

지하철 주변 지반진동의 전파경로가 진동레벨 감쇠에 미치는 영향

The Effects of the Wave Propagation Path of Ground Vibration Induced by the Subway Train on the Reduction of Vibration Level

신한철[†] · 조선규* · 양신추** · 이종민***

Han-Chul Shin · Sun-Kyu Cho · Shin-Chu Yang · Jong-Min Lee

Abstract In this paper, Numerical analysis was conducted to study on the reduction of ground vibration level induced by subway train. The analytical results indicated that the soil properties were the predominant factor affecting the ground vibration when the tunnel was located in the soil layer. On the other hand, the rock properties were the predominant one when the tunnel was located in the rock layer. The effects of the angle between the vertical line of vibration source and the receive point on the reduction of vibration level were also evaluated. There were little difference in the reduction of vibration level when the receive point was located within 30°. The vibration level, however, rapidly decreased when the angle between the two points was larger than 40°.

Keywords : Reduction of vibration level, Subway ground vibration, Numerical analysis, Back analysis

요 지 본 논문에서는 수치해석적인 기법을 이용하여 지하철 주변 지반의 진동레벨 감쇠에 대한 연구를 수행하였다. 해석 결과 터널이 토사지반에 있을 경우 지반진동에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 지반의 물성치로 나타났고, 암반에 있을 경우 가장 큰 영향을 미치는 것은 암반의 물성치로 나타났다. 또한, 진동원과의 연직면에서 떨어져 있는 각도를 기준으로 영향범위를 산정한 결과, 대부분의 해석 결과에서 연직면에서 30° 이내에 있을 경우 진동레벨의 감쇠 현상은 크지 않은 것으로 판단되었고, 40° 이상이 되면 진동레벨은 급격히 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

주 요 어 : 진동레벨 감쇠, 지하철 지반진동, 수치해석, 역해석

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

도시철도를 운영함에 있어 열차운행시 발생하는 지반진동 및 소음은 민원을 야기한다. 도시철도의 경우 대부분 지하구간에 터널(또는 Box) 형태로 건설되고 있고, 지반진동에 관련된 조건으로는 차량, 선로, 지반, 건물 등 다양하다.

특히 터널의 주변 지반조건은 토사지반, 암반지반 또는 토사지반 및 암반지반 사이 등으로 다양하다.

지하철 운행으로 인해 발생하는 지반진동은 지반을 매질로 인접구조물 또는 지표면으로 전달되기 때문에 지반진동의 전파경로에 대한 연구는 의미가 있다. 지반진동의 전파경로에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 터널의 위치이고, 터널 주변지반 및 암반의 강성이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 수치해석적인 기법을 이용하여 터널의 위치가 상부 토사지반에 있을 경우와 토사지반과 암반 사이에 있을 경우 및 암반에 있을 경우 등 터널의 위치를 다양하게 고려한 해석을 수행하였다. 또한 터널 주변 지반의 영향 요소를 다양하게 고려하여 지반진동의 전파경로 및 지반과 암반의 강성 차이 등이 지하철 주변 지반진동레벨에 미치는 영향에 대하여 알아보았다.

해석결과 터널의 위치가 지반진동레벨에 미치는 영향이 크게 나타났고, 터널의 위치에 따라서 지반의 물성치

[†] 책임저자 : 정회원, 서울특별시 상수도사업본부 부분부장
E-mail : hans@seoul.go.kr

TEL : (02)3146-1020 FAX : (02)3146-1019

* 교신저자 : 정회원, 서울산업대학교 건설공학부 교수
E-mail : skcho@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6512

** 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구실장
E-mail : scyang@krii.re.kr

TEL : (031)460-5301

*** 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정
E-mail : scmin988@snut.ac.kr

TEL : (02)970-7254

및 암반의 강성이 지반진동레벨에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 터널 주변 지반조건과 불연속면의 위치 등이 전파경로에 영향을 미치는 사례를 분석하였다.

2. 해석단면에 대한 모델링 및 입력하중 산정

2.1 Mesh size 결정

시간영역에서 동적해석을 수행할 경우 해석에 드는 시간 및 비용을 최소화하고 파의 전파형상을 효율적으로 묘사하기 위하여 유한요소의 최적화는 반드시 필요하다. 지하철 운행으로 인한 진동이 발생할 경우 지반을 통하여 전파되는 파장은 극히 짧은 것부터 매우 긴 것까지 다양하게 존재한다. 그러나, 지반에서 파가 전파 될 경우 감쇠현상에 의해 에너지가 소산되기 때문에 짧은 파장의 경우 곧 소멸되어 버린다. 따라서, 유한요소법을 이용하여 동해석을 수행할 경우 모든 파장을 고려할 필요는 없고, 관심 있는 최소 파장의 길이를 결정하여 유한요소의 크기를 결정하는 것이 합리적이다.

본 논문에서는 상부 토층의 지반을 연약지반, 보통지반 및 풍화토 지반으로 선정하였고, 하부 기반암 경우를 연암, 보통암 및 경암지반으로 선정하였다. 이러한 구분은 표 1 과 같이 내진설계시 지반을 분류하는 기준을 근거로 선정하였다[1].

본 연구에서는 연약지반의 경우 지반의 전단파속도 (Vs)를 180m/sec, 일반 토사지반의 경우 300m/sec, 그리고 단단한 토사 또는 풍화토 지반의 경우 400m/sec로 선정하여 해석을 수행하였다. 암반의 경우 연암의 전단파속도는 760m/sec, 보통암의 전단파속도는 1,500m/sec 그리고 경암의 전단파속도는 2,400m/sec로 가정하여 해석을 수행하였다.

일반적으로 시간영역에서 동적해석을 수행할 경우 파의 전파특성을 효율적으로 시뮬레이션하기 위하여, 유한요소의 크기는 관심 있는 최소 파장의 길이(λ)의 $\lambda/6 \sim \lambda/8$ 보다 작아야 전파형상을 효율적으로 묘사할 수 있다[2].

본 논문에서는 지반의 전단파속도가 180m/sec~400m/sec 사이의 값을 가지고, 지반에서 전파되는 진동의 주파수는 대략 100Hz 미만의 저주파 성분으로 가정하였고, 식 (1)을 이용하여 관심 있는 최소 파장의 길이를 2m~4m 정도로 산정하여 유한요소의 크기가 0.4m 이하가 되도록 모델링하였다[2].

$$f \cdot \lambda = V_s \tag{1}$$

여기서, f = 주파수(Hz), λ = 파장 길이(m), V_s = 전단파속도(m/sec) 이다.

