

# 집중유도 교류 전위차법을 이용한 철도차량 차륜의 표면과 내부 결함 평가

## Evaluation of Surface and Sub-surface defects in Railway Wheel Using Induced Current Focused Potential Drops

권석진<sup>†</sup> · 이동형<sup>\*</sup>

Seok-jin Kwon · Dong-Hyung Lee

### Abstract

Railway wheels in service are regularly checked by ultrasonic testing, acoustic emission and eddy current testing method and so on. However, ultrasonic testing is sometimes inadequate for sensitively detecting the cracks in railway wheel which is mainly because of the fact of crack closure. Recently, many researchers have actively tried to improve precision for defect detection of railway wheel. The development of a nondestructive measurement tool for wheel defects and its use for the maintenance of railway wheels would be useful to prevent wheel failure. The induced current focusing potential drop (ICFPD) technique is a new non-destructive testing technique that can detect defects in railway wheels by applying on electro-magnetic field and potential drops variation. In the present paper, the ICFPD technique is applied to the detection of surface and internal defects for railway wheels. To detect the defects for railway wheels, the sensor for ICFPD is optimized and the tests are carried out with respect to 4 surface defects and 6 internal defects each other. The results show that the surface crack depth of 0.5 mm and internal crack depth of 0.7 mm in wheel tread could be detected by using this method. The ICFPD method is useful to detect the defect that initiated in the tread of railway wheels

**Keywords** : Railway wheel tread, Surface defect, Internal defect, ICFPD, Non Destructive Evaluation

차륜답면, 표면결함, 내부결함, 집중유도 교류전위차법, 비파괴 평가

### 1. 서 론

철도차량에서 손상된 차륜은 주행 중의 승차감 악화 및 보수비용의 증가로 이어질 수 있기 때문에 차륜결함에 대한 정도 높은 검출은 대단히 중요하다. 차륜에서 주로 발생하는 결함은 레일과의 구름 접촉피로와 제동 마찰열에 의한 열응력에 의하여 발생한다. 또한, 차륜내부에 존재하는 결함이 차륜의 표면손상에 많은 영향을 미친다고 알려져 있다[1].

독일의 고속철도 ICE 차륜의 피로파괴에 의한 고속열차의 탈선 사고에서 볼 수 있듯이 차륜결함으로 인한 사고는

막대한 경제적, 사회적 피해를 가져온다[2]. 사고 이후 독일 DB에서는 차륜에 대한 비파괴검사 방법과 기간을 강화 하였으며 Rainer 등[3]은 현재 DB에서 새로운 초음파 기술과 와전류 기술을 적용하여 차륜내부 결함을 탐상하고 있는 기술을 보고하였다. 이 방법은 차륜 내부의 반경방향과 접선방향의 결함을 탐상할 수 있는 장점이 있지만 차륜표면 직하에 존재하는 결함에 대한 탐상은 어려운 점이 있다.

Kendserian 등 [4]은 LAHUT(Laser-Air Hybrid UT)을 이용한 차륜결함 탐상에 대하여 연구하였다. 이 방법은 차량 기지에 입고시 차륜의 표면결함을 탐상할 수 있는 장점이 있으며 90%이상 결함을 검출할 수 있다. 그러나 이 방법은 차륜 내부에 존재하는 결함을 탐상하기에는 부족하다.

Ahn 등은 EMAT(Electro-Magnetic Acoustic Transducer)을 이용하여 차륜답면 표면의 결함을 검출하는 연구를 실시

<sup>†</sup> 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부

E-mail : sjkwon@krii.re.kr

TEL : (031)460-5249 / FAX : (031)460-5279

\* 한국철도기술연구원

하였다[5]. 차륜담면에 밀착될 수 있도록 EMAT의 각도를 조정할 수 있게 하여 표면에 존재하는 결함을 보다 정도 높게 검출할 수 있도록 연구를 실시하였다.

차륜 표면에 존재하는 결함깊이 3mm 이상은 검출할 수 있지만 보다 작은 깊이의 결함과 내부결함의 탐상은 어려움을 가지고 있다는 단점을 가지고 있다. 현재 차륜결함 탐상에는 UT(Ultrasonic Test)를 적용하고 있지만 표면직하의 결함과 단힌 균열을 검출하지 못하는 문제점이 있다[6].

