

지하철 곡선부소음의 특성에 관한 연구

유 원희[†], 고 효인*, 박 준혁*, 조 준호*, 양 칠식**

A Study on the Characteristics of Subway Noise in Curved Line

Wonhee You, Hyoin Koh, Joonhyuk Park and Chilsik Yang

Key Words: Squeal Noise(스킬소음), Stick-Slip(스틱슬립), Flange Contact(플랜지접촉),

Abstract

The subway noise in curved line is affected not only by rail condition but also wheel condition and dynamic characteristics. The railway curving noise can be divided into 2 categories. The first is noise depending on the vehicle speed, and the second is the one independent on vehicle speed. In this study the noises were reviewed by using eigen-mode of wheel and waterfall plot which shows noise level in time-frequency domain. And also those were reviewed in viewpoint of stick-slip noise and wheel flange contact noise.

기호설명

- p : 음압
- ρ : 공기밀도
- c : 소리의 속도
- U : 진동하는 물체의 진동속도

1. 서 론

철도차량의 소음은 직선구간에 비하여 곡선구간에서 인간의 청각에 불쾌감을 유발하는 소음을 발생시킨다. 이는 차륜이 레일 위를 굴러감으로서 발생하는 전형적인 진동소음 외에 곡선부 운행 시 나타나는 높은 수준의 스킨소음 때문이다. 스킨소음이 인간의 귀에 불쾌감을 주는 이유는 소리 에너지가 특정 주파수에 집중되어 있는 토

널(tonal)성분의 에너지가 두드러지게 방사되며, 이 주파수영역은 인간의 귀가 가장 민감한 대역인 1~5kHz 뿐 아니라 20kHz까지 해당되기 때문이다. 이 곡선부의 스킨소음은 특히 도심을 통과하는 트램(Tram)이나 지하철 등의 경우 건설 여건 상 곡선반경이 작은 노선이 많으므로 인구가 밀집되어 있고, 인구이동이 많은 영역에서 차내 소음 혹은 차외로 전파되는 환경소음의 주요 피해원인이 되고 있다. 곡선부 스킨소음은 차륜과 레일의 접촉부분에서 차륜이 받는 크립력(creep force)에 의해 반응하는 동역학적 불안정성(스틱-슬립, Stick-slip)에 근거하는 것으로 알려져 있다. 이러한 동역학적 불안정성이 차륜을 가진시키게 되는데, 이 때 차륜은 반경방향의 방사방향 모드와 굽힘모드에 해당하는 주파수 영역에서 진동하여 소음이 방사된다. 이러한 스틱-슬립에 의한 소음 이외에 곡선부소음의 유형으로는 차륜의 플랜지가 레일의 측면에 닿아 마찰함으로서 발생하는 플랜지 스킨소음이 있다. 이외에도 차량의 동역학적 불안정한 거동에 기인하는 기계적 뼈거덕 거림, 그리고 스킨소음보다는 넓은 주파수 밴드의 피크를 나타내며, 알루미늄 재질이 많은 강철 차륜인 경우 나타난다고 알려져 있는 차륜의 하

† 한국철도기술연구원
E-mail : whyou@krii.re.kr
TEL : (031)460-5670 FAX : (031)460-5299
* 한국철도기술연구원
** 서울도시철도공사

울소음 등이 있다. 이 하울소음은 스틱-슬립 스킨음과 유사하게 차륜의 굽힘진동에 의한 것으로 추정되기는 하지만 명확하지 않을 뿐만 아니라 일반적으로 언급되고 있는 소음은 아니기 때문에 본 논문에서는 스킨소음에 포함하여 취급하였다. 이렇듯 곡선부소음은 차량이 주행할 때 차륜과 레일의 접촉부분과 접촉력에 따라서 다양한 경계 조건들에 의해 여러 가지 유형으로 세분화될 수 있는데 그 중 가장 빈번하고 큰 피해를 주는 것은 횡압에 의한 차륜의 불안정성에 기인하는 소음방사이다. 실제적인 곡선부소음 해결방안으로는 차륜에 댐핑을 부가하거나 접촉표면에 분사를 하는 방법들이 고안되어 적용되고 있다. 그러나 더욱 합리적이고 바람직한 것은 차량이나 궤도의 디자인을 최적화함으로써 곡선부에서 일어나는 스킨소음의 근원을 제거하는 방법이다.

