2023 년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집 KSR2023F071

도시철도 전동차 차축의 초음파탐상비파괴검사를 위한 교정시험편 표준화 방안 제언

A Proposal for Standardization of Reference Blocks for Ultrasonic Test of Urban Railway Axles

이성찬*†, 민석원*, 소민철*, 강병조*, 박영관*, 김명열*, 김상균*

S.C.Lee*†, S.W.Min*, M.C.So*, B.J.Kang*, Y.K.Park*, M.Y.Kim*, S.G.Kim*

초 록 도시철도 전동차의 차축은 비파괴검사를 통한 건전성을 확보하여 전동차 생애주기동안 사용하는 전동차 핵심설비이다. 부산교통공사는 전동차검수기준에 따라 차축의 초음파탐상비파괴검사(수직 및 사각탐상)를 진행하고 있다. 한편, KS 및 ISO 등 관련규격 검토를 통하여 수직탐상의 보완 필요성을 확인하였고, 개선방안 마련을 위한 대비시험편 제작과정 중 현행 수직탐상의 한계점과 노치현상에 의한 응력집중이 발생하는 저널 및 보스시트 탐상(8, 17°) 시 차륜압입 전후 탐상 결과의 차이를 발견하였다. 탐상의 한계와 차이를 보완하기 위하여 사각탐상(45° , 62°)을 병행 진행한 결과 차축 건전성을 확인 할 수 있었으며 이를 바탕으로 교정시험편과 표준화 방안을 제언하고자 한다.

주요어 : 비파괴, 초음파탐상, 차축

1. 서 론

차축은 전동차 생애주기 동안 차체 및 승객의 무게를 충분히 버티도록 설계된 핵심 설비이다. 반면, 운행 중 피로, 굽힘 및 곡선구간의 편하중 등 다양한 외력에 노출되고 있으며, 차축의 건전성 확보를 위하여 주기적으로 초음파비파괴검사를 실시한다.

본 연구에서는 현재의 검사방법을 살피고 개선점을 도출하여 차축의 건전성을 보다 향상시키고자 현장의 여건과 실제 적용성을 고려한 교정시험편의 표준화 방안을 제언하고자 한다.

연구수행은 올림푸스 EPOCH650장비와 2㎒, 직경 30㎜의 수직·국부탐촉자(8, 17°), 25×25㎜의 사각탐촉자(45, 62°) 및 10㎜의 수직탐촉자를 이용하였다.

† 교신저자: 부산교통공사 호포차량사업소 (wwweercom@humetro.busan.kr)
* 부산교통공사

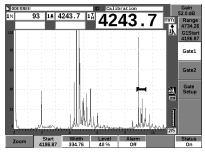
2. 차축 검사기준

2.1 도시철도 전동차 차축의 검사기준

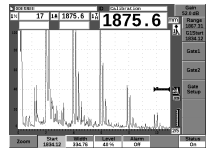
차축의 초음파비파괴검사는 ‘국철2형’ 으로 불리는 환봉 형태의 시편으로 저면포화도(B5)를 CRT 화면의 100%로 교정하고(dB 감도설정) 이를 바탕으로 검사대상을 탐상(B2)하는 것이 일반적인 교정과 검사 기준이다.

위 교정방법은 차축이 외력에 의해 소성가공된 SFA60의 단조강으로 결정입자가 미세하여 감쇠가 적고 저면반사파가 선명한 특성을 반영한 것으로 해석된다. 반면, 실제탐상에서 해당 교정방법을 적용하면 약 2116㎜의 차축을 길이방향으로 탐상하기 위하여 dB값(약63dB)이 상당히 높게 설정하여야 한다.

또한, 그림1과 같이 검사대상으로 저면포화도(52dB) B2를 화면의 100%로 설정하여 국철2형을 탐상하게 되면 국철2형 시편의 저면포화도 B5를 생성하지 못 한다.



(a) 차축 B2생성



(b)국철2형 B5미생성

그림1. 검사대상의 감도설정 값으로 국철2형 탐상

따라서 국철2형의 B5 저면포화도로 설정하는 교정방법은 실제 검사대상품의 B2탐상에 필요한 dB값 이상으로 설정하게 됨을 알 수 있다.

