

대차 프레임의 건전성평가를 위한 초음파신호 후처리기 시뮬레이터 구축

Post-processor Simulator Construction of Ultrasonic Signals for Integrity Evaluation of Railway Truck

이규배¹, 윤인식²

Kyu-Bae Lee, In-Sik Yun

Keywords : Railway truck(대차프레임), Ultrasonic Waves(초음파), Integrity evaluation(건전성평가), Post-processor(후처리기), Attractor(어트랙터), Angle beam method(사각법)

Abstract

This study proposes the post-processor simulator construction of ultrasonic signal for integrity evaluation of railway truck. For these purposes, the ultrasonic signals for defects(crack) of weld zone in frames are acquired in the type of time series data and echo strength. The detection of the natural defects in railway truck is performed using the characteristics of echodynamic pattern in ultrasonic signal. The constructed post-processor simulator agree fairly well with the measured results of test block(defect location, beam propagation distance, echo strength, etc).

Proposed post-processor simulator construction of ultrasonic in this study can be used for the integrity evaluation of railway truck.

1. 서론

화학공장의 수송용 화차는 항공기, 선박, 차량 등과 함께 운송수단으로서 대단히 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 21세기 고속철도의 개통 예정 등으로 인하여 고속화와 안전화 측면에서의 발전이 요구되어지고 있다. 이러한 화차에 있어서 가장 먼저 확보하여야 하는 사항으로는 안전성이며, 화차 중에서도 심한 응력집중을 받으며, 가혹한 환경의 지배를 받는 대차 및 차체 등이 여기에 속하게 된다.

대차는 철도차량의 중요한 부분으로 차륜, 차축, 차차, 모터 등의 구동장치와 이것을 지탱하는 대차 프

레이드로 구성되어 있으며, 이중에서도 대차 프레임에 관련되는 사이드 프레임의 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 프레임부분에 존재하는 결함을 검출하고 이에 대하여 평가하는 것은 철도 차량 전체의 안전성 확보 및 장수명화에 필수적이라 할 수 있다.

현재 철도 차량 대차의 결함 검출 및 평가를 위하여 사용되고 있는 방법으로는 액체침투탐상⁽¹⁾, 자분탐상⁽²⁾, 초음파에 의한 검사⁽³⁾ 및 평가법 등이 있다. 이 중에서 액체침투탐상에 의한 방법은 표면의 균열과 갈

*¹ 정희원, 안산공과대학 컴퓨터응용기계설계과 교수

*² 정희원, 경기공업대학 메카트로닉스과 교수

은 미소 결함의 검출에, 자분탐상에 의한 방법은 표면 및 표면하의 결함 검출에 신속성 및 간편성 등의 장점을 갖고 있지만, 결함의 검출이 표면과 표면하 5mm 정도에만 한정되어 있는 등의 문제점을 내포하고 있다.

그러나 초음파에 의한 방법^{(4)~(6)}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, 초음파 신호 후처리 기 구축을 통하여 결함에 대한 초음파 신호 해석의 정밀도를 높일 수 있다. 초음파 후처리 기 구축에 의한 평가방법^{(7)~(8)}은 초음파탐상기의 CRT상 에코를 오실로스코프에서 대상신호와 대상신호에 대한 확대 등을 통하여 어트랙터적 지능형 후처리기를 구축하는 방법으로 이를 통하여 정밀도 향상과 향후 실시간 평가가 가능하다.

따라서 본 연구에서는 화학공장에서 26년 동안 사용한 화차의 대차에 대하여 응력집중부를 중심으로 자분탐상과 표면균열의 존재유무를 확인 한 후, 초음파탐상을 한 데이터로부터 어트랙터적 지능형 후처리기를 구축하였다. 이렇게 획득한 신호로부터 초음파 신호 후처리 기 구축에 의한 대차의 손상 및 열화의 정량적 평가 방법에 대하여 제시하고자 한다.

