

# 도시철도 지중 콘크리트 구조물의 내진해석법 적용에 관한 연구

## A Study of seismic analysis method of urban rail transit's underground concrete structure

이희영\*,  
Lee, Hee Young

이동호\*\*,  
Lee, Dong Ho

김은겸\*\*\*  
Kim, Eun Kyum

---

### ABSTRACT

Seismic analysis methods in use on ground structure are equivalentstatic analysis, response-displacement method and dynamic analysis etc.

Equivalentstatic analysis does not considerdynamic effect, and dynamic analysis process is very complex. then "Urbanrail transit earthquake-resistance design standard (2005.06)" is persuading that analyze by response displacement method that consider enough dynamic effect of ground structure statically . But, It is very complex and difficult to apply response-displacement method in the field. So, modified equivalentstatic analysis or pseudo static analysis that is easy to apply in the field and have rationality of design is practically used. In this study, I try to prescribe the applicable scale of structure and static analysis that have calculative effectiveness about response-displacement method by comparing and analyzing the result of each analysis method according to the scale of urban rail transit' box type concrete structure and by performing seismic analysis that apply modified equivalentstatic analysis, pseudo static analysis and response-displacement method changing the kind of ground, depth of bedrock, size of structure.

---

### 1. 서론

지하구조물의 지진에 대한 해석방법으로는 등가정적해석법, 응답변위법 및 동적해석법 등이 있다. 등가정적해석법은 동적효과를 고려하지 못하고 있으며 동적해석법은 해석과정이 매우 복잡하여 “도시철도 내진설계 기준(2005.06)”에서는 지하구조물의 동적영향을 정적으로 충분히 고려한 응답변위법으로 해석할 것을 권하고 있다. 그러나 지진해석을 실무에 적용함에 있어 응답변위법은 적용이 매우 복잡하여 실무에서는 적용이 용이하고 설계의 합리성을 갖춘 유사정적해석법 또는 등가정적해석법이 사용되고 있다.

본 연구에서는 등가정적해석법과 유사정적해석법, 응답변위법을 적용하여 지반의 종류, 기반암의 깊이, 구조물의 크기를 변화시키며 내진해석을 수행하고, 도시철도 BOX형 콘크리트 구조물의 규모에 따른 각 해석법의 해석결과를 비교·분석함으로써 응답변위법에 대하여 실무에 적용이 용이하고 계산상 실효성을 갖으며 설계의 합리성 확보가 가능한 해석방법을 검토하고 지하구조물의 규모에 따른 해석방법의 적용성을 평가하고자 한다.

