

# 현 방법으로 검측된 궤도틀림 값의 원형복원에 대한 기초검토

## A Basic Investigation for reconstruction profile of track irregularities measured by chord method

정우진\*                      안규일\*\*  
W. J. Chung                K. I. Ahn

---

### ABSTRACT

In Korea mid chord offset method has been used to measure the track irregularities. This method has been also used all over the world widely because of its accessibility and the operational excellence for measured data. But it has been pointed out recently that track irregularities reconstructed from measured data have unexpected noise in the high frequency area as the defect of this way. This study shows the cause of noise which occurs during reconstructing process and mentions the solutions briefly.

---

#### 1. 서론

궤도틀림 검측은 최근의 철도차량 주행 고속화 추세에 따라 그 작업의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 궤도틀림 검측 방법은 검측 하고자 하는 궤도틀림의 종류에 따라 달라질 수 있으나 크게 볼 때 관성 측정법과 차분법으로 나뉘어진다. 근래 들어 레이저 광원을 이용한 광학식 검측 방법과 와전류 현상을 응용한 전자식 검측장치가 선보이고 있으나 각기 환경적인 요인과 정밀도면에서 약점을 노출하고 있어 현재까지는 범용적으로 사용되지 못하고 있다.<sup>(1)</sup>

관성 측정법은 변위를 2번 미분해서 가속도 정보를 얻는 기본 원리를 이용한 것이다. 이 방법은 검측 목적에 따라 시스템의 변경이 자유롭다는 장점을 가지고 있는 반면, 검측 결과가 속도에 큰 영향을 받고, 검측 과정이 복잡하여 운영자의 특별한 주의가 필요하다는 것이 단점으로 지적되고 있다. 차분법은 몇 개의 지점에서 검측된 궤도변위(versine)의 차이를 이용하여 궤도틀림을 구하는 방법이다. 전기적인 신호처리과정이 검측 과정에 포함되어 있지 않으므로 운영자는 항상 안정된 형태의 궤도틀림자료를 수집할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 차량 속도를 변경시키며 검측할 수 있고 기계장치도 비교적 간단하기 때문에 세계적으로 가장 널리 사용되고 있으며 현재 우리나라도 이 방법을 채택하고 있는 중이다.

우리나라 고속전철과 국철에서 채용하고 있는 차분법 방식은 10m 검측현을 이용하여 궤도틀림을 측정하는 중앙 중거법(mid chord offset method) 방식으로 현의 중앙과 양 끝단에 검측점을 배치하여 궤도변위를 중앙부에서 수집하는 것이다.

---

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

지금까지의 선로 유지보수는 이렇게 검측된 versine값을 기준으로 이루어져왔다. 그러나 이 방법은 최근의 차량 고속화 추세에 따른 선로유지보수 환경변화에 적합하지 못하여, 실제 궤도틀림

에 의한 유지보수 시스템 구축 방안이 그 대안으로 조심스럽게 검토되어지고 있는 중이다.<sup>(2)</sup>

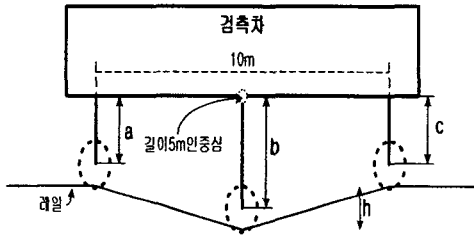
측정된 versine값의 원형틀림 복원은 기하학적원리를 이용한 일련의 과정을 통해 수행될 수 있다. 철도차량 비선형 주행 동특성 해석분야와 같이 궤도틀림에 대한 원형복원이 반드시 필요한 분야에서는 지금까지도 이 방법을 통해 입력치를 얻고 있었으나 최근, 복원된 궤도틀림의 고주파 대역에서 원인을 알 수 없는 noise들이 일정한 주기로 발생된다는 사실이 보고되면서 이에 대한 규명의 필요성이 대두되게 되었다.

본 연구에서는 이 noise가 발생하는 원인에 대하여 알아보았으며 그 제거 방안이 무엇인지에 대해서도 간략히 언급하여 보았다.