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 집중유도 교류 전위차법을 이용, 차륜에서 발생하고 있는 표면 결함과 표면직하의 내부결함 검출 정도에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 집중유도 교류전위차법의 적용

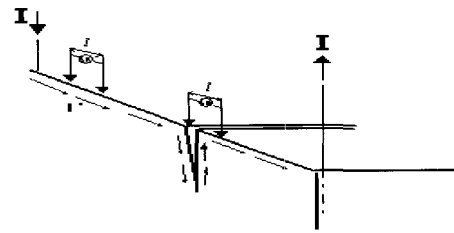
### 2.1 집중유도 전위차법의 원리

1990년대 초 Dorver 등에 의해서 표면결함을 고감도로 검출하고, 그 형상의 예측 및 균열의 진전을 연속적으로 감지할 수 있는 교류전위차법(ACPD, Alternating Current Potential Drop)이 개발되었다[7]. 이 방법은 Fig. 1(a)와 같이 측정체에 일정한 크기를 갖는 정전류 교류전원을 공급하였을 때, 전류의 흐름이 표면근방에만 일정하게 분포하여 흐른다는 표피효과를 이용하였다. 표면 결함이 존재하면 전류의 흐름은 결함의 면을 따라서 흐르며, 전류흐름의 경로가 결함의 깊이만큼 변화하기 때문에 표면결함을 검출할 수 있다.

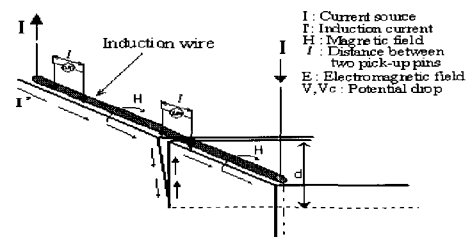
그러나 표피효과에 의한 표면의 전류분포는 공급단자의 거리에 따라 변화하며, 전원 공급단자의 접촉점의 접지문제와 더불어 측정 표면의 오염 등에 따라 측정치에 오차가 발생하는 문제점이 있다. 이런 ACPD의 문제점 중에서 공급단자간의 일정 전류분포 문제를 해결하기 위해서, 탐상영역에 측정전류를 집중하는 방법인 집중유도형 교류전위차법(ICFPD, Induced Current Focusing Potential Drop)이 개발되었다[7,8]

집중유도형 교류전위차법의 원리는 Fig. 1(b)와 같이 하나의 도선에 교류전류(I)를 공급하면 도선의 주위에는 전류 방향에 직각으로 자기(H)가 생긴다. 이 자계는 전류의 주파수와 동일하게 시간에 따라 변화하여 측정물에 전류를 유도하고 기전력(EMF)을 발생시킨다. 이 전류는 도선의 바로 밑에 다른 영역보다 큰 값으로 집중하여 흐른다. 이 유도전류는 공급전원과 반대방향으로 흐르지만 공급전원과 동일한 표피효과를 갖는다.

집중된 전류는 결함 면을 따라서 흐르며, 결함에 따라 변화하는 전류를 측정단자로 측정하여 결함에 대한 정보를 얻을 수 있다.



(a) Potential Drop Method  
(Current flows through the specimen)



(b) ICFPD (Current flows through the Induction Wire and Induced Current is detected)

Fig. 1. Principal of ICFPD method

### 2.2 차륜에 발생하는 균열

차륜에서 피로균열성장은 구름접촉피로와 제동마찰열에 의해서 차륜의 부분손상이나 반경방향 균열진전을 발생시킨다. 이러한 결함의 발생 및 진전의 결과는 차량 부품의 손상 또는 심지어 탈선을 일으킬 수 있다.

차륜의 손상형태는 다음 3가지로 크게 구분할 수 있다 [9,10]. 찰상(flat)은 제동력이 초과되면서 차륜이 레일 위를 활주한 결과 발생하는 손상이다.

차륜접촉면의 과열과 이후의 빠른 담금질과정으로 인해 접촉면의 퍼일라이트강이 매우 취성을 가지는 마르텐사이트로 변태된다. 작은 양의 찰상에도 피로결함의 발생 또는 타원형 차륜으로 변형될 수 있다. 활주상황의 차이에 따라 담면 일부가 원형 또는 타원형으로 평탄화 되거나 찰상이 반점형태로 연결되어 발생하며 파상 또는 피상의 소성유동이 연속적으로 발생한다. 일반적으로 찰상 발견시에는 박리를 동반한다.