본 연구에서는 지하철 곡선부에서의 스킨음을 제거하기 위한 방안을 도출하기에 앞서, 곡선부 스킨음의 현상과 원인을 파악하고자 하였다. 대상과 원인을 정확히 파악함으로써 저감대책을 제대로 수립할 수 있기 때문이다.

2. 차륜/레일 접촉에 의한 소음

2.1 차륜/레일 상호작용에 의한 소음

철도차량이 레일 위를 주행할 때 철도차량은 매우 복잡한 운동을 하게 된다. 철도차량의 진동을 크게 나누면 차체진동과 대차진동으로 구분된다. 그러나 이 진동들은 승차감이나 주행안정성에서 문제가 될 수는 있지만 철도소음에는 거의 영향을 주지 않는다. 이러한 진동과는 달리 철도차량이 레일 위를 주행하면 차륜에서는 고주파 진동이 발생한다. 이 고주파 진동에 기인하는 차륜/레일 전동음이 철도소음의 주된 원인이 되는 것이다. 직선주행 시에는 차륜의 답면과 레일두부의 접촉에 의해 차륜의 반경방향 방사모드에 의한 전동음이 발생하지만 곡선부 주행 시에는 이와는 다르게 차륜의 원판 형태의 굽힘진동에 의한 소음이 발생하게 된다.

2.2 곡선부소음

2.2.1 곡선부소음의 발생

곡선부 주행 시 발생하는 차륜의 스킨은 차륜과 레일의 접촉영역에서 발생하는 스틱-슬립

역학에 기인한다고 알려져 있다. 철도차량 대차의 윤축은 곡선부를 지날 때에 궤도를 따라서 그 진행방향과 일치하여 차륜이 정렬되어 따라갈 수 없으므로, 이러한 불균형적 관계는 그 곡선반경이 작은 급곡선 주행인 경우에 차륜과 레일의 인터페이스 영역에서 상당한 크기의 크립력을 발생시킨다. 주행방향으로 볼 때 앞쪽의 내측 차륜은 그 답면과 레일이 접촉되어 있고, 여기에는 높은 횡방향 크리피지가 작용한다. 한편 주행방향으로 볼 때 앞쪽의 외측 차륜은 플랜지가 레일과 접촉하려는 경향이 생기고 여기에는 윤축이 궤도에서 벗어나지 않도록 횡압이 안쪽으로 작용하게 된다. 여기에 부가하여 종방향 그리고 스핀 크립력이 접촉점에 작용한다.

그러나 접촉점에서 발생하는 주요 역학은 차륜의 답면과 레일의 상부의 접촉에서 발생하는 횡방향 크리피지와 차륜들의 종방향 미끄러짐의 차이에서 기인하는 종방향 크리피지 및 와 레일의 게이지 표면에 미끄러지듯 접촉하는 차륜의 플랜지 접촉 등 3가지로 분류하기도 한다. 곡선부 스킨모델에 관한 연구들에 의하면 차륜의 횡방향 크리피지에 기인하는 스킨현상이 가장 중요한 사항이라고 언급하고 있으며, 대부분의 모델 연구는 이 부분에 집중되어 왔다. 차륜이 마찰하면서 레일상부면을 횡방향으로 미끄러지면서 발생하는 이 스틱-슬립 소음은 가장 높은 소음레벨을 야기하며 주로 2축 대차나 2축 차량의 경우에는 주행방향의 앞쪽 내측 차륜에서 통상적으로 나타나며 주파수 영역은 200~2000Hz 가 주류를 이룬다고 알려져 있다. 이 소음을 저감하기 위한 대안으로서 차륜의 스틱-슬립 불안정성을 제한하거나 이에 대한 응답유형을 차단하는 방향으로 연구되어 왔다. 차륜의 플랜지 접촉에 기인하는 소음은 대개 주행방향의 앞쪽 외측 차륜이나 뒤쪽 내측 차륜에서 발생하고 전자의 경우보다는 낮은 레벨로써 5kHz에서 20kHz까지 간헐적으로 나타나지만 발생 시에는 상당한 소음피해를 끼치는 것으로 보고되고 있다. 이의 문제점 및 중요성에 대해서는 많은 실험적 및 이론적 연구들이 발표되고 있는데, 차륜의 플랜지와 레일의 접촉역학이 차륜에 작용하는 횡방향 미끄러짐에 의해 발생하는 스틱-슬립의 발생경향을 줄이는 작용을 한다는 연구결과도 발

