초음파-파면해석에 의한 대차 프레임의 건전성 평가
Integrity evaluations of bogie frame using ultrasonic-fractography analysis

윤인식 * 권성태 ** 정우현 *** 박덕신 **** 김경국 *****
Yun, In-Sik Kwon, Sung-Tae Jung, Woo-Hyun Park, Duck-Shin Kim, Kyung-Kuk

ABSTRACT

This study proposes the integrity evaluation of bogie frame using ultrasonic waves-fractography analysis. Analysis objectives in this study are to investigate fracture planes of damaged zone by the A-scan method. The surface condition of fracture plane shows degree of degradation by stress concentration. The detection of the natural defects in bogie frame is performed using the characteristics of echodynamic pattern in ultrasonic signal. Results of ultrasonic testing agree fairly well with those of actual fracture plane. In quantitative fractography analysis, microstructures of actual fracture plane turned out to be intergranular and transgranular fracture. Proposed ultrasonic -fractography analysis in this study can be used for the integrity evaluation of the bogie frame

1. 서 론

철도는 항공기, 선박, 차량 등과 함께 운송수단으로서 대단히 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 21세기 고속철도의 개통 예정 등으로 인하여 비약적인 발전을 하게 되었다.

이러한 철도에 있어서 가장 먼저 확보하여야 하는 사항으로는 안전성이며, 심한 응력집중을 받으며, 가혹한 환경의 지배를 받는 대차 등이 여기에 속하게 된다.

대차는 철도차량의 중요한 부분으로 차륜, 차축, 치차, 모터 등의 구동장치와 이것을 지탱하는 대차 프레임으로 구성되어 있으며, 이중에서도 대차 프레임에 관련되는 사이드 프레임 및 볼스타의 건전성 확보는 열차의 안전에 직접적인 영향을 주는 사항으로, 열차의 고속화 등으로 인하여 그 중요성이 더욱 높아지고 있다.

특히 대차는 지속적인 반복응력에 의한 피로(fatigue)환경의 지배를 받는다는 사실을 고려하면, 급작스런 취성파괴(brittle fracture)의 위험성을 내포하고 있다.

따라서 대차의 사이드 프레임 및 볼스타 등의 부분에 존재하는 결함을 검출하고 이에 대하여 평가하는 것은 철도 차량 전체의 안전성 향상 및 보수·유지 최적화에 필수적이라 할 수 있다.

* 대한검사기술(주) 기술부 부장
** 한국철도연구원 시험인증팀 선임연구원
*** 인천제철(주) 포항공장 품질보증팀 부장
**** 한국철도기술연구원 시설전기연구본부 주임연구원
***** 대한검사기술(주) 기술부 실장

현재 철도 차량 대차의 결함 검출 및 평가를 위하여 사용되고 있는 비파괴적인 방법으로는 액체침투탐상[1], 자분탐상[2], 초음파에 의한 검사[3] 및 평가법 등이 있다. 이중에서 액체침투탐상에 의한 방법은 표면의 균열과 같은 미소 결함의 검출에, 자분탐상에 의한 방법은 표면 및 표면하의 결함 검출에 신속성 및 간편성 등의 장점을 갖고 있지만, 결함의 검출이 표면과 표면하 5㎜ 정도에만 한정되어 있는 등의 문제점을 내포하고 있다.

그러나 초음파에 의한 방법[4]은 사용전·중에 실시하는 비파괴검사방법 중에서 체적검사방법으로 그 위력을 더해가고 있다. 특히 A-스캔에 의한 실시간 결과 파악이 가능하고, 다른 작업과의 병행성이 뛰어나며, 작업의 간편성으로 인하여 고속작업이 가능한 등의 장점을 갖고 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다. 이러한 초음파의 장점을 이용하여 결함의 길이 및 깊이에 대한 데이터를 획득함으로써 재질내부에 존재하는 결함에 대한 상태를 파악한 후, 파면해석을 통하여 결함의 발생원인 및 향후의 재질내 거동 양상 등을 평가할 수 있다.

파면해석에 의한 방법[5]~[6]은 파단에 이르기까지의 주요 정보를 갖고 있는 파면을 해석 대상으로 하기 때문에 파단에 이르게 한 원인 및 열화의 정량적 평가가 가능하다.