박리(shelling, spalling)는 구름접촉피로에 따라 담면의 일부 또는 차륜의 전 원주에 걸쳐 발생하는 표면결함 현상이며 높은 응력과 견인력이 차륜담면에 반복 축적되면서 작용하는 하중방향으로 얇은 표면층이 이동하는 것이다. 즉 소성

적으로 유동하는 표면층은 변형경화 되고 결국 파손되며 표면균열이 발생한다. 일단 균열이 발생하면 균열은 일련의 하중을 받으면서 진전하며 다른 인접균열과 합체되어 표면에서 박리 현상이 발생하게 된다.

박리는 과대한 윤증, 차륜재의 강도부족, 또는 활주에 따라 발생하기 쉽지만 일반적으로 찰상과 열균열 등의 손상을 기점으로 발생하는 것이 많다.

열균열은 재료자의 마찰에 의한 담면 또는 플랜지에 열균열이 발생하는 것이다. 열균열은 수많은 미세한 균열이 그물모양으로 발생하는 상태이며 축방향으로 비교적 길게 진전되는 상태의 균열이다. 특히 담면제동식 차륜에서는 재료자 외과부의 열영향으로 발생하는 경우가 많다.

Fig. 2는 차륜담면에 발생하는 대표적인 손상형태를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 제동력에 발생하는 차륜담면의 박리를 나타낸 것이며 Fig. 2(b)는 차륜담면의 표면직하에 발생한 결함이다.

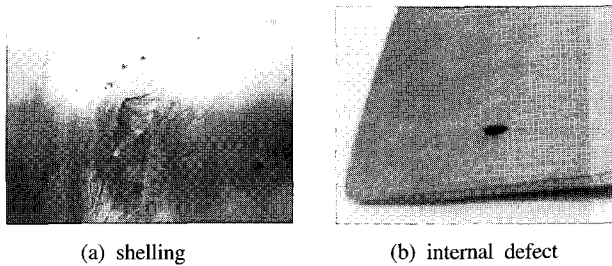


Fig. 2. Defect initiations in railway wheel

### 3. 시험방법

#### 3.1 결함 검출 시스템

보다 신뢰성 있는 차륜담면의 결함 검출을 위하여 Fig. 3과 같이 집중유도 교류 전위차법을 이용한 결함검지 시스템을 구축하였다.

집중유도 교류전위차법을 이용한 본 연구의 결함 검지 시스템은 시험편 이동이 자유로운 자동이송 지그, 시험편과의 접촉압력을 일정하게 유지하기 위한 타이머가 부착되어 있는 결함검지용 센서와 전위차의 변화를 측정할 수 있는 장치로 구성되어 있다.

본 시스템의 구성에서 전위차의 측정장치는 Matelect사의 CGM-5R type을 사용하였다. 또한 접촉압력의 조절은 수동 및 자동으로 제어가 가능하며 센서형상에 따라 지그설계가 가능하도록 설계되어 있다.

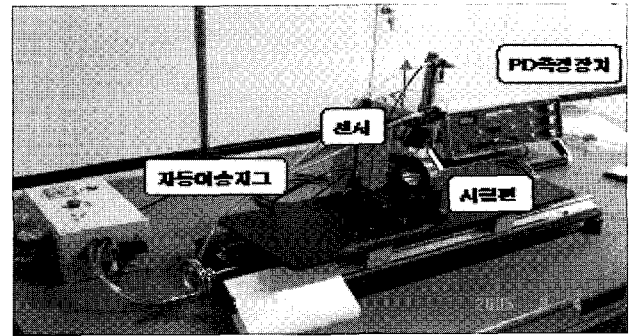


Fig. 3. Schematic diagram of measuring system

#### 3.2 시험조건과 시험편

Table 1에 시험조건을 요약하였다. 공급전류는 2A로서 일정하게 유지하였으며 최적의 결함정보를 얻기 위하여 주파수와 게인을 변화시켜가면서 결함탐상을 실시하였다. 센서는 탐촉자간의 간격을 5mm와 10mm로 변화시켜가면서 영향인자를 실험하였다.

