

틸팅열차 주행시 방진구에 의한 지반진동차단 Blocking for the Ground Vibration by a Trench due to Traveling Tilting Train

이 종 세* 김 희 석** 이 은 수***
Lee, Jong Seh Kim, Hee Seok Lee, Eun Soo

ABSTRACT

In this paper a study on the reduction method of ground vibration by a trench is carried out. The transmitted load into the ground which induces the ground vibration is computed through a study on the interaction between tilting car and the line. This load is applied into the numerical model which is one for a study on the reduction method of ground vibration by a trench. Then the numerical results is compared with the experimental results conducted in the previous study.

1. 서 론

틸팅차량(Tilting Train)의 개발은 경부고속철도 개발에 막대한 비용과 시간이 소요되는 것과는 달리 기존 선을 그대로 사용하면서 속도를 향상하기 위한 선형개량과 기존의 인프라를 이용함으로써 경제적인 문제와 고속철도 운행에 혜택을 받지 못하는 중앙·영동·태백선 등 비수혜지역의 교통편 증진에 기여할 수 있다. 그러나 열차의 고속화로 인해 발생하는 진동문제는 상황에 따라 필요한 현장계측과 정성적/정량적 분석을 통하여 적절한 진동저감 방안을 강구하여야 하며 환경진동차원에서 열차 운행시 발생하는 지반진동의 특성과 그에 대한 적절한 진동저감 대책이 수립되어야 한다. 이를 위해서는 틸팅열차와 기존궤도와의 상호작용에 의해 발생하는 진동메커니즘에 대한 명확한 규명이 선행되어야 하며, 이를 이용하여 지반으로의 진동전파 특성에 대한 파악이 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 차량과 궤도의 상호작용을 고려한 동적해석을 통해 틸팅열차 주행시 발생하는 지반으로의 전달하중을 산정하였으며, 이를 수치 모형에 적용하여 틸팅차량 운행에 따른 지반진동전파 특성을 규명하였다. 이때 방진구를 수치모형에 반영함으로써 진동저감 효과를 분석하였으며, 수치해석의 타당성 규명을 위해 수치해석결과를 초음파 실험결과와 비교하였다.

2. 틸팅차량의 주행특성을 고려한 전달하중의 산정

2.1. 차량과 궤도의 모형화

그림 1과 같이 차량을 2질량으로 모형화하고 궤도를 2중보로 모형화 할 경우 차륜1개에 대한 운동방정식과 궤도의 운동방정식은 다음과 같다.⁽¹⁾

* 정회원 · 한양대학교 건설환경시스템공학부 교수

** 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 박사과정

*** 한양대학교 토목환경공학과 석사과정

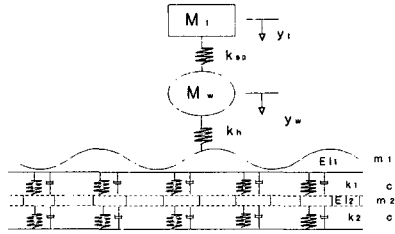


그림 1. 2중보 연속지지모형을 사용한 차량-궤도 시스템

$$M_1 \ddot{y}_1 + k_{sp}(y_1 - y_w) = 0 \quad (1)$$

$$M_w \ddot{y}_w + k_{sp}(y_w - y_1) = -f_H \quad (2)$$

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 y_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial}{\partial t}(y_1 - y_2) + k_1^*(y_1 - y_2) = F(\omega) \delta(x - vt) e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_2 \frac{\partial y_2}{\partial t} + c_1 \frac{\partial}{\partial t}(y_2 - y_1) + k_2^* y_2 + k_1^*(y_2 - y_1) = 0 \quad (4)$$