## 2. 궤도틀림 검측

### 2.1 검측차에서의 궤도틀림 검측 방법

10m 현 중앙 종거법으로 궤도틀림을 검측할 때의 기본원리가 그림 1에 설명되어있다. a, b, c로 표현된 검측점에서 궤도의 변위량 정보가 수집되며 이것은 다시 식(1)을 이용하여 versine 형태로 수집된다. 이와 같은 검출방식은 면(longitudinal)과 줄(alignment) 틀림에서도 동일하게 적용된다.



$$h = b - \frac{a+c}{2} \quad (1)$$

여기서,  $h$  : versine

$a$  : 후방 트롤리의 위치

$b$  : 검측 트롤리의 위치

$c$  : 전방 트롤리의 위치

그림 1. 궤도틀림검측 기본개요

### 2.2 검측된 versine과 실제 궤도틀림간의 관계

Versine과 실제 궤도틀림 사이에는 식(2)와 같은 선형관계가 성립되며 검측된 정보는 이 식을 이용하여 실제 궤도틀림으로 원형 복원된다.

$$y_i = 2V + 2y_{i-1} - y_{i-2} \quad (2)$$

여기서,  $V$  는 검측된 versine이고  $y$  는 각 검측 지점에서의 실제 궤도틀림이다.<sup>(3)</sup>

위 식에서 볼 수 있듯이 궤도틀림의 원형복원에는 그 이전의 검측점에서 복원된 2개의 신호값이 필요하게된다. 복원이 시작될 때는 이 값들을 알 수 없으므로 임의의 수치로 이를 대치하여 해석을 수행한다.

## 3. 원형복원

### 3.1 Versine 변환

검측차에서 검측된 versine은 2진수 형태로 저장된다. 이를 다시 편집이 가능한 10진수의 형태로 바꿔주기 위하여 사용되는 프로그램이 "off-board"이다. 그림 2는 검측된 신호가 off-board에서 변환되는 모습을 보여주고 있다.

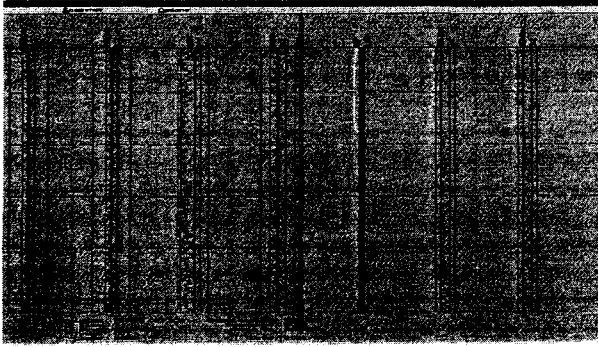


그림 2. Off-board에서의 versine 변환 과정

그림 3은 10진수로 바뀌어진 versine 신호를 검측지점에 따라 도시한 것이다. 검측차는 선로의 곡률 성분까지 모두 검측하므로 측정된 versine값들에는 장파장 성분과 단파장 성분이 혼재되어있다. 궤도틀림에 필요한 성분은 단파장 성분뿐이므로 이를 필터링(filtering)을 통해 분리시켜 주어야 한다. 필터링 과정에서 발생할 수 있는 신호왜곡효과를 최대한 줄이기 위해 본 연구에서는 butterworth 필터를 사용하였다.

그림 4는 고역 필터링(high pass filtering)된 versine을 도시하고 있다. 이 신호들은 식(2)의 과정을 거쳐 원형복원 된다. 그림 5는 원형복원 과정을 간략히 정리한 것이다.<sup>(4)</sup>

