

# 지반구조물 내진설계시 부지특성을 고려한 설계 지반운동연구

## A Study of Site-Specific Design Ground Motions in Earthquake-Resistant Design for Geotechnical Structures

권수영\*      박인준\*\*  
Kwon, Soo Young      Park, Inn Joon

### 국문요약

본 논문에서는 부지특성을 고려한 설계지반운동의 산정방법을 연구하였으며 그 해석 결과를 지반 구조물의 내진설계에 적용하는 방법을 제안하였다. 지진응답 해석시 사용되는 설계응답스펙트럼과 설계시간 이력 등의 입력운동의 통제점 위치가 지반구조물 내진설계에 큰 영향을 미칠 수 있다는 결론을 얻었다. 그러므로, 지반구조물에 설계지진을 적용할 경우 설계지진의 입력위치에 따라 지표운동, 지층내 암반운동, 그리고 노두운동을 사용하는 방법으로 나눌 수 있고 이에 따라 작용 설계지진운동이 변화하므로 지반구조물의 경계조건에 적합한 방법을 사용하여야 한다.

**주요어** : 부지특성, 설계 응답스펙트럼, 지표운동, 지층내 암반운동, 노두운동

### ABSTRACT

This study investigated the development of site-specific design ground motions. A method for earthquake-resistant design of geotechnical structures is also proposed by using the results of investigations. 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 plays an important role in earthquake-resistant design of geotechnical structures. Therefore, an 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 geotechnical structures under earthquake loading.

**Key words** : site-specific, design response spectra, free surface motion, bedrock motion, bedrock outcropping motion

## 1. 서 론

지진시 지반 및 구조물의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 부지의 증폭현상의 신뢰성 있는 평가가 매우 중요하며 특히 매립지와 같이 액상화 가능성이 있거나 깊은 연약층 지반에서는 내진설계시 부지의 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 액상화 가능성이 있거나 매우 연약한 지층으로 분류되는 경우에는 부지고유의 특성평가에 의하여 지반운동을 산정하도록 규정하고 있다.<sup>(1)</sup> 국내에서도 건교부 내진설계 기준연구<sup>(2)</sup>에 의하면 내진해석시 지반의 종류는  $S_A \sim S_F$ 의 6가지 종류로 나뉘며 이중  $S_F$ 로 분류되는 지반은 부지고유의 특성평가가 필요하다고 규정하였다. 본 논문에서는 기반암 상에 연약층이 깊게 존재하는 국내 ○○지역을 대상으로 1차원 파전달 이론에 기초한 지반응답해석을 실시하여 결과를 검토하고 설계운동 적용위치에 따른 지반운동 변화 원인을 분석하였다.

\* 대림산업(주) 기술연구소 주임연구원

\*\* 정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사후연구원(Post-Doc.)

본 논문에 대한 토의를 2000년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

## 2. 지반 지진응답 해석방법

### 2.1 지반응답해석

지진발생시 체적파는 모든 방향으로 전파되고 이 파가 상이한 지층간 경계를 만나면 굴절하게 되므로 지표에 가까워질수록 거의 수직방향으로 전파하게 된다. 1차원 지반응답해석에서는 모든 지층의 경계는 수평이고 지반의 수평응답은 기반암 아래에서 수직으로 전파되는 SH 파에 기인한다고 가정한다. 본 연구에서는 실제 설계에 가장 많이 사용되고 있는 1차원 전응력 해석프로그램인 SHAKE91<sup>(3)</sup>을 사용하였다.

### 2.2 암반 노두운동과 층내 기반암 운동의 비교

그림 1은 탄성 반무한 특성의 1차원 지반계의 지진응답 해석 개념을 나타내고있다. 그림 1(a)의 탄성 반무한공간 상의 입사파 및 반사파 진폭  $E_N$ 과  $F_N$ 을 알고 있으면 그림 1(c)에서의 운동을 계산할 수 있다. 그림 1(c)의 지표면 위치에서  $\tau=0$ 이므로  $E_N = F_N$ 이고 반무한 공간의 표면에서 입사파는 완전 반사되므로 진폭은  $2E_N$ 이다. 이 반사파는 반무한 공간에 완전 흡수되어 입사파에 다시 기여하지 못하기 때문에 반무한 공간 내의 입사파 진폭은 그 상부의 시스템 물성에 독립적이다. 그러므로 그림 1의 모든 시스템에서 입사파 진폭  $E_N$  및  $E_N'$ 은 동일하다고 할 수 있다. 그림 1(a)의 층내 저면운동  $u_N$ 과 그림 1(c)의 암반노두운동  $u_N'$ 의 비는 식 (1)로 정의되는 전달함수로부터 계산된다.