2.2. 틸팅차량 운행에 따른 전달하중 산정

그림 2에서와 같이 곡선부 궤도를 속도 $v(\text{km/h})$ 로 통과하는 질량 m 의 틸팅차량에 작용하고 있는 힘의 평형관계를 고려하면 식 (5)와 (6)의 관계를 얻을 수 있다.⁽²⁾

$$P_1 = \left(\frac{1}{2} - \frac{d}{G} \right) \left(\frac{mv^2}{R} \sin \alpha + mg \cos \alpha \right) + \frac{QH}{G} \quad (5)$$

$$P_2 = \left(\frac{1}{2} + \frac{d}{G} \right) \left(\frac{mv^2}{R} \sin \alpha + mg \cos \alpha \right) - \frac{QH}{G} \quad (6)$$

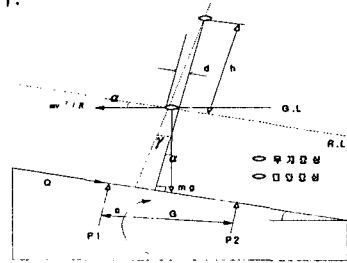


그림 2. 곡선부에서의 틸팅차량의 무게중심에 대한 평형관계

여기서, P_1, P_2 는 레일에 작용하는 수직차륜하중, G 는 수평차륜하중을 나타낸다.

그림 3과 4는 각각 새마을호와 틸팅차량에서의 침목으로의 전달하중 PSD(Power Spectral Density)를 나타낸다. 이때 속도 증가에 따라 고주파 성분이 커지며, 모든 주행속도에 대해 최대 하중 주파수 성분은 20Hz 미만의 저주파 영역에서 형성됨을 알 수 있다.

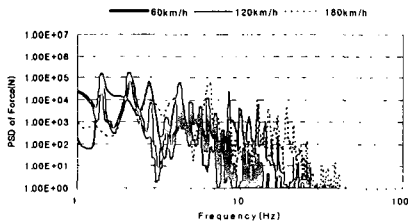


그림 3. 열차주행에 의한 하중 PSD(새마을호)

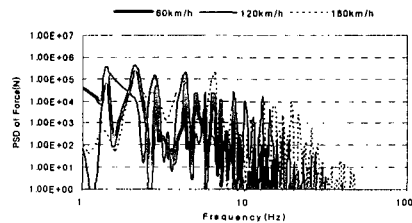


그림 4. 열차주행에 의한 하중 PSD(틸팅차량)

3. 열차주행시 발생하는 지반진동 전파특성

3.1. 진동전파의 수치해석

파가 전달되는 것을 모형화하는데 가장 중요한 사항은 경계에서 파의 반사를 억제시키는 것이다. 동적 유한요소해석에 있어서 모형화한 해석영역이 충분히 크지 못하면 경계부근의 요소에서 에너지가 반사되어 다시 해석 영역으로 들어와 해석의 정확도를 떨어뜨리게 되어 결과에 심각한 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전산적인 부담을 줄이기 위해 인공의 경계를 사용하여 반사파의 영향을 상쇄시키는 흡수경계를 사용하였다.⁽³⁾ 이러한 흡수경계는 경계에 댐퍼를 설치하여 에너지를 흡수하는 것을 기본개념으로 한다. 또한 최적의 요소크기 및 해석시간 간격을 결정하기 위해 본 연구에서는 정밀도를 확보하면서도 파의 전파문제에 적합하다고 알려져 있는 표면파 파장의 약 1/10 크기(한 변의 길이에 대해)의 사각형 등매개 변수요소를 사용하였으며, 해석시간 간격은 표면파를 충분히 재현하기 위해 표면파 주기의 약 1/10을 사용하였다. 또한 시간이력 해석을 위해 음해법(implicit method)인 average acceleration method를 사용하였다.⁽⁴⁾

