

검측차(EM120) 측정결과를 이용한 원형틀림 복원 프로그램 개발

Development of the Program for Reconstruction Profile of Track using the measured Data from EM120

정우진* 구병춘*
W. J. Chung B. C. Koo

ABSTRACT

All work related to maintenance of track has been impletemented on the basis of the measured result from EM series cars in Korea. However, since these types of cars measure only versine value of the track irregularities instead of the real ones, this method will cause the confusion to maintenance operators if commercial speed should increase. This study was showing and explaining the program developed to get the real irregularities from the versine value. Finally, the reconstruction profiles completed by two different methods were compared with artificial track irregularities to confirm the their practicality.

1. 서론

국철에서는 현재 검측차를 이용하여 주요 본선의 경우는 1년에 7회, 기타의 경우에는 1년에 4회마다 선로의 궤도틀림값을 수집하고 있다.⁽¹⁾ 이렇게 수집된 궤도 틀림값들은 궤도 틀림의 상태, 궤도의 부재 및 재료의 열화상태 그리고 궤도의 성능 등을 판별하는 중요 지표로서 사용된다.

한편 이런 전통적인 궤도틀림 수요치와는 별도로, 최근의 급속한 가상공학 기술의 발달은 차량 분야에서도 이들의 정보가 반드시 필요한 것으로 인식되게 하고있다. 즉, 그동안 불가능한 것으로 여겨지던 철도차량의 비선형 주행동특성 해석이 전산장비 및 해석기술의 발달로 가능해짐에 따라 차량 동요에 영향을 주는 궤도틀림 정보가 해석단계에서 입력자료로 필요하게된 것이다.

궤도틀림을 검측하는 방식은 매우 다양하며 세계 각국에서는 각기 다른 방식을 채택하여 검측을 실시하고 있다. 대략, 검측방식은 관성법, 차분법, 광학식 측정법 그리고 이들 각 방식을 혼합하여 응용한 방법 등으로 나뉘어진다. 이들 중 우리나라의 국철과 고속철도가 채택하고 있는 것은 차분법이며 검측장비로는 EM 시리즈(series) 차량이 이용되고 있다.⁽²⁾

차분법은 복수의 지점에서 측정된 레일의 변위를 각각에 대한 변위차(versine)로 변환하여 궤도틀림을 구하는 방법이다. 이 방법은 순수히 기하학적 원리를 이용하여 측정된다는 장점을 가지고 있으나 측정차량의 제원에 따라 검측특성이 좌우된다는 특징이 있다.

차분법으로 측정되는 값들은 실제 궤도 틀림값이 아닌 versine 값이다. 이를 실제 틀림값으로 바꾸기 위해서는 일련의 복잡한 변환과정이 필요하며, 이것이 쉽지 않은 선로 유지보수 현장에서는 실용적인 목적에 따라 versine 값으로 작업실행기준을 삼고 있다. 그러나 검측치들과 실제 틀림 사이에는 선형적인 비례관계가 항상 성립하지 않으며 둘 사이의 차이는 그림 1, 2 그리고 3에

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

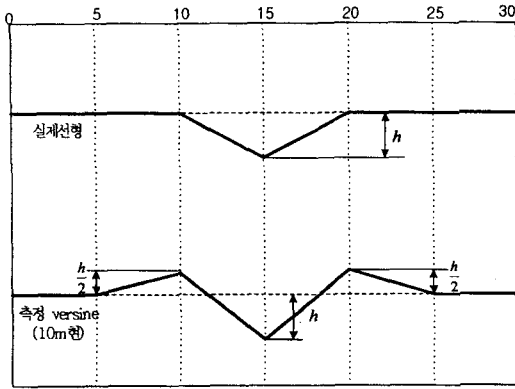


그림 1. 실제 틀림과 versine값의 차이

기준방식보다는 실제 궤도틀림값을 monitoring하여 유지보수 장소 및 실행시기를 결정하는 방식으로 전환되어야 할 것으로 판단된다.