따라서 본 연구에서는 73년 제작되어 화학공장에서 26년 동안 사용하여 온 화차의 대차에 대하여 응력집중부를 중심으로 자분탐상검사로 표면균열의 존재유무를 확인 한 후, 초음파탐상과 파면해석을 하였다.

이러한 결과로부터 초음파와 파면해석을 이용한 대차의 손상 및 열화의 정량적 평가 방법에 대하여 제시하고자 하였다.

2. 초음파 이론

고체 내부를 전파하는 음파에는 입자의 진동이 파의 진행 방향과 같은 종파와 파의 진행 방향이 수직인 횡파가 있으며, 전파하는 재질의 종류 및 특성에 따라 음속이 결정된다.

종파의 음속 C_l 과 횡파의 음속 C_s 는 식(1)과 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K+(4/3)G}{\rho}} \tag{1}$$

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{2}$$

여기서 E는 종탄성 계수, K는 체적 탄성 계수, G는 횡탄성 계수 또는 전단 탄성 계수, ρ는 밀도, ν는 푸와송비이다.

결함 검출을 목적으로 사용되는 초음파는 재질내를 일정한 음속을 갖고 진행하여 결함으로부터의 반사 에코를 얻게 된다. 용접부 결함을 대상으로 하는 경우, 탐촉자의 굴절각에 의한 횡파 사각법을 적용할 수 있다. 0.5 스킵빔거리내를 기준으로 하는 직사법에 대해서는 삼각 함수의 원리에 의해 다음과 같은 식들을 얻을 수 있으며, 이에 대한 원리는 그림 1과 같다.

$$W_{0.5s} = \frac{t}{\cos\theta} \tag{3}$$

$$y = W\sin\theta \tag{4}$$

$$d = W\cos\theta \tag{5}$$

$$d' = 2t - W\cos\theta \tag{6}$$

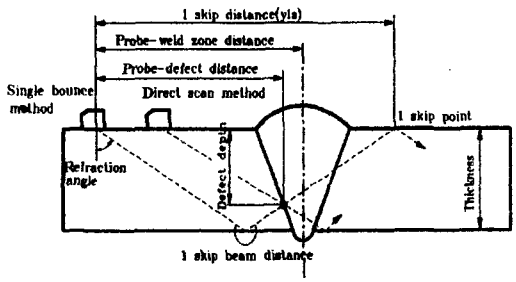

그림 1 사각탐상법의 원리

여기서 스킵점이라는 것은 사각 탐상에서 빔중심축이 저면에서 반사하여 탐상면에 도달하는 점을 말하며, 빔거리(W)는 초음파빔이 이동한 거리, 1 스킵 빔거리는 탐촉자의 입사점으로부터 1 스킵점까지의 거리(yls), 0.5 스킵-거리는 0.5 스킵 점까지의 거리를 말한다. 식(6)은 1회 반사법[7]~[8]에 의한 결함 깊이를 나타내는데, 이는 재질내를 진행하는 초음파 빔이 0.5 스킵 빔거리를 넘어가게 되면 판두께를 2배로 가상하여 구하게 되는 거리이다.

3. 실험 및 결과

3.1 시스템의 구성 및 실험 방법

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 초음파 탐상기(Panametrics사의 EPOCH-II), 초음파 탐상기로부터의 신호를 처리하여 디스 플레이하는 소프트웨어, 결함 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 4MHz, 굴절각 : 70° , 진동자 크기: 8×9㎜), 접촉매질(글리세린) 등이며, 실험에 있어서는 사각 탐촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관관계에 의하여 초음파 탐상기에 나타나는 결함 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 40량의 화차를 대상으로 하였으며, 이중에서 대표되는 샘플로서 Fig. 2와 같은 사이드프레임을 선정하였다.

