

# 부지응답해석에 기초한 지하공간 내진설계 개념

박인준<sup>1\*</sup>, 유지형<sup>2</sup>

## Aseismic design concept for underground space based on site response analysis

Inn-Joon Park, Ji-Hyeung Yoo

**Abstract** This study proposed the aseismic design concept for underground space based on site response analysis and laboratory tests. The results of this study showed that the location of the control points of input motions such as design response spectra and time history of acceleration and the assumption of bedrock properties such as elasticity or rigidity play an important role in aseismic design of underground space. Therefore, the appropriate ground response model among models applying motions such as free surface motion, bedrock motion, or bedrock outcropping motion must be utilized to provide reasonable boundary conditions of underground space under earthquake loading and practical aseismic design.

**Keywords:** Aseismic design, underground space, control point, boundary condition

**요지** 본 논문은 부지응답해석 및 실내시험에 기초한 지하공간 내진설계 개념을 제안하는데 목적을 두고 있다. 설계응답 스펙트럼 및 가속도시간이력과 같은 입력운동의 통제점 위치와 기반암 가정물성이 내진설계에 매우 중요한 역할을 하고 있음을 본 연구결과를 통해 알 수 있었다. 그러므로 통제점 위치에 따른 지표면 자유장운동, 기반암운동 또는 암반노두운동 같은 지반운동 변화를 합리적으로 모델링 할 수 있는 적절한 지반응답 모델을 이용하면 지진하중을 받는 지하공간의 합리적인 경계조건을 모사할 수 있고 현실적인 내진설계가 가능하다.

**주요어:** 내진설계, 지하공간, 통제점, 경계조건

### 1. 서론

지진 시 지하공간의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 부지고유 특성현상의 신뢰성 있는 평가가 매우 중요하며 특히 단층대 또는 연약층에 속해 있는 경우는 내진설계 시 부지특성의 영향을 반드시 고려하여야 한다. 세계 각국에서 이용되고 있는 내진설계기준에서는 기반암 위에 비교적 균질한 지층이 존재할 경우 이 지층의 특성을 고려한 설계 지반운동을 산정하는 간편법을 제시하고 있으나 단층대 또는 연약지반대가 폭 넓게 발달된 지형으로 분류되는 경우에는 부지고유의 특성평가에 의하여 지반운동을 산정하도록 규정하고 있다. 본 논문에서는 기반암 위에 연약층이 깊게 존재하는 국내 ○○지역을 대상으로 1차원 파전달 이론에 기초한 지반응답해석을 실시한 후, 결과를 검토하고 설계운동 적용위치에 따른 지반운동 변화 및 원인을 분석하였다. 그 결과를

이용하여 현실적인 지하공간 내진설계를 제안하였다.

### 2. 지진응답이론

지진발생 시 체적파는 모든 방향으로 전파되고 이 파가 상이한 지층 간 경계를 만나면 굴절하게 되므로 지표에 가까워질수록 거의 수직방향으로 전파하게 된다. 1차원 지반응답해석에서는 모든 지층의 경계는 수평이고 지반의 수평응답은 기반암 아래에서 수직으로 전파되는 SH파에 기인한다고 가정 한다 (박인준 등, 2005; 최승호 등, 2009). 본 연구에서는 실제 설계에 가장 많이 사용되고 있는 탄성 반무한 특성의 1차원 지반계의 지진응답 해석 개념에 기초한 프로그램인 PRO-SHAKE를 사용하였다. 본 이론의 자세한 설명은 참고문헌(Seed 등, 1976)으로 대신하며, 그림 1(a)의 탄성 반무한공간 상의 입사파( $E_N$ ) 및 반사파 진폭( $F_N$ )을 알고 있으면 그림 1(c)에서의 운동을 계산할 수 있다. 이 개념을 실제 지층에 적용하면 암반층을 탄성으로 가정할 경우에는 기반

<sup>1</sup>정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

<sup>2</sup>정회원, 경일대학교 토목공학과 교수

\*교신저자: 박인준 (E-mail: geotech@hansco.ac.kr)