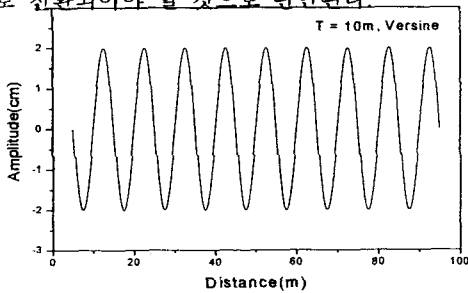


그림 2. 진폭 1cm, 주기 10m 궤도틀림의 versine

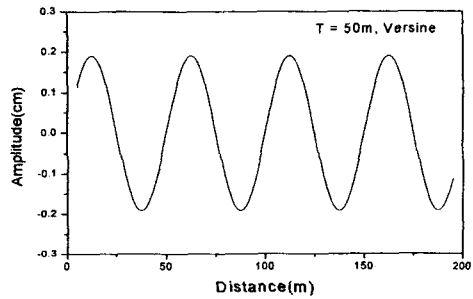


그림 3. 진폭 1cm, 주기 50m 궤도틀림의 versine

본 연구에서는 궤도틀림 원형복원 프로그램을 개발하여 측정된 versine 값들을 실제 선로상의 궤도틀림 값들로 최대한 근사적으로 복원시킬 수 있는 방법을 소개하고 그 결과들을 검토하여 보았다.

2. 프로그램 알고리즘

검측차에서 측정된 versine값의 원형복원은 크게 2가지 방법에 의하여 가능하다. 그 중 하나는 검측차와 원형틀림값 사이의 선형적 관계를 이용하는 방법이고 나머지 하나는 검측치를 푸리에 역변환(inverse Fourier transform)하여 원형틀림을 구하는 방법이다. 본 논문에서는 전자를 기하학적 방법 그리고 후자를 역변환 방법이라고 정의하였다.

기하학적 방법의 경우, 그 복원결과가 비교적 정확하다는 장점이 있으나 측정값들을 현의 길이에 따라 독립적인 다수의 시리즈로 구분시켜 계산해야하고, 변환과정이 끝나면 이들을 다시 하나의 신호로 합성시켜야하는 번거로움이 있다.

역변환 방법의 경우, 그 개념이 명료, 단순하고 해석과정에서 별도의 측정치 가공절차가 생략될 수 있다는 장점이 있으나 변환결과가 해석조건에 민감해진다는 단점이 있다.

본 연구에서는 사용자가 이러한 두 가지 방법 중 하나를 선택하여 원형복원 작업을 수행할 수 있고 입출력의 설정이 편리하게 구성된 전문 프로그램을 개발하였다.

그림 4는 개발된 프로그램의 순서도를 도시하고 있다.

서 보여주는 것과 같은 이유로 발생된다. 그림 2와 3은 선로 상에 존재하는 sine 파형의 궤도틀림이 10mm의 진폭을 가지고 주기가 각각 10m와 50m일 때 이를 검측차에서 측정한 결과를 비교한 것이다. 같은 진폭을 가진 궤도틀림에 대해서 양자간 versine값은 약 10배의 진폭차를 보인다.

이 결과에서 볼 수 있듯이 차량 고속 주행화 및 승차감 향상을 목적으로 보다 정밀한 유지보수 작업이 수행되기 위해서는 종래와 같은 검측차

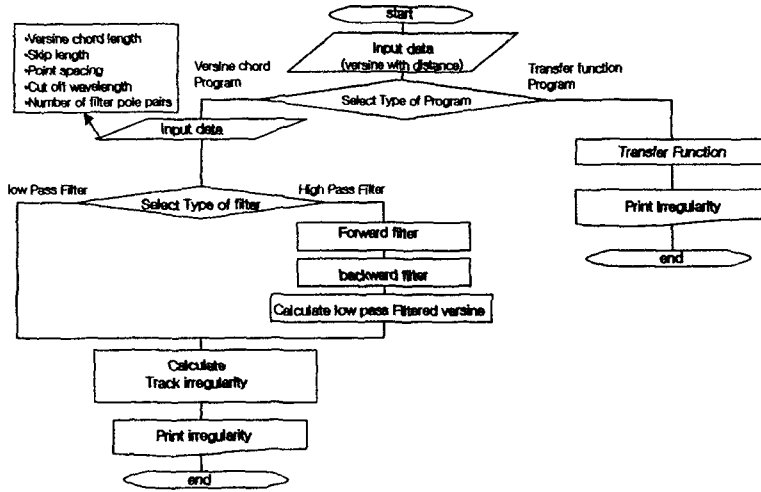


그림 4. 해석 프로그램 순서도

2.1 기하학적 방법

기하학적 방법을 통한 원형복원 방법은 식(1)⁽³⁾과 같은 검측치와 원형틀림 사이의 선형관계로부터 시작된다. 그림 5는 이를 도식적으로 표현한 것이다.