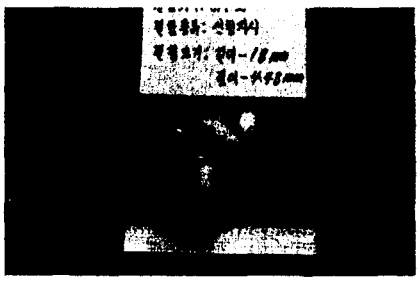

그림 2 사이드프레임의 균열 채취 시험편

파면해석과 초음파 탐상을 위하여 먼저 자분탐상을 하여 표면 균열의 유무를 확인 한 후, 초음파탐상으로 내부 균열의 진행 정도(깊이 등)를 파악하였다. 이렇게 확인된 결함에 대하여 파면해석[9]을 할 수 있는 샘플을 가능한 표면으로 진행된 것들로 선정하였다.

3.2 초음파 평가

초음파는 대차의 볼스타 및 사이드 프레임에 대하여 검사한 데이터에 대하여 해석 및 평가하고자 하였으며, 특히 볼스타와 사이드 프레임에 대해서는 자분탐상 후, 검출된 결함에 대하여 내부 깊이를 측정하고자 하였다.

Epoch II에 의한 해석에 있어서는 초음파 횡파에 의한 결과를 탐상기 CRT상의 정량적 정보로 이용하였으며, 그림 3은 차량의 사이드프레임의 검출결함에 대한 상태를 나타낸다.

처음에 자분탐상으로 표면크랙을 검출한 후, 초음파 탐상을 하여 표면 결함의 내부 진전 상태 여부를 정량적으로 파악하고자 하였다.

초음파센서의 굴절각이 70도 인 점을 고려하면 크랙의 표면에 거의 근접한 거리인 초음파 빔의 진행 8.10㎜, 탐촉자와 결함의 수직표면거리 7.60㎜, 표면으로부터 결함까지의 거리 2.79㎜에서 획득한 정보라고 할 수 있다.

아래의 그림 4는 사이드 프레임으로부터 초음파 센서를 이용하여 획득한 오실로스코프상의 신호를 나타낸다.

신호를 획득하기 위한 시스템의 구성에는 펄서-리시버로 Epoch II를 , 신호 처리에는 오실로스

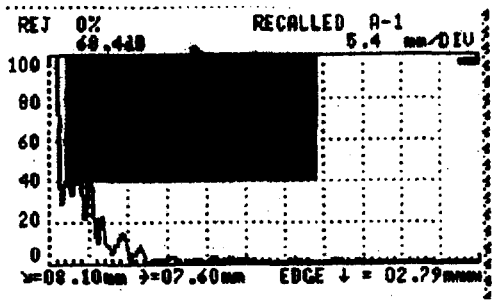

그림 3 사이드프레임 초음파 신호(탐상기)

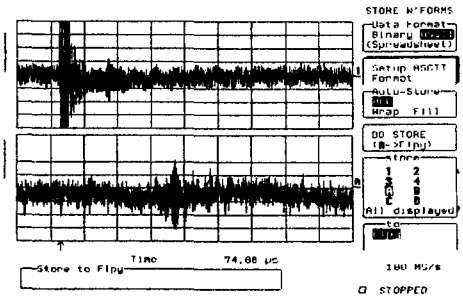

그림 4 사이드프레임의 DSO 초음파 신호

코프를, 초음파 센서로 간이 시스템을 구성하였다.

이렇게 구성한 시스템을 이용하여 100MS/s 샘플링 주파수로 설정하였으며, 그림 4의 화면(상단 신호)에 전체 신호를, 하단은 상단에서 잡은 신호를 전체로 확대하여 나타내었다.

또한 전체신호에 대하여 10배로 확대한 결함 신호를 A화면에 1div당 5μs로 하였으며, 진폭 및 파형의 형태에 따른 균열 결함의 특성을 파악하고자 하였다.

이러한 해석 및 결과로부터 철도차량에 대한 결함의 해석시 더욱 정밀도를 높일 수 있다고 생각한다.

3.3 파면해석 및 평가

재료의 파단면에는 파괴의 진행상황을 나타내는 고유의 형상이 남게 되며, 이것을 해석함으로써 파괴기구나 파괴의 원인에 관한 중요한 정보를 얻을 수 있다. 특히 파괴의 진행 중에 대한 관찰이 아니라, 파괴 후에 남겨진 흔적의 관찰로 파괴의 원인을 분석 및 평가하게 된다.