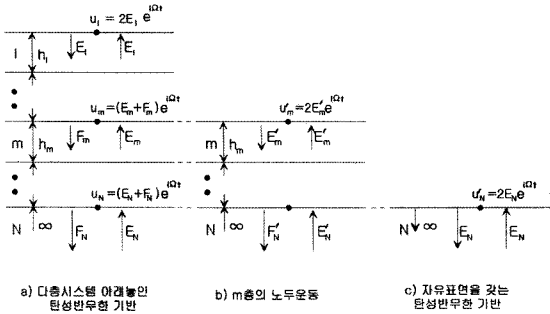


그림 1. 1차원 탄성반무한체 시스템 (Idriss 등, 1992)

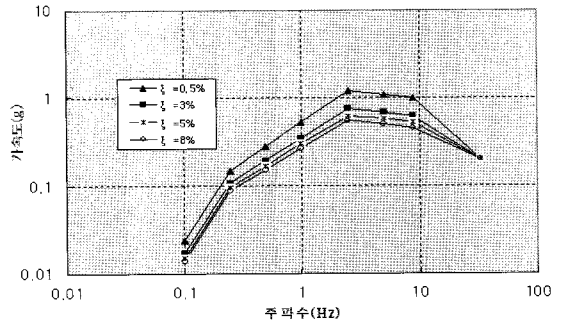


그림 2. 해석 대상 부지의 설계 응답스펙트럼

암에서의 응답이 상부 시스템의 물성에 영향을 받으므로 그림 1(a)의 경우와 같이 층내 암반운동은  $u_i$ 라 하며, 암반노두의 운동은  $u_m$ 가 되고, 암반층을 강성으로 가정할 경우 층내 암반운동 및 암반노두 운동을 모두  $u_N$ 로 고려하여야 한다.

결론적으로 지반응답해석 시 기반암을 강성암반으로 가정할 경우 보다 엄밀한 해를 구하기 위해서는 노두층의 운동이 반드시 반무한 영역 내부의 운동으로부터 분리된 시스템에서 계산하여야 한다.

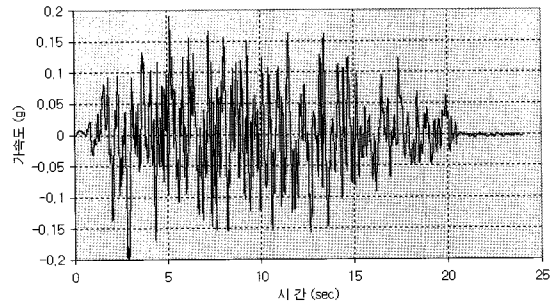


그림 3. 인공 가속도 시간이력

### 3. 해석조건

#### 3.1 설계지반운동

설계지반운동은 국내 역사지진 기록 및 계기지진 기록(한국지진공학회, 1997)을 분석하는 지진위험도 분석으로부터, 설계최대 가속도를 암반에서의 최대 수평가속도 0.2g로 산정하고 미국 원자력규제위원회 지침 1.60 (U.S. Atomic Energy Commission, 1973)에서 제시한 표준설계응답스펙트럼(1.0g)을 최대가속도 0.2g에 맞도록 축척 변경하여 그림 2와 같은 설계응답스펙트럼으로 특성화하였다. 여기서 사용된 표준 설계응답스펙트럼은 견고한 지반의 지표면 운동을 기준으로 작성되었으므로 입력운동의 통제점(control point)은 암반노두로 가정하였다(Newmark 등, 1973).

지반 지진응답 해석을 위해 필요한 가속도 시간이력은 SIMQKE를 사용하여 인공적으로 생성하였다. 생성 시 진폭 포괄함수는 복합형을 사용하였고 계산된 인공 시간이력 곡선의 응답스펙트럼과 목표 설계응답스펙트럼(그림 2)을 비교하여 10% 이상 과소하게 결정된 해당

주파수의 스펙트럼값을 스펙트럼 수정이론에 의하여 수정하였다(Chen, 1974). 그림 2의  $\xi$ 는 지반 감쇠비를 말한다. 이와 같이 산정한 인공시간이력곡선은 그림 3과 같다.

본 연구의 목표를 달성하기 위하여 대상지반의 기반암을 탄성으로 가정하는 경우와 강성으로 가정하는 경우 두 가지 해석사례에 대하여 연구하였다.