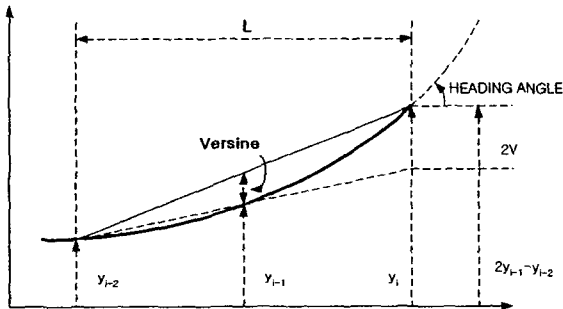


그림 5. 궤도틀림과 versine 간의 관계

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

여기서 V 는 versine 그리고 y_i 는 측정점에서의 실제 틀림량이다.

Heading 각은 실제 검측차에서 측정되는 versine값과 프로그램에서 간주하는 versine값 간의 차이 때문에 발생된다. 보통, 이 차이는 공학적인 관점에서 무시할 정도로 작기 때문에 해석결과의 정확도에 영향을 미치지 못하지만 선로 사정이 극히

열악한 특수한 경우에는 versine값과 heading 각이 비례적으로 커지면서 복원결과의 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있다. 식(1)은 실제 궤도틀림과 관련된 versine값들이 복원에 사용될 때만 유효한 식이다. 검측차에서 수집된 자료는 궤도틀림 정보 이외에도 곡선반경과 관련된 정보도 포함되어 있다. 따라서 복원과정에서는 이들을 따로 분리시켜주어야 한다. 곡률반경에 관련된 정보들은 궤도틀림에 비하여 장파장 성분이므로 저역필터(low-pass filter)를 사용하면 이들을 검측신호에서 쉽게 분리시킬 수 있다. 전술한 바와 같이 신호들은 현의 길이에 따라 다수의 시리즈들로 구성되어지기 때문에 필터링 작업도 이들에 대하여 각기 적용되어야 한다. EM 시리즈 차량의 경우 10m 현 검측방식을 채용하고 있고 3곳의 등간격 검측점을 가지고 있으므로 전체 신호는 20개의 독립된 시리즈들을 포함하게 된다.

이산신호를 처리할 수 있는 디지털 필터에는 여러 종류가 있다. 이들 중 Chebyshev type I 필터는 잔물결 형태를 가지는 passband를 가지며 Chebyshev type II 필터는 잔물결 형태를 가지는 stopband를 가진다. elliptic filter는 passband 및 stopband 모두에서 잔물결 형태를 보이지만 천이역의 폭이 가장 작다는 특징이 있다. 신호복원에서 잔물결 형태의 noise 발생은 잘못된 궤도틀림

복원값을 도출시킬 수 있으므로 본 연구에서는 모든 필터 중 가장 평탄한 passband와 stopband를 가진 butterworth filter를 이용하여 필터링을 수행하였다. 식(2)와 (3)은 각각 저역 및 고역필터 (high-pass filter)로 butterworth 필터가 사용될 때의 일반식을 보여주고 있다.

$$\text{Low pass : } \prod_k \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2 \cos \frac{k\pi}{2N} s \omega_0 + \omega_0^2} \quad (2)$$

$$\text{High pass : } \prod_k \frac{s^2}{s^2 + 2 \cos \frac{k\pi}{2N} s \omega_0 + \omega_0^2} \quad (3)$$

여기서 $k=1,3,4,\dots, N-1$ 이며 N 은 필터 극(pole)의 수이다.

만일 극수가 2라면 식(4)와 같은 관계가 성립된다.

$$C_1 y_1 + C_2 y_2 + C_3 y_3 = A(X_n + 2j X_{n-1} + X_{n-2}) \quad (4)$$

여기서 high pass 필터 일 때 $A=1, j=-1$ 이며 low pass 필터 일 때 $A= \omega_0^2$ 그리고 $j=1$ 이다. X 와 Y 는 각각 필터링 전과 후의 신호값을 나타낸다. 식(4)에 사용된 각각의 계수는 식(5)와 같다.

$$C_1 = 1 + B \omega_0 + \omega_0^2, \quad C_2 = 2 \omega_0^2 - 2, \quad C_3 = 1 - B \omega_0 + \omega_0^2 \quad (5)$$

여기서 $\omega_0 = \tan \frac{\pi \Delta x}{L}$, L 은 cut-off 신호의 주기(wavelength), Δx 는 sample spacing 그리고 $B = 2 \cos(\frac{k\pi}{2N})$ 이다.