본 연구에서는 검출한 균열에 대하여 그림 5와 같이 채취 파면 시험편을 채취하였으며, 시험편을 기계가공하면서 균열 발생의 기점으로 판단되는 부위를 발견하였다.

시험편은 차축(axle)에서 장기간의 응력으로 발생한 것으로 예상되는 균열 부위를 가로 1.5cm, 세로 1.5 cm로 절단하여 가공하였으며, 그림 6에서와 같이 육안으로도 각 부위의 형태와 색깔이 구분되는 것을 알 수 있다. SEM/EDX 분석에서는 시편의 준비가 전체의 70% 가량을 차지할 만큼 큰 비중을 차지한다. 즉, 시험편이 대상물질을 대표하기 때문에 분석은 주어진 시편의 상태에 따라서 달라질 수도 있다.

그림 5 균열발생부위의 형상

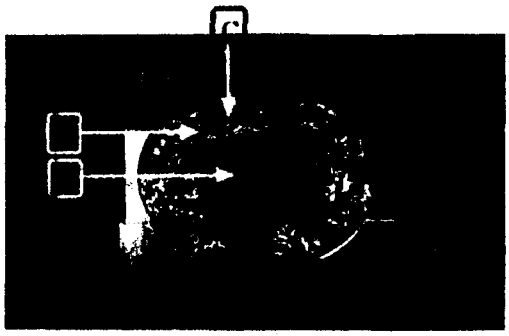

그림 6 SEM/EDX 시험편

본 시료의 분석을 위해서 시편을 시편홀더에 비스듬히 놓고 알루미늄 호일을 사용하여 주위를 고정하여 챔버안에서 시험편의 이탈을 방지하고자 하였다. 또한, 시편은 금속물질로서 코팅을 실

시하지 않고 그대로 분석을 하였으며, 두 개의 시편 중 표면이 비교적 평탄한 것을 선택하였다.

시험편에서 분석 대상지점은 A, B, C로 선정하였다.

A 지점은 육안으로 희게 보이는 부분, B 지점은 최초로 크랙이 발생한 상-좌(up-left), C 지점은 A와 B가 만나는 곳을 대상으로 SEM을 촬영하고, EDX 분석을 실시하였다.

A 부분은 시험편에서 다른 부분보다 약간 희게 보이는 곳으로 이 지점에 대한 SEM 이미지 촬영은 그림 11에 나타내었으며, 그림 7에 표시한 1, 2, 3의 3개 지점에 대한 EDX 성분분석 결과를 표 1에 나타내었다.

3개 지점에 대한 성분분석 결과 O, Mn, Fe가 거의 비슷한 비율로 함유되어 있는 것으로 판단되며, 최초에 시험편 채취시 균열로부터 떨어진 리가멘트와 같은 형태를 띤 부분이라 할 수 있다.

SEM 사진상에 나타난 조직의 형태도는 등축딤플의 형상을 나타내고 있으며, 이는 파면해석을 위하여 인위적으로 응력의 부가하여 나타난 결과로써 등축 딤플의 특징을 나타내는 파면과 일치됨을 알 수 있다.

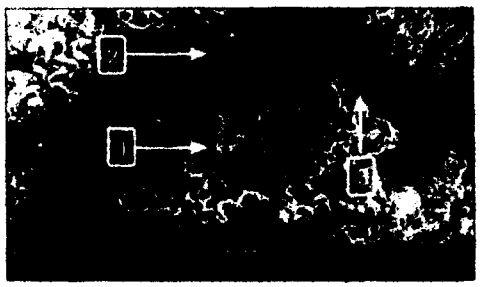

그림 7 A 부위의 SEM 사진

표 1 A 지점의 성분분석 결과

원소			
O	30.02	31.17	27.39
Si	0.17		
Mn	0.82	1.04	0.65
Fe	68.99	67.59	71.97
Total	100	100	100

B 부분은 균열이 최초로 발생한 지점으로 판단되는 곳으로 실제 SEM 이미지 촬영 결과 균열이 곳곳에 생성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이 지점에 대한 SEM 이미지 촬영을 그림 8에 나타내었으며, 그림 중에서 표시한 1, 2, 3의 3개 지점에 대한 EDX 성분분석 결과를 표 2에 나타내었다.

