

## 레일 초음파의 분산 특성 해석<sup>§</sup>

강 부 병<sup>\*†</sup>

\* 우송대학교 소방방재학과

### Analysis of Dispersion Characteristics of Guided Waves in Rails

Bu-Byoung Kang<sup>\*†</sup>

\* Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Woosong Univ.

(Received April 13, 2011 ; Revised June 14, 2011 ; Accepted June 15, 2011)

**Key Words:** Guided Waves(유도 초음파), SAFE(Semi-analytical Finite Element Method), Rail Inspection(레일 검사), Dispersion Characteristics(분산특성)

**초록:** 짧은 시간에 장거리를 전파하는 유도 초음파의 특성을 이용하면 빠르게 넓은 영역의 검사가 가능하다. 그러나 레일의 경우와 같이 단면이 단순하지 않고 임의의 형상을 갖는 구조물의 경우 초음파 전달시 발생하는 분산 특성이나 다수의 모드의 발생으로 초음파 신호의 분석에 어려움을 겪는다. 따라서 실용적인 유도 초음파 검사 시스템을 개발하기 위해서는 먼저 레일내를 전파하여 전달되는 초음파의 거동특성을 이해하여야 한다. 특히 레일내를 전파하는 초음파의 분산특성은 필수적으로 확인되어야 할 특성이다. 본논문에서는 SAFE법을 활용하여 KS60 레일내를 전파하는 초음파의 분산곡선을 구하는 방법을 소개하고 유도초음파를 활용한 레일 검사의 가능성에 대하여 살펴보았다.

**Abstract:** Guided ultrasonic waves propagating over long distances within a short period provide a fast long-range inspection method. However, structures with arbitrary cross-sections, such as rails, have complicated dispersion characteristics that make analysis of the ultrasonic signal difficult. Therefore, an understanding of the characteristics of the propagating waves in rails is important for the creation of a reliable and practical inspection system using guided waves. In particular, it is necessary to investigate the dispersion characteristics of the guided waves. This paper introduces a method for the calculation of the dispersion curves of KS60 rails by adopting a SAFE method, and discusses the possibility of using guided waves as a technique for rail inspection.

### 1. 서론

레일 표면 크랙의 조기 발견을 위한 기술은 철도 분야 유지보수 분야에서 활발하게 연구되고 있는 기술이다. 레일의 두부 크랙은 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 구름 접촉 피로(RCF) 현상에 의해 주로 발생되며 철도의 고하중화 고속화에 따라 기술개발의 중요성이 증가 하고 있다. 구름접촉피로에 의한 레일의 결함은 때로는 레일 절손으로 이어져 대형 사고를 유발하기도 한다. 2000년 영국의 핫필드에서 발생하였던 철도사고가 대

표적인 예 이다. 이 사고는 기존의 검사 방법이 신뢰성 측면에서 충분히 안전하지 않다는 것을 보여주었고 결국 레일 내부의 결함이나 크랙을 신속하게 발견하기 위한 방법이 시급히 요구되었다.

초음파 탐상은 결함 검출을 위해 효과적으로 사용되고 있다. 철도 레일의 검사 분야에서도 오랜 기간 초음파를 이용한 검사 방법에 대하여 연구해 왔고 현장에서 효과적으로 적용되어 사용되고 있다. 그러나 현장에서는 더 빠르고 신뢰성이 높은 검사 방법에 대한 요구가 증가하고 있다. 기존의 초음파를 이용한 검사방법은 주로 메가헤르쯔(megahertz) 대역의 고주파를 이용한다. 레일 검사 분야에서는 기존의 방법으로 검사가 어려운 두 가지 큰 주제가 도전적인 과제로 제시되고 있

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2011. 4. 14.-15., SETEC) 발표논문임

† Corresponding Author, [bbkang@wsu.ac.kr](mailto:bbkang@wsu.ac.kr)

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

는데 그 중 하나가 레일의 횡방향으로 단면을 갖는 수직방향 크랙(transverse vertical crack)의 검출이고 다른 하나는 용접부(alumino-thermic welds)의 검사이다. 영국에서의 조사 결과에 의하면 레일 절손사고의 39.5%가 수직 방향 크랙으로 인해 발생하고 22.4%는 용접부의 결함으로 인해 발생하는 것으로 보고되었다.<sup>(1)</sup>