필터링은 신호들의 시간지연을 발생시키므로 본 프로그램에서는 필터링을 순방향 및 역방향으로 순차 적용시켜 이를 상쇄시킨다.

필터링을 통해 분리된 신호들은 식(1)로 원형복원되며 복원된 20개의 독립 신호들은 최소자승법 (least square method)을 통해 단일 신호로 합쳐진다.

2.2 푸리에(Fourier) 역변환 방법

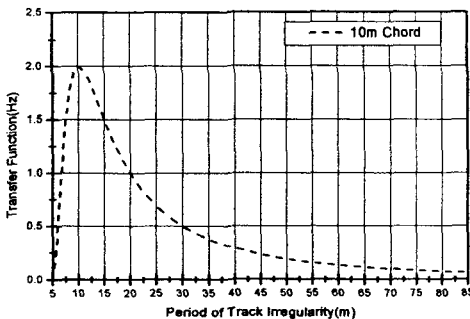


그림 6. 10m현 중앙중거법에 대한 전달함수

검측차에서 검측된 versine값과 실제 궤도틀림은 10m 현 방식일 경우 식(7)과 같은 관계를 가진다. 그림 6은 이때의 검측 특성을 보여준다.

$$y(z) = x(z) - \frac{1}{2} [x(z+c) + x(z-c)] \quad (7)$$

여기서 $y(z)$ 는 측정치, $x(z)$ 는 실제 궤도틀림값, z 는 검측위치 그리고 c 는 측정현의 1/2값 즉 5m이다. 식(7)을 푸리에 변환하면 식(8)을 얻을 수 있다. 이는 다시 식(9)와 같은 전달함수 형태로 재구성될 수 있다.

$$Y(v) = X(v)\{1 - \cos(2\pi v c)\} \quad (8)$$

$$H(v) = \frac{Y(v)}{X(v)} = [1 - \cos(2\pi v c)] \quad (9)$$

위 식들 중 v 는 공간주파수이다. $Y(v)$ 는 검출된 자료들을 푸리에 변환하여 구할 수 있으므로 실제 미지수는 $X(v)$ 뿐이다. 따라서 실제 웨도틀림은 식(10)을 통해 구해질 수 있다.

$$x(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} X(v) e^{ivz} dv \quad (10)$$

3. 복원결과 검증

개발된 프로그램의 결과를 검증하기 위해 인위적으로 진폭이 1cm이고 주기가 40m인 sine 형태의 웨도틀림을 입력하고 이를 다시 두 가지 방법을 통해 원형복원 시켜보았다. 그림 7은 주어진 웨도틀림을 도시하고 있다. 그림 8은 기하학적 방법으로 복원한 결과를 보여준다. 양쪽의 결과는 매우 유사한 경향을 보이므로 복원은 성공적이라고 수행되었다고 간주될 수 있다.

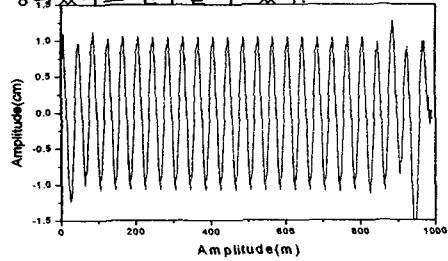
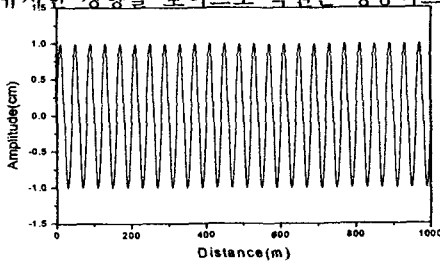