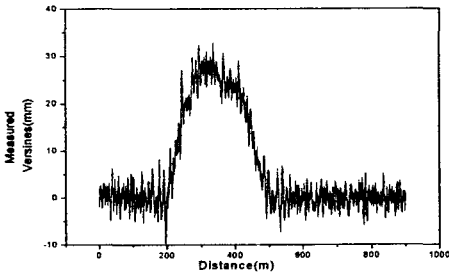


그림 3. 검측된 versine

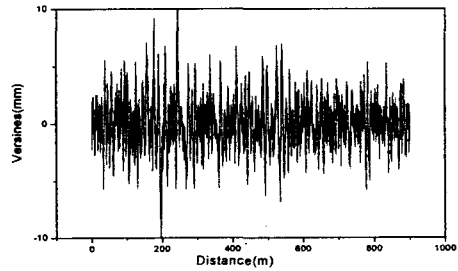


그림 4. 고역 필터된 versine

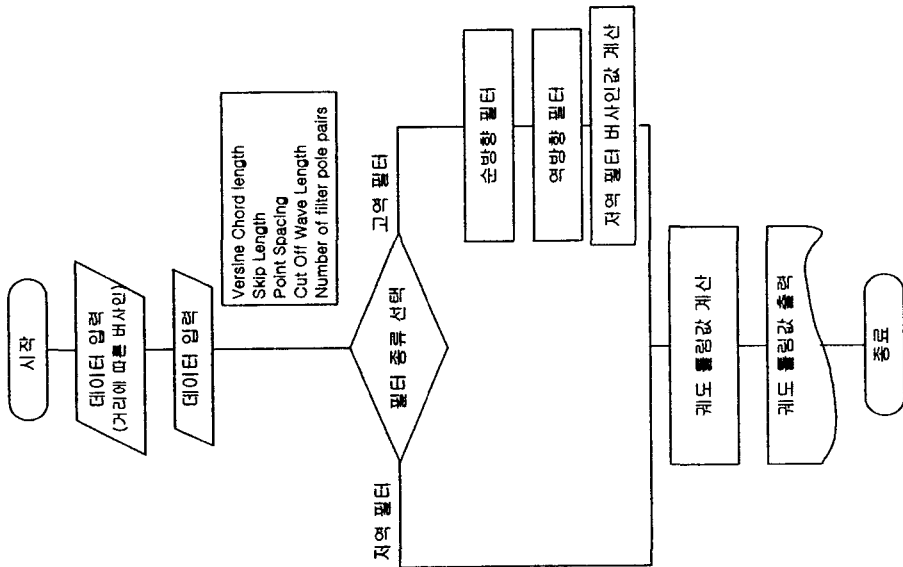


그림 5. 원형복원 과정 순서도

### 3.2 검측 신호의 분류 및 복원 파형의 결합

#### (가) 검측 신호 분류

국내에서 궤도 검측에 사용하고 있는 EM 시리즈(series) 차량은 0.25m마다 한 번씩 versine값을 저장하므로 측정현의 절반인 5m까지 versine을 20번 검측하게 된다. 한 위치에서의 versine값은 검측차 길이의 반이 지나간 후에 검측된 값과 연관성이 있다. 예를 들어, 현의 길이가 10m일 때 그 길이의 4분의 1인 2.5m 마다 versine을 검측 한다면 5m마다 2개의 versine이 검측 된다. 검측이 계속되면 2개의 섞여서 짜여진 시리즈를 얻게된다. 첫 시리즈를 A, 두 번째 시리즈를 B라고 하면 검측된 versine의 순서는 A1, B1, A2, B2, A3, B3,... 가 된다. A 시리즈와 B 시리즈는 서로 독립적이기 때문에 각 시리즈들은 오직 그 시리즈에 해당하는 versine을 이용하여 원형 복원되어야 한다. 따라서 현재의 검측 시스템에서 수집된 신호들은 20개의 독립된 시리즈들로 구성된다.

#### (나) 복원 파형의 결합

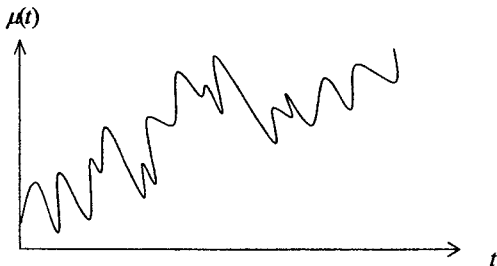


그림 6. 최소자승법 적용 전 신호

원형복원이 끝난 각각의 시리즈들은 최소자승법 (least square method)<sup>(5)</sup>을 통해 하나의 신호로 합쳐진다. 각 series들은 적절하지 못한 초기치 설정의 영향으로 heading 각을 가지고 있으며 이를 그 래프(graph)로 도시하면 그림 6과 같은 것이다.

각 시리즈들의 heading 각은 모두 다르므로 이 들을 하나의 신호로 합쳐주기 위해서는 기울기들 을 통일시켜줄 필요가 있다.

시리즈들의 기울기는 그림 7에 도시된 선형식으 로 구할 수 있다. 이 식에 사용된 계수들은 식(3) 과 같은 형태로 표현될 수 있다.