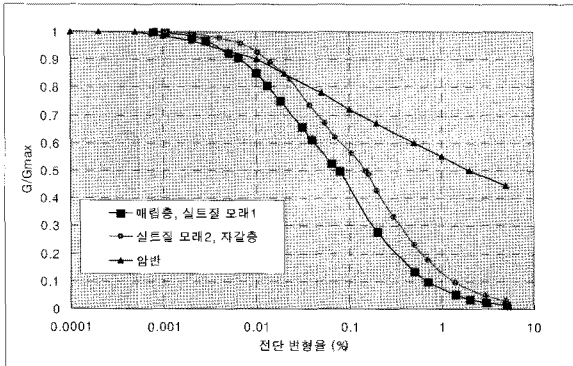
#### 3.2 해석지반물성

해석 대상지반의 물성은 표 1과 같고 지층의 변형률 의존 동적지반특성곡선은 그림 4와 같다.

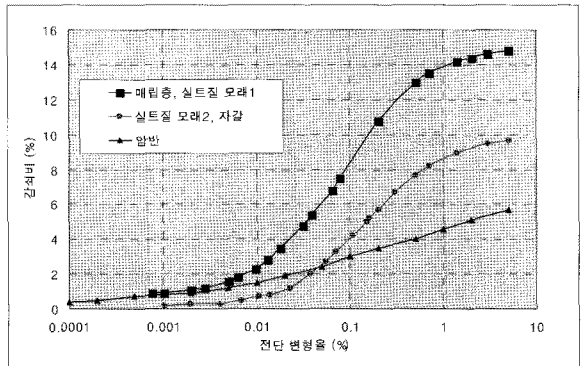
그림 4의 (a), (b) 곡선은 비틀 전단시험을 이용하여 산정하였다. 시험결과 매립층과 실트질 모래 1 및 실트질 모래 2와 자갈층의 곡선은 거의 일치하는 결과를 나타내었으므로 해석 시 동일한 곡선으로 가정하였다. 시험결과를 얻지 못한 변형률 구간(0.1% 이상)에는 Hardin이 제안한 곡선(Idriss 등, 1992)을 사용하였으며 암반(표 1의 연암)층에는 모든 변형률 구간에 대해 Idriss (1992)가 제안한 곡선을 사용하였다.

표 1. 해석 대상지반의 물성

지층	두께 (m)	깊이 (m)	단위중량 (tf/m <sup>3</sup> )	N값	마찰각 (°)	전단파속도 (m/sec)	동포아송 비 (v)
매립층	11.4	11.4	1.90	15	30	130	0.48
실트질 모래 1	20.0	31.4	1.92	29	36	200	0.49
실트질 모래 2	21.1	52.5	2.03	81	45	310	0.48
자갈층	2.7	55.2	2.03	155	45	330	0.48
풍화암	14.4	69.6	2.20	-	35	600	0.45
연암	4.7	74.3	2.60	-	37	750	-
보통암	-	-	2.63	-	40	1500이상	-



(a) 전단변형률 - G/Gmax 관계 (Idriss 등, 1992)



(b) 전단변형률 - 감쇠비 관계 (Idriss 등, 1992)

그림 4. 해석 대상지반의 변형률 의존 동적 지반특성곡선

## 4. 해석결과

### 4.1 해석사례 1

해석사례 1에서는 대상지반의 기반암(전단파속도가 750 m/sec 이상인 보통암 이상)을 탄성으로 가정하여 설계 운동의 입력위치를 암반노두(그림11 ㉑ 참조)에 적용하여 해석하였다. 해석결과 깊이별 시간이력에서의 최대 가속도 및 전단변형률을 깊이에 따라 나타내면 각각 그림 5(a), (b)와 같고 위치별 가속도 시간이력은 그림 6, 위치별 응답의 주파수 성분은 그림 7과 같다.

그림 5(a)에서 깊이별 응답최대가속도의 최대값은 실트질 모래 1층의 하단부인 (-)30 m에서 0.34g이며, 그림 5(b)의 최대 전단변형률은 매립층 하단부인 (-)10 m에서 3.3%를 나타내고 있다.