Table 1. Test conditions

Frequency (kHz)	Current (A)	Gain (dB)
0.3, 3, 30	2.0	70, 90
Distance between pick-up pins = 5, 10 mm		

Table 2. Artificial crack sizes

crack position	Surface (mm)		Internal (mm)		
	c	a	d	a1	a2
①	2.0	8.0	0.3	0.7	1.5
②	1.5	6.0	0.5	0.7	1.5
③	1.0	4.0	0.7	0.7	1.5
④	0.5	2.0	1.0	0.7	1.5

방전 가공으로 표면결함과 내부결함을 시험편에 삽입하여 결함 탐상시험을 실시하였으며 결함 형상은 반타원 균열로 가공하였다. 표면결함은 Fig. 4와 같이 결함깊이(c) 0.5mm부터 2.0mm까지의 결함검출을 목적으로 인공결함을 가공하였으며 내면결함은 표면으로부터 결함이 위치한 거리(d)에 따라  $\phi 0.7\text{mm}$ 와  $\phi 1.5\text{mm}$ 의 결함을 검출하는 목적으로 인공결함을 삽입하였다.

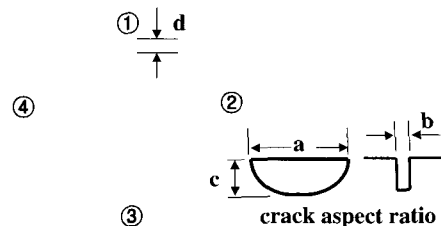


Fig. 4. Artificial crack sizes for test wheel

또한 결함 폭(b)은 최대한 피로결함을 모사하기 위하여 0.3mm와 0.5mm로 제작하였다. Table 2에 시험편에 가공한 인공결함의 위치와 치수를 나타낸다.

Table 2에서 c는 결함 깊이, a는 결함 길이, b는 결함 폭, d는 시편 표면으로부터 결함까지의 거리, a1과 a2는 결함직경이다. 결함 측정시 차륜결함에 대하여 탐촉자 핀은 직각으로 위치하며 차륜결함으로부터 원주방향으로 2.5mm 간격으로 전위차의 변화를 측정하였다.

### 4. 시험결과 및 고찰

#### 4.1 결함폭에 따른 영향

시험편의 표면과 내부결함에 대하여 결함 폭, 탐촉자의 간격의 영향인자를 고려하여 실험을 실시하였다. Fig. 5~Fig. 6에 표면결함의 검출에 대한 전위차의 변화를 나타낸다. 탐촉자 간격 5mm일 경우 Fig. 5는 결함 폭이 0.5mm일 경우의 계측 결과이며 Fig. 6은 결함 폭이 0.3mm일 경우의 계측 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 5~Fig. 6에서 공통적으로 나타나는 경향은 결함이 없는 부위의 전위차는 거의 일정하게 측정되고 있고 결함이 존재하는 위치에서는 전위차가 결함이 없는 부위의 전위차에 비하여 높게 변화되고 있다. 또한, 결함단부의 전위차는 측정단자가 결함의 단에 가깝게 접근할수록 점점 감소하고 있으며 결함위치에서는 높게 변화하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상에 대해서는 Fig. 8에서 자세히 고찰하고자 한다.

이와 같은 결함탐상결과에서 보면 탐촉자 간격 5mm일 경우의 시험편의 표면결함은 결함깊이 0.5mm까지 집중유도 교류전위차법에 의하여 결함검출이 가능하다. 이것은 표면결함이 0.5mm 이상의 결함 깊이에 대하여 정도 높게 검출될 수 있음을 나타내며 결함검출 정도에 따라 검사주기가 연장될 수 있어 검사비용을 절감할 수 있음을 의미하기도 한다. 또한 0.5mm~2.0mm에 이르는 결함깊이에 따라서 전위차의 변화가 각각 다르게 나타남을 그래프에서 볼 수 있으며 이는 집중유도 교류전위차법에 의하여 표면결함의 깊이도 충분히 정량화될 수 있음을 나타낸다. 즉 미지의 표면결함 치수를 집중유도 교류전위차법에 의해 계측할 수 있음을 의미한다.

Fig. 5~Fig. 6의 결함 폭에 따른 전위차의 변화는 결함 폭이 0.3mm 경우보다 0.5mm일 경우 변화가 더 현저하게 나타났으며 실제의 결함을 모사하여 탐상 시험할 경우에 고려해야 할 사항이라 생각된다.

