상시)</li> <li>• D-13@125mm(지진시)</li> </ul>
	P <sub>max.</sub>	174.88	102.93	626.90	578.58			
측벽부	M <sub>max.</sub>	356.83	172.53	665.47	608.96	198.72	104.51	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D-19@125mm(상시)</li> <li>• D-13@125mm(지진시)</li> </ul>
	P <sub>max.</sub>	36.38	1.40	703.07	667.04			
바닥부	M <sub>max.</sub>	16.19	171.30	46.32	191.88	23.81	235.20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D-19@125mm(상시)</li> <li>• D-13@125mm(지진시)</li> </ul>
	P <sub>max.</sub>	0.00	2.6	87.07	191.88			

성능수준별 하중조합을 토대로 계산된 철근량을 살펴 보면 표 4.5와 같다.

상시와 지진시의 철근량을 나타내었는데, 상시조건에 필요한 철근량이 지진조건시 필요한 철근량 보다 크기 때문에 지진시 영향은 상시에 비해서 크지 않게 나타났다. 물론 이러한 지진시 결과는 터널 라이닝 하부 지반종류에 따른 결과가 달라질 수는 있지만 일반적으로 상시조건에 하중의 종류가 보다 다양하고 하중조합계수가 크기 때문에 상시의 하중조건이 라이닝 철근량에 지배적인 역할을 한다는 것을 의미한다.

#### 4.2 지진규모 상향시 구조안정성 영향분석

경주지진은 관측된 역대 최대 지진이었고 이보다 훨씬 강한 지진이 발생할 가능성이 제기되면서 원전에 대한 불

안감과 우려도 커지고 있는 실정이다. 현재 국내 원전의 설계기준은 원전 바로 아래에서 0.2~0.3g(리히터 규모로 환산하면 약 6.5~7.0) 규모의 지진이 발생해도 견딜 수 있도록 설계되어 있다. 터널의 경우 내진1등급의 경우 0.154g(리히터 규모로 환산하면 약 6.4)에 대해서 설계되고 있으며

이보다 보다 큰 지진의 영향에 대해서는 고려되지 않는다. 홍태경 교수 등의 “한반도 지진지체구조구 모델과 최대 지진규모”(2014)를 보면 한반도에서 발생할 수 있는 최대 지진규모는 7.45±0.04로 예상됐고, 김성균 교수 등은 2001년 이 규모를 7.14±0.34로 내다봤다.

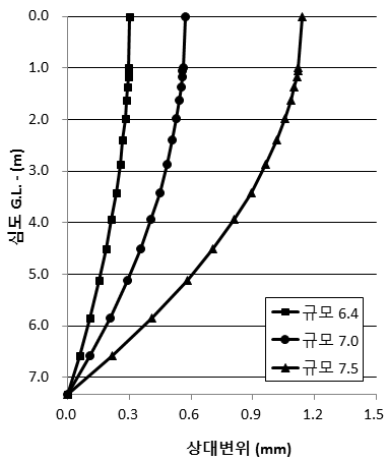
따라서, 앞서 현행설계 사례에서 살펴본 개착터널 라이닝과 동일한 조건에서 지진시 하중을 규모 7.0, 규모 7.5으로 상향 조정하여 내진안정성을 살펴보고자 한다. 지진 설계는 규모를 기준으로 하는 것이 아니라 가속도를 기준

〈표 4.6〉 규모-진도-가속도의 관계

규모	진도(MMI) 기상청, 2006	최대지반가속도 (PGA) Trifunac and Brady,1975	유효최대지반가속도 (EPA)	지표면 최대 가속도계수(g)
6.4(현행)	8	0.264	0.11	0.154
7.0	9	0.528	0.21	0.294=0.3
7.5	10	1.053	0.42	0.588=0.6