Table 1. Site Category (MOCT, 1997)[1]

지반 분류	지반종류	상부 30m에 대한 평균 지반 특성		
		전단파속도, VS30(m/s)	표준관입 시험 $\frac{N}{N(N_{crit})}$ (blow/foot)	비배수 전단강도 $\frac{S_u}{S_u}$ (kPa)
S_A	경암지반	1500초과	-	-
S_B	보통암지반	760에서 1500	-	-
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

표 2에는 연약지반, 보통지반 및 단단한 토사지반(풍화토)의 입력 물성치와 연암, 보통암 및 경암 등 기반암의 입력 물성치, 그리고 터널라이닝의 콘크리트 물성치를 정리하였다.

Table 2. Material Properties

구분	밀도	Vs	G	ν	E	감쇠비
	kN/m ²				m/s	
콘크리트	23.52	2400	13820.0	0.2	22600.0	2.0
연약지반	16.17	180	53.46	0.35	144.34	3.0
보통지반	18.13	300	166.50	0.33	442.89	3.0
풍화토	19.11	400	312.00	0.30	811.20	3.0
연암	22.54	760	1328.48	0.25	3321.20	2.0
보통암	23.52	1500	5400.0	0.25	13500.0	2.0
경암	23.52	2400	13820.0	0.25	34560.0	2.0

2.2 해석 모델의 정의

본 논문에서는 상부 토층을 연약지반, 보통지반 및 풍화토 지반 등 3개 종류의 지반으로 선정하였고, 하부 암반의 경우 연암, 보통암 및 경암지반 등 3개 종류의 암반을 선정하였다. 또한 터널의 위치와 지반의 층상구조에 따른 진동 레벨 감쇠의 변화에 대한 것을 알아보기 위하여, 터널의 위치가 토사지반에 위치한 경우(Case 1), 토사지반과 암반사이에 위치한 경우(Case 2), 그리고 암반지반에 위치한 경우(Case 3)로 나누어 해석을 수행하였다.

표 3에는 위와 같은 토사지반과 암반의 층상구조와 터널의 위치에 따른 해석 케이스를 정리하였다.

Table 3. Case study

터널 위치	토사 종류		암반 종류		강성비 E암반/ E지반	Case
	구분	Vs	구분	Vs		
토사 지반 (case 1)	연약 지반	180	연암	760	23.0	#1-1
			보통암	1500	93.5	#1-2
			경암	2400	239.4	#1-3
	보통 지반	300	연암	760	7.5	#1-4
			보통암	1500	30.5	#1-5
			경암	2400	78.0	#1-6
	풍화토	400	연암	760	4.1	#1-7
			보통암	1500	16.6	#1-8
			경암	2400	42.6	#1-9
토사 - 암반 사이 (case 2)	연약 지반	180	연암	760	23.0	#2-1
			보통암	1500	93.5	#2-2
			경암	2400	239.4	#2-3
	보통 지반	300	연암	760	7.5	#2-4
			400	1500	30.5	#2-5
			경암	2400	78.0	#2-6
	풍화토	400	연암	760	4.1	#2-7
			보통암	1500	16.6	#2-8
			경암	2400	42.6	#2-9
암반 (case 3)	연약 지반	180	연암	760	23.0	#3-1
			보통암	1500	93.5	#3-2
			경암	2400	239.4	#3-3
	보통 지반	300	연암	760	7.5	#3-4
			보통암	1500	30.5	#3-5
			경암	2400	78.0	#3-6
	풍화토	400	연암	760	4.1	#3-7
			보통암	1500	16.6	#3-8
			경암	2400	42.6	#3-9

그림 1~그림 3에는 터널 위치에 따른 해석대상지반의 모델링을 나타내었다. 유한요소의 경우 평면변형 조건의 4절점 사각형 유한요소를 사용하였고 유한요소 가장자리 경계면에는 파의 반사로 인한 영향을 없애기 위한 무한요소 (infinite element)를 이용하였다. 따라서, 무한요소가 사용된 원거리 영역(far field)에서는 변위, 응력, 에너지 등이 지수함수 형태로 감소하여 매우 작은 값이 되므로 특별한 경계조건이 필요 없다[3].

본 연구에서는 전파경로를 고려한 지하철 주변 지반의 진동레벨에 대한 감소현상을 살펴보기 위하여, 상업용 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Explicit Version 6.5-1을 이용하였다[4].

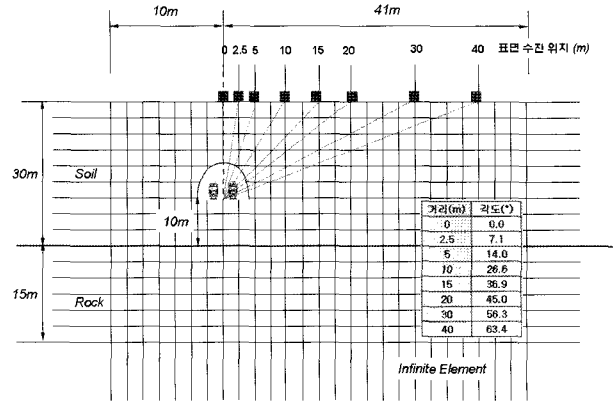


Fig. 1. Numerical modeling of Case 1

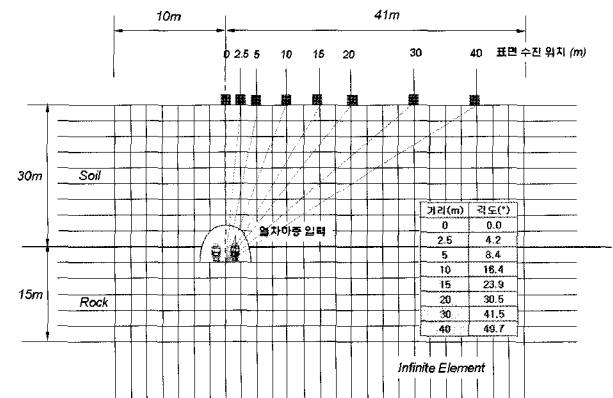


Fig. 2. Numerical modeling of Case 2

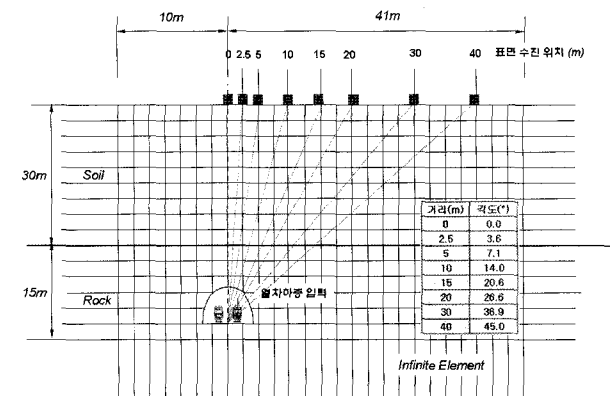


Fig. 3. Numerical modeling of Case 3

또한, 본 논문에서는 진동원에서 수신부까지 연직면으로부터의 각도에 따른 지반의 진동레벨 감소에 대한 특성을 살펴보기 위하여 지표면 거리에 따른 각도의 변화에 대한 결과를 분석하였다. 지표면 거리에 따른 연직면으로부터의 각도는 그림 1~그림 3에 나타나 있다.