$$A_{N'}(\omega) = \frac{U_{N'}}{U_N} = \frac{E_N(\omega) + F_N(\omega)}{2E_N(\omega)} \quad (1)$$

그림 1(a)에서 지표면운동  $u_1$ 과 그림 1(c)에서 반무한 공간의 자유표면 운동사이의 전달함수는 식 (2)와 같다.

$$A_N(\omega) = \frac{E_1(\omega)}{E_N(\omega)} \quad (2)$$

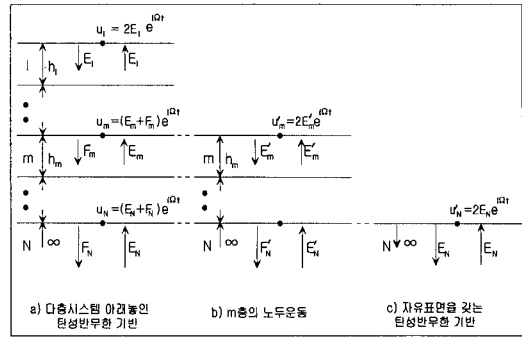


그림 1 탄성 반무한체의 1차원 시스템

만일 반무한 공간이 지층아래 위치한 암반이라고 가정하면 식 (1)은 지층내 기반암 운동과 암반 노두운동 간의 비를 나타내며 항상 1 이하의 값을 갖게된다.

이 개념을 실제 지층에 적용하면 암반층을 탄성이라고 가정할 경우에는 기반암에서의 응답이 상부 시스템의 물성에 영향을 받으므로 그림 1(a)의 경우와 같이 층내 암반운동은  $u_N$ , 암반노두의 운동은  $u_N'$ 가 되고, 암반층을 강성이라고 가정할 경우 층내 암반운동 및 암반노두 운동을 모두  $u_N'$ 로 고려하여야 한다.

이와 같이 지반응답해석시 기반암을 탄성암반으로 가정할 경우 보다 엄밀한 해를 구하기 위해서는 노두층의 운동이 반드시 반무한 영역 내부의 운동으로부터 분리된 시스템에서 계산되어야 한다.

## 3. 해석사례

### 3.1 개요

본 연구의 대상부지는 국가 중요시설물 건설을 위해 해안지역에 매립에 의해 조성된 지역으로 매립층 하부는 깊은 층적층이 존재한다. 부지의 설계 최대가속도는 지진 위험도 분석을 실시하여 결정하였고 외국의 설계기준에 제시된 응답스펙트럼을 이용하여 설계시간이력곡선을 인공적으로 생성하였다. 또한 현장 및 실내 시험을 이용, 1차원 지반응답 해석의 입력변수

를 결정하였다. 이때 설계지진의 입력위치는 기반암으로서 기반암을 탄성으로 가정하여 암반노두운동으로 입력하는 경우와 기반암을 강성으로 가정하여 층내 암반운동으로 입력하는 경우에 대해 해석 후 결과를 비교 검토하였다.

### 3.2 설계지반운동

설계지반운동은 국내 역사지진 기록 및 계기지진 기록을 분석하는 지진위험도 분석으로부터 설계최대 가속도를 암반에서의 최대 수평가속도 0.2g로 산정하고 미국 원자력 규제위원회 지침1.60<sup>(4)</sup>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.<sup>(5),(6)</sup>

지반 지진응답 해석을 위해 필요한 가속도 시간이력은 SIMQKE<sup>(7)</sup>를 사용하여 인공적으로 생성하였다. 생성시 진폭 포괄함수는 복합형을 사용하였고 계산된 인공시간이력 곡선의 응답스펙트럼과 목표 설계응답스펙트럼(그림 2)을 비교하여 10% 이상 과소하게 결정된 해당 주파수의 스펙트럼값을 스펙트럼 수정이론에 의하여 수정하였다.<sup>(8),(9)</sup> 이와 같이 구한 인공 시간이력 곡선은 그림 3과 같다.