〈표 4.7〉 규모에 따른 가속도 응답스펙트럼

규 모(최대가속도)	가속도, 속도 응답스펙트럼	비 고
$M_L=6.4(0.154g)$	$S_a = 2.5 \times 0.11 \times 9.807 \times 1.4 = 3.776 \text{ m/s}^2$ $S_v = 0.184 / 2\pi \times 3.776 = 0.111 \text{ m/s}$	위험도계수(I)= 1.4적용
$M_L=7.0(\text{약}0.3g)$	$S_a = 2.5 \times 0.21 \times 9.807 \times 1.4 = 7.208 \text{ m/s}^2$ $S_v = 0.184 / 2\pi \times 7.208 = 0.211 \text{ m/s}$	
$M_L=7.5(\text{약}0.6g)$	$S_a = 2.5 \times 0.42 \times 9.807 \times 1.4 = 14.416 \text{ m/s}^2$ $S_v = 0.184 / 2\pi \times 14.416 = 0.422 \text{ m/s}$	



〈그림 4.2〉 개착터널부 깊이에 따른 상대변위(붕괴방지수준)

으로 한다. 편의상 지진설계 기준이 규모 6.4에 견디도록 설계하고 있다고 하지만 이는 정확하지 않은 추정치이다. 그러므로 앞서 살펴본 규모-진도-가속도의 관계식들을 이용하여 규모 7.0, 규모 7.5의 가속도를 구하여 적용하였다(표 4.6 참조).

설계응답스펙트럼 형상을 정의하기 위해 개발된 지진계수에서 Ca는 지반의 유효최대지반가속도를 의미하며,

약 2.5Ca는 가속도영역에 있는 5% 감쇠 단주기 시스템의 최대가속도 값의 평균값을 나타내는 것입니다. Cv는 5% 감쇠 1초 시스템의 가속도 응답을 의미하며, 이 값을 주기로 나눌 경우에 속도영역에서의 가속도 응답을 정의하게 되는 것이다. 이러한 관계를 이용하여 유효최대지반가속도(EPA)를 지역계수와 지진계수로 보고 설계응답스펙트럼을 작성하였고, 이를 통해 구한 가속도 스펙트럼(Sa)과 속도 스펙트럼(Sv)를 이용하여 지진시 하중을 산정하였다.

개착터널 깊이에 따른 상대변위는 그림 4.2와 같으며, 개착터널의 뒤채움토의 상단부에서부터 깊이별로 적용한 지진시 수평하중과 주변전단력은 표 4.8 및 표 4.9와 같다.

이러한 하중들을 콘크리트구조기준에 맞게 하중조합하고 범용수치해석 프로그램인 Midas GTS-NX를 이용하여 비선형 구조해석을 수행하였다. 이를 통해 붕괴방지수준의 내진시 개착터널 라이닝에 발생할 수 있는 단면력을 검토하였고 구조해석결과와 계산된 철근량은 표 4.10 및 표 4.11과 같다.

응답변위해석을 수행한 결과를 살펴보면, 기존의 철근 라이닝 검토는 상시와 지진시의 조건을 모두 만족시켜야 하는데, 주로 상시조건에 필요한 철근량이 현행 규모 6.4(약