표 1. 해석지반의 물성치

단위중량 (t/m ³)	포아송비	감쇠비	전단파속도 (m/s)
1.9	0.333	0.02	100

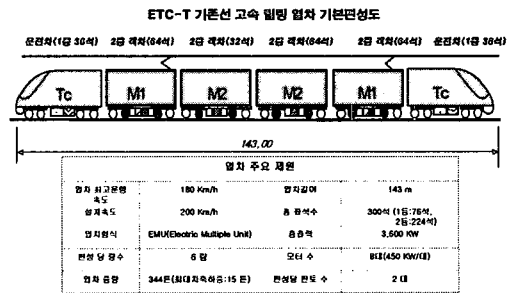


그림 5. 밀링열차 기본편성도

3.2. 차량의 곡선부 주행시의 전파해석

차량이 곡선부를 주행할 경우 부설캔트와 원심력으로 인해 비대칭 차륜하중이 발생하게 된다. 특히 밀링차량은 차량제원 및 밀링각과 원심력의 차이로 인해 기존차량과는 다른 양상의 차륜하중이 발생하게 된다. 따라서 진동전파 양상도 달라질 수 있으므로 곡선부 주행특성을 고려하여 수치해석을 수행하였다. 이때 같은 곡선반경에 대해 기존차량과 밀링차량의 최고속도를 적용하였다.

그림 6, 7은 모형에서의 좌우측 거리에 따른 주행속도별 최대변위 및 최대가속도에 대한 감쇠곡선을 데시벨(dB) 단위로 나타낸 것이다. 여기서 거리증가에 따라 모든 해석변수(변위, 가속도)에서 감쇠가 일어남을 볼 수 있으며 기존차량에 비해 밀링차량에 의한 진동이 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 좌측에 비해 우측에서의 진동레벨이 더 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 곡선부에서의 부설캔트와 원심력때문으로 판단된다.

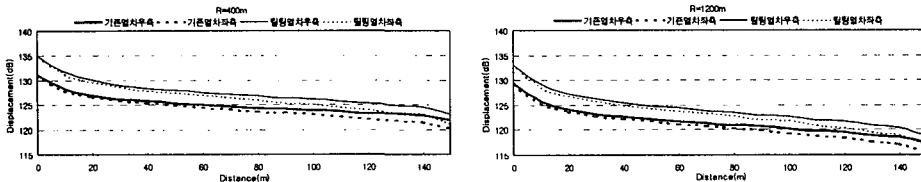


그림 6. 곡선부 거리에 따른 변위감쇠곡선(R=400, 1200m)

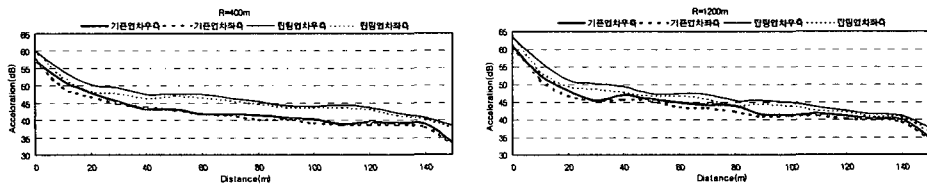


그림 7. 곡선부 거리에 따른 가속도감쇠곡선(R=400, 1200m)

그림 8~11은 모형에서의 주행속도별 변위, 가속도의 주파수 성분을 타나낸 것이다. 속도증가에 따라 모든 변위(변위, 가속도)에서 발생주파수가 고주파 영역으로 옮겨가는 것을 볼 수 있으며, 주행속도가 같을 경우 모든 수신위치에서 변위, 가속도에 대해 동일한 주파수대역이 발생하는 것을 볼 수 있다. 발생주파수가 고주파 영역으로 옮겨가는 것은 열차주행속도에 따른 하중발생특성 때문이며, 모든 수신위치에서 동일한 주파수가 발생하는 것은 응력파가 모드변환없이 전파되기 때문으로 판단된다. 또한 동일한 속도에 대해 변위 및 가속도에서 모두 최대 진폭발생 주파가 다른 것을 볼 수 있다.