2.2 전동차 차축 검사규격

철도차량기술기준 Part81에 따르면 Category2 (200km/h미만) 차축은 제작사양에 따라 EN과 KS 규격으로 구분하여 검사를 요구하고 있다.

표 1 철도차량기술기준의 차축적용 규격 구분

구분	EN13261	KS R 9220
검사 조건	길이방향으로 반향파는 50%이상, 바탕노이즈는 10%이하의 감도	KS B 0817 9. 검사수행
검사 평가	ISO 5948	KS B 0817 10. 초음파탐상검사 결과의 평가

표1에서와 같이 KS에서는 일반적 초음파탐상 요건만을 제시하였지만, EN에서는 ISO5948를 인용하여 상대적으로 구체적인 요건을 요구하고 있으며 한국철도 표준 규격(KRS RN 0008)에서도 ISO5948의 검사 방법을 채택하고 있다.

차축이 받는 피로와 하중을 바탕으로 ISO 5948을 실제 적용하기 위하여 대비시험편을 제작 하고 탐상결과를 고찰하고자 한다.

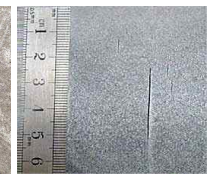
3. 차축의 운영상 · 기계적 특성을 고려한 대비시험편 제작

3.1 차축의 운영상 특성

차축은 SFA60재질로 내마모성이 좋은 펄라이트 조직을 이루고 있으며, 차체 및 승객의 하중에 따른 힘을 차축과 차륜으로 분산되고 있고 중수선이 도래되기까지 약 1.5×10^7회 이상의 반복 피로를 받고 있다.

차륜압입 과정에서 차륜과 보스는 억지끼워 맞춤이 이루어지고 약 30~55$_{ton/100\,mm}$의 힘이 가해져 표면 크랙과 변형을 유발하고, 차륜의 탈거과정에서도 동일한 현상이 발생한다. 반복되는 하중응력과 압입과정의 표면 미시 크렉이 피로한도를 증가시켜 거시크렉으로 성장이 가능하다.

(a) 차축파손



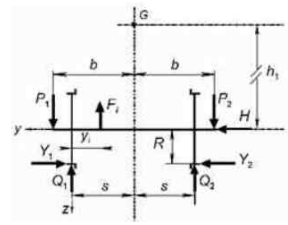
(b) 크랙성장

(c)압입불량

그림2. 차축 기계적 특성에 따른 불량

3.2 차축의 기계적 특성

차축에 전해지는 하중은 가속, 곡선주행, 승객 하중 등 다양한 변수에 의하여 하중이 전달되지만 정하중을 기준으로 해석을 하면, 그림3의 EN13103에 따라 차체와 레일간 힘의 전달점인 차륜과 보스 에서 굽힘모멘트가 최대가 됨을 알 수 있다.



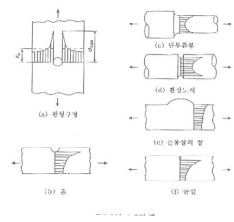
P_1, P_2 : 수직힘(저널)

Y_1, Y_2 : 차륜/레일 수평힘

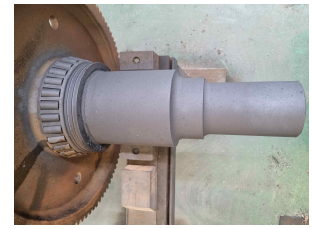
Q_1, Q_2 : 차륜/레일 수직힘

그림3. EN13103 차축에 가해지는 힘 분포

또한 보스 및 저널 등은 단면적이 급격히 변하거나 두께차가 발생하는 노치로 인하여 응력 집중이 발생되고, 노치 저부에 응력이 가장 강하게 발생하여 노치 표면에서 크렉 등을 관찰할 수 있다.



(a) 노치의 응력분포



(b) 차축의 노치형상

그림4. 노치의 응력분포와 차축의 노치형상

3.3 차축 특성을 고려한 대비시험편 제작

차축 대비시험편은 KS D ISO 5948의 요구조건을 반영하였고 재질은 실제 검사대상과 동일하게 제작된 차축으로 선정하였다.

