

# 철도차량 차축 결함에 대한 집중 유도 전위차법 탐상의 유한요소 해석

## Finite Element Analysis of ICFPD Method for the Defect Detection of Railway Axle

김성훈\* 임충환\*\* 구병훈\*\*\* 권석진\*\*\*\* 이찬우\*\*\*\*\*

### ABSTRACT

The NDT(Non-Destructive Testing) is valid for the defect detection of rolling stocks because it can be used to detect the defect in many invisible parts. For example, fatigue cracks are initiated in press fit parts that suffer from fretting fatigue damage such as the wheel seat and the NDT technique can detect those cracks. But the conventional ICFPD method can not apply to detect such cracks in press fit parts of the axle by some technical problems. In this study, we have introduced the new concept ICFPD method that can be applied in press fit parts of the axle. And we have shown the basic techniques of FEM about the new concept ICFPD method.

keyword : ICFPD(Induced Current Focusing Potential Drop), FEM(Finite Element Method), Railway Axle, NDT(Non-Destructive Testing)

### 1. 서 론

철도차량의 윤축(Wheelset)은 견인 모터나 엔진 크랭크축의 회전력을 받아 회전운동을 함으로써 철도차량을 선로 위로 전후진 시키는 중요한 역할을 한다. 따라서 윤축에 발생하는 결함은 차량의 성능과 안전성에 지대한 영향을 끼치게 되므로 이를 방지하기 위하여서는 각종 비파괴 검사 방법을 활용한 윤축에 대한 정기적인 검사가 필요하다. 실제로 많은 비파괴 검사법들이 철도차량의 검사에 이용되고 있는데 한 예로써 윤축 간 압입부에 대한 비파괴 검사를 들 수가 있다. 윤축 압입부의 검사는 차륜을 차축에서 분리한 후 차축 표면에 자분탐상검사를 적용함으로써 표면결함을 검출하는 과정으로 이루어진다. 하지만 이 경우에 차륜과 차축의 분리를 위한 복잡한 과정이 필요하며 이에 따라 불필요한 시간과 비용이 소모될 수밖에 없다. 본 연구에서는 윤축의 압입부에 발생하는 결함을 차축과 차륜의 분리 과정 없이 효과적으로 탐상할 수 있는 신개념의 집중유도 전위차법(Induced Current Focusing Potential Drop method ; ICFPD)을 소개하고 집중유도 전위차법을 이용한 탐상과정에서 일어나는 일련의 현상들에 대해 전자계 해석 전문 상용 소프트웨어인 Maxwell 3D 프로그램을 이용한 유한요소 해석을 수행하였다. 마지막으로 이를 통해 집중유도 전위차법에 대한 검증을 수행하고 새로운 검사법의 유한요소해석에 대한 기초기술을 제시하였다.

\* 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

\*\* 한국철도기술연구원 연구원(UST 석사과정), 정회원

\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\*\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

## 2. ICFPD법의 기초원리[1,2,3]

일반적인 전위차법과 ICFPD법의 원리를 그림 1에서 비교하고 있다. 유도도선에 전류가 흐르면, 도선 주위에는 전자기장이 유도된다. 만약 전도성 금속 가까이에 있는 유도도선에 교류전류가 흐르게 되면, 전자기장은 다시 도체에 유도전류를 발생시킨다. 이 때 발생한 유도전류에 의해 전위차가 측정될 수 있다.