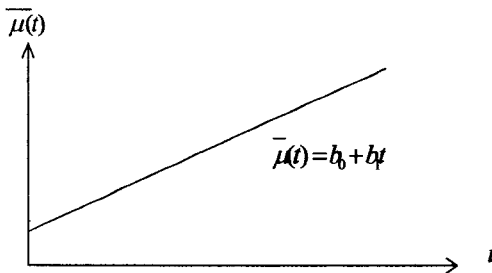


그림 7. 신호들의 기울기

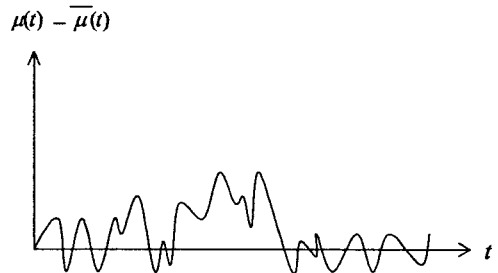


그림 8. 최소자승법 적용 후 신호

$$b_0 = \frac{2(2N+1) \sum_{n=1}^N \mu_n - 6 \sum_{n=1}^N n \mu_n}{N(N-1)} \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{12 \sum_{n=1}^N n \mu_n - 6(N+1) \sum_{n=1}^N \mu_n}{hN(N-1)(N+1)}$$

여기서  $\mu$ 는 신호값,  $h$ 는 신호간 간격 그리고  $N$ 은 전체 신호의 수를 의미한다. 그림 8은 최소자 승법이 적용되어 신호가 x축에 대하여 평형하게 된 것을 보여주고 있다.

#### 4. 결과검토

##### 4.1 복원결과 검증

실제 궤도틀림은 여러 가지 파장 및 진폭 성분으로 구성된다. 따라서 복원결과에 문제가 있을 경우 어떤 입력치 성분이 원인인 지 판단하기가 불가능하다. 본 연구에서는 궤도틀림의 주기와 진폭에 따른 복원 결과의 인과관계를 보다 정확하게 파악 하고자 궤도틀림을 정현파로 가정하였으며 이것의 복원결과를 입력치와 다시 비교하며 그 정확성을 검증하였다.

복원결과 검증은 다음과 같은 순서로 이루어진다. 먼저 식(2)를 역으로 변환하여 정현파에 대한 versine을 기하학적으로 계산한다. 산출된 versine은 원형복원 프로그램에 다시 입력되어 원래의 궤도틀림 형상으로 복원된다.

궤도틀림으로 가정한 정현파의 주기를 일정하게 놓고 진폭을 변화시킨 결과, 복원 결과는 입력치와 같은 진폭 변화를 보였다. 따라서 궤도틀림의 진폭변화는 복원 결과에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 반면 궤도틀림의 진폭을 일정하게 하고 주기를 변화시켜 원형 복원시켰을 경우, 주기의 변화에 따라 그 결과는 많은 차이를 보였다. 특이할 점으로써 주기가 작을 때의 원형복원 결과는 원래의 입력값에 비해 일그러진 형태가, 그리고 주기가 커질수록 원형에 가까운 형태가 나타났다.

그림 9는 진폭이 1cm이고 주기가 8m인 정현파의 원형복원 결과를 나타내고 있으며 그림 10은 같은 진폭에 주기가 70m인 정현파의 원형복원 결과를 도시하고 있다. 그림 9와 같이 원형복원이 잘 이루어지지 않은 경우를 주파수 분석해보면 그림 11에 도시된 것과 같이 고주파 대역에 주기적인 noise가 존재하고 있음을 볼 수 있다. 이런 현상은 원형복원이 비교적 잘 된 경우(그림 10)에서는 나타나지 않던 현상이다. 그림 12는 그림 10의 주파수 분석 결과이다.