3개 지점에 대한 성분분석 결과 1, 3번과 2번 사이에 성분이 상당한 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 즉, 1번과 3번에는 O가 약 30~40% 정도 포함되어 있었지만, 2번에는 O와 Al이 포함되지 않고 Fe가 성분의 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 따라서 이러한 결과로부터 B 지점은 슬래그나 산화로 인해 균열이 발생한 것으로 판단된다. 즉 사이드프레임의 제작시 슬래그가 용탕에 말려 형내에 들어가 응고 된 후, 이것이 반복응력의 지배를 받게 되어 균열의 시점이 되었다고 볼 수 있다.

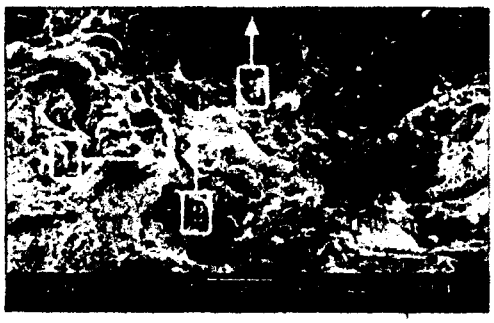

그림 8 B 부위의 SEM 사진

표 2. B 지점의 성분분석 결과

원소			
C	7.25	7.33	5.14
O	39.93		29.79
Al	0.23		
Si	1.27	1.16	
Mn	0.76	0.85	0.69
Fe	50.55	90.66	64.39
Total	100	100	100

C 부분은 A와 B가 교차되는 지점으로 이 지점에 대한 SEM 이미지 촬영은 그림 9에 나타내었으며, 그림 중에 표시한 1, 2, 3, 4의 4개 지점에 대한 EDX 성분분석 결과를 표 3에 나타내었다.
4개 지점에 대한 성분분석 결과 1, 2번은 A지점으로 판단되며, 3번과 4번은 약간 갈색이 나며 앞서 서술한 B지점으로 생각된다.
이상에서의 SEM 조직사진 및 성분분석에 대한 결과로부터 균열의 발생은 내부의 안쪽 위치이었으며, 균열의 발생원인으로는 사이드프레임의 초기 제작시 생긴 내부 기포가 지속적인 피로환경의 지배를 받게 되어 내부의 응력집중부위로부터 균열이 발생 한 후, 진전되어 표면에 나타나게 된 결과라고 생각된다.

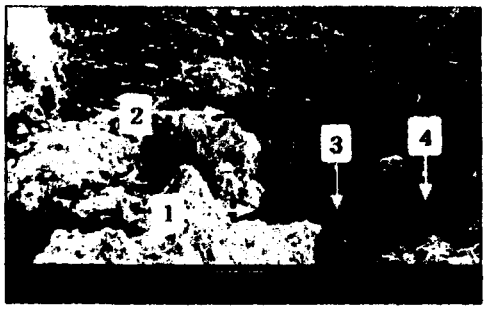

그림 9 C 부위의 SEM 사진

표 3 C 지점의 성분분석 결과

C	8.55	10.48	9.24	9.51
O	5.07	31.63	41.57	31.21
Si	0.76	1.23	0.67	0.70
Na,P,K		1.20		
Cr	0.19			Zn(0.18)
Mn	0.77	0.81	0.25	Ca(0.04)
Fe	84.67	53.98	48.28	58.37
Mo		0.67		
Total	100	100	100	100

그림 10, 그림 11은 자분탐상을 하여 검출한 균열에 대하여 미소조직 등의 관찰로 피로균열의 발생과 진전에 관계되는 제반 특성을 파악하고자 하였으며, 분석한 조직사진 상에서는 아래와 같이 크게 두가지의 형태로 나타남을 알 수 있다.

1) 입계균열(intergranular crack)
2) 입내균열(transgranular crack)

즉, 위에서와 같은 입계균열로 발생하여 손상이 누적되면서 점차 확대되어 입내 균열 형태로 발전하여 입계균열과 입내균열의 복합적 환경의 지배를 받게 된 것으로 생각된다.