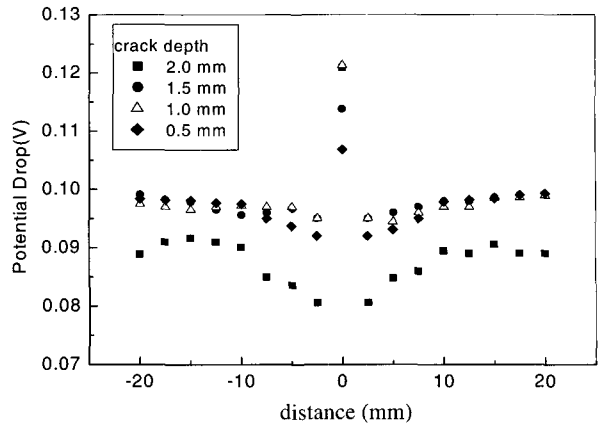


Fig. 5. Potential drops in crack width of 0.5mm

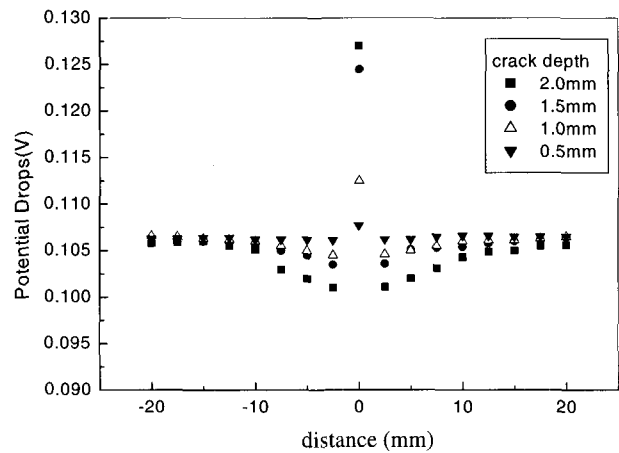


Fig. 6. Potential drops in crack width of 0.3mm

결함 폭 0.5mm 경우에는 결함깊이 0.5mm에 대해서도 전위차변화가 크기 때문에 결함정보를 정도 높게 얻을 수 있지만 결함 폭 0.3mm의 경우에는 결함깊이가 작을수록 전위차의 변화폭이 적게 나타나고 있다.

#### 4.2 탐촉자 핀의 간격에 따른 영향

탐촉자 간격에 의한 결함탐상 정도의 영향에 대하여 살펴 보았다. Fig. 5와 Fig. 6은 탐촉자 간격 5mm이며 Fig. 7에 탐촉자 간격이 10mm 일 경우 전위차의 분포를 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 탐촉자 간격 5mm일 경우에는 결함깊이 0.5mm까지 결함 검출이 가능하지만 Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 탐촉자 간격 10mm의 경우에는 결함깊이 1.0mm까지만 결함 탐상이 가능하다.

이와 같이 탐촉자의 간격이 좁을수록 유리하게 결함을 검출할 수 있는 것은 결함표면을 따라 유도된 전류를 보다 집중적으로 탐상할 수 있기 때문이다. 따라서, 집중유도 교류

전위차법에 있어 탐촉자의 간격이 좁을수록 좀 더 정도 높은 결함을 검출할 수 있음을 알 수 있다.