2.3 입력하중 산정 방법

열차하중에 의한 인접한 구조계의 진동을 합리적으로 예

측하기 위해서는 구조계에 작용하는 열차하중을 신뢰성 있게 산정하는 것이 매우 중요하다. 그러나, 열차하중을 열차의 중량, 속도, 레일의 조도성분 등을 종합적으로 고려하여 동적 구조해석을 위한 시간이력인 하중을 산정하는 일은 여러 가지 불확실성이 존재하여 신뢰성 있는 결과를 얻기가 매우 어렵다.

본 연구에서는 신뢰성 있고 합리적인 결과를 얻기 위해 계측된 열차진동과 해석적으로 산정된 열차와 구조계의 주파수 응답함수로부터 열차하중을 역산할 수 있는 역해석 (Input Identification) 기법을 적용하였다. 이런 방법으로 구한 시간이력 열차하중을 유한요소해석 결과와 비교하여 결과의 신뢰성을 검증하였다.

역해석 기법은 중첩의 원리가 적용될 수 있는 선형구조계에서 식 (2)를 이용하여 산정할 수 있고, 미지의 열차하중 $P(\omega)$ 는 식 (3)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$U(\omega) = H(\omega) \cdot P(\omega) \tag{2}$$

$$P(\omega) = U(\omega)/H(\omega) \tag{3}$$

여기서, $U(\omega)$ 와 $P(\omega)$ 는 각각 응답과 입력하중의 푸리에 스펙트럼이고, $H(\omega)$ 는 단위하중에 의한 구조계의 주파수 응답함수를 의미한다[5].

식 (3)을 살펴보면 단위하중에 의한 구조계의 주파수 응답함수와 구조계에서 계측된 응답의 푸리에 스펙트럼을 구할 경우 구조계에 작용하게 되는 열차하중이 쉽게 계산될 수 있다.

2.4 열차진동계측 결과 및 열차하중의 산정

열차진동에 의해 발생한 구조계의 응답을 구하기 위해 기존 열차 운행구간에서의 수직진동에 대한 속도시간이력을 계측하였다. 계측은 서울도시철도 5호선의 종로3가역과 을지로4가역의 중간 지점에 있는 본선 터널 직상부에 있는 중요주차장에서 계측하였다. 진동 계측시 계측위치와 계측 응답은 그림 4에 나타내었다.

계측지점의 지반모형에 단위하중을 적용하여 계측지점에서의 주파수 응답함수를 산정하기 위해 지반의 반무한성을 고려할 수 있는 동적해석 프로그램인 SASSI를 사용하여 transfer function을 획득하였다[6]. 그림 5는 주파수 응답함수 및 열차하중 산정을 위한 수치해석적인 모델링 및 입출력 위치를 나타낸 개념도이다. SASSI를 사용한 동적 응답해석을 통해 구해진 계측지점의 주파수 응답함수는 그림 6과 같다.

전술한 바와 같이 주파수 응답함수와 계측된 응답을 상호처리기법을 사용하여 열차 운속에 작용하는 열차하중

을 산정하였고, 산정된 결과는 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 나타난 시간이력곡선은 배경잡음(noise)의 영향이 가장 작은 계측 데이터를 이용하여 역산한 시간이력곡선이다.

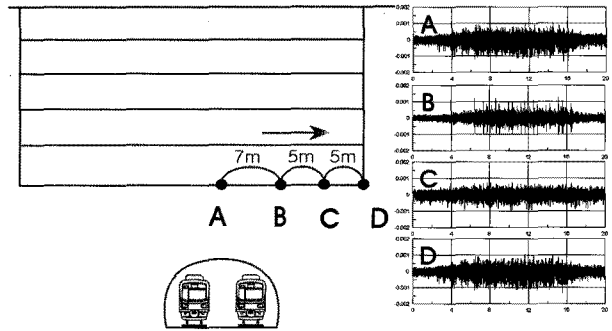


Fig. 4. Location of measurement for train vibration and time history of the vertical component (acceleration)

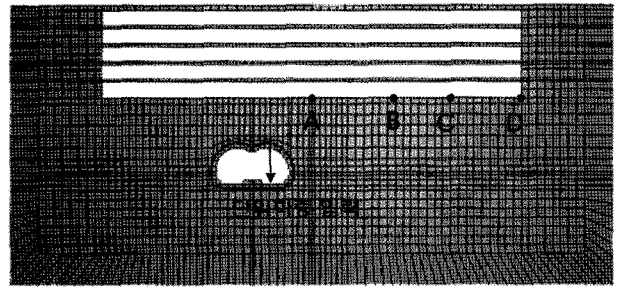


Fig. 5. Numerical modeling for the evaluation of train force

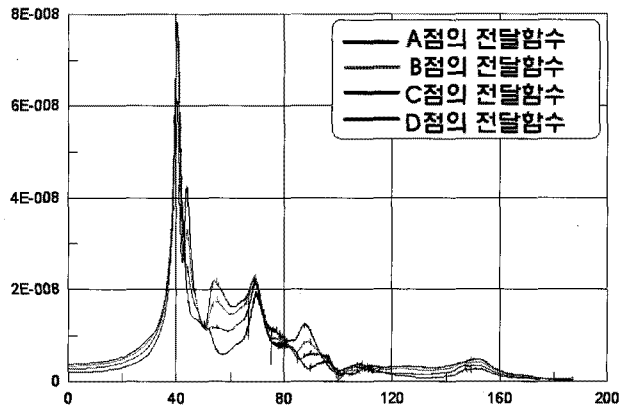


Fig. 6. Frequency response function at the measurement

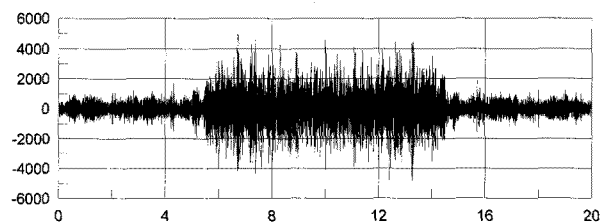


Fig. 7. Time history of the evaluated force for numerical analysis

3. 파의 전파형상 (Wave propagation)

본 절에서는 SASSI를 이용하여 역산기법으로 산정된 하중을 이용하여, ABAUQS/Explicit로 터널 위치에 따라 3개의 case에 대한 해석을 수행한 결과를 분석하였다[7]. 각각의 case는 지반과 암반의 강성에 따라 표 3과 같이 9개의 세부 모델로 나누어 해석을 수행하였다.