표되고 있다.

한편, 곡선부 주행 시 차륜의 가진과정 동안의 크립력과 크리피지 조건에 대해서 연구하고 기술한 연구들이 다수가 있으며, 그에 관련된 많은 이론이 있다. 일반적으로 크리피지의 증가에 따라서 차륜과 레일의 접촉 영역내의 점착영역이 감소하고, 더 이상 접촉하고 있는 두 물체간의 미끄러짐을 방지할 수 있을 정도의 마찰이 충분하지 않게 될 때까지 크립력은 증가한다. 접촉점에서 일단 미끄러짐이 발생하면 빠른 속도로 점착계수가 감소하면서 크립력이 감소하는 경향을 나타낸다. 여기에서 크리피지의 레벨은 물론 크립력 및 마찰력도 접촉영역에서 차륜이 받는 수직항력, 접촉물체의 재질의 특성, 구름 속도에 따라 달라지게 된다. 결론적으로 이처럼 나타나는 감소현상에 의해 증가추세이던 크립력은 더 이상 유지가 되지 않아서 크리피지와 크립력 변화는 고주파수의 주기로 요동하게 되고, 이에 의해서 스킨소음을 발생시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 맥락에서 스킨소음을 예측하기 위한 연구에서 비롯된 이론 모델들은 대부분 각각 차륜과 레일에 관한 동역학적 거동을 기술하고 해석할 수 있는 부분과 포화상태에 이른 접촉영역에서의 크리피지와 감소하는 점착계수 등에 관한 관계를 다룰 수 있는 접촉모델 등을 포함하고 있다.

2.2.2 곡선부소음의 저감방안

곡선부 스킨소음 발생에 대한 가능성을 제한하거나 제거하기 위한 근본적인 방법으로는 우선 곡선반경을 증가시켜서 공격각을 감소시키거나 축간거리를 감소시킴으로써 횡방향 크리피지를 감소시키는 방법이 있으며, 탄성적으로 거동되는 윤축이 곡선부 주행 시 곡선부의 점선에 따라 주행할 수 있는 메커니즘을 구현하는 방법도 있지만 이는 일정 속도 이상에서는 주행안정성이 뒷받침되어야 한다. 그 외 차륜이 독립적으로 주행하는 독립차륜, 일축 대차, 능중 및 반응동 조향장치 등이 있다. 한편 차륜의 굽힘강성을 높이거나 차륜의 모드댐핑을 증가시키는 방법으로써 차륜에 댐핑재를 삽입하여 차륜의 진동에너지를 손실시키거나 위상의 변화를 주어 공진주파수 영역을 제어하는 다양한 방음차륜을 들 수 있다. 차

륜과 레일의 마찰력에 직접적인 영향을 주는 방법으로는 레일상부의 윤활이나 연마 등을 통해 마찰력의 기울기를 감소하는 방법 등을 생각할 수 있다. 여기에는 기름이나 물, 마찰조정제 등이 사용되며 이로 인해 정지마찰계수와 미끄러짐 마찰계수의 차이를 줄일 수 있다. 그러나 이 방법은 운행의 안전과 유지보수 및 환경 측면에서 신경을 써야 하는 방법이다.