KS D ISO 5948에서는 비교법의 경우 3mm 지름의 평저공을 결함으로 요구하여, ASTM A388을 참고하여 두께150mm 이상의 부분은 6mm 지름의 평저공을 대비시험편에 함께 반영하였다. 또한 형상특성상 노치 주변이 응력집중의 영역으로 인공흠을 저널·보스·베어링 등에 각각 다른 깊이로 120° 간격으로 각 3군데 인공흠을 가공하고 사각탐상 요건이 부재하여 차축의 형상에 코의 영향이 적은 위치를 선정하여 인공흠을 가공하였다.

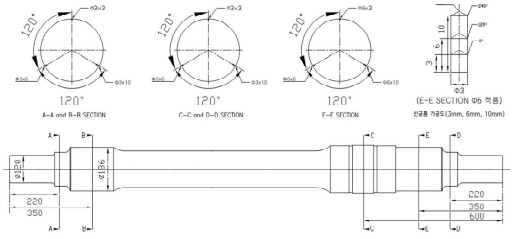


그림5. 대비시험편 제작도면

4. 대비시험편을 통한 탐상결과 고찰

4.1 0° 수직탐상

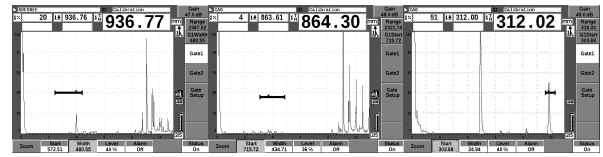
KS D ISO 5948에서는 검사합격 요건으로 시간축 15% 이상범위 중 화면높이 5% 초과를 허용하지 않는다. 반면 실제 탐상 시, M축의 경우 650, 940mm(대기어측) 부근에서 에코가 발생하였고, T축은 860mm 부근에서 이상 신호가 발견되었다.

이것은 근거리음장 거리를 지난 음파가 원거리음장 분산각에 따라 차축의 측면에서 파형변이를 발생시켜 가상지시를 만들어낸다.

$$\sin\phi = 1.22\frac{\lambda}{d} = 1.22\frac{V}{fd}$$

ϕ: 빔의분산각 λ: 파장 f: 주파수
d: 진동자직경 V: 속도

0° 탐촉자 제원(2Mhz, 5920m/s, 직경30mm)에 대한 분산각 7° 를 위 공식으로 얻을 수 있으며, 분산각 7° 와 차축표면의 접합점이 M축, T축 탐상에서 발견한 이상신호의 위치와 일치함을 확인 할 수 있다.



(a)M축 에코 (b) T축 에코 (c)원주방향 탐상

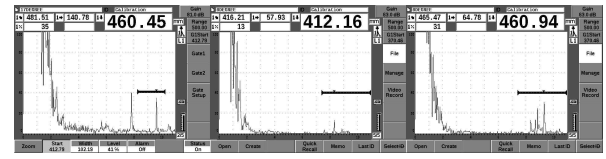
그림6. 0°수직탐상(길이방향, 원주방향)

따라서 길이방향 수직탐상의 가상지시로 인한 결함탐상 한계를 보완하기 위하여 가상지시 주변을 원주방향으로 탐상하였고, 그림6-c와 같이 결함신호는 발견되지 않았다.

또한 길이방향 수직탐상 시, 대비시험편의 크고작은 인공흠에 대한 신호반응은 확인 할 수 없었다. 따라서 0° 수직탐상법은 길이방향 탐상 시 가상지시에 대한 원주방향 탐상과 저널·보스 등 노치가 많은 부분은 별도의 탐상을 실시하여 탐상의 정합성을 높일 필요가 있다.

4.2 8, 17° 국부탐상

음속5920m/s의 종속신호를 8, 17° 로 경사를 두어 음파를 보내는 국부탐상은 일반적인 탐상법은 아니지만, 해당 각도는 보스 끝단을 향한다는 점에서 보스 건전성 확보에 유효한 방법이다. 다만, 차륜이 압입된 경우 차륜의 오일압입부 형상신호에 결함신호가 묻히는 현상이 나타나고, 종파의 이동이 차축을 넘어 차륜까지 도달함을 발견하였다.