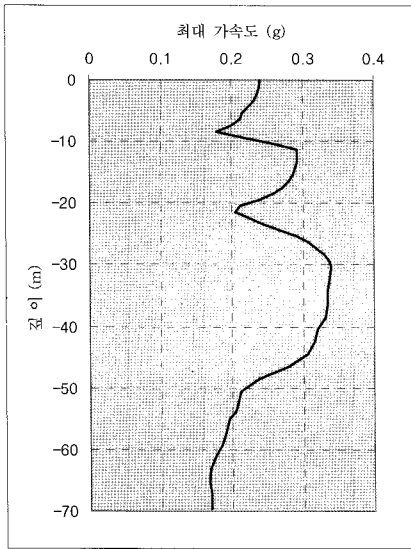
그림 6(a)는 암반노두에서의 응답으로 이는 입력운동과 동일하며, 그림 6(b)는 상부지층이 존재하는 층내 암반의 응답으로 그림 6(a)와 비교하여 진폭이 현저히 감소함을 알 수 있다. 그림 6(c)는 지표면에서의 응답을

나타내고 있으며 이는 그림 6(b)에서보다 증폭된 값을 나타낸다.

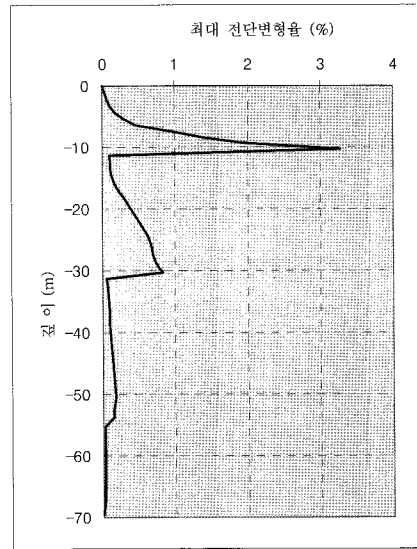
그림 7은 지반의 각 위치에서 가속도 성분을 나타낸 결과이며 그림 7(b)와 비교하여 그림 7(c)에서의 주파수 성분이 저주파 영역으로 치우쳐 있음을 나타내므로 암반과 지표면 사이의 지반이 고주파 필터 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 여기서 스펙트럴 가속도란 지진응답 분석 결과로써 각 주파수(Hz)별 해당 가속도를 분석한 결과이다.

### 4.2 해석사례 2

해석사례 2에서는 대상지반의 기반암을 강성으로 가정하여 설계 운동의 입력위치를 지층내 암반(연암과 보통암의 경계층)에 적용하여 해석하였다 (그림11 ㉒ 참조). 해석결과 깊이별 최대 가속도 및 전단변형률을 깊이에 따라 나타내면 각각 그림 8(a), (b)와 같고 위치별 가속도 시간이력은 그림 9, 위치별 응답의 주파수 성분은 그림 10과 같다.