교류전위차법(Alternating Current Potential Drop ; ACPD)의 경우와 마찬가지로 ICFPD법에서도 유도전류는 표피효과(Skin Effect)에 의해 도체의 표면층에서 주로 흐르게 된다. 표피효과란 교류자속에 의한 유도전류가 도체의 표면 부근에 집중하여 유도되고 도체 내부로 들어갈수록 지수함수적으로 감소하는 것을 말한다. 때문에 유도전류를 이용한 시험을 수행하기 위해서는 유도전류에 의해 탐상할 수 있는 시험체내의 깊이를 아는 것이 중요하다. 이 깊이를 표준침투깊이, 즉 Standard depth of penetration이라 하고 이는 유도전류가 도체표면의 약 37%로 감소하는 깊이를 말한다. 표준침투깊이  $\delta$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu \cdot \sigma \cdot f}} \quad (1)$$

여기서  $\mu$ 는 투자율(permeability, H/m),  $\sigma$ 는 전도도(conductivity,  $1/\Omega \cdot m$ ),  $f$ 는 교류전계의 주파수(frequency, Hz)를 나타낸다. 위의 식에서 알 수 있듯이 침투깊이는 교류전계의 주파수에 따라 변화하므로 시험의 관심 영역에 따른 침투깊이를 기준으로 시험주파수를 선정해야 한다.

또한 측정을 통해 얻어지는 전위차  $\Delta V$ 는 식 (2)와 같다.

$$\Delta V = I' \rho \frac{l}{\delta \cdot b} = I' \rho \frac{l}{S} = j \cdot \rho \cdot l \quad (2)$$

위 식에서  $\Delta V$ 는 전위차(V),  $I'$ 은 유도전류(A),  $\rho$ 는 저항률( $\Omega \cdot m$ ),  $j$ 는 전류밀도(A/m<sup>2</sup>),  $l$ 은 두 측정점 사이의 거리(m),  $b$ 는 전류가 흐르는 폭(m), 그리고  $S$ 는 전류가 흐르는 면적(m<sup>2</sup>)을 나타낸다.

## 3. 신개념 ICFPD법의 소개[1]

그림 2는 압입 피로에 의해 차축 압입부에서 발생하는 균열지점을 보여주고 있다. 그림 2와 같이 축의 반경방향으로 발생하는 균열에 대하여 차축을 차륜에서 분리하는 작업 없이 탐상이 가능하게 되면 상당한 액수의 유지, 보수비용을 절감되게 된다

기존의 ICFPD 방법은 탐촉자를 균열과 직각으로 위치시켜 전위차를 측정하기 때문에 철도차량의 차축 균열 탐상 시 어려움이 있다.

하지만 새로운 개념의 ICFPD법을 적용하게 되면 차축을 차륜에서 분리하는 작업이 불필요해진다. 신개념의 ICFPD법은 기존의 방법과 달리 탐촉자를 균열과 평행하게 위치시켜 전위차를 측정하기 때문이다. 그림 3에서는 이와 같은 신개념 ICFPD법의 원리를 기존의 방법과 비교하고 있다.

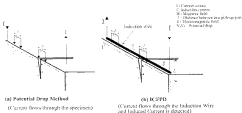


그림 1. 일반 전위차법과 ICFPD법의 원리 비교

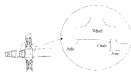


그림 2. 압입부 내 자육에서의 결함 발생

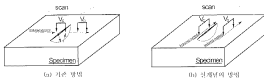


그림 3. ICFPD의 기본방법과 신개념방법에 대한 비교

#### 4. ICFPD법의 유효요소 해석을 통한 검증

##### 4.1 검증 방법

본 연구에서는 신개념 ICFPD법의 탐상성능에 대한 검증을 위하여 전자기 해석 전문 소프트웨어 중 하나인 Maxwell 3D를 사용하여 유효요소해석을 수행하였다. 먼저 시뮬레이터에서 ICFPD법의 환경을 구성하여 자육에 자육이 결합되어 있을 경우와 분리되어 있을 경우에서의 균열에 대한 전위차 변화를 측정해 보았다. 또한 ICFPD법을 이용한 결함탐상에 있어서 전위차의 크기를 결정하는 변수인  $f$  (induction wire에 흐르는 전류, 유도전류  $I$ 에 의해 발생하는 단위시간당 자기력선에 대한 변화의 비율에 비례),  $f$  (induction wire에 흐르는 전류의 주파수),  $l_p$  (두 측정점, 즉 pick-up pins 사이의 거리)의 변화에 따른 탐상성능을 해석하여 보았다. 참고로, 해석에 있어서 측정된 전위차는 모두 90dB로 증폭하여 그래프에 나타내었다.