---

\* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 정회원

\*\* 주식회사 대우엔지니어링 철도사업부

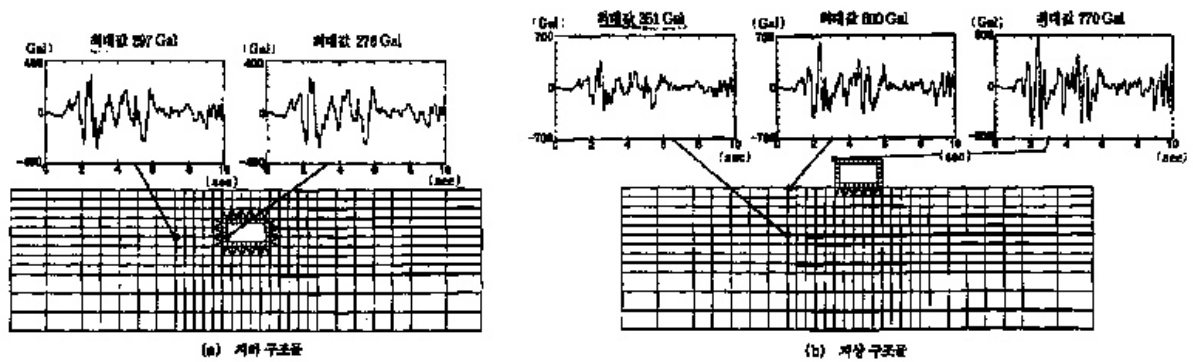
\*\*\* 서울산업대학교 토목공학과 교수, 정회원

## 2. 지하 BOX 구조물의 진동 및 변형특성

### 2.1 지중구조물의 진동특성

지하 구조물의 진동 특성은 지반 속에서의 지반운동에 순응하여 구조물이 진동하기 때문에, 상대적으로 큰 지진 피해를 받는 교량, 건물 등의 지상 구조물과 다르다. 일반적으로 지하 구조물은 지반에 대해 상대적인 진동을 일으키기가 어렵고, 일단 일어난 진동도 곧 소멸된다. 지하 구조물은 지진 시 지반에 변위나 변형이 생기면 그것에 따라 주위에 끌려 운동한다. 따라서 지상 구조물에서는 관성력이 중요하지만 지하구조물에 대해서는 지진시 지반에 생기는 변위 및 변형이 중요하다.

<그림1>은 지상구조물과 BOX형 지하구조물의 지진응답 특성 차이를 잘 보여주고 있다. 즉, 지중구조물의 경우에는 지반과 구조물의 진동가속도가 거의 비슷하나 지상구조물은 기초하부 지표면에서 진동가속도가 증폭되고 구조물 상단에서는 더욱 증폭됨을 볼 수 있다.

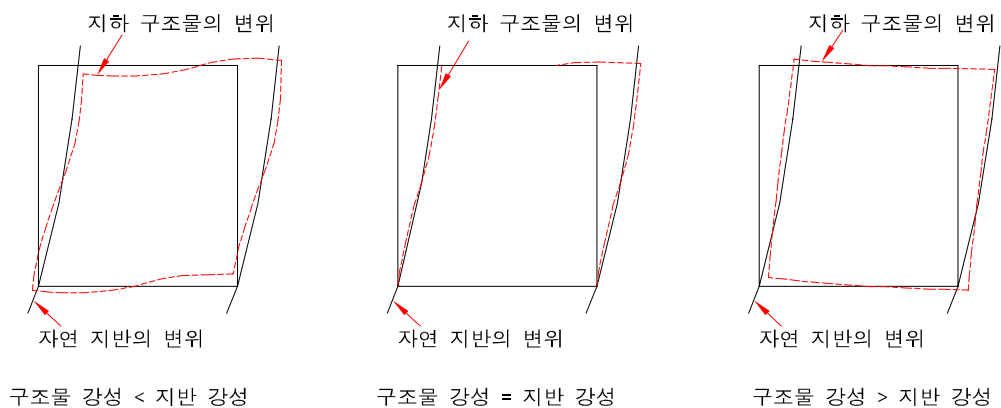


<그림1> 지상 및 지하구조물의 가속도 응답특성

### 2.2 BOX형 지중구조물의 변형 특성

지중구조물의 지진응답특성은 지반변위와 밀접한 관계가 있기 때문에 구조물과 지반의 강성차이는 거동특성에 큰 영향을 미친다. 그러나 개착 구조물과 같이 단면이 두껍고 주변지반이 터파기 후 성토로 이루어진 경우 구조물의 거동은 지반의 변형에 순응하지 않을 가능성이 크다.

<그림2>는 BOX형 지하 구조물의 전단탄성계수와 지반의 전단탄성계수의 크기에 따라 자유장 지반변위에 비하여 지하구조물의 변위가 다르게 발생함을 보여주고 있다. 이는 지하구조물의 지진응답해석시 구조물과 지반의 강성차이를 잘 고려하여야 함을 의미한다.