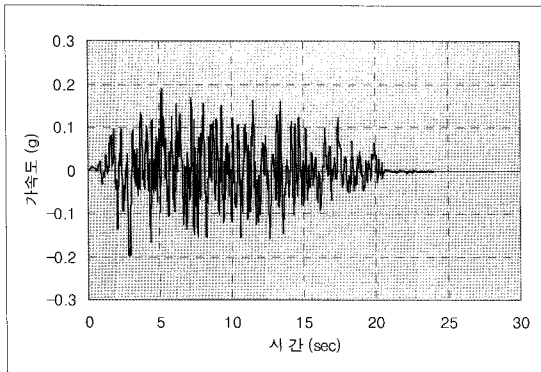


(a) 깊이별 최대가속도

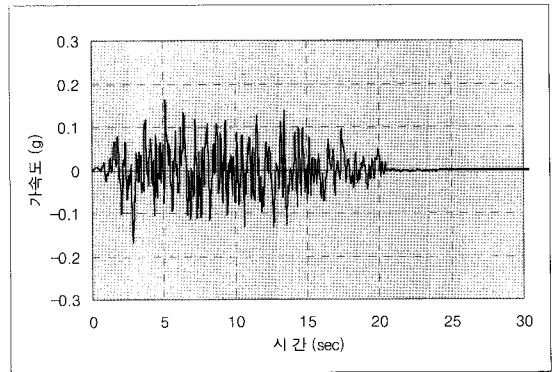


(b) 깊이별 최대 전단변형률

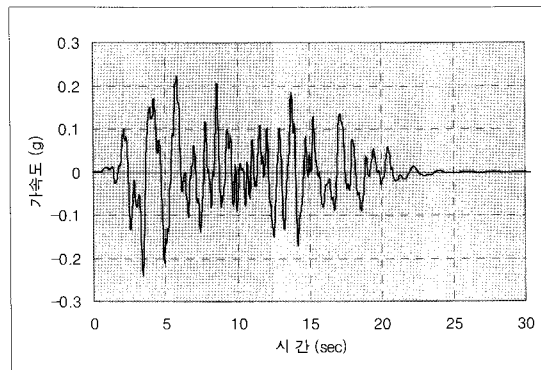
그림 5. 해석사례 1의 깊이별 지진응답 해석결과



(a) 암반 노두에서의 시간가속도 이력

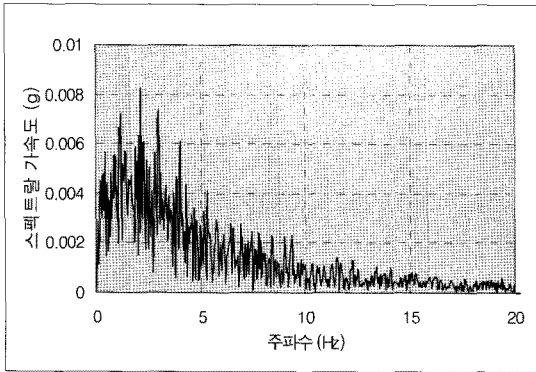


(b) 지층내 암반에서의 시간가속도 이력

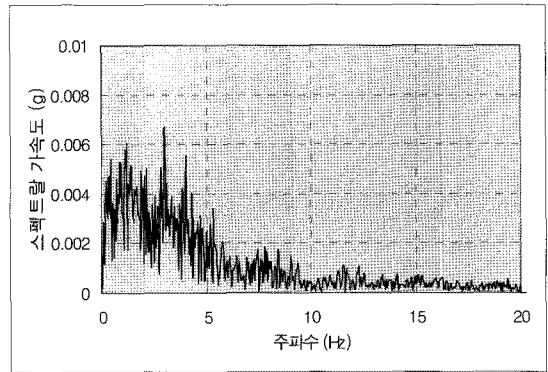


(c) 지표면에서의 시간가속도 이력

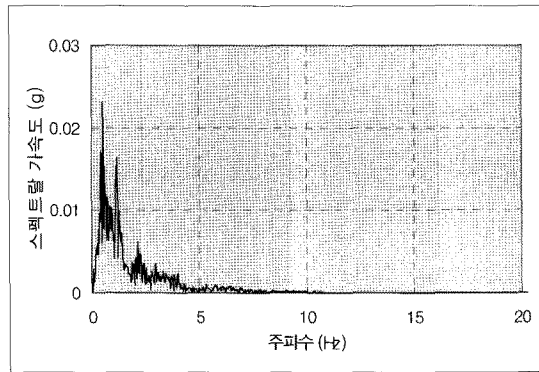
그림 6. 해석사례 1의 위치별 가속도 응답



(a) 암반 노두에서의 주파수 성분

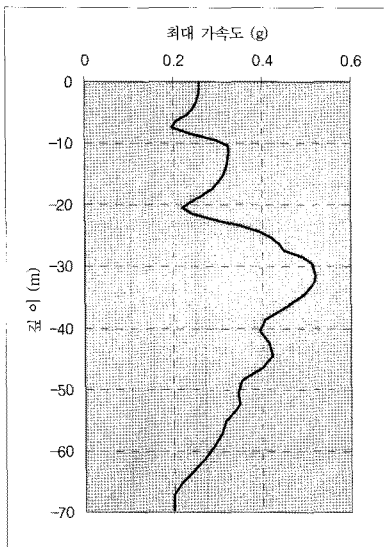


(b) 지층내 암반에서의 주파수 성분

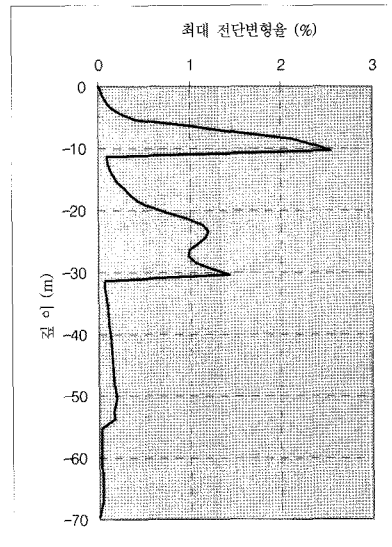


(c) 지표면에서의 주파수 성분

