

개량분기기 인근의 소음진동 시뮬레이션

엄기영¹ · 엄주환¹ · 이진형^{1†}

Simulation of Noise and Vibration around the Improved Turnout System

Ki-Young Eum · Ju-Hwan Um · Chin-Hyung Lee

ABSTRACT

A turnout system which permits trains to pass from one track to another is a combination of the switch, the crossing, lead rails which are necessary to connect the switch and the crossing, two guard rails and a switch machine for operating the switch. A turnout is the sole moving part among the railway components and has complex configuration, so the safety has always been raised an issue. In Korea, it is planned to adopt the high speed tilting train, which operates at the maximum speed of 200km/h, at conventional lines by the year of 2010. However, for the application of the tilting train to conventional lines, it is prerequisite to establish a stable turnout system allowing the tilting train to pass through it without reducing speed. Therefore, the improved turnout system for the speed-up of conventional lines has been developed and the prototype of the turnout system has been constructed. In this study, simulation of noise and vibration around the improved turnout system was performed in order to predict the generation level of noise and vibration due to passing of the tilting train through the turnout system.

Key words : Improved Turnout System, Noise and Vibration, Tilting Train, Speed-Up

요약

철도운행에 있어 분기기는 열차를 주행선로에서 이웃한 선로로 이동시키는 매우 중요한 역할을 수행하는 장치로써 포인트부, 리드부 그리고 크로싱부로 이루어져 있다. 그러나 분기기는 레일 주변설비 중 유일한 가동부로 구조도 복잡하고 천이과정 중 차륜, 레일간의 급격한 운동변화가 필연적으로 발생되어 안전성 문제가 항상 거론되고 있다. 실제로, 국내외에서 차량의 탈선사고가 빈번히 발생되는 취약부위이기도 하다. 또한 차량, 궤도, 통신 그리고 전기 분야 등 분기기는 각각 다른 기능을 수행하는 매우 복잡한 장치들의 조합 시스템으로 각각의 단위 개체들의 최적화만으로는 분기기의 전반적 성능을 향상시키기는 힘들며 이들에 대한 통합 기술의 확보가 필수적이다. 우리나라 철도는 기존선의 최고운행속도를 200km/h까지 향상 시키는 장기계획을 수립하고, 곡선부가 많은 우리나라 지형에 적합한 최고운행속도 180km/h의 틸팅열차를 개발 중이다. 그러나, 기존선로에 틸팅열차를 적용하기 위해서는 속고의 저감없이 틸팅열차를 통과시킬 수 있는 안정적인 분기기시스템의 확립이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 틸팅열차 통과 시 기존선 속도향상을 위해 개발된 개량분기기 주변의 소음진동 정도를 예측하기 위해 시뮬레이션을 실시하였다.

주요어 : 개량분기기, 소음진동, 틸팅열차, 속도향상

1. 서 론

철도운행에 있어 분기기는 열차를 주행선로에서 이웃

2006년 10월 17일 접수, 2006년 11월 22일 채택

¹⁾ 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 인프라기술개발팀

주 저 자 : 엄기영
교신저자 : 이진형
E-mail; ifinder@hanmail.net

한 선로로 이동시키는 매우 중요한 역할을 수행하는 장치로써 포인트부, 리드부, 그리고 크로싱부로 이루어져 있다. 그러나 분기기는 레일 주변설비 중 유일한 가동부로 구조도 복잡하고 천이과정 중 결선부에서 차륜, 레일간의 급격한 운동변화가 필연적으로 발생되어 안전성 문제와 반복되는 통과열차의 충격하중에 의한 소음진동 문제가 항상 거론되고 있다. 실제로, 국내외에서 차량의 탈선사고가 빈번히 발생되는 취약부위이기도 하다. 또한 차량, 궤도, 통신, 그리고 전기 분야 등 분기기는 각각 다른 기능을

수행하는 매우 복잡한 장치들의 조합 시스템으로 각각의 단위 개체들의 최적화만으로는 분기기의 전반적 성능을 향상시키기는 힘들며 이들에 대한 통합 기술의 확보가 필수적이다.

우리나라 철도는 기존선의 최고운행속도를 200 km/h 까지 향상 시키는 장기계획을 수립하고, 곡선부가 많은 우리나라 지형에 적합한 최고운행속도 180km/h의 틸팅 열차를 개발 중이다. 그러나 국내외에서 발생되는 열차 사고사례의 상당수가 분기기와 관련이 있을 만큼 분기기에서는 대형사고가 빈번하여 각국의 철도기관에서도 이를 취약부로 분류하여 엄격히 관리하고 있고, 사고를 감소시키고자 우리나라 규정에서도 분기기의 직선 측 최대 통과속도를 130km/h로 제한시키고 있다. 현재로서는 기존선 차량 최고주행 속도 140km/h와 불과 10km/h의 차이만 가지고 있어 전체 선로운영 효율측면에서 큰 문제가 되고 있지는 않으나 계획대로 운행 최고속도가 증가된다면 점차 격차가 벌어지게 되어 선로운영에 큰 차질이 빚어질 것으로 예상된다. 반면 이 규정을 무시하고 분기기통과속도를 증가시킨다면 차량의 안전성은 더 이상 보장할 수 없게 될 것이다. 따라서 틸팅열차의 직선 측 분기기에서의 속도향상을 위해 기존의 분기기를 개선하여 보다 성능이 향상된 개량분기기를 개발하는 연구가 활발히 진행 중이다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 기존선 속도향상을 위해 개발된 개량분기기^[1]를 틸팅열차가 통과할 때 발생하는 소음진동 수준을 예측, 비교분석 하였다.