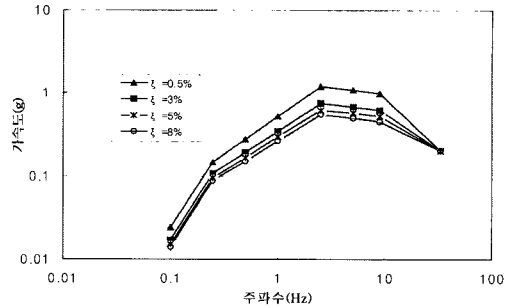


그림 2 해석 대상부지의 설계 응답스펙트럼

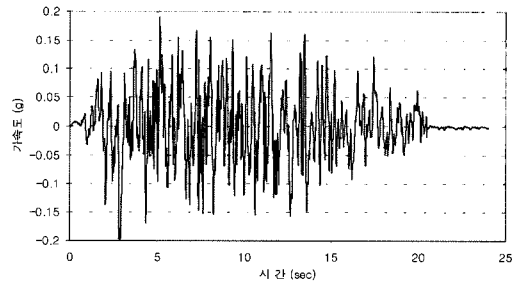


그림 3 인공 가속도 시간이력

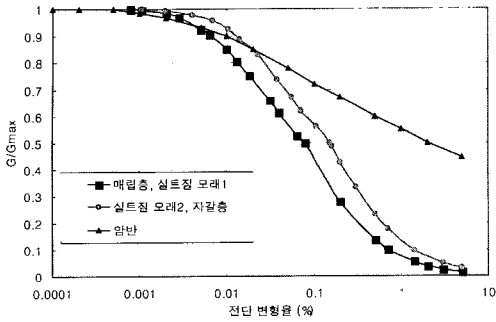
### 3.3 해석 지반 물성

해석 대상지반의 물성은 표 1과 같고 지층의 변형을 의존 동적 토질곡선은 그림 4와 같다.

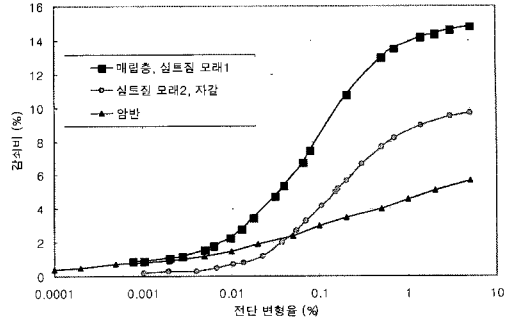
그림 4의 (a),(b) 곡선은 비틀 전단시험을 이용하여 산정하였다. 시험결과 매립층과 실트질 모래1 및 실트질 모래2와 자갈층의 곡선은 거의 일치하는 결과를 나타내었으므로 해석시 동일한 곡선으로 가정하였다. 시험결과를 얻지 못

표 1 해석 대상지반의 물성

지층	두께(m)	깊이(m)	단위중량 (tf/m <sup>3</sup> )	N값	마찰각 (°)	전단파 속도 (m/sec)	동포아스비 (ν)
매립층	11.4	11.4	1.90	15	30	130	0.48
실트질모래1	20.0	31.4	1.92	29	36	200	0.49
실트질모래2	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	1500	-
경암	-	-	2.63	-	40	1500	-



(a) 전단변형률 -  $G/G_{max}$  관계



(b) 전단변형률 - 감쇠비 관계

그림 4 해석 대상지반의 변형률 의존 동적 토질곡선

한 변형률 구간(0.1%이상)에는 Hardin이 제안한 곡선<sup>(10)</sup>을 사용하였으며 암반층에는 모든 변형률 구간에 대해 Idriss<sup>(3)</sup>가 제안한 곡선을 사용하였다.