2. 초음파-어트랙터 이론

결함 검출을 목적으로 사용되는 초음파는 재질내를 일정한 음속을 갖고 진행하여 결함으로부터의 반사에코를 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 Fig. 1과 같다.

$$W_{0.5s} = \frac{t}{\cos \theta} \tag{1}$$

$$y = W \sin \theta \tag{2}$$

$$d = W \cos \theta \tag{3}$$

$$d' = 2t - W \cos \theta \tag{4}$$

여기서 스킵점이라는 것은 사각 탐상에서 빔중심축이 저면에서 반사하여 탐상면에 도달하는 점을 말하며, 빔거리(W)는 초음파빔이 이동한 거리, 1 스킵 빔 거리는 탐촉자의 입사점으로부터 1 스킵점까지의 거리(yls), 0.5 스킵 거리는 0.5 스킵 점까지의 거리, θ 는 굴절각, t는 판두께, y는 탐촉자와 결함과의 수직거리를 말한다. 식(4)는 1회 반사법에 의한 결함 깊이를 나타내는데, 이는 재질내를 진행하는 초음파 빔이 0.5 스킵 빔거리를 넘어가게 되면 판두께를 2배로 가상하여 구하게 되는 거리이다.

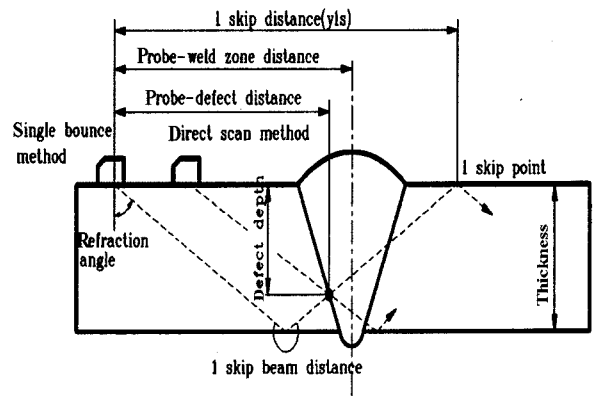


Fig. 1 사각탐상법의 원리

어트랙터 해석을 위해서는 시계열 신호로부터 어트랙터를 재구성하는 것이 필요하다. 어트랙터 재구성이란 시계열 신호를 위상 공간으로 표현하는 것을 말하며, 어트랙터 재구성 방법은 Takens의 지연 방법⁽⁹⁾을 사용하였다. 즉, i개의 데이터가 주어졌을 때, 식(5)와 같이 주어지는 m 차원 벡터 $\bar{X}(i)$ 를 위상공간에서 순서대로 연결시킴으로서 어트랙터가 재구성된다. 임베딩 차원과 시간 지연에 의한 어트랙터의 재구성으로 어트랙터상의 사분면 특징을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \bar{X}(1) &= [x\{1\}, x\{1+\tau\}, \dots, x\{1+(m-1)\tau\}] \\
 \bar{X}(2) &= [x\{2\}, x\{2+\tau\}, \dots, x\{2+(m-1)\tau\}] \\
 &\vdots \\
 \bar{X}(i) &= [x\{i\}, x\{i+\tau\}, \dots, x\{i+(m-1)\tau\}]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서 $x(i)$ 는 주어진 시계열 데이터이며, m 은 임베딩 차원(embedding dimension)을, τ 는 시간 지연(time delay)을 나타낸다. 임베딩 차원을 결정하는데 있어서는 Kennel이 제안한 FNN(false nearest neighbor)방법⁽¹⁰⁾을 이용하였다.