<그림2> BOX형 개착구조물과 지반의 전단강성비에 따른 구조물 변형 특성(예)

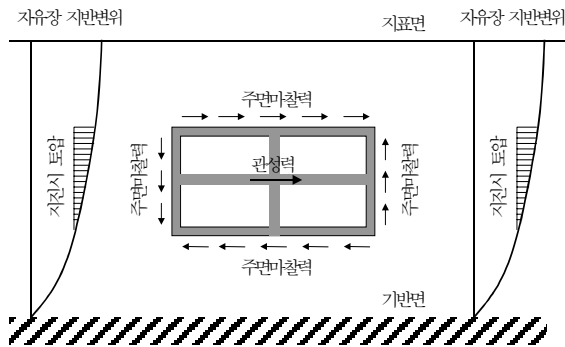
### 3. 지중 콘크리트 BOX 구조물의 내진해석 방법

등가정적해석법은 지상구조물의 지진해석법으로 구조물의 질량에 설계 가속도를 곱한 관성력을 구조물에 작용시켜서 지진시 구조물에 발생하는 단면력을 계산하는 방법이다. 지중구조물의 경우에는 관성력과 함께 지반으로부터의 지진시 토압을 작용시킨다.

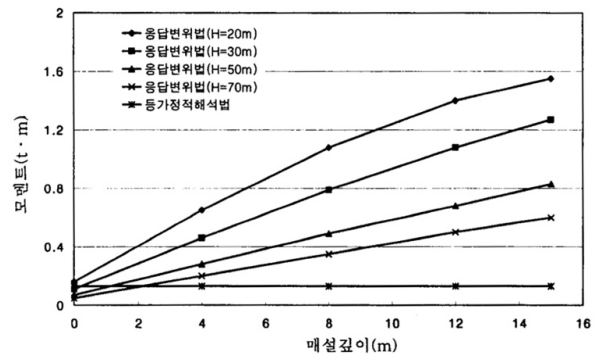
응답변위법은 지중구조물의 지진해석을 위해 고안된 해석법으로 지진시 발생하는 지반변위를 구조물에 가함으로서 구조물의 단면력을 정적으로 계산하는 방법이다. 응답변위법은 구조물의 거동이 관성력에 의한 영향보다는 주로 주변지반의 상대변위에 기인하는 현상으로부터 성립된다.

동적 해석법은 구조물 및 주변지반 전체를 모델링하여 시간영역 및 주파수 영역에서의 운동방정식을 푸는 방법으로서 등가정적해석법 또는 응답변위법으로 해석이 어려운 구조물 및 지반조건이 복잡한 경우에도 적용이 가능하다.

일반적으로 지하구조물은 주변의 지반과 비교하여 중량이 가볍거나 같은 정도이다. 또한 구조물이 주변 지반에 의해 둘러 쌓여 있으므로 지반을 통한 감쇠효과가 크며 관성력이 구조물의 거동에 미치는 영향이 미소하다는 거동 특성이 있다.



<그림3> 응답변위법의 작용 하중



<그림4> 매설깊이에 따른 해석방법별 모멘트 비교 평가(한국지반공학회, 2000년)

<그림3>과 같이 구조물과 지반을 각각 뼈대구조와 스프링 요소로 모델링한 후, 지진시 자유장 변위에 대한 토압과 지반 변위가 구조물에 미치는 주변 마찰력과 관성력을 작용시켜 구조물의 거동을 파악하는 해석기법이 응답변위법이다.

응답변위법은 해석 대상이 다층지반인 경우 지진시 자유장의 지반변위를 지반의 1차 모드로 가정하기 어렵고, 이에 따른 지진시 토압 및 주변 마찰력을 산정하기 어려운 단점이 있다. 또한 지반을 표현하는 스프링 요소의 탄성정수를 구하기 위한 별도의 수치해석 과정이 필요하다.

응답변위법에 사용되는 지반의 수평변위량의 연직방향 분포는 Shake 등을 이용한 지진응답해석을 이용하여 구하는 것이 좋다. 그러나 지층구성이나 지반의 증폭특성이 복잡한 지반과 지진시 지반의 특성이 크게 변화하는 지반 등 상세한 검토를 필요로 하는 지반 이외에는 토층의 고유주기에서 지표면의 최대변위를 구하고, 지반의 변형모드를 가정하여 지반 변위의 연직방향 분포를 코사인 함수로 구하여 적용할 수 있다.