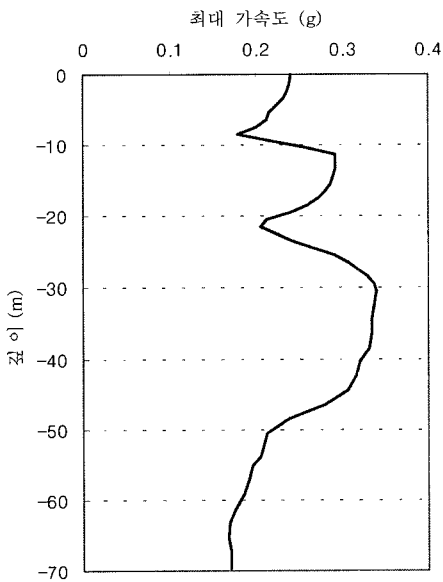
#### 4. 해석결과

##### 4.1 해석사례 1의 결과

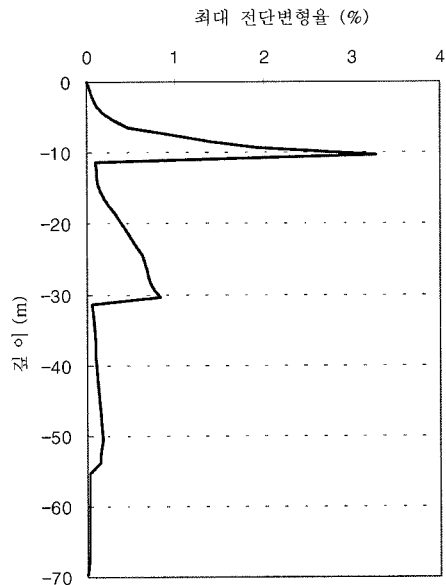
해석사례 1에서는 대상지반의 기반암을 탄성

으로 가정하여 설계 운동의 입력위치를 암반노두에 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 모래1층의 하단부인 (-30m)에서 0.34g이며, 그림5 (b)의 최대 전단변형률은 매립층 하단부인 (-10m)에서 3.3%를 나타내고 있다.

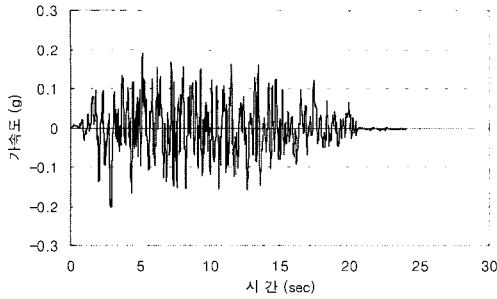


(a) 깊이별 최대가속도

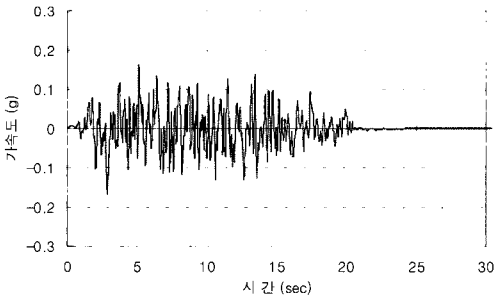


(b) 깊이별 최대 전단변형률

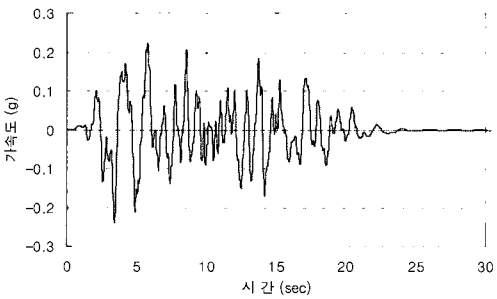
그림 5 해석사례 1의 깊이별 지진응답 해석결과



(a) 암반 노두에서의 시간가속도 이력



(b) 지층내 암반에서의 시간가속도 이력

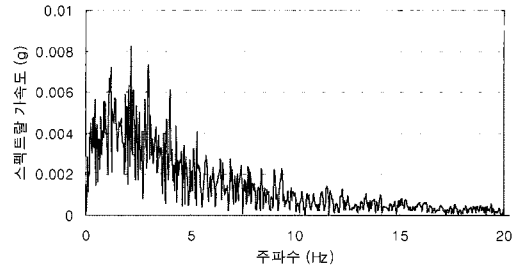


(c) 지표면에서의 시간가속도 이력

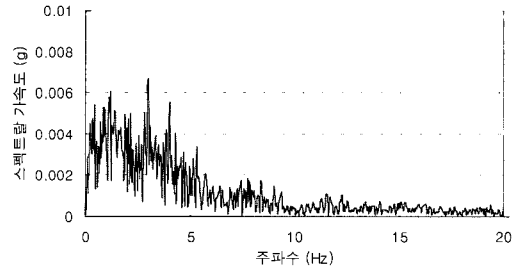
그림 6 해석사례 1의 위치별 가속도 응답

그림 6(a)는 암반노두에서의 응답으로 이는 입력운동과 동일하며, 그림 6(b)는 상부지층이 존재하는 층내암반의 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.