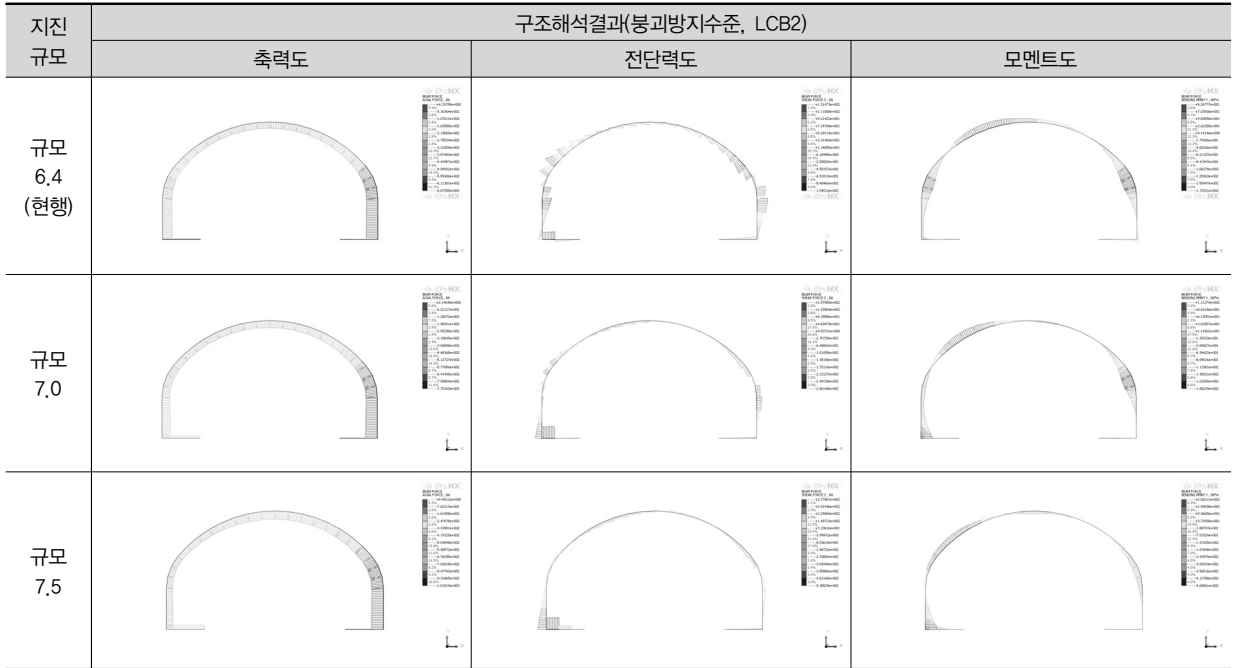
〈표 4.8〉 지진시 깊이별 수평하중

z (m)	지진시 수평하중			P(z) (kN/m <sup>2</sup> )
	규모 6.4(현행)	규모 7.0	규모 7.5	
0.000	40,748	77,458	154,916	40,748
1.000	39,979	75,997	151,994	39,979
1.040	39,917	75,877	151,755	39,917
1.160	39,714	75,492	150,984	39,714
1.358	39,330	74,763	149,526	39,330
1.632	38,701	73,566	147,132	38,701
1.979	37,739	71,738	143,475	37,739
2.395	36,344	69,087	138,174	36,344
2.874	34,410	65,409	130,818	34,410
3.411	31,826	60,498	120,995	31,826
3.925	28,945	55,022	110,044	28,945
4.503	25,231	47,961	95,922	25,231
5.114	20,761	39,465	78,931	20,761
5.851	14,634	27,817	55,634	14,634
6.588	7,710	14,656	29,311	7,710
7.325	0,000	0,000	0,000	0,000

〈표 4.9〉 지진시 깊이별 주면전단력

z (m)	지진시 주면전단력					
	규모 6.4(현행)		규모 7.0		규모 7.5	
	법선방향	접선방향	법선방향	접선방향	법선방향	접선방향
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.000	0.109	1.997	0.207	3.797	0.415	7.594
1.040	0.339	2.053	0.644	3.902	1.289	7.805
1.160	0.625	2.234	1.188	4.247	2.376	8.495
1.358	1.012	2.520	1.924	4.791	3.847	9.582
1.632	1.538	2.878	2.924	5.470	5.848	10.941
1.979	2.233	3.264	4.244	6.204	8.488	12.408
2.395	3.113	3.628	5.917	6.897	11.833	13.794
2.874	4.182	3.917	7.950	7.446	15.901	14.892
3.411	5.674	3.732	10.785	7.093	21.570	14.187
3.925	7.330	2.668	13.933	5.071	27.867	10.143
4.503	8.869	1.037	16.858	1.970	33.717	3.941
5.114	10.113	0.000	19.224	0.000	38.448	0.000
5.851	11.528	0.000	21.913	0.000	43.826	0.000
6.588	12.925	0.000	24.569	0.000	49.139	0.000
7.325	14.303	0.000	27.189	0.000	54.378	0.000