## 4.2 모델링(Modeling)

윤축의 형상 데이터는 한국형 고속철도(HSR-350X)의 윤축 형상을 간략화 하여 사용하였고 압입부에 위치한 crack의 깊이는 2mm, 폭 40mm, 축방향 길이는 0.3mm이며 사용된 센서의 형상은 가로세로 각각 40mm, 두께 3mm이다. 윤축과 균열의 자세한 세부모습은 그림 4에 나타내었으며, 그림 5는 Maxwell 3D에서 모델링된 전체 모델링 형상을 나타낸다.

축의 물성치는 투자율  $\mu = 1000 \text{ H/m}$ , 저항률  $\rho = 1.74e-6 \ \Omega \cdot \text{m}$  이다.

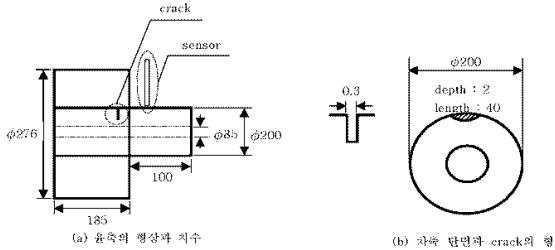


그림 4. 윤축과 crack의 세부 형상과 치수

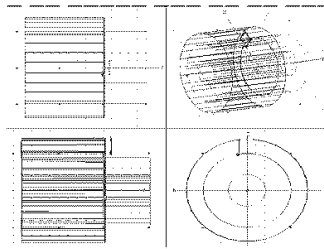


그림 5. 모델링 형상

## 4.3 차륜의 유무에 따른 신개념 ICFPD의 성능 검증

먼저 차륜을 제거한 경우에 균열에서 두 측정점( $L_1$ )까지의 거리 D를 1.5mm에서 15.5mm에 걸쳐 1mm 간격으로 해석을 수행하고 이를 균열이 없을 때 같은 위치에서 측정된 전위차 값과 비교해 보았다. 최초의 거리 1.5mm는 센서 전체의 두께가 3mm이므로 측정점은 센서 한 가운데 있음을 가정할 것이다. 또한 차륜이 제거되지 않은 경우에는 균열이 압입부의 안쪽 3mm 지점에 위치하고 있음을 가정하고 5.5mm에서 15.5mm까지 1mm 간격으로 해석을 수행하였고 마찬가지로 균열이 없는 경우와 비교하였다.

그림 6의 해석결과와 그래프에서 볼 수 있듯이, 두 경우 모두  $D = 10\text{mm}$  부근을 기준으로 균열

의 유무에 따라 계산된 전위차가 뚜렷한 차이를 보이고 있다.

즉, 선계열 ICFPD 적용 시 균열로부터 10mm 이내의 범위에 센서를 위치시킨다면 차등이 제거 되지 않은 경우의 압입부 내 차측 결함 탐상에도 유효함을 알 수 있다.