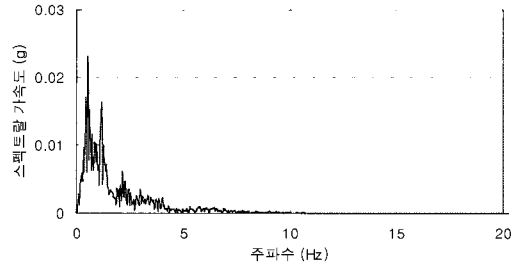
그림 7은 지반의 각 위치에서 가속도 성분을 나타낸 결과이며 (b)와 비교하여 (c)에서의 주파수 성분이 저주파 영역으로 치우쳐 있음을 나타내므로 암반과 지표면 사이의 지반이 고주파 필터 역할을 하고 있음을 알 수 있다.



(a) 암반 노두에서의 주파수 성분



(b) 지층내 암반에서의 주파수 성분



(c) 지표면에서의 주파수 성분

그림 7 해석사례 1의 위치별 응답의 주파수 성분

#### 4.2 해석사례 2의 결과

해석사례 2에서는 대상지반의 기반암을 강성으로 가정하여 설계 운동의 입력위치를 지층내 암반에 적용하여 해석하였다. 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.

그림 8(a)에서 깊이별 가속도의 최대값은 해석사례 1에서와 같이 실트질 모래1층의 하단부인 (-)30m에서 0.52g이며, 해석사례 1과 비교하여 깊이별 최대 가속도값이 증가하였음을 알 수