3.1 터널 위치에 따른 지반진동 전파형상

터널의 위치가 변할 경우 수신부에 전달되는 지반진동의 전파경로는 달라진다. 본 절에서는 터널의 위치에 따라서 지하철 하중에 의한 지반진동의 전파형상에 대한 결과를 분석하였다.

그림 8에는 상부 지반은 보통 토사지반($V_s=300\text{m/sec}$)이고 하부 암반은 보통암($V_s=1,500\text{m/sec}$)으로 이루어진 해석 모델에 대하여, 해석 시작 후 12.0초가 지난 후 터널(또는 Box)이 토사지반에 있을 경우(그림 8-(a), case 1-5), 토사와 암반지반 사이에 있을 경우(그림 8-(b), case 2-5) 그리고 암반지반에 있을 경우(그림 8-(c), case 3-5)의 지반진동 전파형상을 나타내었다. 그림 8-(a)에 나타난 바와 같이 터널(또는 Box)이 토사지반에 건설되어 있을 경우(case 1) 대부분의 진동에너지는 토사지반을 통하여 전파가 이루어지고 있고, 지반진동 전파형상은 case 2와 case 3과 전혀 다른 전파 특성을 보이고 있다. 이는 암반의 강성이 토사지반보다 크기 때문에 진동파가 암반으로 전파되지 못하고 지반과 암반 경계부분에서 반사가 이루어지기 때문으로 분석된다. 반면, case 2와 case 3과 같이 진동원이 암반에 있을 경우 대부분의 에너지는 암반을 통하여 전파가 이루어지고 상대적으로 적은 에너지가 토사지반으로 전파되는 현상이 일어난다. 따라서, 토사지반에 건설된 지역에서 지반진동이 크게 발생하고, 암반지역에 건설된 곳의 경우 상대적으로 지반진동이 작게 나타나게 된다.

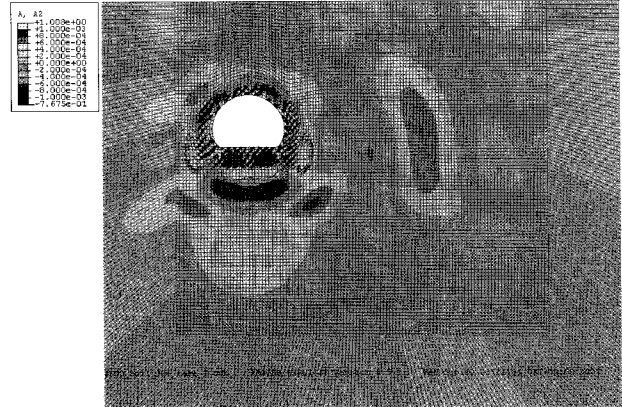
이와 같이 본 논문에서 얻어진 전파형상에 대한 결과는 뉴욕지하철 방법 및 일본 지하철 방법 등 기존의 지하철 운행으로 인한 지반진동 예측식의 경우와 경향성 측면에서 같은 것으로 판단된다.

3.2 암반/지반 강성차이에 의한 지반진동의 전파형상

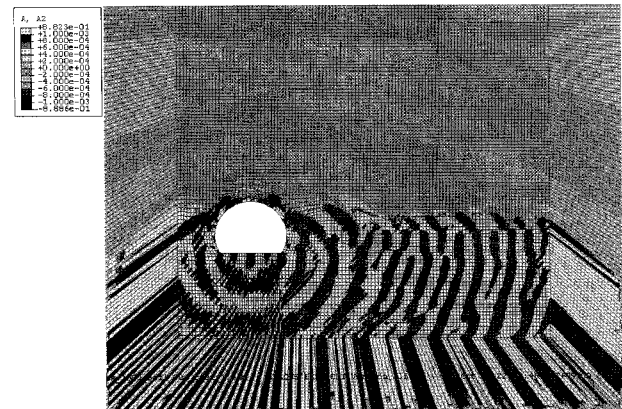
본 절에서는 암반과 상부지반의 강성차이에 의한 지반진동의 전파형상에 대한 결과를 분석했다. 그림 9에는 터널이 경암에 건설되어 있을 경우 상부 토사지반이 연약지반, 일반토사 지반 그리고 풍화토 지반으로 이루어졌을 경우 지반의 진동레벨에 대한 전파형상을 나타내었다.

그림 9의 결과를 살펴보면 상부 토층의 변화에 따른

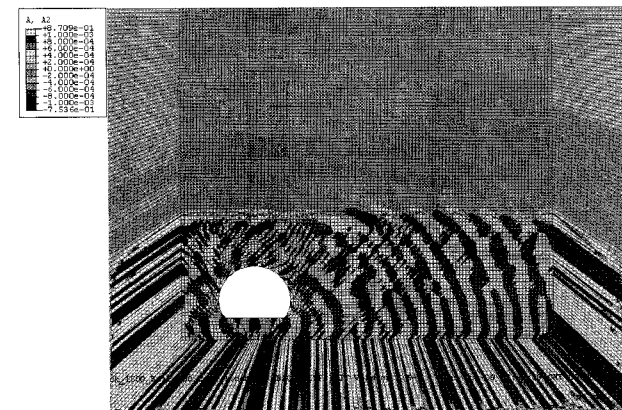
진동레벨의 전파형상은 비슷하게 나타났다. 이러한 결과는 하부 암반지반이 연암일 경우와 보통암일 경우도 비슷한 현상이 나타났다. 따라서, 터널의 위치가 동일 할 경우 암반의 종류 및 상부 토층 종류의 변화에 따른 지반진동 전파형상은 비슷한 것으로 나타났으며, 다만 지반진동의 크기는 지반 조건 및 암반의 강성에 따라 다르게 나타났다.