2. 진동해석

철도진동은 레일과 궤도하부, 그리고 지반의 물성치 등에 따라 응답이 상이하므로 시뮬레이션을 통해 신뢰성 있는 정량적인 결과를 도출하기란 매우 어려운 일이다^[2-4]. 특히 분기기의 크로싱부에서 순간적인 충격이 가해질 때 궤도하부에 전달되는 충격하중을 수치해석을 통해 예측하는 것은 더욱 어렵다^[3]. 따라서 대부분의 지반진동에 관한 문제는 순수 해석적인 기법보다는 실험과 경험을 기본으로 하는 “Semi-Empirical Method”를 적용하고 있다. 이 방법은 해석적으로 기본적인 절차를 가지면서 불확실성이 높은 인자들에 대해서는 실험 및 측정값을 병행함으로써 예측정확성을 높일 수 있다.

따라서 본장에서는 기존열차 운행시의 현장측정결과와 경험자료^[4]를 바탕으로 한 “Semi-Empirical Method”를 적용하여 현재 개발 중인 틸팅열차가 200km/h의 속도로

개량분기기를 통과할 때 발생하는 충격진동의 크기를 예측하였다. 준 경험적 방법에 의한 동적해석절차를 그림 1에 나타내었다.

2.1 해석방법

진동해석은 범용해석 프로그램인 ANSYS 5.3^[5] 의 Transient Analysis를 이용하였다. 해석 모델은 그림 2에

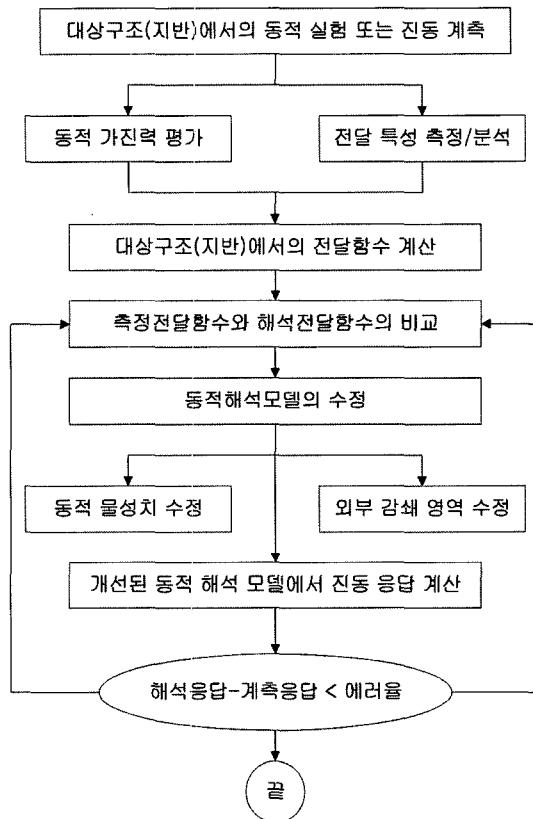


그림 1. 동적해석절차

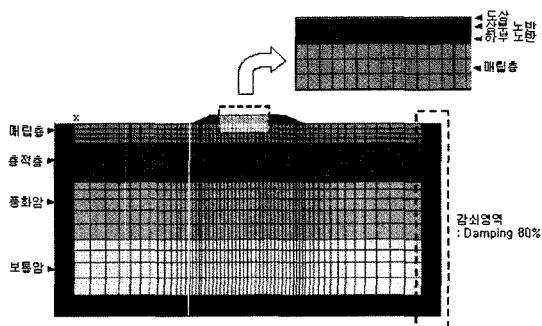


그림 2. 분기기 인근 진동해석 모델링

나타낸 바와 같이 분기기의 크로싱부를 중심으로 2차원으로 모델링하였으며, PLANE42(Quad 4node) Element를 사용하였다. 통상적으로 공용하중에서 지반 변형율의 크기는 최대 0.5% 미만이고 대부분 0.01% 이하의 저변형률로 거동을 하는 것으로 알려져 있다. 또한, 최근에는 지반의 변형계수를 신뢰성 있게 측정할 수 있는 계측기법이 개발되어 정적 실험에서 계측의 정확도가 증가함에 따라 정적변형 계수와 동적 변형 계수의 통념적 차이가 줄어들고 있으므로, 본 연구에서는 지반의 동적 거동이 선형한계에 있다고 가정하였다. 궤도하부의 두께 및 물성치는 표 1에 나타내었다. 지반모델링에 있어서는 각 단면별 지질의 총간 변화에 따른 지반단면을 모델링에 적용하였으며, 각지질의 물성치는 지질의 N치를 근거로 각종 조사자료의 대표적인 값을 적용하였다.^[1] 또한, 유한한 해석모델의 끝단에서 발생하는 reaction force를 줄이기 위해 모델의 외부요소에 대하여 80%의 damping을 적용함으로써 해석 모델의 정확성을 높일 수 있도록 하였다.

2.2 해석결과 및 검증

진동해석은 그림 3에 나타낸 바와 같이 분기기의 크로싱부에 시간이력하중을 기한 후 크로싱부로부터 4m, 8m, 그리고 16m에서 진동가속도응답을 구하는 순으로 수행하였으며, 해석결과는 개량 분기기가 부설되어 있는 구미

표 1. 궤도하부 지반조건

	도상	상부노반	하부노반
영율(MPa)	130	80	60
포아송 비	0.2	0.3	0.3
단위중량(kN/m^3)	2	16	16
두께(m)	0.3	1.5	225

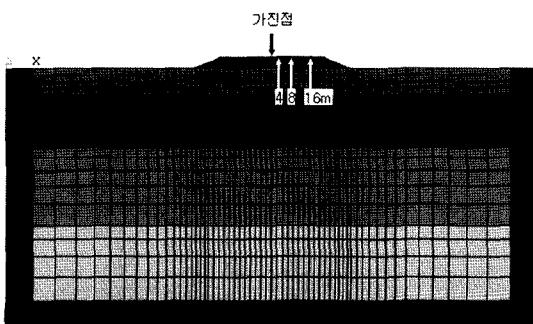


그림 3. 분기기 크로싱부 충격하중 가진점 및 수진점

에서의 측정결과를 이용하여 해석결과와 비교함으로써 전파특성 및 정량적인 크기가 유사하도록 해석모델의 물성치 등을 조정하였다. 해석결과의 검증은 통과속도 90km/h의 화물열차를 대상으로 하였다. 화물열차와 무궁화 열차는 동일한 디젤 동력차로 구동하며 동력차의 윤중은 11.5tonf이다.