그림 7. 해석사례 1의 위치별 응답의 주파수 성분

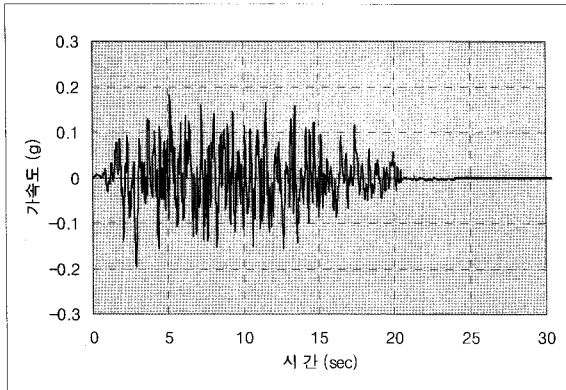


(a) 깊이별 최대가속도

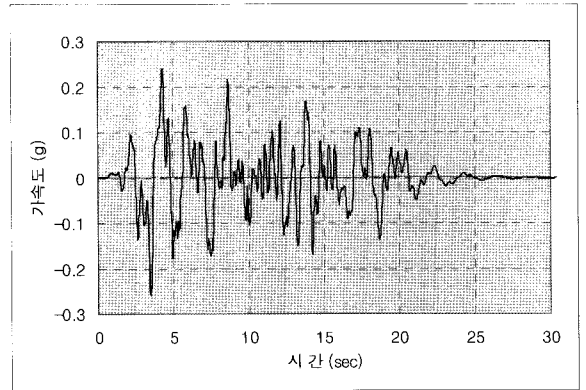


(b) 깊이별 최대 전단변형률

그림 8. 해석사례 2의 깊이별 지진응답 해석결과

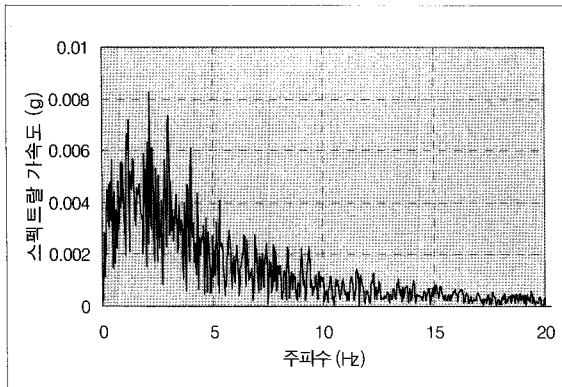


(a) 지층내 암반에서의 시간가속도 이력

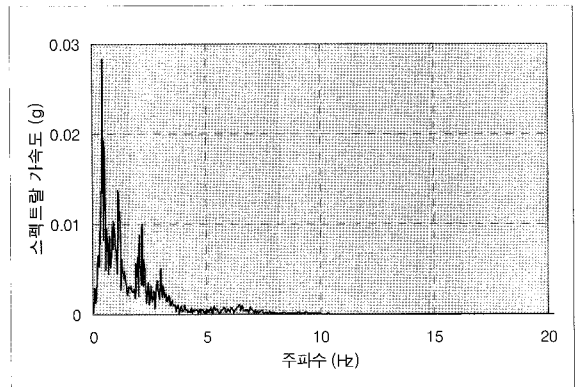


(b) 지표면에서의 시간가속도 이력

그림 9. 해석사례 2의 위치별 가속도 응답



(a) 지층내 암반에서의 주파수 성분



(b) 지표면에서의 주파수 성분

그림 10. 해석사례 2의 위치별 응답의 주파수 성분

그림 8(a)에서 깊이별 가속도의 최대값은 해석사례 1에서와 같이 실트질 모래 1층의 하단부인 (-)30 m에서 0.52g이며, 해석사례 1과 비교하여 깊이별 최대 가속도 값이 증가하였음을 알 수 있다. 그림. 8(b)의 최대 전단 변형률은 매립층 하단부인 (-)10 m에서 2.5%를 나타내고 있다.