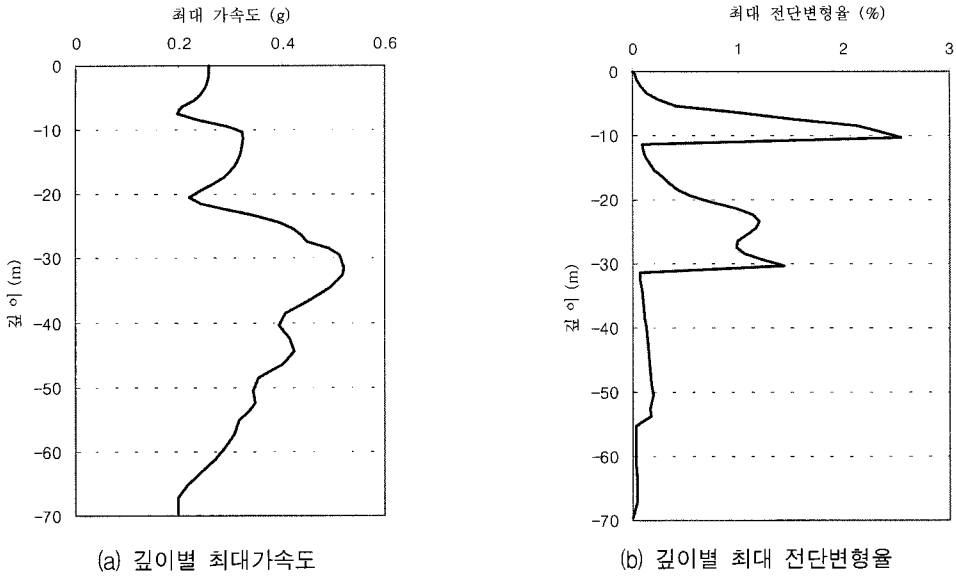


그림 8 해석사례 2의 깊이별 지진응답 해석결과

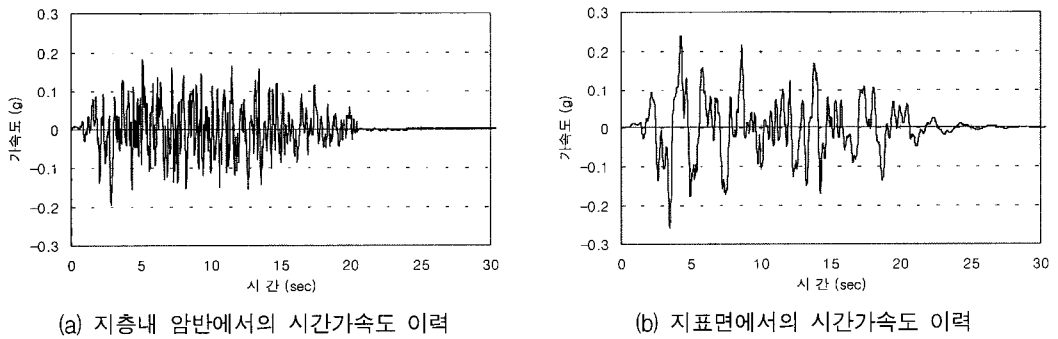


그림 9 해석사례 2의 위치별 가속도 응답

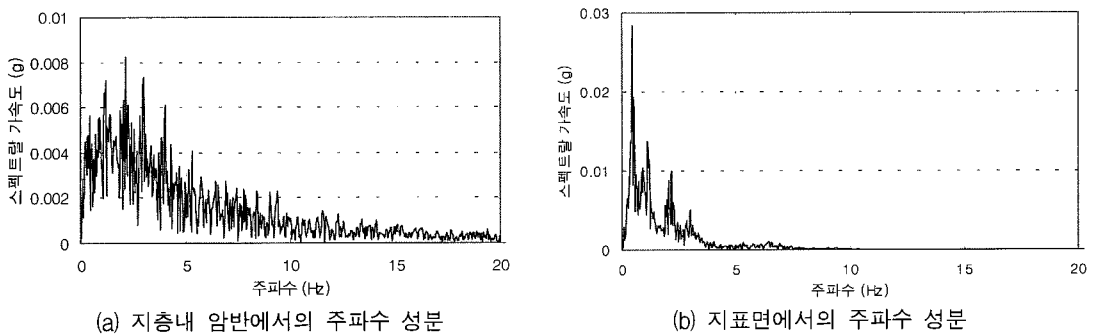


그림 10 해석사례 2의 위치별 응답의 주파수 성분

있다. 그림 8(b)의 최대 전단변형율은 매립층 하단부인 (-)10m에서 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 해석 사례 1의 경우와 비교하여 훨씬 큰 증폭을 나타냄을 알 수 있다. 여기서 증폭율이란 입사파 진폭과 응답 진폭의 비로서 정의된다. 이는 입력운동이 동일하여도 작용위치에 따라 응답이 변화하기 때문이다. 그림 10은 위치별 응답의 주파수 성분을 나타낸 결과이며 해석사례 1과 마찬가지로 암반과 지표면 사이의 지반이 고주파 필터 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결과 분석

그림 11은 지반응답해석 결과분석을 위한 개념도를 나타낸 것이다.

해석사례 1은 기반암을 탄성으로 가정하였고 입력운동위치는 암반노두로 그림11의 A위치에 해당한다. A에서는 2장에서 제시한 바와 같이 지층에 의한 경계조건이 존재하지 않으므로 최대 진폭이 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

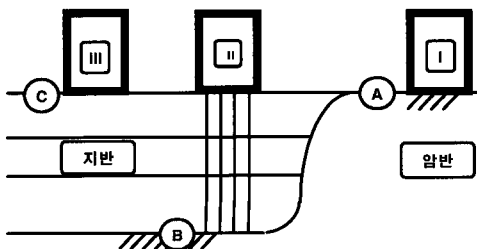


그림 11 부지 개념도

표 2 해석사례 1, 2의 위치별 최대가속도 응답

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

영향을 받은 반사파 최대진폭( $\leq E$ )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. 두가지 해석결과의 위치별 최대가속도 응답 값은 표 2와 같다. 해석결과 데이터에 의하면 해석사례 1의 경우  $2E=0.2g$ 이고  $E+F$ 는  $0.17g$ 이며 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 연구에 사용된 SHAKE91 프로그램은 입력운동 작용위치를 설정할 수 있으므로 입력운동 위치에 따른 지반 응답해석을 수행할 수 있도록 작성되어 있다.<sup>(3)</sup>