(a) Contour of the wave propagation for Case 1-5



(b) Contour of the wave propagation for Case 2-5



(c) Contour of the wave propagation for Case 3-5

Fig. 8. Contour of the wave propagation characteristics with the location of tunnel (or Box)

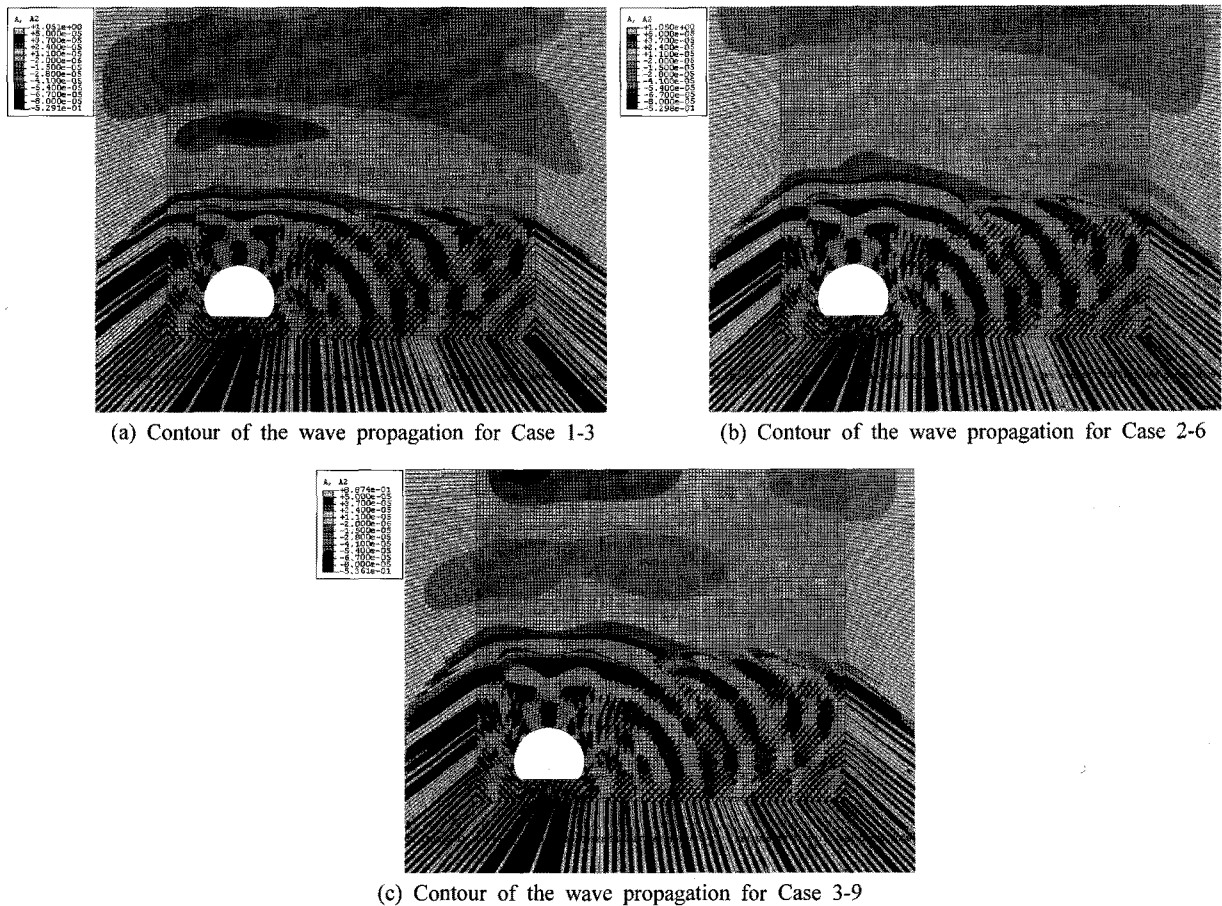


Fig. 9. Contour of wave propagation characteristics with the stiffness difference between soil and rock

4. 지반 진동레벨 감쇠 현상

본 절에서는 터널의 위치에 따른 지하철 주변 지반의 진동레벨 감쇠에 대한 연구를 수행하였다[7]. 지하철 진동에 대한 지표면에서 지반 진동레벨의 감쇠현상에 대하여 분석을 하였고, 특히 터널 직상부와 터널 하부 중심 간의 각도를 이용한 진동레벨의 감쇠 현상에 대하여 분석하였다.

4.1 거리에 따른 진동레벨 감쇠 현상

그림 10~그림 15에는 지하철 진동으로 유발된 주변 지반 지표면에서의 해석결과이다. 그림 10~그림 12는 터널이 상부 토사지반에 있을 경우, 터널이 토사와 암반 사이에 걸쳐 있을 경우, 그리고 암반 지역에 있을 경우 등 터널의 위치가 변할 경우에 대한 해석 수행 결과이다. 또한, 그림 13~그림 15에는 암반의 물성치가 일정할 경우 상부 토사 지반의 물성과 터널의 위치가 변할 경우에 대한 해석 결과를 나타내었다. 지표면 수신부의 위치는 그림 1~그림 3과 같다.

그림 10의 경우 터널 단면 전체가 토사 지반에 있는 경우이고, 그림 11은 터널은 토사지반과 암반 사이에 있으나 진동원은 암반에 있는 경우이다. 그림 12는 터널 단면 전체와 진동원이 암반에 있는 경우에 해당한다. 따라서 그림 11과 그림 12의 경우 진동원은 암반에 있다고 볼 수 있다. 그림 10~그림 12의 결과에서는 진동원의 위치가 토사 지반에 있을 경우와 암반층에 있을 경우로 나누어 생각할 수 있고, 아래와 같이 두 가지의 큰 특징이 나타나고 있다.

해석결과 터널이 토사 층에 있을 경우(그림 10), 상부 토사지반의 지반조건 변화에 의한 영향이 매우 큰 것으로 나타났고, 하부 암반 종류의 변화에 대한 변화는 상대적으로 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다.

터널이 암반과 토사 사이에 있을 경우, 그림 11에 나타난 바와 같이 상부 지반조건 변화에 의한 영향 보다는 하부 암반의 강성에 따른 변화가 더 크게 나타났다. 즉, 암반의 강성이 암반과 토사 지반의 강성차이보다 더 큰 영향 인자로 판단된다.