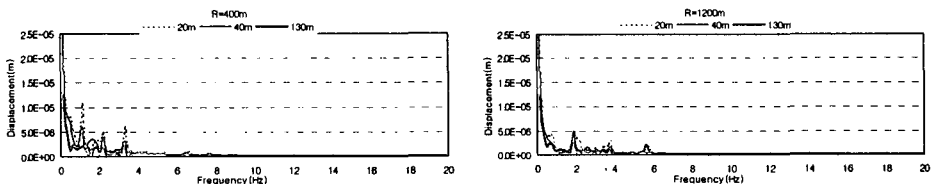


그림 8. 기존열차 곡선부 거리별 변위주파수 성분(R=400, 1200m)

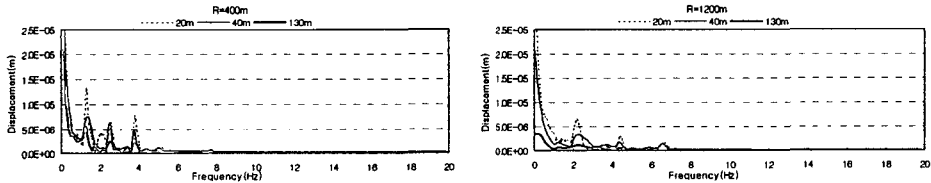


그림 9. 틸팅열차 곡선부 거리별 변위주파수 성분(R=400, 1200m)

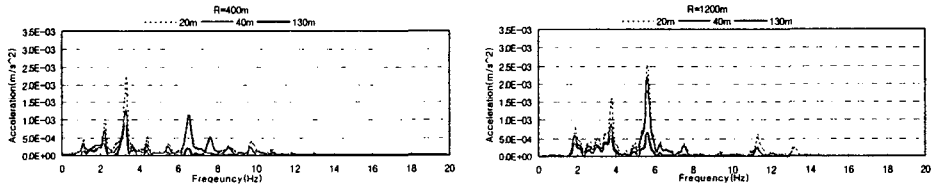


그림 10. 기존열차 곡선부 거리별 가속도주파수 성분(R=400, 1200m)

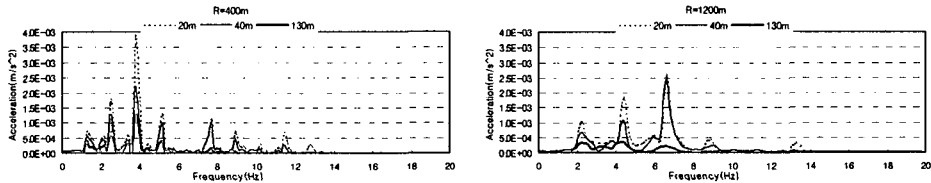


그림 11. 틸팅열차 곡선부 거리별 가속도주파수 성분(R=400, 1200m)

동일한 속도로 직선부를 주행할 경우와 곡선부 최고주행속도로 곡선부를 주행할 경우에 대해서 모두 기존 차량보다 틸팅차량의 변위 및 가속도 진동레벨이 더 높게 측정되었다. 특히 곡선부 주행시에는 부설켄트와 원심력으로 인해 원심력방향으로의 진동레벨이 더 높게 측정되었다.

4. 방진구에 의한 지반진동차단

4.1. 방진구 제원 결정을 위한 수치해석

그림 12는 해석변수를 나타내며, 모든 변수들은 표면파의 파장(λ_R)으로 나누어 줌으로서 무차원화 시켰다. 모든 해석 결과들의 상대적인 비교를 위해 진동 차단효과를 식 (7)에서의 진폭감쇠비로 정의하였다.