곡선부 스킨의 발생 원리를 고려하여 볼 때에 그 방사되는 소음을 낮추는 방법으로는 사실상 그리 큰 효과를 본다고 할 수 없다. 불안정성에 근거하여 발생하는 특성에 대응할 수 있는 효과적인 방법은 그 효과를 감소시키기 보다는 근원을 제거하는 것이다. 본 연구는 이러한 효과적인 방법을 개발하기 전에 지하철 곡선부소음의 현황을 파악하고자 하였다.

3. 지하철 곡선부소음의 특성

3.1 곡선부소음 측정 시험

본 절에서는 국내 운행하는 전동차 시험을 통해 측정된 차륜의 방사소음을 다룬다. 시험차는 차량 상태가 양호하고 중정비 검수를 완료한 차량 1편성을 대상으로 하였다. 운용 노선은 급곡선 빈도가 많은 노선에 운용토록 하였으며 운행조건은 정상 영업운행 조건으로 하였다. 시험기간은 시험차량으로 지정된 영업운행 시점으로부터 12개월 이상 운용토록 계획하였으며 3차 시험일까지 7개월 이상 운용 중이며 시험 개시 후 총 누적주행거리는 약 60,879km 이하다. 시험일 및 누적주행거리는 Table 1과 같다.

Table 1 Travelling Distance of Test vehicle

| Test No. | Travelling Distance(km) |
|----------|-------------------------|
| 1 | 0 |
| 2 | 27,200 |
| 3 | 60,900 |

운전실이 연결된 Tc-car의 첫 번째 대차의 각 차륜측면으로 Fig. 1 및 Fig. 2와 같이 측정마이크로폰이 측정지그에 부착되어 사용되었으며

표준전동차의 두 윤축사이의 거리(W)는 2.1m이다. 전반적인 차륜소음 방사현황을 모니터링하기 위해 일정기간 간격으로 측정이 수행되었으나 본 과제에서는 궁극적으로 곡선구간에서의 차륜소음의 현황과 특성을 파악하고자한다. 연구에 의하면 곡선부 스킨소음은 곡선반경이 500m보다 큰 구간에서는 많이 발생하지 않으며, 그보다 작은 곡선반경을 갖는 구간에서 잘 발생한다고 한다. 한 대차의 전후 윤축사이의 거리(W)와 곡선반경(R)의 비율에 의해 그 비 (R/W) 가 100 이하이면 매우 높은 스킨소음이 발생한다고 알려져 있다. 본 절에서는 곡선반경이 400m인 구간과 300m 이하인 구간을 주로 대상으로 다루었다.



Fig. 1 Microphone Installation

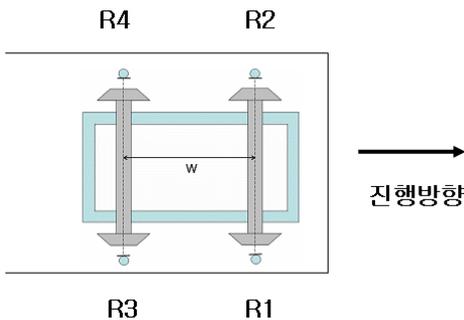


Fig. 2 Microphone position

3.2 10kHz 이상의 주파수에서 공진이 뚜렷이 나타나지 않는 경우

Table 1에서 보여주고 있는 여러 차륜의 시험 중에 플랜지 스킨 성분이 나타나지 않고, 단지 곡선부에서의 스틱-슬립에 의한 스킨소음만 나타나고 있는 부분에 대해 살펴본다.

Fig. 3은 곡선반경이 R=400 인 곡선부에서 나타나는 스킨소음에 대해 시간영역에서의 차륜 근방

에서의 소음수준을 보여준다. Fig. 2에서 보여주고 있는 마이크로폰의 위치에 따라 약간씩 다른 소음수준을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 구간에서는 차륜과 레일이 미끄러지면서 굴러가는 (스틱-슬립) 음이 명확히 들린다.