지진해석 방법으로 제안된 등가정적해석법과 응답변위법으로 임의의 BOX형 지하구조물에 대하여 박성우(2000년) 등이 지진해석을 수행한 평가 결과는 <그림4>와 같다.

<그림4>는 매설깊이와 표층깊이의 변화에 따라서 BOX형 지하구조물의 측벽에 발생하는 최대 모멘트의 변화를 나타낸 것이다. 표층깊이가 깊어질수록 등가정적해석법과 응답변위법에 의한 모멘트 응답의 차이가 증가함을 해석결과에서 알 수 있다. 이것은 표층깊이가 깊어질수록 지진동으로 인한 구조물의 상대변위가 작아져서 수평지진하중이 작아지며, 표층의 주기가 작아져서 주변전단력이 감소하기 때문으로 등가정적해석법은 구조물의 매설깊이를 고려하지 못하는 해석방법임을 알 수 있다.

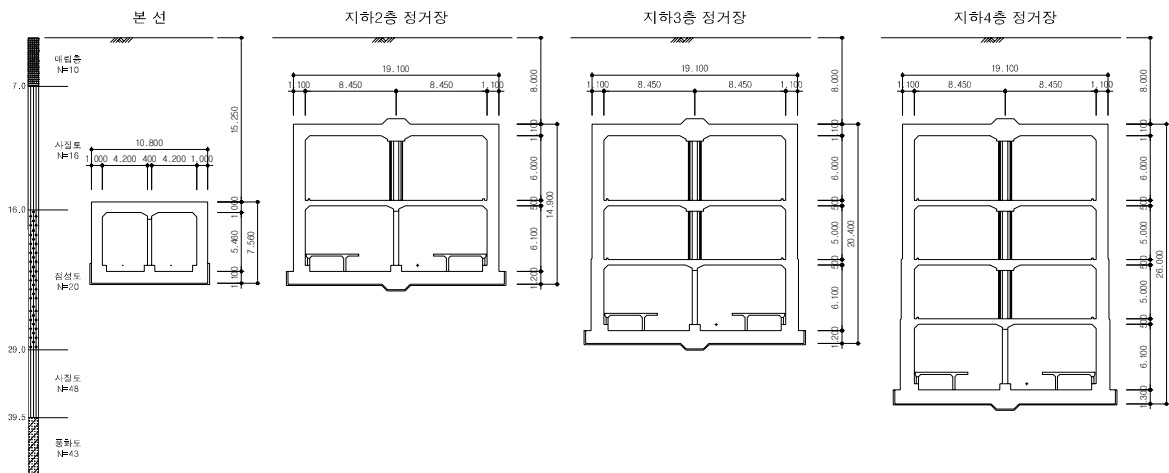
#### 4. 도시철도 지중 콘크리트 구조물의 내진해석

##### 4.1 해석대상 범위의 선정

지하구조물의 지진응답에 영향을 주는 변수로는 지반강성(N치), 표층깊이, 지하구조물의 매설깊이와 크기 등 여러 가지 요인이 있다.

등가정적해석법, 응답변위법 등 내진해석 방법에 따른 해석결과의 변화 추이를 분석하기 위해서는 모든 경우에 대하여 해석을 수행하여야 하지만 본 논문에서는 도시철도 지하구조물의 규모별 내진해석을 수행하여 지하구조물의 내진설계에 대한 합리성을 갖추면서도 실용적으로 적용할 수 있는 해석법을 평가하고자 하는 목적에서 동일 지층에 놓인 구조물로 해석 범위를 제한하였다.