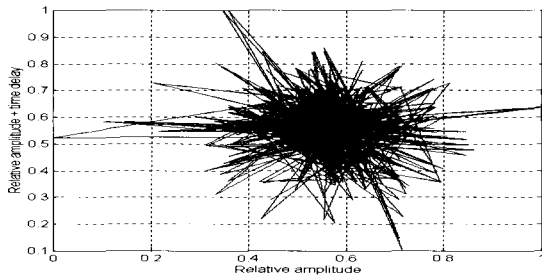


Fig. 2 어트랙터 재구성(노이즈)

FNN이란, 임의의 임베딩 차원에서는 두 어트랙터위의 점이 근접점(nearest neighbor point)이지만 임베딩 차원이 한 차원 증가될 경우에는 근접점이 되지 않는 점을 말하며, 임베딩 차원을 증가시키면서 FNN비를 계산하여 FNN비가 0% 근처일 때의 임베딩 차원을 찾아 그 시계열 데이터의 임베딩 차원으로 결정한다. FNN비는 주어진 각 데이터에서 FNN의 갯수를 줄이고 이를 어트랙터의 전체 점의 수로 나눔으로서 계산된다. 이렇게 하여 구성된 어트랙터는 Fig. 2와 같은 잡음(noise)과 구별이 되며, 전체 위상공간 내에서 일정한 궤적을 이루게 된다. 시간 지연은 Liebert와 Schuster가 제안한 상관적분 방법⁽¹¹⁾을 이용하여 결정하였으며 이는 시간 지연의 변화에 따라 계산된 상관적분 값에서 첫 번째 국부 최소점(local minima point)이 되는 점을 주어진 시계열 데이터의 시간 지연으로 결정하는 방법이다. 임베딩 차원 및 시간 지연을 계산함으로써 어트랙터를 재구성할 수 있으며, 프랙탈 차원을 추출하여 시계열 데이터의 기하학적 특성을 평가 할 수 있게 된다. 프랙탈 차원은 정수

값이 아닌 실수로 표현되며 신호의 성질과 변화의 정도에 따라 그 값이 달라진다. 따라서, 어트랙터의 고유한 특성으로 프랙탈 차원을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 재구성된 어트랙터로부터 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Gressberger와 Procaccia가 제안한 식(8)를 이용한 상관적분 방법⁽¹²⁾을 사용하였다. 이 방법은 어트랙터상의 각 점에서 상관 적분을 계산함으로써 프랙탈 차원을 결정하게 된다. 어트랙터상의 한 점을 중심으로 반지름을 기준으로 하는 구를 그리고 구 내부점의 수를 구하는 과정을 어트랙터 상의 각 점에서 반복하여 구한 값들에 대하여 평균을 한다.

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 디스플레이 하는 소프트웨어, 결합 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 4MHz, 굴절각 : 70°, 진동자 크기: 8×9mm), 접촉매질(글리세린) 등이며, 실험에 있어서는 사각 탐촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관 관계에 의하여 초음파 탐상기에 나타나는 결합 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 40량의 화차를 대상으로 하였으며, 이 중에서 대표되는 샘플로서 Fig. 3과 같은 사이드프레임을 선정하였다. 데이터 획득을 위하여 초음파 탐상과 자분탐상을 하여 표면 균열의 유무를 확인한 후, 초음파탐상으로 내부 균열의 진행 정도(깊이 등)를 파악하였다. 이렇게 확인된 결합에 대하여 해석을 할 수 있는 샘플을 가능한 표면으로 진행된 것으로 선정하였다.