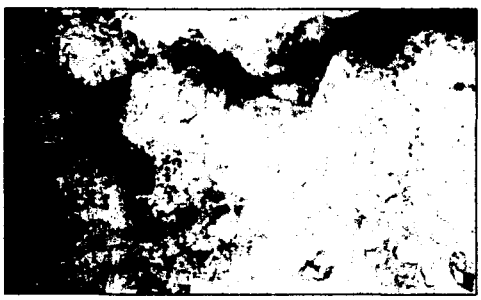

그림 10 균열부위의 조직사진(100배)

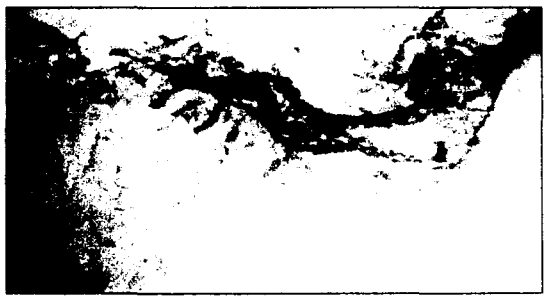

그림 11 균열부위의 조직사진(200배)

다만, 이러한 균열의 발생형태에 대해서는 균열 선단에 지속적인 손상이 누적되면서 항복영역으로부터 진전된다고 할 수 있다.
즉, 사이드프레임의 초기 제작시 내부결함(기포, 기공, 슬래그 혼입 등)의 존재로 인하여 응력집중을 받는 부위에 균열의 생성이 생성된 후, 진전을 계속하여 외부로까지 나타나게 되는데 이

럴 경우 초기에 발생한 균열은 역학적으로 선단부위에 응력특이성의 환경하에 무한대의 응력집중을 발생시키며 손상이 커지면서 진행되어 간다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 재질의 건전성 평가에 각광 받는 초음파와 파면해석을 이용하여 화차 사이드프레임의 균열을 대상으로 손상원인 및 건전성에 대하여 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 내부균열 부위를 광학 현미경 및 주사전자현미경으로 조직을 관찰한 결과, 균열의 대부분이 입계로 진행되면서 입내 및 입계로 합체되는 형상을 나타내었다.

2) 균열의 발생기점은 내부의 가스 홀이었으며, 이러한 가스홀의 생성원인으로는 사이드프레임의 초기 제작시에 응고 되면서 가스가 밖으로 빠져 나오지 못하여 생성된 것으로 생각된다.

3) 사이드프레임의 손상메카니즘으로는 초기 균열의 발생 및 표면균열으로의 진전, 부식이 합체된 부식피로임을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. V, "Standard Practice for Liquid Penetrant Inspection Method," pp.455～472, 1995.
2. ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. V, "Magnetic Particle Examination," pp.151～156, 1995.
3. 윤인식, "초공간을 고려한 SA508 강의 재질열화 시계열 신호의 카오스성 평가," 대한용접학회지, 제16권, 제6호, pp.537～547, 1998.
4. Yun In-Sik, "The Defect Detection and Nondestructive Evaluation in Weld Zone of Austenitic Stainless Steel 304 using Neural Network Ultrasonic Waves,"KSME International Journal, Vol.12, No.6, pp.295～306, 1998.
5. 小寺澤良一, "フラクトグラフィとその應用," 日刊工業新聞社, 1982.
6. 北川英夫, 小寺澤良一, "フラクトグラフィ," 培風館, 1978.
7. 윤인식, 이 원, 권성태, "어트랙터 해석을 이용한 레일 용접부의 결함 평가," 한국철도학회지, 제2권, 제1호, pp.38～46, 1999.
8. 윤인식, 권성태, 장영권, 정우현, 이찬석, "위상공간-주파수해석을 이용한 레일 용접부의 결함 평가," 한국철도학회지, 제2권, 제2호, pp.21～30, 1999.
9. 윤인식, 권성태, 선종성, 명노종, 정우현, 손태순, 김경국, 김순철, "초음파 파면해석에 의한 대차 프레임의 건전성 평가," 한국철도학회지, 제3권, 제2호, pp.77～83, 2000.