그림 4는 화물열차 통과 시 진동해석을 위해 사용한 크로싱부 충격하중의 입력선도를 나타낸 것으로 동력차의 윤중은 11.5tonf이지만 크로싱부에 가해지는 충격하중은 정하중의 2배로 고려하여 최대하중을 23tonf으로 적용하였다. 진동응답의 최대값을 구하는 관점에서 열차 통과시 간동안의 전체 시간이력하중을 사용하는 것보다 전동차에 의한 하중만을 사용하는 것이 연산시간에 있어 보다 효율적이고 진동응답의 주파수특성도 큰 차이가 없으며 특히 현장측정결과, 동력차가 결선부를 통과할 때 최대진동이 발생함을 알 수 있었으므로^[1] 열차통과시간동안의 시간이력하중 데이터 중 동력차에 의한 하중만을 진동해석을 위한 입력 자료로 사용하였다. 그림 5는 해석결과를 검증하기 위한 현장측정결과로서 구미역의 개량 분기기

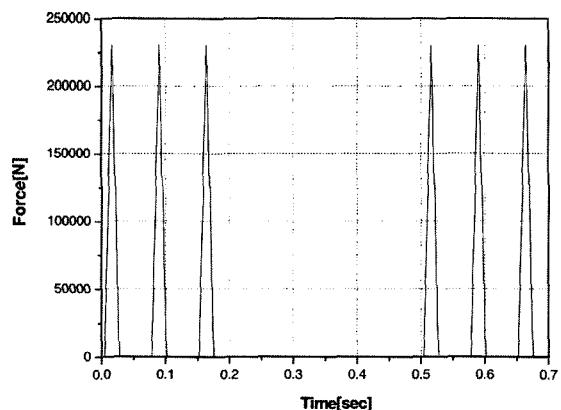


그림 4. 충격하중 입력선도

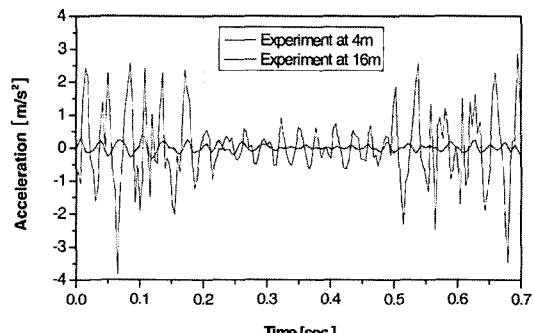


그림 5. 진동가속도 시간응답 현장측정 결과

를 91km/h의 화물열차가 통과할 때 분기기 크로싱부로부터 4m, 8m, 16m 이격거리에서 측정한 데이터 중에서 동력차 통과시의 진동가속도 시간이력 선도를 나타낸 것이다. 그림에서 4m와 16m 이격거리에서 진동가속도의 time peak 값은 각각 2.9m/s^2 , 0.4m/s^2 를 나타내고 있다. 그림 6은 그림 4의 충격하중을 사용하여 이격거리에 따라 계산한 진동응답을 나타낸 것이다. 결과에서 4m, 8m, 16m 이격거리에서의 진동가속도 time peak값은 각각 3m/s^2 , 1.7m/s^2 , 그리고 0.6m/s^2 이다. 그림 7은 디젤 전동차 운행시의 해석 결과와 현장측정결과의 주파수특성을 비교한 것으로 주파수대역이 정확히 일치하지는 않지만 전체적인 크기와 경향이 매우 유사함을 볼 수 있다. 이상에서 고찰한 바와 같이 시간대역 및 주파수대역에서의 해석결과가 현장측정결과와 유사함을 볼 수 있으며 따라서 진동해석모델의 타당성을 확인할 수 있다.