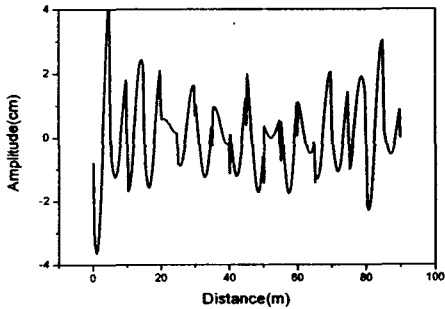


그림 9. 주기가 8m인 경우

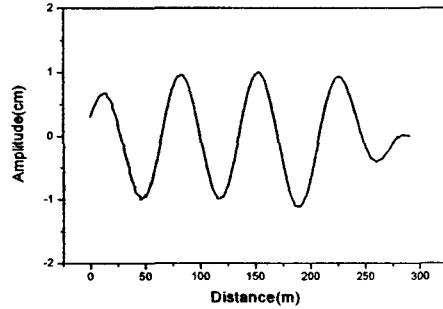


그림 10. 주기가 70m인 경우

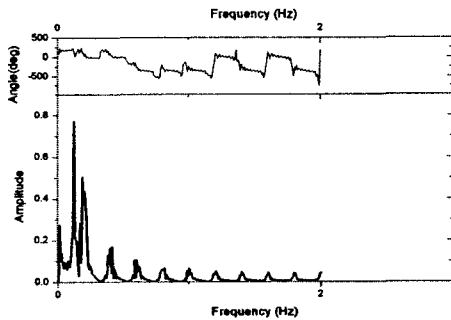


그림 11. 그림 9 FFT한 경우

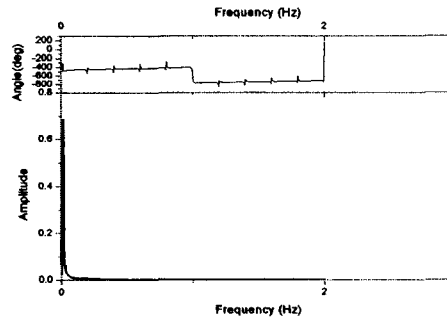


그림 12. 그림 10 FFT한 경우

#### 4.2 Noise 발생 원인 규명

원형 복원시 발생하는 noise의 발생 원인을 찾기 위해 진폭이 1cm 이고 주기가 각각 8m와 10m인 정현파에 대하여 원형 복원작업을 실시하였다. 그림 13과 14는 이들 복원 결과중 여섯 개 시리즈를 뽑아서 도시한 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 여섯 개의 시리즈 중 몇 개의 시리즈가 전체 경향을 따르지 않고 어긋나 있음을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 검출된 20개의 시리즈들은 원형복원 절차를 마친 후 하나로 합쳐져야 하므로 일부 시리즈가 이렇게 어긋난다면 전체 시리즈의 원형복원 결과는 그림 9와 같이 일그러진 형태로 나타날 것이다.

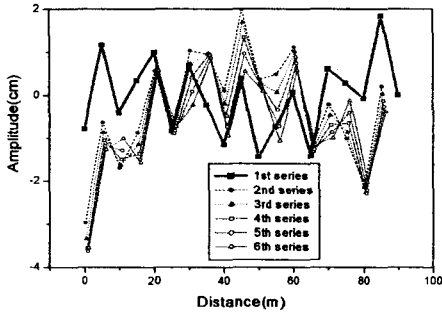


그림 13. 주기가 8m인 시리즈 6개

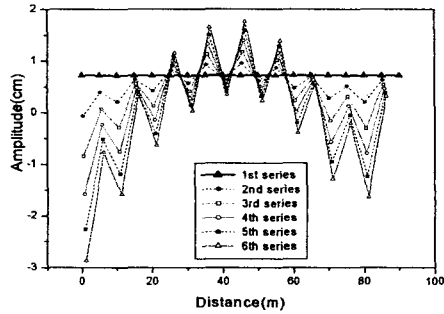


그림 14. 주기가 10m인 시리즈 6개

이런 현상은 케도틀립의 신호 추출속도가 케도틀립 주기와 맞지 않아 발생하는 엘리어징 효과 (aliasing effect) 때문인 것으로 판단된다. 이산신호의 주파수 성분을 정확하게 재구성하기 위해서는 이론적으로 식(4)와 같은 관계가 성립되어야 하나 경험적으로는 신호 1주기당 2.5 번 샘플링 (sampling)되는 것이 가장 적당하다고 알려져 있다.<sup>(6)</sup>

$$f_s > 2 f_m \quad (4)$$

여기서,  $f_s$  는 표본 추출 주파수이고,  $f_m$  은 신호 주파수이다.