터널이 하부 암반층에 있을 경우, 그림 12에 나타난 바와

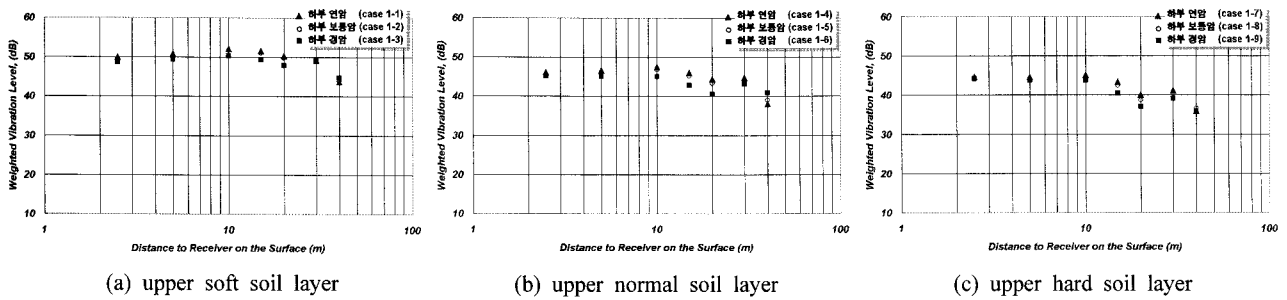


Fig. 10. Tunnel (or Box) located in the upper soil layer

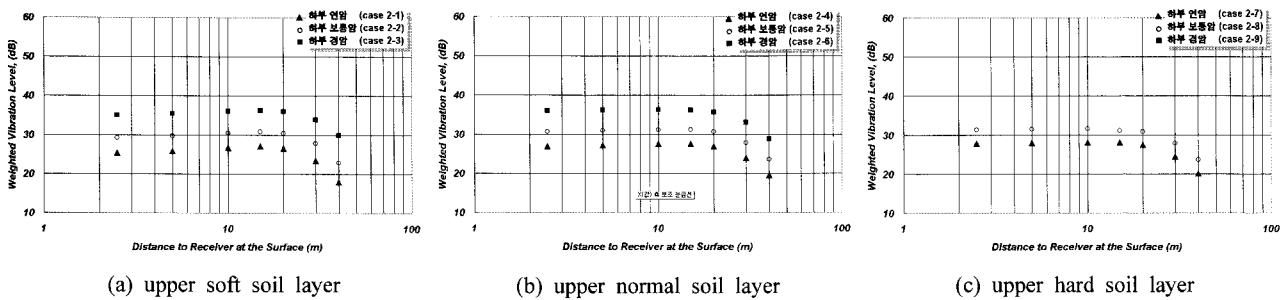


Fig. 11. Tunnel located between soil and rock layer

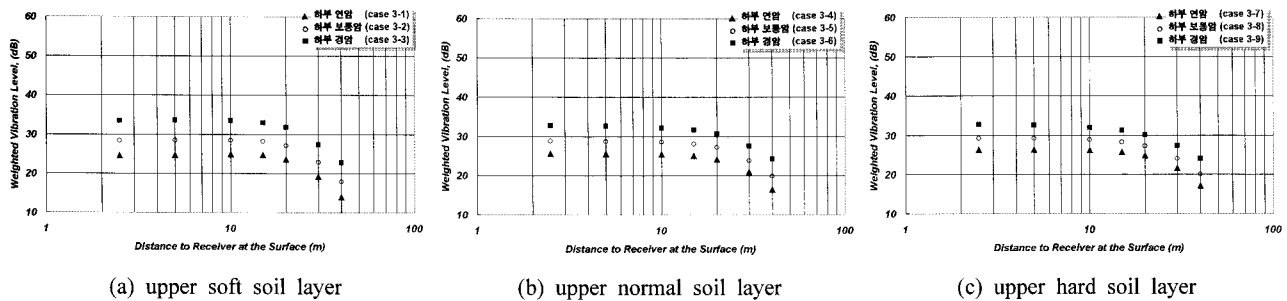


Fig. 12. Tunnel located in lower rock layer

같이 상부 지반조건의 변화에 의한 영향 보다는 하부 암반의 강성에 따른 변화가 더 크게 나타나고 있다. 즉, 암반의 강성이 암반과 지반의 강성차이보다 지반의 진동레벨에 더 큰 영향을 미치는 인자로 판단된다. 이러한 결과는 그림 11의 결과와 유사하다. 따라서 진동원의 위치가 암반에 있을 경우와 경향성 측면에서 비슷한 것으로 판단된다.

따라서, 수신부의 거리에 따른 해석 결과에서는 터널의 위치가 토사지반 또는 암반지반에 있느냐가 지반진동 감소에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 분석되며, 터널(또는 BOX)이 토층에 있을 경우 토층의 물성치가 진동 예측을 위한 가장 중요한 요소로 판단된다. 특히, 터널이 토사지반에 있을 경우 하부 암반지반의 물성치가 미치는 영향은 미비한 것으로 나타났다.

터널이 토사지반에 있을 경우 거리감쇠와 재료감쇠가 암반에 있는 경우 보다 상대적으로 크게 발생하고, 암반과의

경계부분에서 반사파의 영향이 나타난다. 예를 들자면, 그림 10의 30m 위치 같이 토층과 암반의 경계층에서 반사되는 영역에 있는 곳에서 진동크기가 커질 수 있는 개연성이 있다. 이에 대한 설명은 4.3절에서 자세하게 서술되어 있다.

4.2 가진원과의 각도에 따른 지반진동 감쇠현상

본 절에서는 진동원으로부터 수신측까지의 각도(연직선으로부터)에 의한 진동감쇠에 대하여 분석하였고, 분석 결과는 그림 16에 나타나있다. 각 위치의 각도는 그림 1~그림 3에 나타나 있다.

그림 16의 결과를 살펴보면, 터널이 상부 토층에 있을 경우와 암반 또는 토사와 암반지반 사이에 있을 경우로 크게 구분이 가능하다. 터널(또는 Box)이 상부 토층에 있을 경우 진동감쇠는 선형적으로 감쇠하는 경향이 있는 것