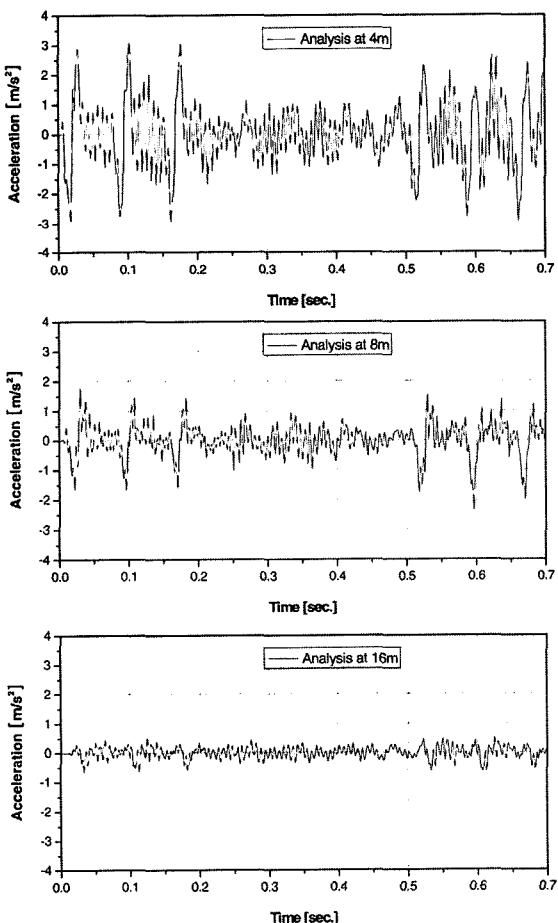


그림 6. 이격거리별 진동가속도 시간응답 해석결과

2.3 틸팅차량 운행 시 진동예측

개량 분기기를 대상으로 틸팅차량 운행 시 분기기 인근의 진동해석을 수행하였다. 틸팅열차의 통과속도는 200 km/h로 가정하였으며 동일한 속도로 통과하는 디젤 열차(무궁화 및 화물)에 대한 진동예측결과와 비교·평가하였다. 그림 8은 통과속도를 200 km/h로 가정하였을 때 각각 디젤 동력차와 틸팅열차 동력차의 충격하중 입력선도를 나타낸 것이다. 틸팅열차의 윤중은 7.5tonf이며 앞 절에서와 마찬가지로 충격하중은 윤중의 2배로 가정하였다. 그림 9는 통과속도 200 km/h의 디젤 동력차에 대한 진동해석결과로서 이격거리 4m, 8m, 16m에서의 진동가속도 time peak값은 각각 4.9m/s^2 , 3.4m/s^2 , 1.2m/s^2 를 나타내고 있다. 그림 10은 통과속도 200 km/h의 틸팅열차에 대한 진동해석결과로서 이격거리 4m, 8m, 16m에서의 진동가속도 time peak값은 각각 3.5m/s^2 , 1.7m/s^2 , 0.7m/s^2 을 나타내고 있다. 동일한 통과속도의 디젤 동력차와 비교하면 4m 이격거리에서 진동의 크기가 약 30% 저감되는 효과가 있는 것으로 파악된다. 그림 11은 통과속도 200 km/h의 틸팅열차 운행 시 분기기 인근지역에서 진동가속도의 주파수 스펙트럼을 나타낸 결과이다.

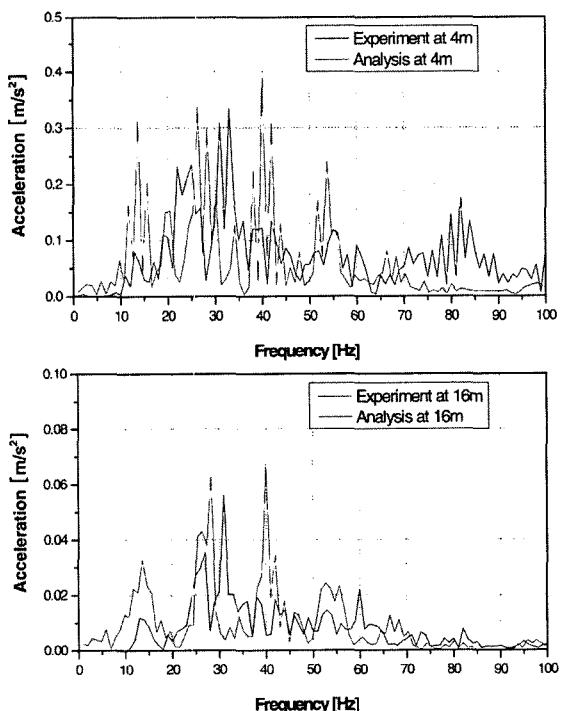
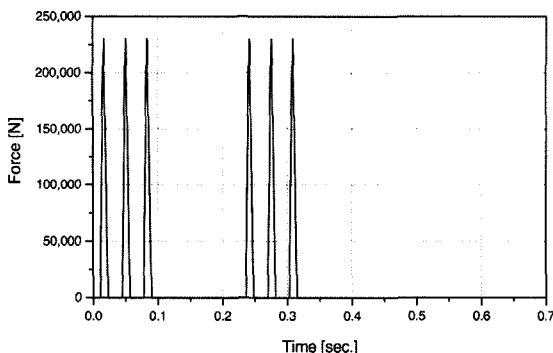
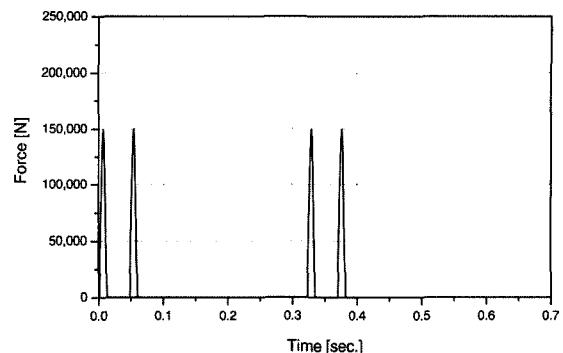


그림 7. 현장측정 및 해석결과의 주파수특성 비교



(a) 디젤열차



(b) 틸팅열차

그림 8. 통과속도 200km/h시 충격하중 입력선도

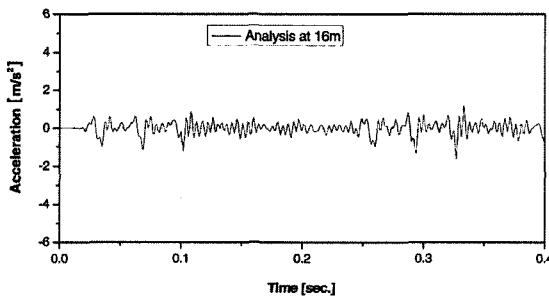
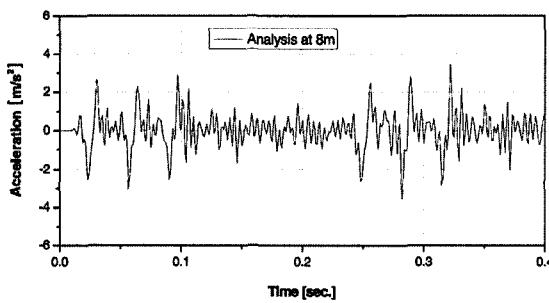
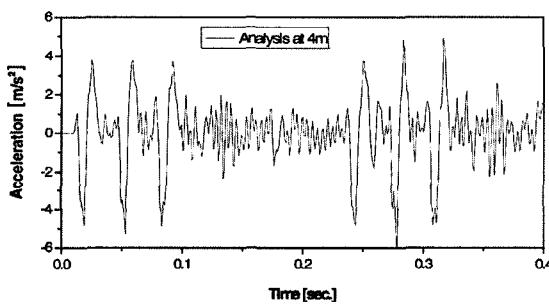