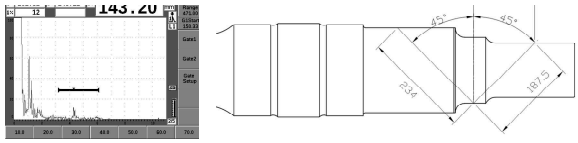
(a) 17° 국부탐상 (b) 8°보스끝단 (c) 8°차륜거리

그림7. 국부탐상(차륜오일압입부, 차륜형상)

4.3 45, 62° 사각탐상

45, 62° 는 저널과 보스 내 결함탐상을 위한 것으로 대비시험편을 통하여 탐상한 결과 인공흠 등의 검출능이 탁월하여 수직(0°) 및 국부(8, 17°)의 한계점 보완하기 위한 역할로 충분함을 확인하였다. 인공흠은 형상에코와 혼선을 최소화하기 위하여 저널 및 보스의 중심에 직경 3mm, 6mm로 나누어 가공한다. 다만 M축 대기어

측의 보스 탐상은 62° 의 0.5SKIP으로는 보스 결함을 탐상 할 수 없으며, 1SKIP 탐상시 형상에 의함 측정의 정확도가 떨어진다. 따라서 그림8-b와 같이 대기어측 보스는 45° 를 저널표면을 반사면으로 정하여 1SKIP거리로 탐상 하여 62° 의 불감영역을 일부 보완 할 수 있다.



(a) 45° 0.5SKIP　　(b) 45° 1SKIP(저널 반사)

그림8. 45°사각탐상의 0.5, 1SKIP 비교

5. 결론 및 후기

차축 건전성 확보를 위한 초음파탐상검사는 기존 국철2형을 이용한 B5 저면포화도 방식의 한계점의 보완과 ISO 5948을 적용한 개선점을 바탕으로 표준화된 교정시험편을 제언하고자 한다.

- *0° 수직탐상은 ISO 5948에 따른 길이방향 탐상과 가상지시부의 원주방향 탐상을 병행 할 것*
- *8, 17° 국부탐상은 차륜형상, 오일압입부, 보스끝단 등 형상에코 앞단의 신호에 집중할 수 있도록 시편내 인공흠을 가공 할 것*
- *45, 62° 사각탐상으로 응력집중 발생부(저널·보스 등) 결함 탐상을 위하여 각 형상의 중심에 인공흠을 가공하고, 45° 1SKIP 탐상을 위한 보스의 인공흠은 6mm로 할 것*

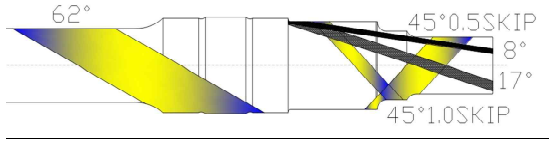


그림9. 국부·사각탐상의 COVERAGE

차축의 건전성 확보를 위한 초음파탐상비파괴검사 방법 및 대비시험편 제작을 위하여 지원해주신 부산교통공사 호포차량사업소 사우 여러분께 무한한 감사의 뜻을 전하며, 이번 연구를 통하여 차축관리를 위한 활발한 연구개발의 계기가 되었으면 한다.

참고문헌

[1] Seok Jin Kwon(2014) Evaluation of Non Destructive Inspection Interval for running Safety of Railway Axle *: J.Korean Soc. Precis. Eng.,Vol. 31, No. 9,* pp. 777-782.

[2] 김용원(2015) 철도차량(화차) 차륜 파손 원인 분석 : 한국철도학회 철도저널 18권 3호, 2015년 6월, pp. 109-117.

[3] 국토교통부 철도사고 조사보고서(2016) : ARAIB/R16 – 8.

[4] 안승운(2018) A study on the Statistical Quality Control of Electric Car Axle using Ultrasonic Testing.

[5] KS D ISO 5948:2002 압연 제품의 철도레일-초음파탐상 검사 합격 기준

[6] EN13103:2009 Railway applications-Wheelsets and bogies-Non-powered axles-Design method

[7] 박은수, 박익근 비파괴검사개론(2000)