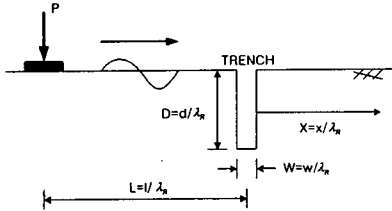
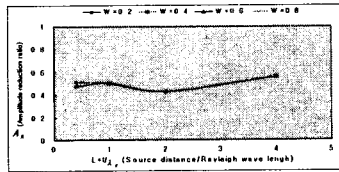


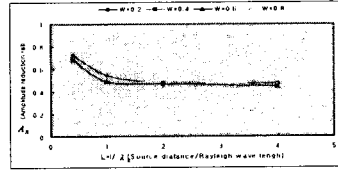
그림 12. 해석변수 개요도

$$A_r = \frac{A(\text{With Trench})}{A(\text{Without Trench})} \quad (7)$$

그림 13은 $D=0.6$, $X=2.0$, 6.0 인 경우로서, 가진원과 방진구의 거리가 $L=2.0$ 이상인 경우 방진구의 두께 영향은 없음을 보여준다. 또한 $D=0.2$, 0.4 , $X=4.0$, 8.0 인 경우에도 동일한 결과를 얻을 수 있었다.



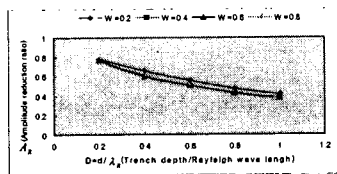
(a) $X=2.0$ (수치해석)



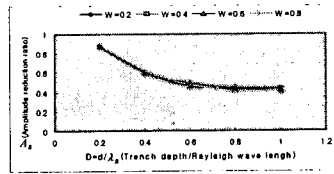
(b) $X=6.0$ (수치해석)

그림 13. 가진원 거리변화에 따른 표면파의 차단효과

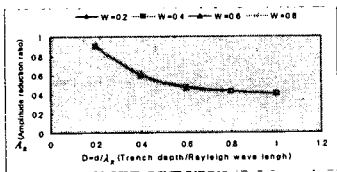
그림 14는 $L=0.4 \sim 4.0$, $X=3.0$ 인 경우, 방진구 깊이(D)에 따른 감쇠비를 나타낸다. 그림 14(a)에서는 방진구 깊이 증가에 따라 감쇠비가 계속 작아짐을 볼 수 있는 반면 그림 14(b)~(d)에서는 $D=0.5$ 부근에서 변곡점이 발생하여 $D=0.6$ 이후 완만하게 감쇠비가 감소함을 알 수 있다. 이는 $L=0.4$ 인 경우 가진원과 방진구의 거리가 가까워 상당부분의 표면파 에너지가 방진구 저면을 통과하기 때문으로, 가진원과 방진구 위치가 가까울 경우 ($L < 1.0$)와 그렇지 않은 경우에는 서로 다른 양상을 보임을 알 수 있다.



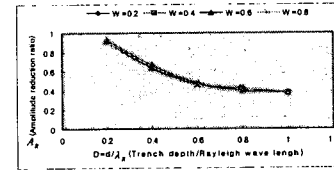
(a) $L=0.4$, $X=3.0$



(b) $L=1.0$, $X=3.0$



(c) $L=2.0$, $X=3.0$



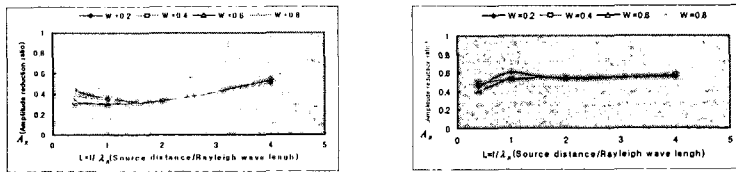
(d) $L=4.0$, $X=3.0$

그림 14. 방진구의 제원 변화에 따른 표면파의 차단효과(수치해석)

4.2. 실험결과와의 비교

수치해석결과의 타당성을 확인하기 위해 등방성재료로 가정할 수 있는 아크릴시편을 이용하여 초음파 실험을 수행하였다. 초음파 발수신기에서 발생된 전기적 신호는 초음파 탐촉자를 통해 기계적 에너지로 전환되어 시험편에 전달된다. 시험편을 통과한 에너지는 시험편의 탐상면에서 다시 초음파 탐촉자로 전달되어 전기적 신호로 변환된 후 초음파 발수신기를 통해 증폭된 후 오실로스코프 상에 디지털신호로 나타난다. 이상의 실험 장비들을 사용하여 발신 탐촉자의 위치와 수신 탐촉자의 위치를 변화시키며 실험을 수행하였다.