〈표 4.10〉 구조해석결과(Midas GTS-NX)



〈표 4.11〉 하중조합을 토대로 계산된 철근량(지진규모 상향시)

구 분	단위	상시	단면력			상시	단면검토			
			지진시				지진시			
			현행	상향	상향II		현행	상향	상향II	
			규모6.4	규모7.0	규모7.5		규모6.4	규모7.0	규모7.5	
천정부	M <sub>max</sub>	kN·m	281.98	135.55	127.85	224.77	D-19 @ 125mm	D-13 @ 125mm	D-19 @ 125mm	D-29 @ 125mm
	P <sub>max</sub>	kN	626.90	578.58	685.04	940.70				
	S <sub>max</sub>	kN	191.59	104.18	116.93	151.09				
측벽부	M <sub>max</sub>	kN·m	356.83	172.53	173.52	228.36				
	P <sub>max</sub>	kN	703.07	667.04	774.68	1033.12				
	S <sub>max</sub>	kN	198.72	104.51	200.55	284.87				
바닥부	M <sub>max</sub>	kN·m	16.19	171.30	299.33	531.71				
	P <sub>max</sub>	kN	87.07	191.88	293.27	494.24				
	S <sub>max</sub>	kN	23.81	235.20	350.95	575.50				

0.154g)의 필요철근량 보다 많았으나, 규모를 상향하여 검토하게 되면 내진시 필요철근량이 점차 증가하여 규모 7.0(약0.2g)이상의 경우에는 상시조건 이상의 철근량이

필요할 것으로 나타났다. 특히 측벽부와 바닥부의 우각부에서 응력집중이 발생하는 경향을 나타내었고, 전단력에 대한 보강 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이는 현행설

계기준보다 지진규모를 상향조정할 경우 붕괴방지수준의 성능을 발휘하기 위해서는 보다 많은 철근량으로 설계되어야 하며, 라이닝 단면설계시 내진시가 지배적인 영향을 미치는 것을 의미한다.

## 5. 결론 및 제언

최근의 경주 지진과 관련하여 우리나라도 더 이상 지진 안전지대가 아니라는 인식과 함께 내진 설계 강화에 대한 여론이 대두되고 있다. 따라서 현재 이루어지고 있는 터널의 내진 설계 기준과 설계방법에 대해서 살펴보고 경주지진에 대한 피해현황과 공학적 분석내용에 대해서 정리하였다. 이를 통하여 과거 한반도의 지진이력과 국내시설물의 내진관련 분석을 통하여 교량과 터널과 같은 구조물에 대해서 내진설계 방법론에 대한 종합적인 검토가 기술적 관점에서 뿐만 아니라 국민안전과 사회환경적 측면에서 수행되어야 할 것으로 판단된다.

본고에서는 현재 내진 설계된 터널구조물을 대상으로 하여 내진규모가 상향되었을 경우에 대한 구조 안정성 검토를 실시하여 내진규모 상향에 따른 터널구조물에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 이와 같은 분석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 현행 설계조건으로 응답변위해석을 수행하면 상시와 지진시(M=6.4)의 해석결과중 상시조건에 의해 철근량이 결정되는 경우가 일반적이지만, 규모를 상향조정하면 내진시 필요한 철근량이 점차 증가하여 규모 7.0 (약0.2g)이상의 경우에는 상시조건 이상의 철근량이 필요한 것으로 나타났다. 특히 측벽부와 바닥부의 우각부에서 응력집중이 발생하는 경향을 나타내었고, 전단력에 대한 보강도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 현행설계기준보다 지진규모를 상향조정할 경우 보다 많은 철근량으로 설계되어야 하며, 라이닝 단면설계시

상시보다 내진시가 지배적인 영향을 미치는 것을 의미한다.