그림 9. 해석결과(디젤열차)

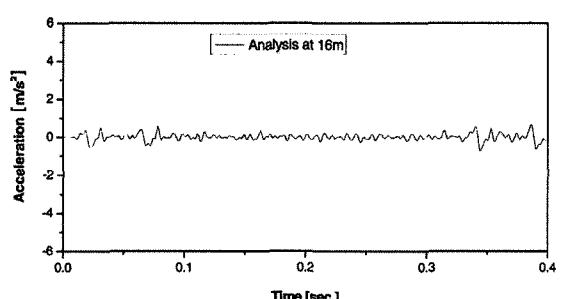
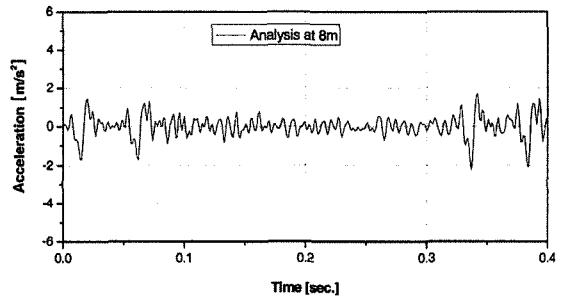
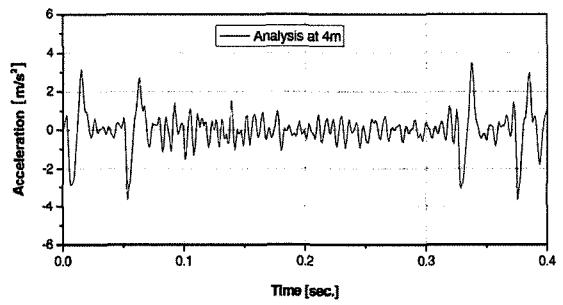


그림 10. 해석결과(틸팅열차)

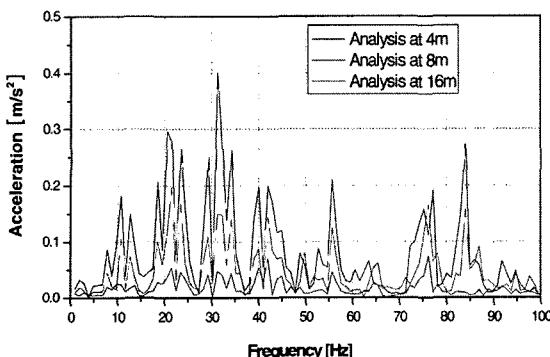


그림 11. 진동 - 가속도 스펙트럼

3. 소음해석

열차가 분기기를 통과할 때 발생하는 최대 소음도는 크로싱부의 충격소음보다는 동력차의 통과 소음에 주로 기인한다^[1]. 철도소음의 측정에 관하여 소음진동 공정시험법에서는 1시간 동안 연속 측정하여 자동 연산·기록한 등가 소음도를 측정소음도로 하거나, 1시간 동안의 열차 통행량과 각 열차 통과 시 최대소음도의 대수평균을 이용하여 산출한 등가 소음도를 측정소음도로 하도록 규정하고 있다. 따라서 최대소음도의 관점에서, 분기기의 종류는 큰 의미가 없고 단지 열차(특히 동력차)의 종류 및 통과속도에 따른 최대소음도의 변화가 주 관심대상이다. 본 연구에서는 임의의 열차 통과속도에서 분기기 인근의 소음도를 수치해석을 통해 계산하고 현장실측결과와 비교함으로써 수치해석의 타당성을 검증하였다. 그리고 분기기를 시속 200km/h로 통과하는 텔링열차를 가정하여 소음해석을 수행하였다.

3.1 해석방법

소음해석은 상용프로그램인 ENPro 3.1^[6]을 이용하여 수행하였다. ENPro 3.1은 ISO 3742에 기초한 환경소음 예측용 소프트웨어로서 흡·차음, 투파, 반사, 회절 등을 고려하여 공기 중의 소음전파현상을 계산할 수 있다. 소음 벨벨측정의 기본수식은 다음과 같다.

수음점에서의 옥타브밴드별 음압레벨 L_p 는 각 음원 및 가상음원에 대하여, 그리고 63Hz에서 8kHz까지의 주파수 대역에서 8개 옥타브밴드에 대하여 식 (1)에 따라 계산한다.

$$L_p = L_w + D_c + A_{div} - A_{comb} \text{ dB} \quad (1)$$

여기서

L_w : 음원으로부터 방사되는 옥타브밴드별 음향파워레벨 (dB)

D_c : 음원의 중심부터 수음점 방향으로의 지향성에 따른 보정값(dB)

A_{div} : 거리감쇠에 의한 감음량(dB)

A_{comb} : 음원에서 수음점까지 음이 전파되는 과정에서 거리감쇠에 의한 감음량 이외의 옥타브밴드별 감음량(dB)으로 다음과 같이 나타낸다.

$$A_{comb} = A_{atm} + A_{ground} + A_{screen} + A_{site} + A_{wind} \text{ dB} \quad (2)$$