검측차에서 검측하는 각 versine 시리즈의 신호간 간격은 현 길이의 반인 5m이다. 그러므로 한 주기당 2.5번 이상 신호추출이 이루어지기 위해서는 케도틀립의 주기가 최소 12.5m 이상이 되어야 할 것이며 주기 12.5m 이하의 신호들은 원형 복원시 신호왜곡을 동반하게 된다.

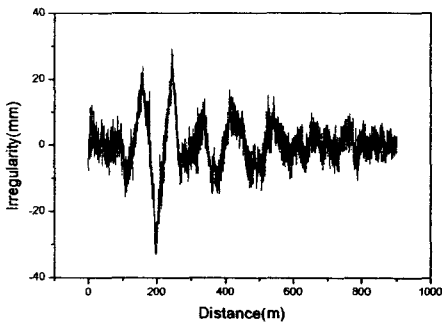


그림 15. Versine을 이용한 원형복원

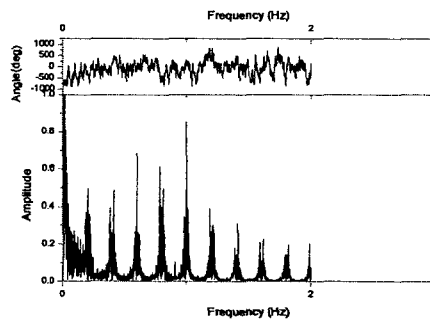


그림 16. 그림 15 FFT 한 경우

그림 15는 실제 검측차에서 검측된 궤도틀림(부산-부산진)을 기하학적인 방법을 이용하여 원형 복원시킨 결과이다. 이 결과를 주파수 분석한 것이 그림 16이며 여기서도 noise가 고주파 대역에 주기적으로 분포되어있는 것을 발견할 수 있다. 이런 noise들은 앞서 검토한 바와 같이 검측현의 길이 때문에 발생하는 신호 왜곡 현상으로 설명될 수 있을 것이다.

### 4.3 Noise 저감대책

4.2에서 검토한 결과에 의하면 궤도틀림 검측값을 복원할 때 발생하는 noise들은 검측 주파수가 궤도틀림 주기를 따라가지 못한 것에서 기인한다. 만일, 이 추론이 맞다면 현의 길이를 줄여서 궤도틀림을 검측한 후 이를 복원한 결과에서는 noise들이 없어져야 할 것이다.

그림 17은 궤도틀림의 진폭이 1cm이고 주기가 12m인 정현파의 형태를 가질 때 5m 검측현을 이용해 이를 검측하고 다시 원형 복원시킨 결과를 보여주고 있다. 이것은 그림 18과 같이 10m 검측현이 사용되었을 때의 원형복원 결과와 비교해볼 때 신호왜곡 현상이 크게 개선된 것이다.

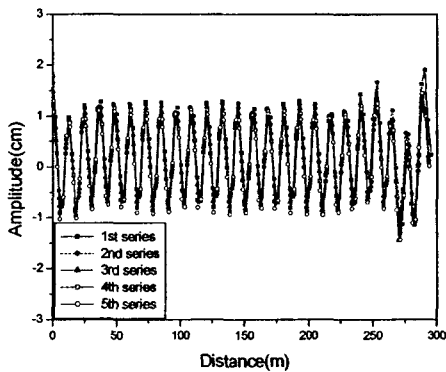


그림 17. 현의 길이 5m, 주기 12m인 정현파 원형복원한 시리즈 5개

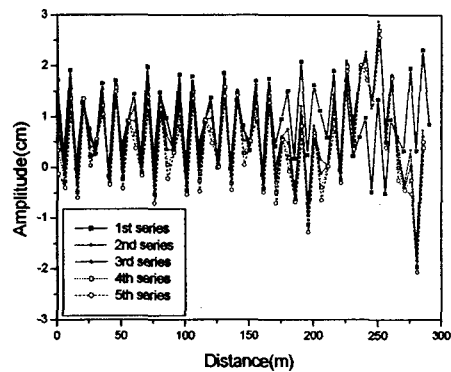


그림 18. 현의 길이 10m, 주기 12m인 정현파 원형 복원한 시리즈 5개

또 하나의 유력한 대안은 검측차의 검측점 간격을 바꾸는 방법이다. 현재의 EM 시리즈 차량은 검측점의 간격이 등간격이어서 차량의 이동방향에 상관없이 검측신호가 일정하게 수집된다는 장점을 가지고는 있으나 일정 주파수 대역 이하는 검측할 수 없다는 단점이 있다.