그림 9(a)는 기반암에서의 응답으로 입력운동과 동일하고 암반을 강성으로 가정하였으므로 암반노두에서의 응답도 이와 동일하게 된다. 그림 9(b)는 지표면에서의 응답을 나타내고 있으며 이는 그림 9(a)에서보다 증폭된 값을 나타내며 해석사례 1의 경우와 비교하여 훨씬 큰 증폭률을 나타냄을 알 수 있다. 여기서 증폭률이란 입사파 진폭과 응답 진폭의 비로서 정의된다. 이는 입력운동

이 동일하여도 작용위치에 따라 응답이 변화하기 때문이다.

그림 10은 위치별 응답의 주파수 성분을 나타낸 결과이며 해석사례 1과 마찬가지로 암반(보통암)과 지표면 사이의 지반이 고주파 필터 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

## 5. 해석결과 분석

그림 11은 지반응답해석결과 분석을 위한 부지 개념도를 나타낸 것이다. 본 개념도를 통해서 해석사례별 결과분석의 이해를 돕도록 하였다. 여기서 입력지진 통제점 위치㉠은 암반의 노두면(보통암), ㉡는 층내 기반암

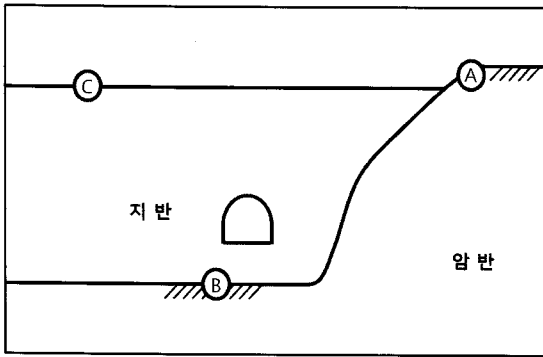


그림 11. 부지 개념도내 입력지진 통제점 위치

표 2. 해석사례 1, 2의 위치별 최대가속도 응답

	기반암	지표면	층내 암반	암반 노두	깊이별 최대가속도
해석사례 1	탄성	0.24g	0.17g	0.20g	0.34g
해석사례 2	강성	0.26g	0.20g	0.20g	0.52g

면(연암과 보통암 경계면) 그리고 C는 지표면 자유장면(매립층)으로 정의할 수 있다.

해석사례 1은 기반암을 탄성으로 가정하였고 입력운동위치는 암반노두로 그림 11의 A위치에 해당한다. A에서는 앞에서 제시한 바와 같이 지층에 의한 경계조건이 존재하지 않으므로 최대진폭이 입사파 최대진폭의 2배가 된다. 여기서 입사파의 최대진폭을 E라고 하면 암반노두에서 입력 및 응답의 최대진폭은 2E가 된다. 층내 기반암은 그림 11의 B위치에 해당하며 기반암을 탄성으로 가정하였으므로 B에서 응답의 최대진폭은 입사파 최대진폭인 E와 상부지층의 영향을 받은 반사파 최대진폭F(≤E)의 합과 같으므로 이는 A위치에서의 최대진폭 2E보다 감소된 값을 갖는다. 해석사례 1에 해당하는 A, B, C에서의 가속도 시간이력은 그림 6(a), (b), (c)와 같다.

해석사례 2에서는 기반암을 강성으로 가정하였으므로 A와 B위치에서의 응답은 동일하며 이는 A 및 B에서의 입력운동과도 동일한 이력을 갖는다. 따라서 입사파의 최대진폭을 E라고하면 암반노두와 지층내 암반에서의 입력 및 응답의 최대진폭은 모두 2E가 된다. A와 B가 같은 해석사례 2에서 가속도 시간이력은 그림 9(a)이고 C에서의 가속도 시간이력은 그림 9(b)와 같다. 두

가지 해석결과의 위치별 최대가속도 응답값은 표 2와 같다. 해석결과에 의하면 해석사례 1의 경우  $2E=0.2g$ 이고 E+F는 0.17g이며 해석사례 2의 경우  $2E=E+F=0.2g$ 이다.