여기서 A_{atm} : 대기흡음에 의한 감음량

A_{ground} : 지면효과에 의한 감음량

A_{screen} : 건물과 지형의 차폐에 의한 감음량

A_{site} : 일반적 계산법으로는 불가능한 숲, 주택, 산업지역을 통해 전파되는 과정에서의 감음량

A_{screen} : 일정한 속도의 바람에 의한 감음량

등가의 A-가중치 전체 음압레벨 L_A 는 식 (1)과 식 (2)에 따라 각각의 음원, 가상음원, 그리고 식 (3)과 같이 각각의 옥타브밴드별 음압레벨을 합산하여 구한다.

$$L_A = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^8 10^{0.1 \{(L_p)_{ij} + (\Delta L_A)\}} \right\} \right] \text{ dB} \quad (3)$$

여기서 n : 가상음원을 포함한 음원의 총 개수

j : 63Hz부터 8kHz까지 8개의 옥타브밴드 중심수파수를 나타내는 지수

ΔL_A : 일반적인 A-가중치 인자.(dB)

장시간 평균한 A-가중치 음압레벨 $L_A(LT)$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$L_A(LT) = L_A - C_{met} \text{ dB}$$

여기서 C_{met} 는 기상조건에 따른 보정값이다.

소음해석의 타당성을 검증하기 위해 개량분기기가 부설되어 있는 구미에서 통과속도 91km/h의 화물열차에 대한 소음 측정 자료를 이용하였다(그림 12). 그림 13은 소음해석을 위해 지형과 음원 및 수음점을 모델링한 것이다. 선로 주변의 지형은 평坦하게 모델링 하였고 소음원은 선음원으로 가정하여 선로 중앙에 위치시켰으며 수음점은

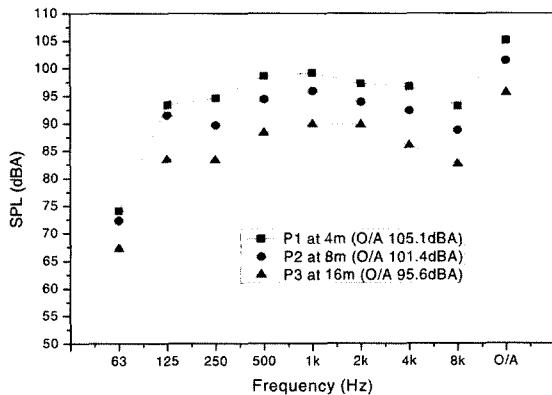


그림 12. 개량분기기 인근 소음측정 결과

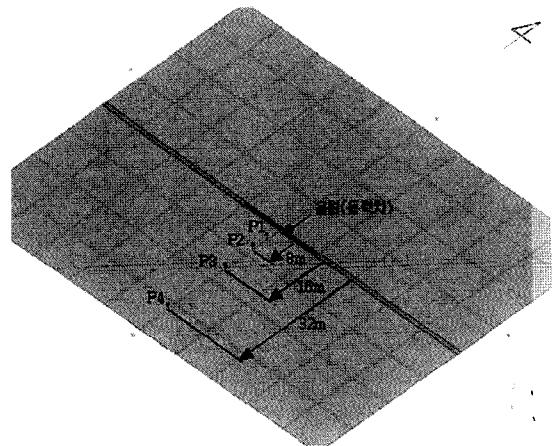


그림 13. 소음해석 모델링

음원으로부터 4m, 8m, 16m, 그리고 32m 이격된 지점의 지면 위 1.5m 높이로 설정하였다. 일반적으로 소음원이 연속으로 이동하고 있는 철도소음이나 도로소음의 경우는 소음원을 선음원으로 모델링하며, 이격거리가 2배가 될 때마다 이론적으로 소음도가 3dB씩 저감된다. 그러나 철도소음^[7-9]의 경우는 도로소음과는 달리 열차의 길이가 유한하기 때문에 가까운 거리에서는 이격거리가 2배가 될 때마다 3~6dB씩 저감되며, 매우 먼 거리에서는 점음원과 유사하게 되어 6dB씩 저감된다. 그림 12의 측정결과에서도 볼 수 있는 바와 같이 4m 지점과 8m지점에서 측정한 소음도의 차는 3.7dB이고, 8m 지점과 16m 지점에서 측정한 소음도의 차는 5.8dB로써 이격거리가 멀어질수록 점음원의 전파특성을 나타내고 있다. 따라서 이러한 철도 소음의 전파특성을 반영하기 위해 소음원을 동력차의 길이에 해당하는 20m의 선음원으로 모델링하고 그림 14에

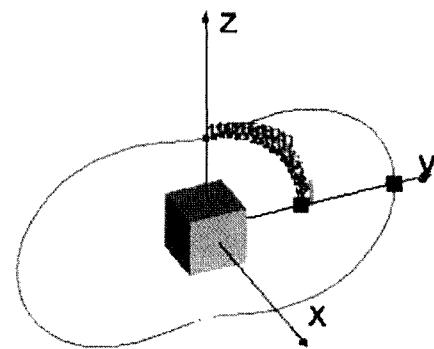


그림 14. 소음원의 지향성 모델

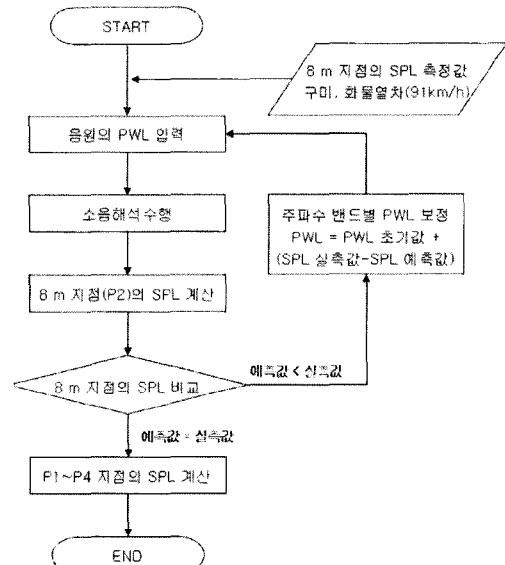


그림 15. 소음원의 음향파워레벨 산출절차

나타낸 바와 같이 쌍극자형태의 지향성을 갖도록 모델링 하였다.^[10-13] 또한 소음원의 음향파워레벨 및 주파수특성은 그림 12의 측정결과 중 중간지점인 8m 에서의 주파수 밴드별 소음도를 이용하여 역으로 산출하였다. 그림 15와 그림 16은 각각 소음원의 음향파워레벨을 산출하는 과정과 산출결과를 나타낸 것이다.