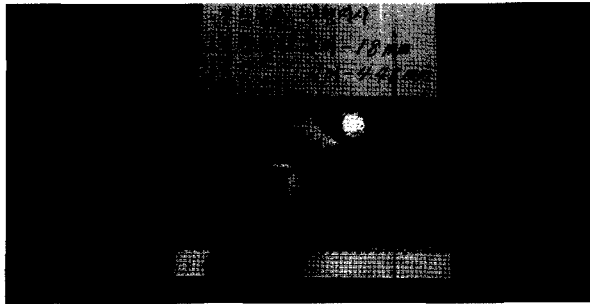


Fig. 3 사이드프레임의 균열 채취시험편

3.2 초음파 평가

초음파는 대차의 사이드 프레임에 대하여 검사한 데이터에 대하여 해석 및 평가하고자 하였으며, 자분탐상 후, 검출된 결함에 대하여 내부 깊이를 측정하고자 하였다. Epoch II에 의한 해석에 있어서는 초음파 횡파에 의한 결과를 탐상기 CRT상의 정량적 정보로 이용하였으며, Fig. 4는 차량의 사이드프레임의 검출 결함에 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 8.10mm, 탐촉자와 결함의 수직표면거리 7.60mm, 표면으로부터 결함까지의 거리 2.79mm에서 획득한 정보라고 할 수 있다. 아래의 Fig. 5는 사이드 프레임으로부터 초음파 센서를 이용하여 획득한 오실로스코프상의 신호를 나타낸다. 신호를 획득하기 위한 시스템의 구성에는 펄서-리시버로 Epoch II를, 신호처리에는 오실로스코프를, 초음파 센서로 간이 시스템을 구성하였다.

이렇게 구성된 시스템을 이용하여 100MS/s 샘플링 주파수로 설정하였으며, Fig. 5의 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.

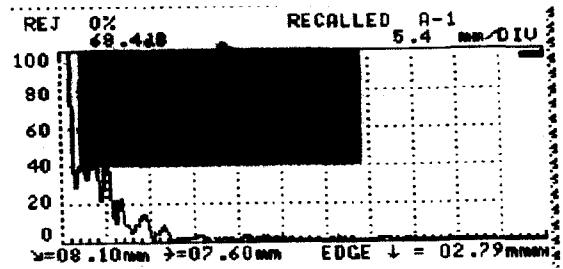


Fig. 4 사이드프레임 초음파 신호(초음파탐상기)

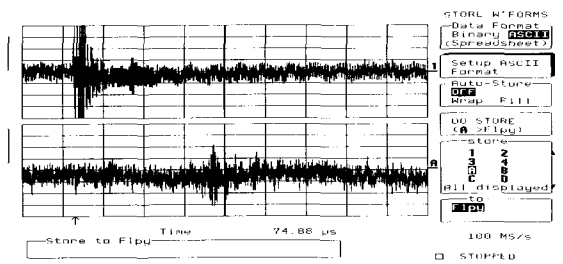


Fig. 5 사이드프레임의 DSO 초음파신호

3.3 초음파신호 후처리 기 구축 및 평가

초음파신호 후처리 기 구축을 위하여 로렌츠 어트랙터 모델을 도입하였으며, 이에 대한 기존의 결과들과 비교를 하면서 본 연구에서 프로그래밍화 한 초음파신호 후처리 기 시뮬레이터를 검증하였다. 프로그램은 Matlab 버전 4.2c1이상에서 시뮬레이션할 수 있도록 Matlab으로 프로그래밍하였으며, 획득 데이터에 대하여 최대 20,000개까지 처리할 수 있도록 하였다. 데이터의 인터페이스는 로딩시킨 데이터 파일명(확장자명 제외), 대상 데이터의 시작 점, 대상 데이터의 전체 길이, 시간지연, 플로팅 형식(점 또는 선)의 순서로 하여 어트랙터를 구성할 수 있도록 하였다. 확장 카오스 시뮬레이터 구축을 위한 샘플로 로렌츠 어트랙터를 고려하면, 이것은 외부 입력이 없는 3자유도의 자율계로써 운동방정식은 다음의 식(6), (7), (8)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = F_1(x, y, z) = 10(x-y) \quad (6)$$

$$\frac{dy}{dt} = F_2(x, y, z) = -y + (28 - z)x \quad (7)$$

$$\frac{dz}{dt} = F_3(x, y, z) = -\frac{8}{3}z + xy \quad (8)$$

위의 방정식들로부터 해의 데이터를 얻어 그 플로팅하면 Fig. 6, 7과 같은 로렌츠 어트랙터를 얻을 수 있다.