위의 분석결과로부터 기반암을 탄성으로 가정하였을 경우에는 상부 지층의 영향으로 암반노두에서 입력한 입력운동이 지층내 기반암에서는 변화하므로 입력운동을 정의하는 기반암의 위치에 따라 상이한 지반 응답결과를 얻을 수 있으며, 기반암을 강성으로 가정하였을 경우에는 입력운동 정의위치에 관계없이 동일한 지반 응답결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 본 해석 결과를 토대로 동일 지반내 에서도 기반암을 탄성으로 가정하느냐 강성으로 가정하느냐의 차이에 따라서 깊이별 최대가속도가 약 34%의 차이가 날 수 있음을 알았다. 지하 구조물 내진설계 시 중요한 지반 증폭해석에 이런 결과를 반영함으로써 보다 현실적인 내진설계가 가능하다. 지하구조물 내진설계에 사용된 PRO-SHAKE 프로그램은 입력운동 작용위치를 설정할 수 있으므로 입력운동 위치에 따른 지반 응답해석을 수행할 수 있도록 작성되어 있다.

## 6. 결 론

1. 지반 지진응답 해석 시 기반암을 강성암반으로 가정할 경우, 암반노두와 층내 암반에서의 지진운동은 동일하다. 그러나 기반암을 탄성암반으로 가정할 경우, 층내 암반의 운동은 암반노두의 운동과 상이한 결과를 나타낸다. 이 경우 구속조건의 차이에 의해 지반내 암반상의 운동이 감소되는 결과를 나타낸다.
2. 실제 지진기록은 대부분 지표면에서 기록되므로 이를 근거로 작성된 설계 응답스펙트럼은 지표면에서의 값이다. 그러나 연약층 또는 파쇄가 많이 된 단층대가 깊게 존재하는 지반에 건설되는 터널 또는 지하공간 등은 구조물을 해석할 경우에는 지층 내 암반상의 설계 응답스펙트럼을 사용하는 것이 합당하다.
3. 기반암을 탄성암반이라고 가정할 경우 층내 기반암상의 응답스펙트럼은 암반노두에서 보다 감소된 값을 갖는다. 이는 경계조건의 차이 때문에 발생하는 현상임을 알 수 있으며 이러한 차이를 무시할 경우 깊은 연약지반 밑을 통과하거나 그 지층내에 존재하

는 지하구조물의 내진설계 시 비 현실적인 설계가 이루어질 가능성이 있다고 판단된다.

4. 본 연구결과를 통해 도심지 천층터널의 경제적인 내진해석을 위해서는 지층 내 암반상의 설계 응답스펙트럼을 사용하고, 가능한 기반암을 탄성암반이라고 가정하여 그에 합당한 물성을 실험실에서 산정하여 사용하는 것이 바람직하다.

## 감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. 박인준, 박성용, 김수일, 김상환 (2005), “박스 지하구조물의 간편 내진해석”, 터널기술, 한국터널기술공학회 논문집, 제7권, 제3호, pp. 249-257.
2. 최승호, 박인준, 김상환 (2009), “대형지하공간의 내진해석”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제2호, 6월호, pp. 163-174.
3. 한국지진공학회 (1997), “내진설계기준연구(II)”, 건설교통부.
4. Chen, C. (1974), “Simulation of three component spectra compatible time histories,” 2nd ASCE Specialty Conference on Structural Design of Nuclear Plant Facilities, ASCE, Vol. I-A, pp. 72-79.
5. Idriss, I.M. and Sun, J.I. (1992), “Shake91 User's Guide,” University of California.
6. Newmark, N.M., Blume, A. and Kanwai, K. K. (1973), “Design response spectra for nuclear power plants,” ASCE Structural Engineering Meeting, San Francisco.
7. Seed, H.B., Ugas, C. and Lysmer, J. (1976), “Site-dependent spectra for earthquake-resistant design,” Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 66, No. 1, pp. 221-243.
8. U.S. Atomic Energy Commission (1973), “U.S. Atomic Energy Commission Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants”.

접수일(2010.4.7), 수정일(2010.5.3), 게재확정일(2010.5.28)