그림 15는 그림 13의 수치해석 결과에 대한 실험결과이다. 그림 13과 마찬가지로 $L=2.0$ 이상에서 방진구 두께의 영향이 무관함을 볼 수 있으며, 다른 경우($D=0.2, 0.4, 0.8; X=4.0, 8.0$)에도 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

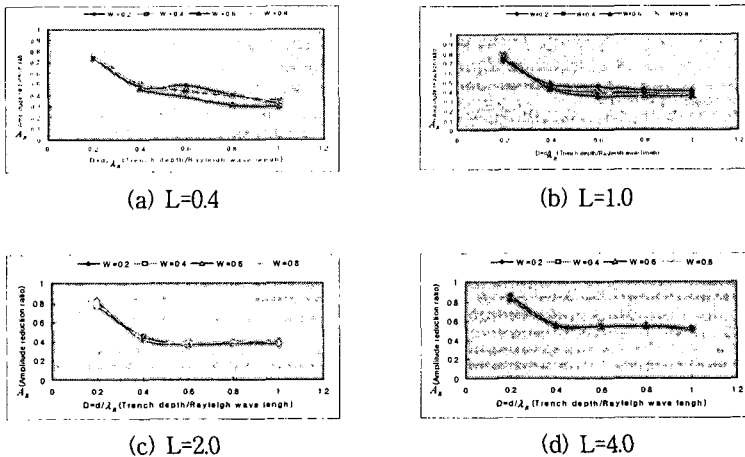


(a) $X=2.0$ (초음파 실험)

(b) $X=6.0$ (초음파 실험)

그림 15. 가진원 거리변화에 따른 표면파의 차단효과

그림 16은 그림 14의 수치해석 결과에 대한 실험 결과이다. 그림 14와 유사하게 $L < 1.0$ 인 경우 방진구 깊이가 증가에 따라 계속적으로 감쇠비가 감소하나 $L \geq 1.0$ 인 경우 $D \geq 0.6$ 에서 일정한 감쇠비를 나타냄을 볼 수 있다. 그림 14의 수치해석 결과는 $D=0.6$ 이상에서 완만하기는 하나 감쇠비가 계속적으로 감소됨을 볼 수 있는 반면, 그림 16의 실험결과는 거의 일정함을 볼 수 있다. 이는 2차원 수치해석과 3차원 실험에서 오는 차이 및 감쇠메커니즘의 차이에서 발생하는 결과로 판단된다. 그러나 $L \geq 2$ 인 경우 진폭감쇠비가 방진구 두께에 무관하게 되며, $L \geq 1.0, D \geq 0.6$ 인 경우 대체로 일정한 진폭감쇠비를 보인다는 점에서 실험 및 수치해석 결과가 일치한다고 할 수 있다.



(a) $L=0.4$

(b) $L=1.0$

(c) $L=2.0$

(d) $L=4.0$

그림 16. 방진구의 제원 변화에 따른 표면파의 차단효과 (초음파 실험)

이상의 수치해석 및 실험결과로부터 방진구의 진동차단효과는 방진구의 형상과 설치위치에 따라 상당한 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 따라서 방진구에 의한 진동차단 효과를 얻기 위해서는 4.2절에서의 결과를 참고하여 적절한 방진구 형상과 설치위치를 결정하여야 할 것이다.⁽⁴⁾

4.3. 열차운행에 의한 진동차단 해석 예제

효과적인 지반진동차단을 위한 방진구의 형상 및 설치위치는 표면파의 주파수에 의해 결정된다. 따라서 방진구 설치를 위해서는 먼저 지반진동의 변위 및 가속도에 대한 주파수 분석이 선행되어야 하며, 다음으로 차단해야 할 대상을 결정한 후 이에따른 방진구의 형상 및 설치위치를 결정하여야 할 것이다.