해석 대상 구조물은 최근 인천광역시의 송도지하철 건설공사중 지반여건이 지진에 취약할 것으로 예상되는 구간에 위치한 도시철도 본선과 지하 2층, 3층, 4층 정거장 표준 Type을 선정하여 내진해석을 수행하였으며 표준단면도는 <그림5>와 같다.



<그림5> 도시철도 본선 및 정거장의 표준 Type

해석 대상 지역의 지층구성은 매립층, 사질토, 점성토, 풍화토, 풍화암으로 구성 되어 있으며, 기반암은 GL -53m 정도에 분포되어 있는 연암(전단파속도 760m/sec 이상)으로 조사되었다.

##### 4.2 내진해석

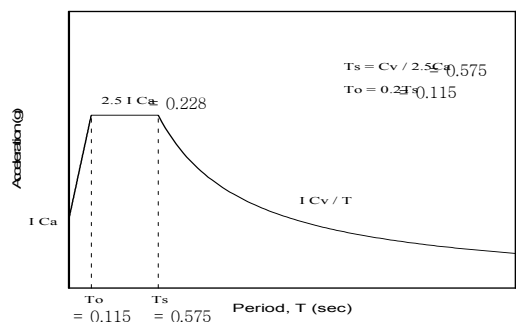
등가정적해석법과 단일코사인법, Shake를 이용한 응답변위법에 대하여 도시철도 지하 본선 및 정거장 구조물을 “도시철도 내진설계기준(2005. 06)”을 적용하여 규모별로 해석하였다. 본 논문에서는 해석방법별 해석결과에 대한 상대적 비교를 위하여 기능수행수준에 대하여만 해석을 수행하였다.

단일코사인법 적용을 위해 작성한 감쇠비 5%의 표준응답스펙트럼은 <그림6>과 같다.

지반의 상대변위 및 주면마찰력, 관성력의 산정은 식 (1)~(5)를 적용하였다.

- 위험도 계수(I) : 0.57
- 기반암 지반 종류 : S<sub>D</sub>
- 지진계수 : Ca = 0.16 , Cv = 0.23
- 속도응답스펙트럼 :

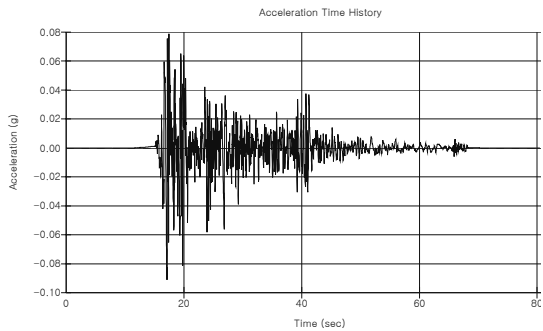
$$S_v = (T_s / 2\pi) \times S_A \quad (\text{m/sec}) \dots\dots\dots (1)$$



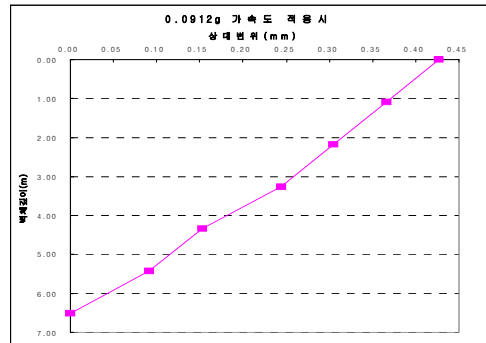
<그림6> 표준설계응답스펙트럼, 감쇠비 5% 기준

- 지반의 상대변위 :  $U(z) = 2/\pi^2 \times S_V \times T_G \times \cos(\pi z/2H)$  (m) ..... (2)
- 지진시 측벽 토압 :  $p(z) = K_H \times \{u(z) - u(z_B)\}$  ..... (3)
- 주면 전단력 :  $\tau = G_D / (\pi \times H) \times S_V \times T_S \sin(\pi z/(2H))$  ..... (4)
- 관성력 :  $f_i = m_i \times a_i = w_i \times K_{hi} = A_i \times \gamma_c \times K_{hi} = 25 \times A_i \times K_{hi}$  ..... (5)