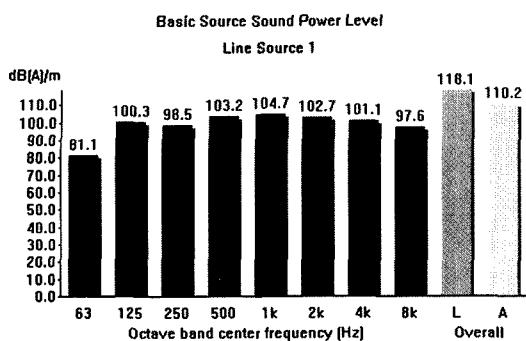


그림 16. 소음원의 음향파워레벨 산출결과

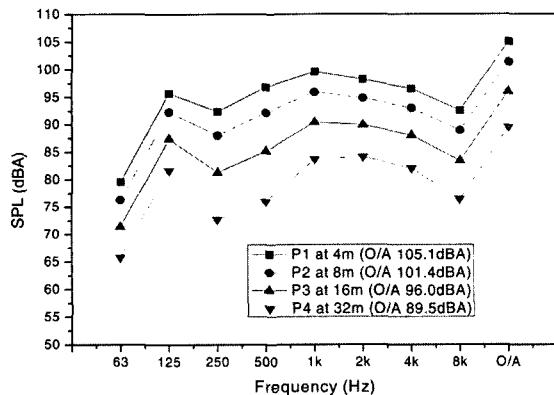


그림 17. 이격거리별 해석결과(화물열차)

3.2 해석결과 및 검증

그림 17은 P1~P4에서의 소음해석결과를 나타낸 것이고, 그림 18은 4m와 16m 이격거리에서의 실측결과와 해석결과를 비교한 것이다. 결과에서 저주파대역의 주파수 특성은 다소 차이가 있으나 전체적인 overall 값이 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 해석모델링과 해석방법이 유효함을 알 수 있다. 그림 19는 화물열차가 90km/h의 속도로 개량분기기를 통과할 때 분기기 주변지역에 대한 소음분포를 이격거리와 높이별로 계산한 결과이다.

3.3 틸팅열차 운행 시 소음 예측

열차가 분기기를 통과하는 동안 발생하는 최대소음도는 열차의 동력차 소음에 기인하므로 소음예측을 위해서는 열차의 운행속도에 따른 소음자료를 필요로 한다. 틸팅열차의 경우 현재 개발 중에 있기 때문에 운행시의 소음을 관한 자료가 없는 상태이다. 그러나 기존의 무궁화나 화물열차의 동력차에 비해 동일한 속도에서 최소한 3dB 이상 소음이 저감될 것(소음에너지의 50% 이상 저

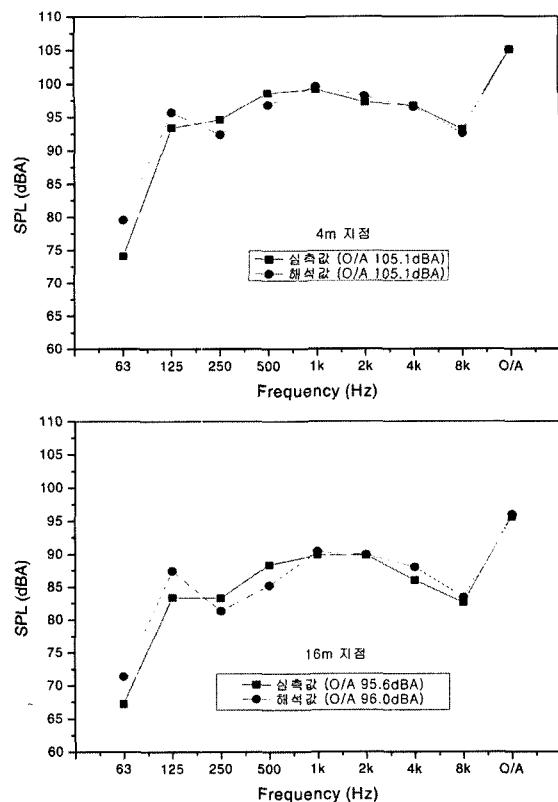


그림 18. 실측과 해석결과 비교검증

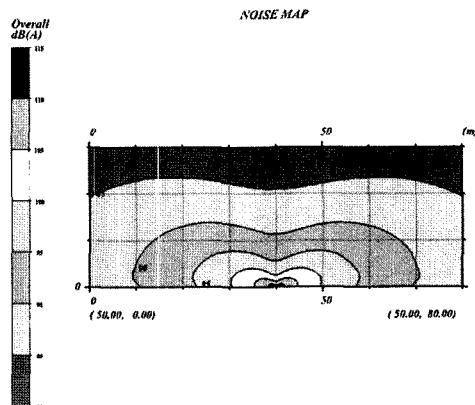


그림 19. 소음분포 예측결과

감)으로 예상된다.^[1] 따라서 틸팅열차가 시속 200km/h로 개량 분기기를 통과하는 경우 선형보간된 실험식^[1]을 이용하여 아래와 같이 200km/h의 소음도를 계산한 후 3dB를 뺀 값을 틸팅열차 운행시의 최대소음도로 예측하였다. 그 결과 틸팅열차가 200km/h의 속도로 개량 분기기를 통과할 때 분기기로부터 8m, 16m 이격거리에서 최대 소음