4.2절에서의 결과가 열차운행에 의한 지반진동에 대해서도 유효한지를 확인하기위해 수치해석을 수행하였다. 예제로서 틸팅차량의 곡선부(R=1200m) 주행모형을 선택하였으며, 틸팅차량 곡선부 주행에 따른 주파수 특성을 고려하여 최저 탁월주파수(2Hz)-방진구의 형상과 위치는 표면파의 주파수에 따라 결정된다. 즉, 저주파성분일수록 방진구의 깊이와 설치위치는 커져야 하므로 최저 탁월주파수에 대해 고려하였다.-에 대한 방진구 형상(D=28m, W=10m) 및 설치위치(L=46m)를 결정하였다. 또한 4.2절의 결과를 확인하기 위해 방진구 깊이(D=10, 50m)와 설치위치(L=20, 80m)를 변화시켜 해석을 수행하였다.

그림 17, 18은 방진구 설치위치에 따른 방진구 깊이별 변위, 가속도 진폭감쇠비를 나타낸 것이다. 그림 17, 18에서 방진구 설치이후 거리에 따라 변위 성분은 약 40~80%의 투과율을 보이며, 가속도 성분은 약 10~40%의 투과율을 보인다. 변위성분과 가속도 성분의 투과율에 차이가 남을 볼 수 있는데, 이는 틸팅열차 곡선부 주행시의 발생주파수 성분과 관계가 있다. 틸팅열차 곡선부(R=1200m)에 대한 주파수 성분에서 변위는 약 2Hz-적정 방진구 깊이와 위치는 각각 28m와 46m-에서 최대 진폭발생 주파수가 발생하며, 가속도는 약 6.5Hz-적정 방진구 깊이와 위치는 각각 10m와 14m-에서 최대 진폭발생 주파수가 발생하기 때문이다. 따라서 변위에 비해 가속도성분의 진폭감쇠가 더 크게 일어난 것으로 판단된다.

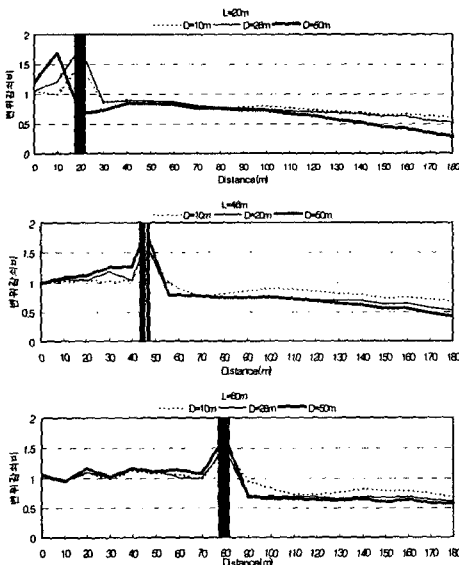


그림 17. 방진구에 의한 변위 진폭감쇠비
(L=20, 46, 80m)

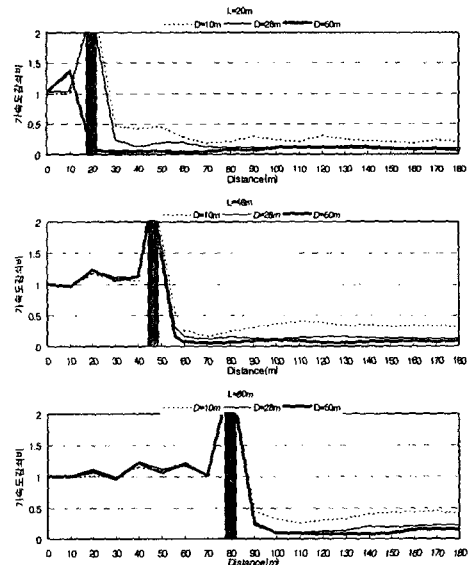


그림 18. 방진구에 의한 가속도 진폭감쇠비
(L=20, 46, 80m)