응답변위법에서는 지진에 의한 지반의 동적변위, 전단력, 가속도 계산과 지반반력계수 산정을 위한 동적물성치를 보다 정확히 산출하기 위해 Shake를 이용하여 지반응답해석을 수행하였다. 입력최대가속도 0.0912g인 입력지진과의 가속도-시간이력곡선은 <그림7>과 같으며 <그림8>은 Shake해석에 의한 지반변위를 나타낸다.



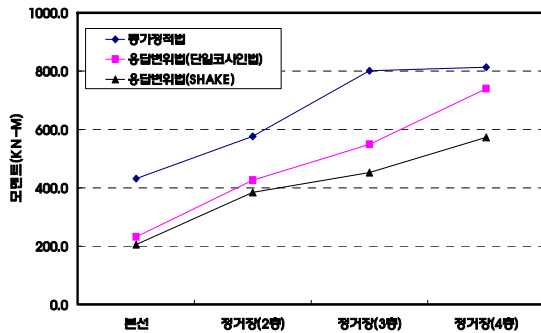
<그림7> 입력 가속도-시간이력곡선



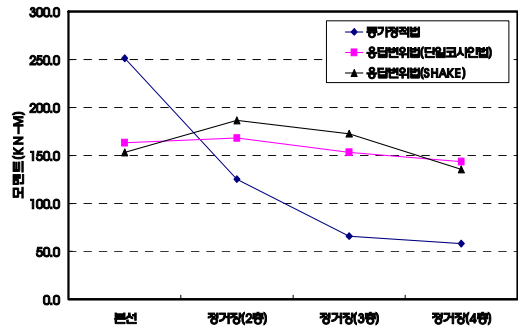
<그림8> Shake 해석에 의한 지반변위

### 4.3 해석결과 분석 및 고찰

지진시 지반변위에 의한 지진하중의 영향을 가장 크게 받는 구조물 측벽 상·하부의 모멘트 및 전단력을 비교하여 지하 구조물 규모에 따른 해석 방법별 결과의 차이를 분석하였으며 해석 결과는 <그림9>, <그림10>과 같다.



<그림9> 측벽 하부 해석결과

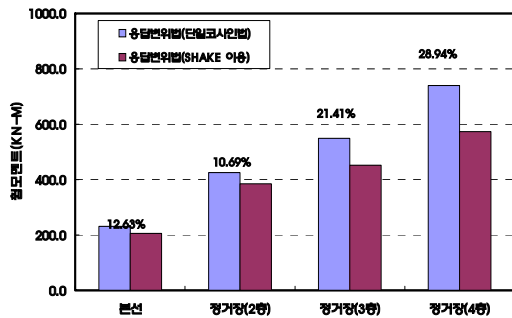


<그림10> 측벽 상부 해석결과

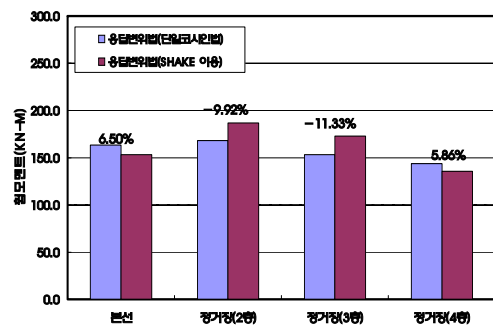
Okabe-Mononobe가 제안한 동적지진토압에 의한 등가정적해석법은 지표면에 지반과 접해 있는 옹벽과 같은 구조물의 내진설계를 위한 해석방법으로 구조물의 매설깊이를 고려할 수 없어 지중구조물의 내진해석에는 적절하지 않다. 해석결과에서 등가정적해석법이 응답변위법과 큰 차이를 보이고 있는 것은 등가정적해석법이 지진도압계수를 적용해 지진시 증가된 동적지진도압을 직접 재하하여 해석한 반면, 응답변위법에서는 지진해석 결과만을 비교하기 위하여 지중변위를 구조물에 하중으로 가하고 상시도압은 하중으로 고려되지 않은 결과이다.