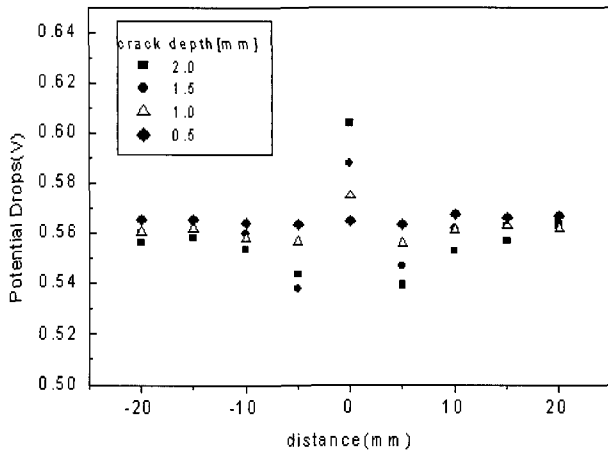


Fig. 7. Potential drops in pick-up pin 10mm

Fig. 8은 전위차분포를 탐촉자의 위치에 따라 나타낸 것이다. 결함부의 전위차는 하나의 측정단자가 결함을 건너 결함단에 있을 때 큰 전위차로 측정되고, 결함이 측정단자의 중앙에 위치할 때 작게 측정되어 전위차분포가  $\wedge$ 자형을 이루고 있다. 결함부근의 전위차의 변화는 결함이 없는 부분과 비교하여 볼 때, Fig. 8에서와 같이 결함단에서 유도전류의 흐름이 모서리효과(edge effect)에 의하여 변화하기 때문이다. 또한 이 효과는 결함이 깊을수록 결함 단의 전위차가 크게 측정되는 것으로부터 결함의 깊이에 의존하고 있음을 알 수 있다.

이상의 전위차분포로부터 결함주위의 전위차는 결함의 존재에 의하여 변화하고, 그 깊이에 따라 전위차의 차이를 보이고 있다.

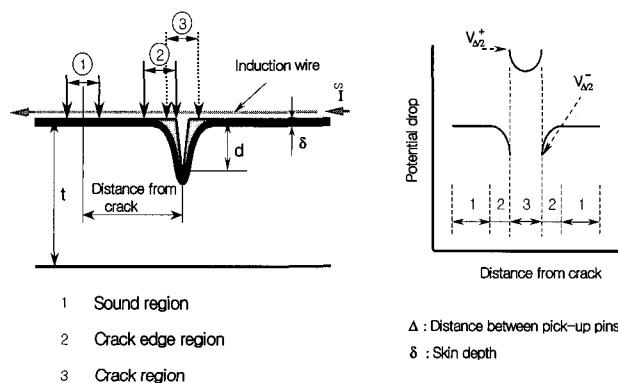


Fig. 8. Distribution of potential drop by ICFPD

### 4.3 내면결함에 따른 전위차의 변화

Fig. 9에서 나타낸 바와 같이 결함 1.5mm에 대하여 표면에서 1.0 mm 떨어진 위치까지 내면결함을 검출할 수 있다. 또한, 결함에서 10mm 떨어진 위치에서의 원격 탐상으로 내면결함을 검출할 수 있지만 그 이상의 거리에서는 검출정도가 저하되고 있다. Fig. 10은 표면에서 1.0mm 떨어진 위치에서 내면결함크기 0.7mm를 집중유도 교류전위차법으로 탐상할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 전위차의 변화에 대한 분포도를 살펴보면, Fig. 9와 같이 결함크기가 보다 큰 쪽에서는 모서리 효과에 의해 전위차의 단차가 발생하지만 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 결함크기가 작은 쪽에서는 모서리효과가 상쇄되어 전위차의 단차가 제거되는 현상을 볼 수 있다.