그림 18에서 방진구 위치가 46m, 80m인 경우, 즉 표면파(2Hz)의 한 파장이후인 경우, 깊이 28m, 50m 방진구는 비슷한 투과율(20%)을 보이지만 깊이 10m 방진구는 상대적으로 높은 투과율(40%)을 보임을 볼 수 있다. 이것은 틸팅열차 곡선부(R=1200m)에 대한 주파수 성분에서 가속도성분의 최대 진폭발생 주파수는 약 6.5Hz이기는 하나 2Hz 성분도 존재하며, 이로인해 깊이 10m의 방진구는 상대적으로 표면파 차단성능이 떨어진 것이다. 이러한 결과로부터 열차운행하중에 대해서도 4.2절의 결과가 유효함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 틸팅차량의 주행특성을 고려하여 기존선로에서의 틸팅차량의 진동 발생 메커니즘을 규명함으로써, 열차주행시 발생하는 지반진동전파 특성을 파악하여 방진구에 의한 진동차단효과를 분석하고 이를 초음파 실험결과를 통해 검증하였다.

- (1) 틸팅차량의 발생하중의 최대 주파수 성분이 20Hz미만의 저주파수 영역에서 나타났으며, 곡선부 주행시 열차속도의 증가에 따라 지반에서의 변위는 점차 감소하고 가속도는 증가하는 것으로 나타났으며, 곡선부 주행시 기존차량보다 틸팅차량의 변위, 가속도 진동레벨이 더 높게 측정되었다. 특히 틸팅차량의 주행특성으로 원심력방향으로의 진동레벨이 더 높게 측정되었다.
- (2) 충격하중에 의한 수치해석 및 초음파 실험을 통해, 가진원으로부터 방진구의 위치가 표면과 파장의 2배 이상인 경우 진폭감쇠비는 방진구 두께에 무관하며, 가진원으로부터 방진구의 위치가 표면과 파장의 1배 이상이며 방진구 깊이가 표면과 파장의 0.6배 이상인 경우, 일정한 진폭감쇠비를 보이는 것으로 나타났다.
- (3) 틸팅열차 주행에 의한 지반진동차단 효과에서는 실험을 통해 검증된 방진구 설치조건에서 변위 성분은 약 40~80%의 투과율을 보이며, 가속도 성분은 약 10~40%의 투과율을 보임을 알 수 있었다. 또한 틸팅열차 하중에 의한 지반진동차단의 수치해석 결과와 충격하중에 의한 결과가 일치함을 확인 할 수 있었다.
- (4) 방진구의 형상 및 설치위치는 표면파의 주파수에 의해 결정되므로, 효과적인 진동차단을 위해서는 먼저 지반진동에 대한 주파수 분석이 선행되어야 하며, 다음으로 차단해야할 대상을 결정한 후 이에따른 방진구의 형상 및 설치위치를 결정하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 양신추, "고속열차 주행시 교량과 인접한 구조물에서 발생하는 진동해석," 한국철도기술연구원, 1997.
2. 유영화, 임주환, 엄기영, "기존선의 선형조건을 고려한 틸팅차량의 허용속도 평가," 한국철도학회 논문집, 제6권, 제4호, 2003, pp. 246~251.
3. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L., "Finite Dynamic Model for Infinite Media," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 95, No. EM4, 1969, pp. 859~877.
4. 김희석, 이상진, 이종세, "방진구에 의한 표면파 산란해석," 한국전산구조공학회 학술발표회논문집, 제17권, 제1호, 2004, pp. 235~242.