- 2) 개착터널 하부지반에 따라서 단면의 두께나 철근량이 증대될 수 있으나 단일코사인법에 의한 변위형상이 이중코사인법이나 1차원 지반응답해석과는 정확성에서 차이가 나는 것으로 알려져 있으며, 개착터널부의 현장시추조사와 실내동적시험에 한계가 있으므로 이에 대해서는 보다 면밀한 연구가 이루어져야한다.
- 3) 내진설계 기준은 지진에 대비하기 위한 최소한의 조건이므로 특정한 구조물에 관하여 내진안전성을 높이기 위해서는 설계기준에 제시된 수준보다 더 높은 지진하중을 고려하여 설계에 반영하고 연성능력이 큰 구조방식을 채택하는 것이 바람직한 방법이라고 할 수 있다.
- 4) 본 내진검토는 일부 지역에 설계중인 터널구조물에서의 제한된 검토임을 밝히는 바이며, 향후 보다 깊이 있고 전문적인 해석이나 연구가 수행되어야 할 것이다.

우리나라에서 사상유래가 없는 지진규모의 경주지진 발생이후 구조물에 대한 안전에 대한 국민적 우려와 관심이 증가하고 있는 것이 현실이다. 특히 국회 등에서는 한반도도 이제 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아님을 인식하고 지진에 대한 체계적이고 장기적인 안전대책을 요구하고 있으며, 내진설계기준 강화(내진규모 대폭상향 등)를 추진하고 있는 실정이다. 하지만 모든 시설물이나 구조물에 대하여 지진에 대한 안전성을 더욱 높이는 것은 막대한 건설비용의 증가를 초래하기 때문에, 국민안전과 사회비용적 측면을 모두 고려한 보다 합리적인 방안을 모색할 때라고 판단된다.

지진은 우리에게 있어 엄청난 재난을 가져올 수 있는 중대한 RISK임에는 틀림이 없다. 하지만 우리기술자들이 지진에 대비한 기술적 대책을 조속히 마련하고, 합리적인 객관적 결과를 바탕으로 국민적 합의(컨센서스)를 지속적으로 형성해감으로서 총체적인 국민안전을 확보해야 할 것이다.

## 참고문헌

- 1) 건설교통부 (1997), “내진설계기준연구(Ⅱ)”.
- 2) 건설교통부 (1999), “터널설계기준”.
- 3) 건설교통부 (2001), “도로설계기준”.
- 4) 국토교통부 (2011), “기존 시설물(터널) 내진성능 평가요령”
- 5) 국토교통부 (2013), “도시철도 내진설계 기준”.
- 6) 도로공사 설계처 (2007), “내진설계 적용방안 수립”, 2006년도 고속도로 설계 실무자료집.
- 7) 박광순 (2013), “시설물 내진설계기준 현황 및 개선방안”, 시설물저널 기획특집2, 대한 시설물 유지관리협회.
- 8) 박광순, “지진관련용어: 규모, 진도 관계”, 한국시설안전공단 홈페이지, 지진정보관.
- 9) 안재광, 박두희, 김동규, 김광염 (2013), “운영 중인 도로 터널의 내진 성능 평가”, 한국터널지하공간학회 논문집, Volume 15, Issue 2, 2013, pp.69-80.
- 10) 일본건설성 (1977), “신내진 설계법”.
- 11) 일본토목학회 (1996), “터널표준시방서”.
- 12) 이철호 (2016), “경주 규모 5.8 지진의 데미지 포텐셜과 내진설계 측면의 시사점”, 2016년도 한국지진공학회 20주년 기념 국제 Workshop 및 학술발표회.
- 13) 최원호 (2007), “최원호의 내진설계이야기 시리즈”, 마이더스 아이티 홈페이지, 건축분야 전문가칼럼.