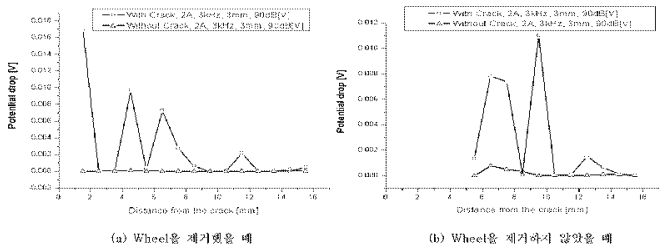


그림 6. 차륜 유무에 따른 결함 탐상 성능 검증결과

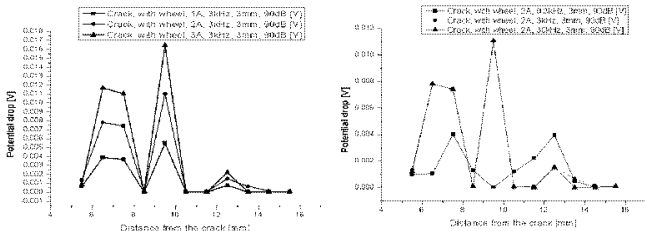


그림 7.  $I_p$ 의 변화에 따른 측정 전위차값 비교

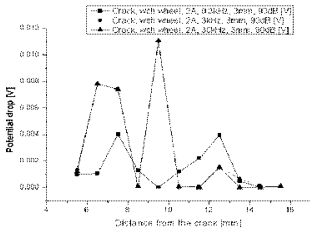


그림 8.  $I_p$ 의 변화에 따른 측정 전위차값 비교

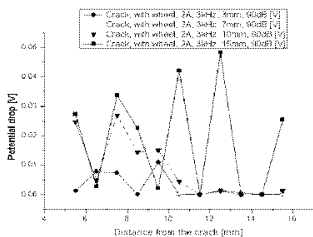


그림 9.  $I_p$ 의 변화에 따른 측정 전위차값 비교

#### 4.4 $I$ , $f$ , $l_p$ 의 변화에 따른 결함검출 성능 변화

먼저 유도 도선(Induction wire)을 흐르는 전류의 변화에 따른 신개념 ICFPD의 결함검출 성능의 경향을 알아보기 위해 차륜이 부착되어 있는 상황에서 전류의 주파수  $f$ 는 3kHz로, 측정점 사이의 거리  $l_p$ 는 3mm로 고정시킨 후 해석을 시행하였고 그 결과는 그림 7과 같다. 유도전류를 발생시키는 유도기전력은 유도 도선에 흐르는 전류  $I$ 에 비례하므로 전류가 커짐에 따라 유도전류에 의한 전위차의 측정값도 증가함을 그래프를 통해 알 수 있다.

그림 8은 주파수의 변화에 따른 측정 전위차 비교결과를 나타내고 있다. 그림에서 3kHz와 30kHz에 대한 결과가 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 일정 주파수 이상에서는 포화상태가 되어 전위차의 측정에 주파수가 더 이상 영향을 미치지 못함을 의미한다.

두 측정점 사이의 거리 변화에 따른 측정 전위차에 대한 결과가 그림 9에서 보여 지고 있다.  $l_p$ 가 10mm까지 증가함에 따라 측정되는 전위차는 전체적으로 증가하고 있으나  $l_p$ 가 15mm일 때는 그 값의 변화폭이 너무 커 오히려 성능이 감소하는 결과를 얻었다.

#### 5. 결론

본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

(1) 균열로부터 10mm 이내에 센서를 위치시킨다면 신개념 ICFPD법의 적용이 매우 효과적임을 해석적으로 증명하였다.

(2) 여러 변수( $I$ ,  $f$ ,  $l_p$ )의 변화에 따른 해석값을 비교하여 다음의 결론들을 얻었다.

- 1) 전류  $I$ 가 증가할수록 보다 큰 전위차를 얻을 수 있다.
- 2) 주파수  $f$ 는 전위차에 비례하는 경향이 있으나, 일정 주파수에서 포화되어 전위차에 영향을 미치지 못한다.
- 3)  $l_p$ 의 증가는 일정수준의 길이까지는 검출성능을 향상시키지만 그 이상의 경우에는 오히려 성능이 감소하는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 검출성능이 최대가 되는 적정 길이를 사용하여야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 기술사업인 차량성능향상 핵심기술 개발과제의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. S. J. Kwon, K. Ogawa, T. Shoji (2004), "Development of a New Concept for Induced Current Focusing Potential Drop for Crack Detection in Press Fit Railway Axle", 14th wheelset Congress
2. 이봉수 (2001), "알루미늄 평판의 표면결함에 대한 와전류 신호의 유한요소해석", 석사학위논문, 부산대학교
3. 박은수, 박익근 (2000), "비파괴검사개론", 도서출판 골드