그림 7. 진폭 1cm, 주기 40m인 웨도틀림 그림 8. 기하학적 방법으로 복원된 웨도틀림

그림 9는 역변환 방법으로 복원된 원형틀림을 보여주고 있다. 배율이 0이 되는 대역을 피하기 위해 역변환 구간은 10m에서 100m대역으로 제한되었다. 여기서 x축은 신호의 숫자를 나타낸다. 복원 결과를 보면 주기와 진폭이 비교적 선명하게 나타나고 있는 있으나 기하학적 방법에 비하여 초기 진폭이 일정치 못한 경향이 있음을 알 수 있다. 이런 현상은 주기가 짧아질수록 더욱 뚜렷해진다. 역변환에서의 이런 신호 왜곡은 변환에 필요한 신호의 숫자가 2ⁿ개로 제한되기 때문에 발생된다. 즉 sampling이 충분치 못할 경우 2의 승수배 만큼의 신호만 역변환에 사용되므로 이를 제외한 나머지 많은 양의 신호정보들은 사용되지 못한다. 검출차는 0.25m 간격마다 검출을 하므로 주기가 짧아지면 한 주기를 표현하는데 필요한 이산신호의 숫자는 그 만큼 작아지게 된다. 주기가 짧아짐에 따른 복원신호의 왜곡현상은 기하학적 방법에서도 마찬가지로 발생되나 푸리에 역변환 방법에서 더욱 심하게 나타난다.

그림 10과 11은 주기가 10m일 때의 각 방법으로 웨도틀림을 복원한 결과를 도시하고 있다. 기하학적 변환방법을 사용했을 때 발생하는 신호의 국부적인 왜곡은 aliasing 효과 때문에 발생한 것으로서 현재와 같은 10m 현 방식이 사용할 때, 이것이 무시될 수 있는 최소 웨도틀림 주기는 12.5m가 될 것이다.^{(4),(5)}

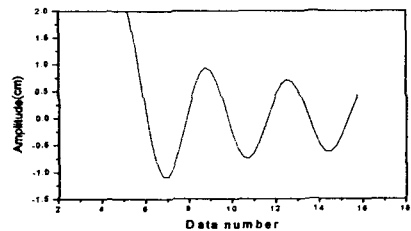


그림 9. 푸리에 역변환으로 구한 웨도틀림

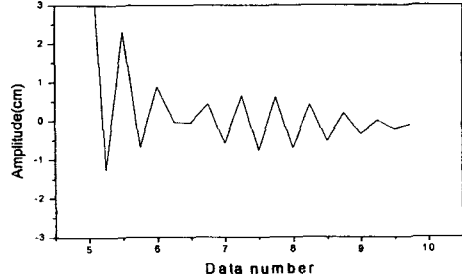
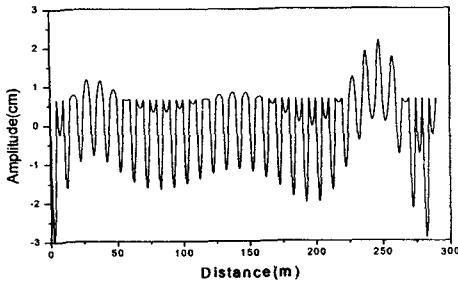


그림 10. 진폭 1cm, 주기 10m의 신호를 기하학적 방법으로 복원된 궤도틀림
 그림 11. 진폭 1cm, 주기 10m의 신호를 푸리에 역변환 방법으로 복원된 궤도틀림

4. 결론

본 논문에서는 궤도검측 자료로부터 원형틀림이 구해질 수 있도록 개발된 전문 프로그램을 소개하였으며 그 해석결과를 검증하여 보았다. 지금까지 연구된 내용들은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 궤도틀림의 복원은 기하학적 방법과 푸리에 역변환 방법을 통해 이루어질 수 있다.
- (2) 인위적인 궤도틀림값을 입력하여 시험해본 결과 기하학적 방법은 일부 대역을 제외하고 대부분의 대역에서 안정된 복원결과를 보인다.
- (3) 푸리에 역변환에 사용되는 신호의 숫자는 2의 승수배로 제한되므로 신호가 충분하지 못할 경우 불안정한 복원결과를 보일 수 있다.
- (4) 주기가 짧아짐에 따른 복원신호의 왜곡현상은 기하학적 방법에서도 마찬가지로 발생되나 푸리에 역변환 방법에서 더욱 민감하게 나타난다.
- (5) 차량 고속 주행화 및 승차감 향상을 목적으로 보다 정밀한 유지보수 작업이 수행되기 위해서는 종래와 같은 검측치 기준방식보다는 실제 궤도틀림값을 monitoring하여 유지보수 장소 및 실행시기를 결정하는 방식으로 전환되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 서사범(2000), "궤도장비와 선로관리," 열과 알, pp. 186-188
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, 안규일(2002), "현방법으로 검측된 궤도틀림값의 원형복원에 대한 기초검토," 추계학술대회 논문집, 한국철도학회
5. 김성원의 3명(1995), "기계진동학," 반도출판사, pp. 476-482