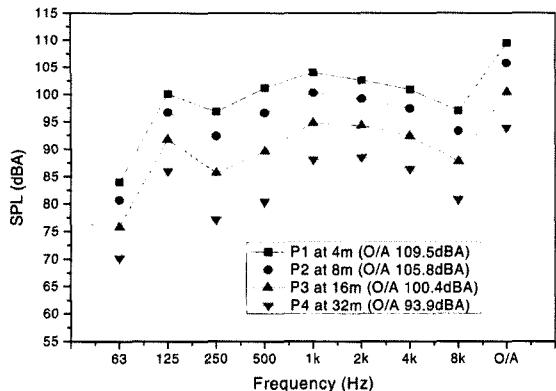


그림 20. 이격거리별 해석결과(틸팅열차)

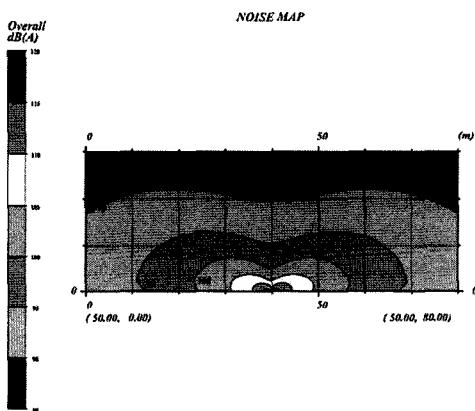


그림 21. 소음분포 예측결과

도는 각각 106dB (A), 100dB(A)로 예측할 수 있다.

$$SPL(at\ 8m) = 92.75 + 0.08 \times 200 - 3 = 105.8\ dB(A)$$

$$SPL(at\ 16m) = 87.04 + 0.08 \times 200 - 3 = 100.0\ dB(A)$$

8m 지점에서의 최대소음도를 기준으로 수치해석을 통해 예측한 결과를 그림 20에 나타내었다. 그림 21은 소음 분포도를 나타낸 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 기존선 속도 향상을 위해 개발된 개량 분기기의 성능을 분석하고자, 틸팅차량 투입에 따른 개량 분기기에서의 소음진동 수준을 예측하기 위해 수치해석을 수행하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 상용 프로그램을 이용하여 개량분기기 인근에서의 소음·진동을 예측하였으며, 현장에서의 측정결과와 비교한 결과 정량적인 크기와 이격거리에 따른 감쇠경향이 유사하게 나타남으로서 해석모델의 타당성을 검증하였다.

(2) 틸팅열차가 200 km/h의 속도로 개량분기기를 통과하는 경우를 가정하여 소음·진동해석을 수행한 결과, 진동의 경우 동일한 속도의 디젤 동력차와 비교할 때 약 30%의 저감효과가 있는 것으로 파악되었다. 소음의 경우 동일한 속도의 디젤 동력차에 비해 최소한 3 dB 이상 저감될 것으로 예상되지만 틸팅 동력차에 대한 소음자료가 확보되어야 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 엄기영 등(2006), “분기기 성능개선을 통한 기존선 속도향상 방안 연구”, 한국철도기술연구원.
2. 유승도 등(1997), “경부선 철도진동의 특성과 영향범위”, 한국소음진동공학회지, Vol.7, No.4, pp. 597-604.
3. 이주호 등(1998), “열차하중에 의한 지반 및 인접구조물의 진동계측과 예측 해석”, 한국소음진동공학회 준계학술대회 논문집, pp. 365-370.
4. 강보순 (2005), “열차하중에 대한 지반-궤도의 상호작용”, 한국철도학회논문집, Vol.8, No.2, pp. 116-121.
5. Swanson analysis systems INC, ANSYS, Version 5.3
6. B&K, ENPro, Version 3.1.
7. 강대준 (1997), “철도소음과 그 영향”, 한국소음진동공학회지, 제 7권, 제 5호, pp. 827-836.
8. 주진수, 박병전 (1998), “평탄부 선로에서 철도소음의 전파예측에 관한 연구”, 한국소음진동공학회지, 제8권, 제1호, pp. 187-194.
9. 김석홍 등(1993), “경부선 철도 소음진동의 전파특성에 관한 기초연구”, 한국소음진동공학회지, Vol.3, No.1, pp. 47-55.
10. 구동희 등 (2002), “철도차량의 소음방사 특성에 관한 연구”, 한국철도학회논문집, Vol.5, No.1, pp. 26-31.
11. 조대승 (2001), “철도를 포함한 교통소음의 예측 기술”, 한국철도기술, Vol.32, pp. 30-36.
12. E.J. Rathe (1977), “Railway noise propagation”, *Journal of sound and vibration*, Vol.51(3), pp. 371-388.
13. D.Hohenwarter (1990), “Railway noise propagation models”, *Journal of sound and vibration*, Vol.141(3), pp. 17-41.



엄기영 (kyeum@krri.re.kr)

1988년 성균관대학교 토목공학과 학사
1991년 성균관대학교 토목공학과 석사
1991년 삼안건설기술공사
1996년 ~ 현재 한국철도기술연구원 책임연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션,



엄주환 (jhum@krri.re.kr)

1996년 금오공과대학교 토목공학과 석사
1996년~1997년 한국고속철도건설공단
2007년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션,



이진형 (ifinder@hanmail.net)

1999년 중앙대학교 토목공학과 학사
2001년 중앙대학교 토목공학과 석사
2005년 중앙대학교 토목공학과 공학박사
2006년 ~ 현재 한국철도기술연구원 박사후과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션,