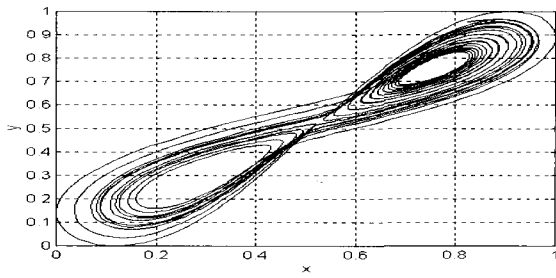


Fig. 6 2차원 어트랙터

Fig. 6은 로렌츠 어트랙터의 2차원적 구조, Fig. 7은 로렌츠 어트랙터의 3차원적 구조를 나타낸다.

본 논문에서는 이상에서 시뮬레이션한 어트랙터 재구성에 의한 위상공간상 궤적 정량화가 가능한 초음파신호 후처리기 시뮬레이터를 대차의 사이드 프레임의 건전성 평가에 적용하였다.

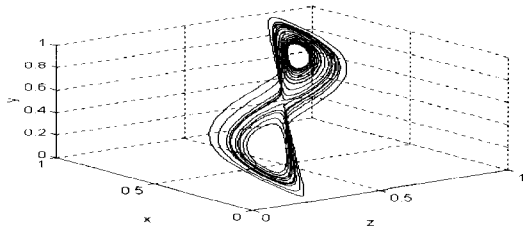


Fig. 7 3차원 어트랙터

Fig. 8은 사이드 프레임의 무결함에 대하여 시계열 신호로 획득한 데이터를 프로그래밍한 초음파신호 후처리기 시뮬레이터를 이용하여 2차원 어트랙터 재구성한 것을 나타낸다. 데이터 획득시에 반사체가 없으면 에코의 획득이 쉽지 않은 점을 고려하여 제1저면이 나타나도록 사각에 의한 최대 에코를 획득하고자 하였다.

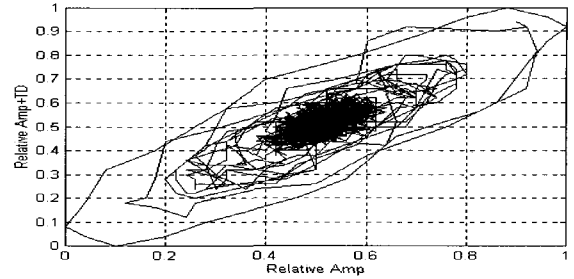


Fig. 8 2차원 어트랙터(무균열)

Fig. 9는 사이드프레임에 내재된 균열에 대하여 획득한 신호를 데이터로 위상공간상에 재구성한 2차원 어트랙터를 나타낸다. 어트랙터의 궤적이 안에서 밖으로 휘돌아 나가는 형상을 하고 있으며, 대부분이 데이터의 가장 큰 에너지를 기준으로 하는 대각선 방향에 모두 몰려 있음을 알 수 있다. 이러한 궤적의 형상은 내재균열에 대한 어트랙터적 특성을 나타낸다고 할 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교하면 어트랙터상의 궤적이 심하게 차이가 남을 알 수 있으며, Fig. 10은 본 논문에서 구축한 초음파신호 후처리기 시뮬레이터의 주요 내용을 나타낸다.