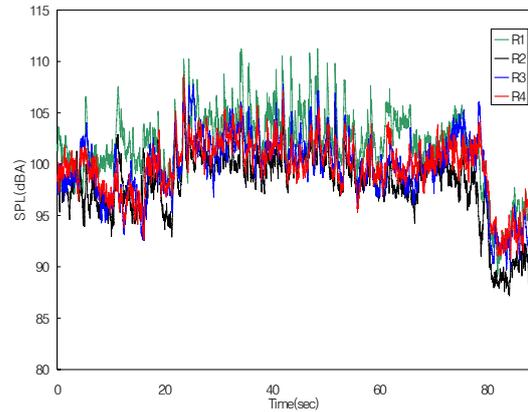


Fig. 3 A구간 곡선부 차륜소음수준(R400)

특히 이 구간에서는 마이크로폰 R1에서의 소음수준이 높으므로 이 부분에 의한 소음을 Waterfall 그래프로 나타내면 다음과 같다.

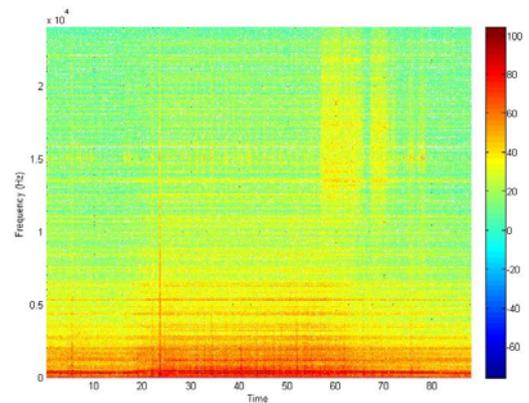


Fig. 4 차륜 R1 소음수준의 Waterfall

이 그래프를 보면 60초 근방에서 10kHz 이상의 주파수에서 넓은 범위에 걸쳐서 소음수준이 높게 나타나고 있음을 볼 수 있으며, 이 시간대역에서 Fig. 3을 보면 마이크로폰 R1에서의 소음수준이 유독 높게 나타남을 볼 수 있다. 이 부분에서는 차륜이 레일 위를 미끄러지면서 굴러가는 음이 좀 더 복잡하게 들린다. 한편, Fig. 4에서는 시간의 흐름에 관계없이 특정한 주파수 성분의 소음이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 차륜의 고유 진동모드에 의한 방사소음의 결과로

나타나는 바, 진동하는 물체에서 방사되는 방사 소음이 다음 식과 같은 관계를 가지기 때문이다.

$$p \propto \rho c U \text{ ----- (1)}$$

여기서 p 는 방사소음, ρ 는 공기밀도, c 는 소리의 속도, U 는 진동하는 물체의 진동속도이다. Fig.4를 저주파수 영역에서 보다 자세히 관찰해 보면 다음 그림과 같다.

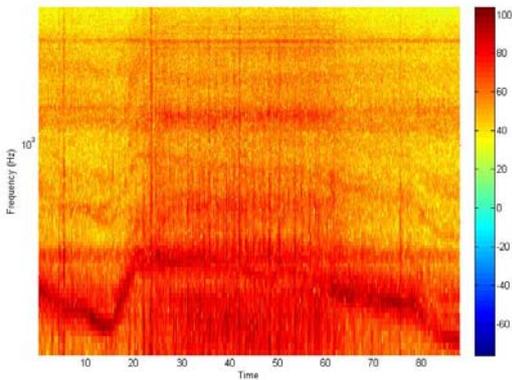


Fig. 5 차륜 R1 소음 Waterfall 상세

이 그림을 보면 480Hz와 1,200Hz 등에서 차륜의 고유진동모드에 의한 방사소음으로 추정되는 성분을 볼 수 있다. 유한요소 해석을 통해 얻어진 480Hz에서의 차륜의 진동모드는 다음과 같다.