등가정적해석법은 지중구조물의 내진해석에는 적절치 않으므로 단지 상대비교를 위하여 해석결과를 수록하였으며 지하구조물의 규모에 따른 해석결과 비교 대상에서는 제외하였다.

도시철도 지하구조물의 규모별 내진해석을 실시한 결과 해석방법별 결과값의 괴리율은 측벽 상부와 하부에 대하여 <그림11>, <그림12>와 같은 결과를 얻었다.



<그림11> 측벽 하부 Error율



<그림12> 측벽 상부 Error율

Shake 등 지진해석 프로그램을 이용하여 지진응답해석을 수행하는 응답변위법의 해석 결과에 대하여 비교적 편리하게 지반변위를 산정하여 정적으로 지진해석을 수행하는 단일코사인법의 해석 결과를 비교하면 측벽 하부에서는 지하구조물의 층수가 증가할수록 발생모멘트가 커지면서 해석 결과의 Error율이 12.6%에서 28.9%까지 증가하였으며, 측벽 상부에서는 단일 코사인법의 해석 결과가 본선과 지하4층 정거장에서는 각각 6.5%와 5.8%로 크게 나타났으나 지하2층 및 지하3층에서는 오히려 9.9%와 11.3%로 작게 나타났다. 이런 해석결과의 차이는 지하구조물의 내진설계시 지진하중에 의한 발생 부재력이 상시하중에 의한 부재력의 최대 약 30% 정도인 점을 고려할 때 지진해석 방법에 따른 해석결과가 전체 부재력에 미치는 영향은 약 3.7% ~ 5.8% 수준이라고 판단할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 현재 도시철도 지하구조물의 내진설계에 적용되고 있는 내진해석법의 합리적 실용성을 파악하기 위해 도시철도 지하구조물을 규모별로 등가정적해석법, Shake를 이용한 응답변위법 및 단일코사인법으로 해석하였으며 결과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 등가정적해석법은 지반에 접해 있는 구조물의 지진해석을 위해 개발된 해석법으로 매설 깊이 뿐만 아니라 구조물의 규모에 대한 영향도 고려되지 않아 지중구조물의 내진해석 방법으로는 적절치 않다.
- 2) Shake를 이용한 응답변위법과 단일코사인법에 의한 해석결과는 구조물의 층수가 증가할수록 해석결과의 괴리율이 증가하였으나 전체 부재력에 대하여 약 5.8% 내의 오차를 보이는 정도이므로 지중구조물의 내진해석에는 모두 적용 가능한 비교적 정확한 해석방법임을 알 수 있었다.
- 3) 지하2층, 3층 정거장의 측벽 상부에서는 단일코사인법에 의한 해석결과가 Shake를 이용한 응답변위법의 해석결과 보다 다소 작게 나타났으나 미미한 수준이었으며 응답변위법에 비하여 단일코사인법에 의한 지중구조물의 내진해석이 비교적 적용이 간편하며 안전측의 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

1. 도시철도 내진설계 기준(2005), 건설교통부.
2. 내진설계기준연구(Ⅱ)(1997), 건설교통부.
3. 지중구조물의 내진설계(2000), 한국지진공학회.
4. 지반구조물 내진설계(2004), 한국지진공학회.
5. Kawashima(1996), 地下構造物の耐震設計.
6. John, C.M. and Zaharah, T.F.(1985), "A seismic design of underground structures, NSF Grant No. CEE-8310631".
7. 박성우(2000), "BOX형 지하구조물의 내진설계 기준 확립을 위한 해석기법 개발", 한국지진공학회 춘계 학술대회 논문집.