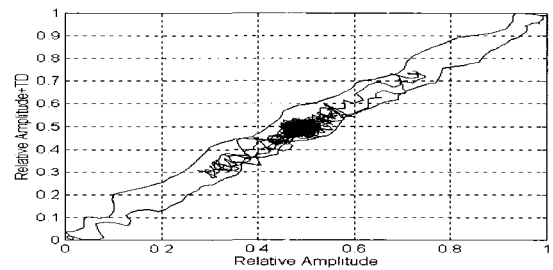


Fig. 9 2차원 어트랙터(내재균열)

초음파신호 후처리기

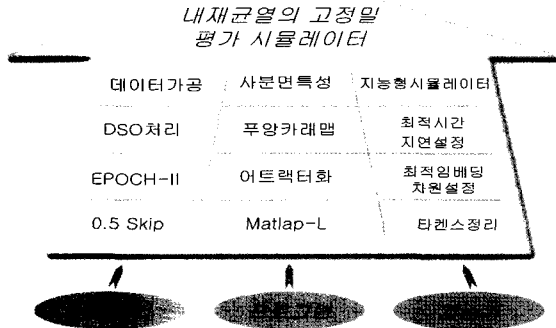


Fig. 10 초음파신호 후처리기 시뮬레이터

전체를 신호처리, 프로그램, 지능기 등의 3분야로 구분하였으며, 구분한 각각의 분야에 대하여 4가지의 소분야로 재분류하여 시뮬레이터를 개발하였다. 현재 모든 처리가 실시간으로 가능하며, 가장 중요한 인자인 시간지연과, 임베딩차원에 대한 내부처리 기능을 부가하여 별도로 인자를 계산하여 재적용하는 불편함을 제거하였으며, 사분면 특징까지를 평가하고자 할 경우는 처음 시뮬레이션시에 옵션화에 따라 수행이 가능하도록 하였다.

따라서 개발한 시뮬레이터로부터 어트랙터상의 궤적에 의한 대차의 사이드 프레임에 대한 건전성 평가가 가능함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 재질의 건전성 평가에 각광 받는 초음파와 초음파신호 후처리기 시뮬레이션을 이용하여 화차 사이드프레임의 건전성에 대하여 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 사이드 프레임의 건전성 평가를 위하여 초음파신호를 데이터로 하는 타켄스의 지연방법에 의한 어트랙터 재구성용 Matlap 시뮬레이터를 개발하였다.
- 2) 기존의 펄서/리시버를 대체하여 초음파탐상기에 의한 시스템을 구축함으로써 현장 적용이 가능한 실용적 시스템을 구축하였다.
- 3) 사이드 프레임의 실시간 건전성평가가 가능하도록 시간지연, 임베딩차원 등의 인자추출 프로그램을 링크화하는 초음파신호 후처리기 시뮬레이

터를 제시하였다.

후 기

이 논문은 2002학년도 안산공과대학 학술연구비에 의하여 연구된 것임.

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. 윤인식, 권성태, "초음파 파면해석에 의한 대차 프레임의 건전성 평가," 한국철도학회, 제2권, 제3호, pp.77~83, 2000.
6. 윤인식, 권성태, 박덕신, "초음파 파면해석에 의한 대차 프레임의 건전성평가," 한국철도학회 2000년 추계학술대회 논문집, pp.461~467, 2000.
7. 윤인식, 권성태, "어트랙터 해석을 이용한 레일 용접부의 결합 평가," 한국철도학회지, 제2권, 제1호, pp.38~46, 1999.
8. 윤인식, 권성태, "위상공간-주파수해석을 이용한 레일 용접부의 결합 평가," 한국철도학회지, 제2권, 제2호, pp.21~30, 1999.
9. F. Takens, "Lecture Notes in Mathematics," D. A. Rand and L. S. Young(eds.), Springer, Vol. 898, pp.266. 1981.
10. M. B. Kennel et al, "Determining Embedding Dimension for Phase Space Reconstruction using Geometrical construction," Physical Reviews A, Vol. 45, pp.2403~3411. 1992.
11. W. Liebert and H. G. Schuster, "Proper Choice of The Time Delay for The Analysis of Chaotic Time Series," Physics Letters A, Vol. 142, pp.107~111. 1989.
12. P. Grassberger and I. Procaccia, "Characterization of Attractors," Rev. Lett., Vol. 50, No.5, pp.346~349. 1983.