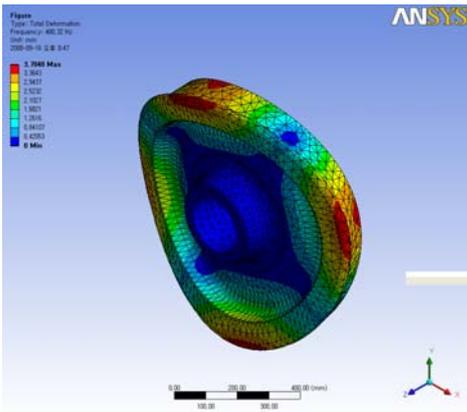


Fig. 6 480Hz에서의 차륜의 진동모드

전동차가 곡선부를 주행하면서 발생하는 차륜 답변과 레일 두부사이의 접촉역학은 주행방향의 스틱-슬립과 횡방향의 스틱-슬립으로 구분될 수 있다. Fig. 6에서 보는 차륜의 횡방향 진동모드가 Fig. 5에서보는 바와 같이 가장 강하게 나타나는 원인은 결국 전동차가 곡선부를 주행할 때 횡방

향의 스틱-슬립에 의한 횡방향 가진이 강하게 형성되기 때문으로 판단된다. 한편, 이 곡선구간을 운행할 때의 전동차의 속도는 Fig. 7과 같다.

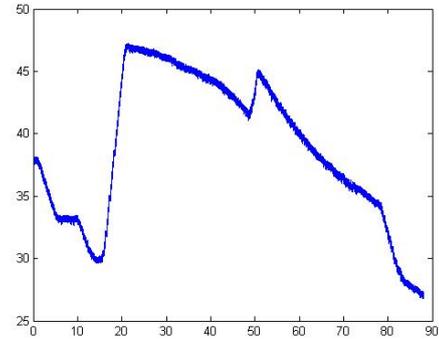


Fig. 7 A구간 주행 시 전동차 속도

Fig. 5와 Fig. 7을 비교해 보면 전동차의 주행 속도에 비례해서 주파수 성분이 나타나는 현상을 볼 수 있다. 이는 결국 곡선부 주행 시 차륜의 고유진동모드 이외에도 전동차의 주행속도에 비례하는 주파수 성분이 강하게 나타남을 보여주는 것이다. 이 현상은 곡선부 A 구간의 레일두부에 파상마모가 일정하게 생겨 있기 때문에 나타난 현상으로 보여진다.

3.3 10kHz 이상의 주파수에서 공진이 뚜렷이 나타나는 경우

이 절에서는 3.1절과는 달리 10kHz 이상의 주파수 영역에서 차륜의 공진현상이 뚜렷이 나타나는 경우에 대해 살펴본다. Fig. 8은 곡선반경 R=300m인 곡선부에서 측정된 차륜/레일 접촉에 의한 곡선부소음이다.

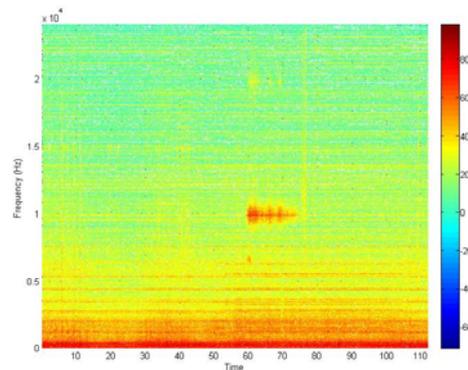


Fig. 8 차륜소음 Waterfall(R300)

이 그림에서는 Fig. 4에서와는 달리 약 10kHz

에서 15초 정도 강한 공진음과 같이 보여지는 성분이 보이고 있다. 이 부분을 밴드통과필터를 적용하면 쇠끼리 갈리는 듯한 소음을 들을 수 있다. 결국 이 소음은 차륜의 플랜지가 레일 측면에 접촉하여 회전하면서 내는 플랜지 스킨음임을 알 수 있다.

한편 Fig. 9는 곡선반경이 다른 영역에서의 차륜소음의 Waterfall을 보여주고 있다.