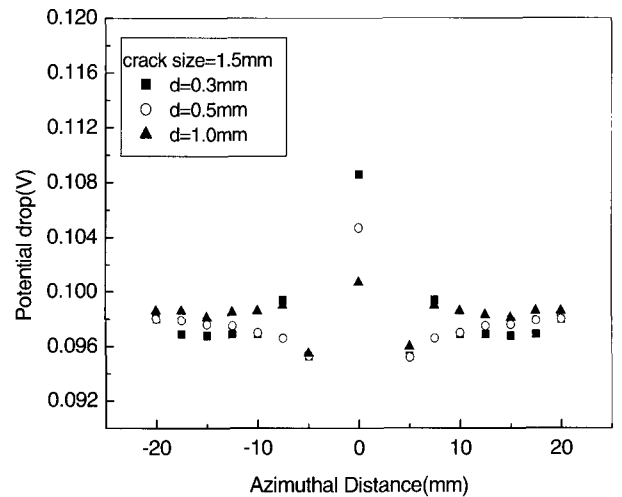


Fig. 9. Potential drops at inner crack 1.5mm

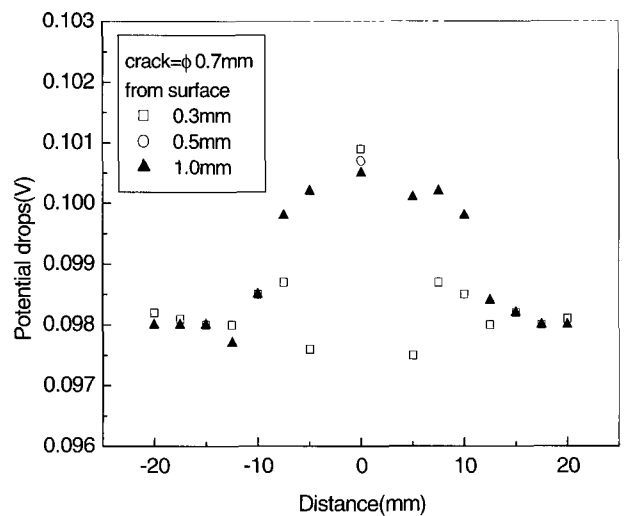


Fig. 10. Potential drops at inner crack 0.7mm

## 5. 결 론

차륜담면에 발생하는 표면 결함과 내부결함을 기존 방법인 UT보다 정도 높게 검출하기 위하여 집중유도 교류 전위차법을 적용하여 연구를 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 집중유도 교류전위차법을 이용한 차륜시편의 결함 탐상결과, 탐촉자 간격 5mm일 경우 시험편의 표면결함은 결함깊이 0.5mm까지 결함검출이 가능하며 0.5mm 이상의 표면결함에 대해서는 정도 높게 검출될 수 있다.

2) 결함부근의 전위차의 변화는 결함이 없는 부분과 비교하여 볼 때, 결함 끝단의 전류 흐름이 모서리 효과(edge effect)에 의하여 변화한다. 이러한 전위차 분포로부터 결함주위의 전위차는 결함의 존재에 의하여 변화하고, 그 깊이에 따라 전위차의 차이를 보이고 있다.

3) 집중유도 교류 전위차법에 있어 탐촉자의 간격이 좁을수록 좀 더 정도 높은 결함 탐상을 예측할 수 있으며 이러한 이유는 탐촉자의 간격이 좁을수록 결함표면을 따라 유도된 전류를 보다 집중적으로 탐상할 수 있기 때문이다.

4) 기존 UT 탐상에서 검출하기 어려운 내면결함에 대하여 본 연구의 집중유도 교류전위차법은 차륜 담면표면에서 1.0mm 떨어진 위치에서 결함크기 0.7mm의 내면결함을 탐상할 수 있다.

## 참고문헌

1. A. Ekberg, J.Marais, "Effects of imperfections on fatigue initiation in railway wheel", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F., Vol. 214, (2000), p.46
2. V.Esslinger, R.Kieselbach, R.Koller, B.Weisse, "The railway accident of Eschede - technical background", Engineering Failure Analysis, Vol. 11, (2004), pp.515-535
3. P. Rainer, A.Erhard, H-J. Montag, H.M.Thomas, H.Wusternberg, "NDT technique for railroad wheel and gauge corner inspection", NDT &E international, Vol. 37, (2004), p.89-94
4. S.Kenderian, D.Cerniglia, B.B.Djordjeve, G.Garcia, "Laser-air hybrid ultrasonic technique for dynamic railroad inspection applications", (2004), 16th World Congress NDT
5. Kim Y.G, Ahn.B.Y, Kim Y.J, "Flaw detection of railroad wheel tread using EMAT", Key Engineering Materials, Vol. 270-273, 2004, pp.619-624
6. M.Saka, H.Tohmyoh, H.Okabe, S.R.Ahmed, "Local thermal treatment for opening the closed crack", The 7th Far-East Conference on Nondestructive Testing, (2006), pp33-39
7. T. Shoji, "Current status and future direction of potential drop method of QNDE" (in Japanese), Journal of Japan Society for Non Destructive Inspection, Vol.49, No.11, (2000), p.762
8. S.J.Kwon, J.W.Park, K.Ogawa, T.Shoji, "Development of a new concept for Induced Current Focusing Potential Drop for crack detection in press fit railway axle", (2004), 14th Wheelset Congress
9. 木川武彦, "鐵道車輪のフラットの生成ならびに剝離に關する研究", 1995.9, RTRI論文集
10. Daniel H.Stone, Brtto .R. Rajkumar, Steven .M.Belpport, G.J.Moyar, "Wheel spalling/shelling", AAR report, no.R-814, 1992.6