### 6. 구조물 설계에의 적용

실제 지진기록은 대부분 암반노두 또는 지표면에서 기록되므로 이를 근거로 작성된 설계

응답스펙트럼도 암반노두 또는 지표면에서의 값이다.<sup>(11)</sup> 만일 암반의 표면, 즉 암반노두에서의 지진기록을 토대로 작성된 응답스펙트럼을 이용한 지진해석의 경우 그림 11의 I 과 같은 구조물은 설계 응답스펙트럼을 직접 입력운동으로 사용하는 것이 가능하다. 그러나 그림 11의 구조물II와 같이 말뚝선단이 기반암까지 근입된 구조물에서 말뚝을 포함하는 모델을 이용한 지진해석에는 B위치에서의 응답을 계산하여 입력운동으로 사용하여야 한다. 이때 B위치에서의 운동은 층내 기반암 운동이다. 여기서 기반암을 강성암반으로 가정할 경우에는 B에서의 응답이 A에서의 입력운동과 동일하므로 구조물 II의 지진해석시 설계응답스펙트럼을 수정없이 사용하여도 무방하나 기반암을 탄성으로 가정할 경우 지반응답해석을 이용하여 응답스펙트럼을 수정하여 사용해야만 한다. III과 같은 구조물의 경우 C위치에서의 응답을 구조물 해석시 이용한다. C위치에서 운동의 진폭은 B와 C 위치 사이에 존재하는 지반의 특성에 따라 변화하게 된다.

그림 12에 기반암을 탄성이라고 가정한 해석 사례 1의 경우에 대해 감쇠비 5%인 경우의 암반노두에서 정의된 설계 응답스펙트럼과 지층내 응답스펙트럼을 비교하여 도시하였다. 이 결과에 의하면 층내 기반암의 응답스펙트럼은 암반노두와 상이한 값을 갖는다. 이는 2장에서 유도한 바와 같이 경계조건의 차이 때문에 발생하는 현상임을 알 수 있으며 이러한 차이를

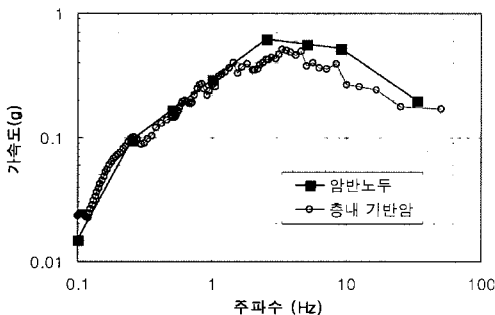


그림 12 암반 노두와 지층내 기반암에서의 응답스펙트럼

무시할 경우 그림 11의 구조물II와 같이 깊은 연약층에 위치하고 선단이 기반암에 근입된 긴 말뚝기초를 갖는 구조물의 내진설계에서 구조물의 주파수 특성에 따라 과다 혹은 과소 설계가 수행될 가능성이 있다고 사료된다.

## 7. 결 론

1. 지반 지진응답 해석시 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 연약층이 깊게 존재하는 지반에 건설되는 구조물은 대부분 말뚝기초 등을 이용하여 지층내 암반에서 지지되므로 말뚝을 포함한 모델을 이용하여 구조물을 해석할 경우에는 지층내 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 연약층에 위치하고 선단이 지반내 기반암에 근입되어있는 긴 말뚝기초를 갖는 구조물의 내진설계시 과다설계가 이루어질 가능성이 있다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 대림산업(주) 기술연구소의 지원으로 이루어졌음을 밝히며 이에 감사합니다.



### 참 고 문 헌

1. Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, 1996.
2. 한국지진공학회, 내진설계기준연구(II), 건설교통부, 1997.
3. Idriss, I. M. and Sun, J. I., *SHAKE91 User's Guide*, University of California, 1992.
4. U. S. Atomic energy commission, "U. S. atomic energy commission regulatory guide 1.60 ; Design response spectra for seismic design of nuclear power plants", 1973.
5. Newmark, N. M., Blume, A., and Kanwai, K. K., "Design response spectra for nuclear power plants," *ASCE Structural Engineering Meeting*, San Francisco, 1973.
6. Seed, H. B., Ugas, C., and Lysmer, J., "Site-dependent spectra for earthquake-resistant design," *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 66, No. 1, 1976, pp. 221-243.
7. SIMQKE, *User's Manual and Documentation*, Department of Civil Engineering, M.I.T., 1976.
8. Chen, C., "Simulation of three component spectra compatible time histories," *2nd ASCE Specialty Conference on Structural Design of Nuclear Plant Facilities*, ASCE, Vol. I-A, 1974, pp. 72-79.
9. Hu, Y. X., Liu, S. C., and Dong, W., *Earthquake Engineering*, E & FN SPON, 1996.
10. 한국지반공학회, 진동 및 내진설계, 구미서관, 1997.
11. 김동수, 이진선, "부지고유의 지반거동 평가예제 연구", 한국지진공학회 추계학술대회 논문집, 1998.