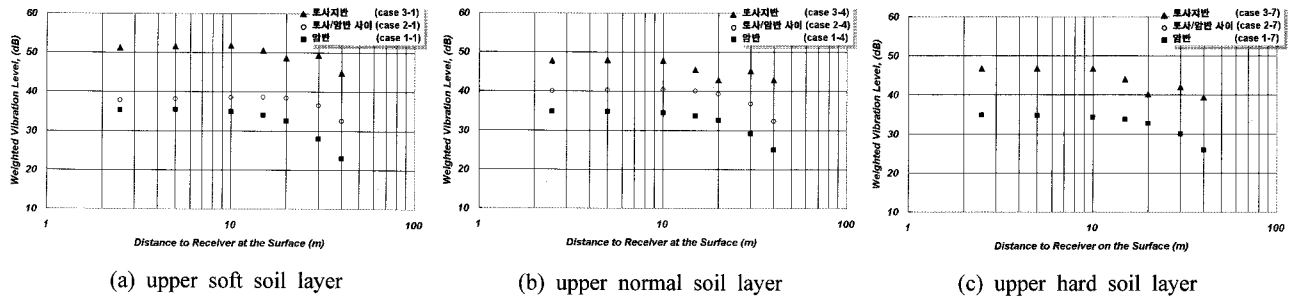


Fig. 13. Tunnel located in soft rock as a lower layer

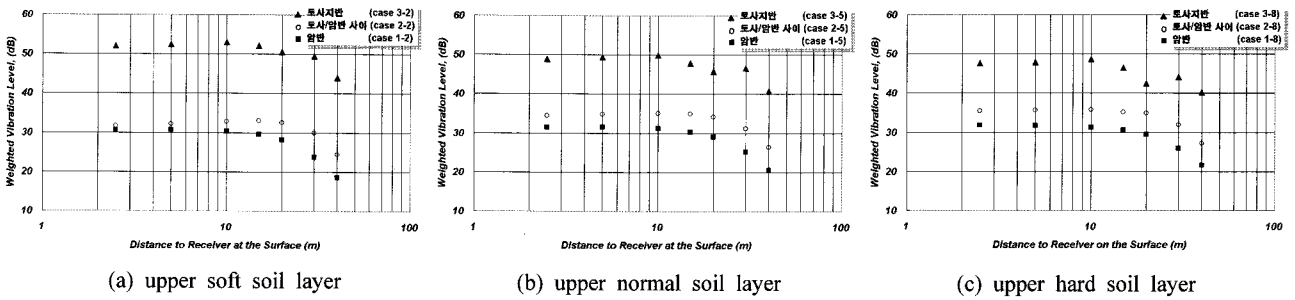


Fig. 14. Tunnel located in general rock as a lower layer

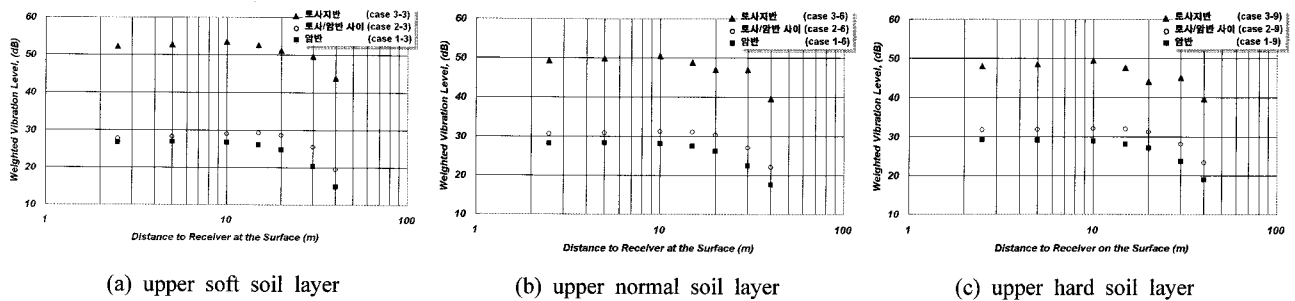


Fig. 15. Tunnel located in hard rock as a lower layer

으로 나타났다. 반면, 암반 또는 암반과 토사사이에 있을 경우(가진원은 암반에 있을 경우) 수신부가 연직선에서 30° 이내에서는 진동감쇠현상이 두드러지게 발생하지 않고 있다.

암반 또는 암반과 토사사이에 있을 경우 수신부가 연직선에서 30° 이상에서는 지반진동의 감쇠현상이 서서히 발생하기 시작하여 40° 이상부터 급격하게 감쇠현상이 발생하는 현상이 나타났다.

추세선의 전체적인 경향은 암반/토사 지반의 강성차이가 작을수록 감쇠 추세가 선형에 가깝고, 강성의 차이가 클수록 추세선은 비선형으로 가깝게 산정되었다.

연직선으로부터 30° 이내에 있을 경우, 모든 해석결과에서 감쇠 경향이 크게 나타나지 않았다. 또한, 터널 직상부에서 30° 이내에 있을 경우 직상부보다 진동이 크게 발생하는 곳도 발생하고 있다. 이는 전술한 바와 같이 파의 중

첩 효과로 인하여 각도가 작을 경우 복잡한 거동이 나타나 는 것으로 판단된다.

4.3 파의 중첩 현상 및 이질층 경계면에서의 반사 현상

4.1절과 4.2절에서 설명한 바와 같이, 지반진동의 전파경로 및 암반/지반의 강성 차이가 진동레벨에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 대표적인 예로 터널 직상부에서 멀리 떨어져 있지 않은 곳 또는 직상부와의 각도가 20°~30° 사이의 값이 직상부의 진동레벨보다 크게 나타나는 현상과 암반과의 경계부분에서 반사파의 영향 등이다. 본 연구에서는 이러한 현상이 발생하는 곳에서 파의 전파 형상을 살펴보았다.

그림 17은 터널 직상부 주변의 값이 터널 직상부의 값보다 크게 나타나 거리에 따른 감쇠현상이 발생하지 않는 것처럼 보이는 이유에 대하여 설명을 해주고 있다. 즉, 지하철 하중은 일정 시간 동안 지속되는 하중이고 터널의 경우