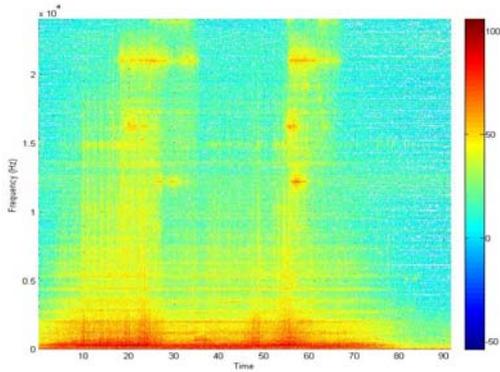


Fig. 9 차륜소음의 Waterfall(R278, R248)

이 그림은 Fig. 8과는 달리 10kHz 이상의 주파수에서 더 많은 공진음과 같은 특성을 보이는 주파수 성분들이 보이고 있다. 그러나 이들 음의 특성은 Fig. 8에서와 같은 쇠가 깎이는 듯한 소음 특성을 보이고 있는 바, 이들 역시 차륜 플랜지와 레일 측면의 접촉에 의한 플랜지 스킨음으로 판단된다. 참고로 15kHz에서의 차륜의 고유진동모드는 Fig. 9와 같다.

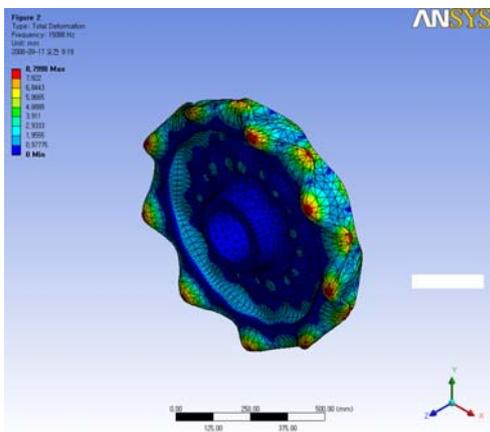


Fig. 10 15kHz에서의 차륜의 진동모드

Fig. 10을 보면 15kHz에서의 차륜의 진동모드는 차륜의 웹부분은 거의 움직이지 않고 주로 플

랜지가 굽힘진동을 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 플랜지의 운동은 레일 측면과의 접촉으로 인해 발생하는 것으로 판단된다.

결국 차륜답면과 레일두부 사이의 스틱-슬립에 의한 스킨음이나 차륜플랜지와 레일 측면의 접촉에 의한 플랜지 스킨음 모두 차륜의 진동모드와 관계가 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

(1) 지하철 전동차가 곡선부 주행 시 발생하는 스킨음은 5kHz 이하 저주파수에서는 차륜답면과 레일두부의 스틱-슬립 가짐에 의한 차륜의 공진 모드에 의해서 발생한다.

(2) 곡선부 주행 시 전동차의 주행속도에 비례하는 주파수 성분이 강하게 나타나는 현상은 그 곡선부의 레일두부에 파상마모가 일정하게 생겨 있기 때문에 나타난 현상으로 보여진다.

(3) 10kHz 이상의 고주파수 영역에서 발생하는 스킨음은 쇠가 깎이는 듯한 음으로서 차륜플랜지와 레일 측면의 접촉으로 인하여 차륜의 플랜지의 굽힘진동모드가 강하게 발생되어 나타나는 플랜지스킨음이다.

후 기

본 연구의 시험을 위해 도와주신 도시철도공사 관계자분들께 진심으로 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) W.H. You, 2007, Development of the Active Steering Bogie for Eco-friendly Urban Trains(KRRI annual research report)
- (2) D.J Thompson, A.D. Monk-Steel and C.J.C. Jones, 2003, "Railway noise : Curve squeal, Roughness Growth, Friction and Wear", Report: RRUK/A3/1
- (3) S.S. Hsu, Z Huang, S.D. Iwnicki, D.J.thompson, C.J.Jones, G.Xie and P.D.Allen, 2007, "Experimental and theoretical investigation of railway wheel squeal", Proc.IMEchE Vol. 221 Part F: J. rail and Rapid Transit