반면, 검측점의 간격을 비대칭으로 놓는다면 장파장 및 단파장 성분을 모두 검측할 수 있을 것이다. 일부 국가에서는 이 방법으로 궤도틀림을 검측하고 있다. 그러나 이 방법은 차량의 주행방향에 따라 검측신호의 성질이 바뀌게 되므로 운영자가 단파장 성분에 관심이 없을 경우 오히려 불편을 초래할 수도 있다.

### 4.4 궤도틀림의 파장과 차량 동요의 관계

차량의 동요는 특정 영역에 있는 파장의 궤도틀림에 민감하게 나타난다. 일반적으로 차량은 주행 속도 영역에서 좋은 승차감을 느낄 수 있도록 설계된다. 대부분의 경우, 차량이 가장 중요하기 쉬운 진동수는 1.0~1.5Hz 근처이다. 이것을 궤도틀림 주기와 차량속도와의 관계로 정리한 것이 그림 19이다. 이것을 보면 일반 차량의 주행속도 대역에서는 10m 이하의 궤도틀림 주기는 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 특히 열차속도가 증가됨에 따라 차량의 동요는 장파장 궤도틀림과 관련성이 커지며 단파장 성분과는 무관하게 된다.

따라서 현재의 궤도 운행 속도를 고려해 본다면 EM 시리즈 검측차량으로부터 수집된 versine을 이용하여 원형 복원한 궤도틀림값을 선로 유지보수 또는 차량 비선형 동특성 해석에 사용하여도 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

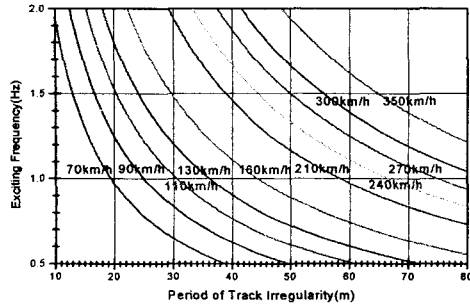


그림 19. 궤도틀림의 파장과 가진 주파수

## 5. 결론

본 연구에서는 10m 현 중앙 종거법으로 검측된 versine을 원형 복원시키는 과정에서 나타나는 noise의 발생원인을 검토하고 그 해결방안에 대하여 간략하게 논의해보았다. 지금까지 연구된 결과들은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 검측차에서 수집된 신호를 기하학적 방법을 통해 원형 복원시킬 때 발생하는 고주파 대역에서의 noise는 검측신호 주파수와 궤도틀림 주기가 서로 맞지 않아 발생하는 엘리어징 효과 때문이다.
- (2) Noise를 줄이기 위해서는 현의 길이를 감소시켜 주는 것이 가장 확실한 방법이나 검측차의 검측점 위치를 변경해주는 것도 유력한 대안이 될 수 있다.
- (3) 궤도틀림 파장과 차량 동요 주파수와와의 관계를 고려해볼 때 일반 주행속도 대역에서 궤도틀림의 고주파성분은 큰 영향을 미치지 못할 것으로 예상된다. 따라서 현재의 검측 방식으로 수집된 versine을 원형 복원하여 사용하여도 유지보수 및 동특성 해석에 무리가 없을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 서사범(2000), "궤도장비와 선로관리," 열과 알, pp 186
2. 한국철도기술연구원(2001), "기존선 고속화에 대응한 궤도관리 기법개발 및 관리기준 정립," 한국철도기술연구원, pp. 7-12
3. 영국철도연구소(BRR)(1992), "Processing Versines for Vampire," BRR, pp. 4-10
4. 정우진, 구병춘(2002), "검측차(EM120) 검측결과를 이용한 원형틀림 복원 프로그램 개발," 추계 학술대회 논문집, 한국철도학회
5. Julius S. Bendat and Allan G. Piersol(1971), "Random Data: Analysis and Measurement Procedures," John Wiley & son, pp. 289-291
6. 김성원의 3명(1995), "기계진동학," 반도 출판사, pp. 476-482