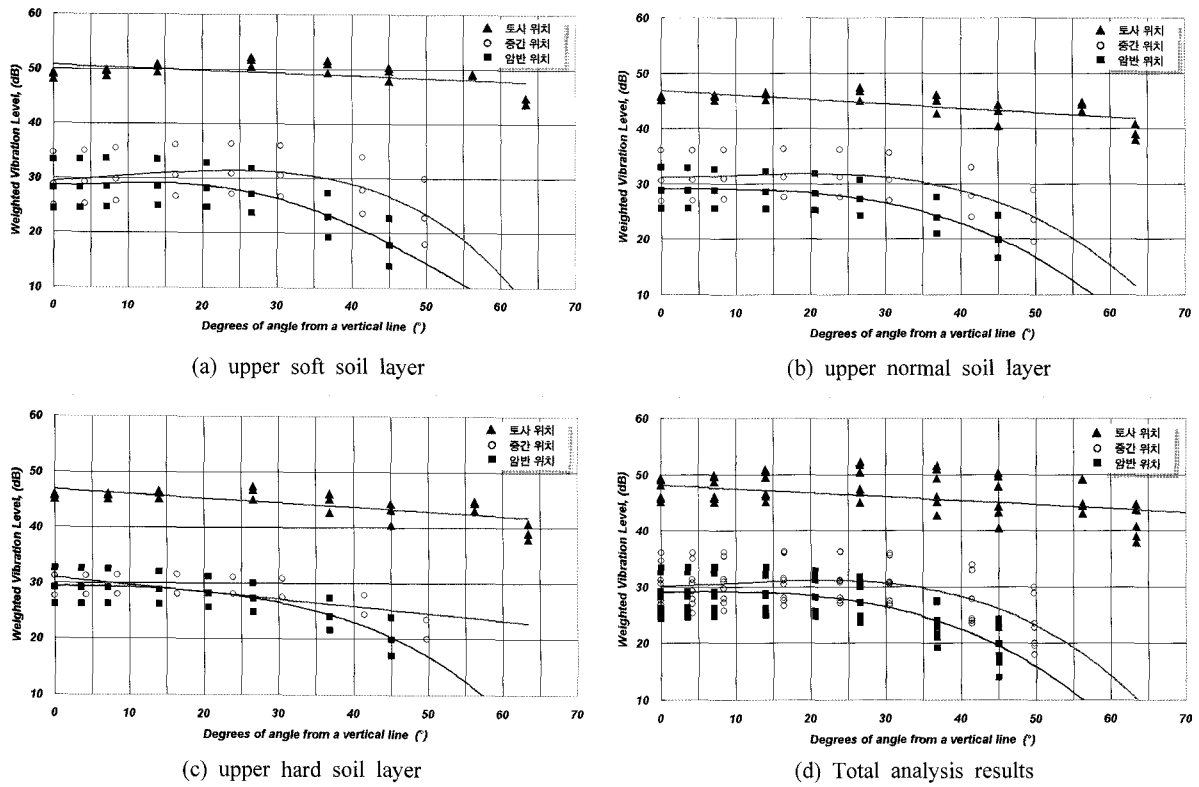


Fig. 16. Reduction of vibration level with the degrees of angle from a vertical line

강체거동(rigid body motion)을 하고 있어 터널 자체가 하나의 하중으로 작용하게 된다. 따라서, 터널 직상부에서 항상 가장 큰 진동이 감지되는 것이 아니고 주변지반에서 더 크게 감지되는 경우가 발생할 수 있다.

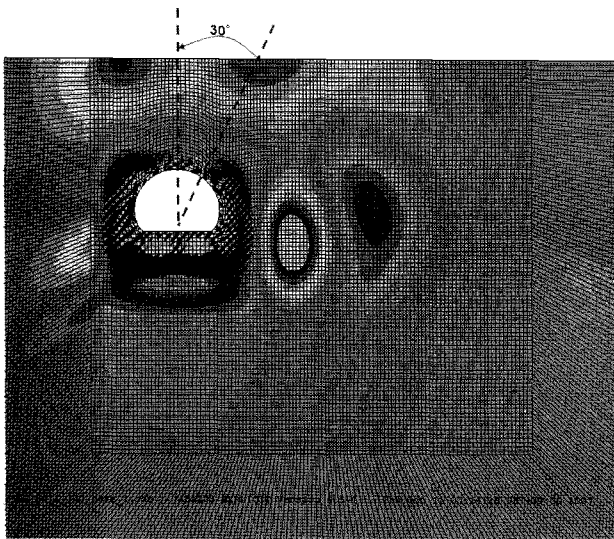


Fig. 17. Wave propagation around the tunnel located in soil layer

그림 18은 토층과 암반의 경계층에서 반사되는 영역에 있는 곳에서 진동크기가 커져 거리감쇠 현상이 발생하지 않는 경우에 대한 예이다. 그림 10~그림 15의 결과를 살펴

보면, 직상부에서 30m 떨어진 지점에서 터널이 토사지반에 있을 경우 20m 떨어진 지점보다 진동레벨이 더 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 그러나, 진동원이 암반에 있을 경우 이러한 현상이 발생하지 않고 진동레벨이 지속적으로 감소하고 있다.

터널(또는 80X)가 토사지반에 있을 경우 암반과층 경계층에서 반사파 등의 영향이 나타나는 지점

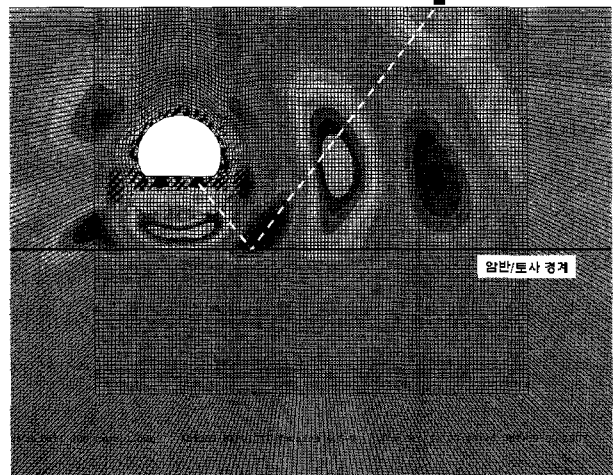


Fig. 18. Wave propagation around the tunnel located in soil layer above the rock

본 논문에 이용된 해석모델의 경우 토사와 암반의 경계층에서 반사되는 파동이 직상부에서 30m 떨어진 곳에 많

은 영향을 미쳐 주변보다 큰 진동이 발생하는 것으로 나타났으나, 이는 현장 지반 조건에 따라 달라질 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 지하철 주변 지반의 진동레벨 감쇠에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 터널의 위치와 3 종류의 토사지반과 3 종류의 암반을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 해석 결과 터널이 토사지반에 있을 경우 지반진동에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 지반의 물성치로 나타났고, 암반에 있을 경우 가장 큰 영향을 미치는 것은 암반의 물성치로 나타났다. 또한, 진동원과의 연직면으로부터 이격 되어 있는 각도를 기준으로 영향범위를 산정한 결과, 대부분의 해석 결과에서 연직면에서 30° 이내에 있을 경우 진동레벨의 감쇠 현상은 크지 않은 것으로 판단되었고, 40° 이상이 되면 진동레벨은 급격히 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(MOCT)(1997), “내진설계기준연구 II.”
2. 윤종구(2000), “경사지반에서 표면파기법 적용시 영향요소 연구 (수치해석),” 한구과학기술원 석사학위논문.
3. Kuhlemeyer, R. L., and J. Lysmer(1973), “Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems,” J. Soil Mech, & Foundations Div., ASCE, Vol. 99(SM5), pp. 421-427.
4. ABAQUS/Explicit User's Manual, Version 6.5-1, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
5. 윤정방, 이동근, 정진상, 김두기(1997), “지하철 운행하중에 대한 인접구조물의 진동해석,” 대한토목학회 논문집 제17권 제I-1호, pp. 25-34.
6. SASSI User's manual(1988), “The Gegents of the University of California.”
7. 신한철(2009), “도시철도 터널구간 지반진동 예측에 관한 연구,” 서울산업대 철도전문대학원 박사학위논문.

접수일(2008년 10월 15일), 수정일(2009년 9월 7일),
 게재확정일(2009년 9월 24일)