최근에 개발되어 활발히 연구되고 있는 유도초음파를 이용한 검사 기술은 레일과 같이 일정한 단면을 갖고 길이 방향으로 긴 형태를 갖는 구조물의 검사에 효과적으로 사용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 유도 초음파는 주로 수십 킬로헤르쯔 대역의 주파수를 사용하며 짧은 시간에 장거리를 전파하는 초음파의 특성을 이용하기 때문에 빠르게 넓은 영역의 검사가 가능하다. Fig. 1에서와 같이 수밀리미터의 파장을 갖는 기존의 초음파 방법은 레일내를 모든 방향으로 수백 밀리미터를 전파 할 수 있다. 그러나 저주파를 사용하는 유도초음파는 수백 밀리미터의 파장을 가지고 있고 감쇄 특성에 따라 달라지지만 보통 수십에서 수 백미터를 전파한다. 특히 유도초음파의 최대 장점은 레일의 길이 방향으로 전파하기 때문에 레일 단면에 존재하는 수직방향 크랙에 대하여 민감하다는 것이다. 또 다른 장점은 저주파 대역을 사용함으로써 입계면에서의 산란으로 인한 감쇄가 작기 때문에 레일 용접부를 전파에 가면서 결함을 찾을 수 있다는 데 있다.<sup>(2)</sup>

유도 초음파의 특정 모드가 사용될 때 특정 위치의 크랙이나 결함 등에 대한 검출율을 높일 수 있다.<sup>(3)</sup> 예를 들어 표면파의 경우는 차륜 레일 접촉면 근처의 표면 결함에 대하여 높은 민감도를 보여주고 한 번의 검사 위치에서 수 미터 이상의 장거리를 검사 할 수 있다. 그러나 레일의 경우와 같이 단면이 단순하지 않고 임의의 형상의 곡선으로 이루어진 구조물의 경우 초음파 전달시 발생하는 분산 특성이나 다수의 모드의 발생으로 초음파 신호의 분석에 어려움을 겪는다. 따라서 실용적인 유도 초음파 검사 시스템을 개발하기 위해서는 먼저 레일내를 전파하여 전달되는 초음파의 거동특성을 이해하여야 한다. 초음파 거동의 완벽한 이해가 수반 될 때에 효과적인 센서 및 신호 처리 시스템의 개발이 가능하다. 특히 레일내를 전파하는 초음파의 분산특성은 필수적으로 확인되어야 할 특성이라고 하겠다. 본 논문

에서는 이런 의미에서 SAFE법을 활용하여 KS60 레일내를 전파하는 초음파의 분산곡선을 구하는 방법을 연구하였고 유도초음파를 활용한 레일 검사의 가능성에 대하여 살펴보았다. 또한 상용 프로그램의 고유치 해석 모듈을 활용하여 SAFE 법을 구현하는 방법을 레일의 해석과정을 통하여 제시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 SAFE 법

유도 초음파는 구조물 건전성 진단(SHM)이나 비파괴 평가(NDE)를 위해서 큰 잠재력을 가지고 있는 기술이다. 유도초음파는 초음파가 통과하는 경로상의 단면 전체에 대하여 결함이나 크랙에 대해서 민감하고 장거리를 전파하는 특성이 있기 때문이다. 그러나 동일 주파수에서 다수의 모드가 전달되고 분산 특성이나 감쇄 특성으로 인하여 발생하는 기술적인 어려움도 가지고 있다. 따라서 초음파 전달시 응력 패턴이나 속도 특성 등 분산 특성을 결정하여야만 효과적인 검사 시스템을 설계할 수 있다. 몇 가지 방법들이 분산 특성 방정식의 풀이에 사용되고 있다. 비교적 형상이 단순한 실린더형상이나 플레이트 형상에 대해서는 엄밀해(analytic solution)를 구하여 분산 특성을 구하는 방법들이 사용되고 있고 좀 더 일반적인 해를 구하기 위해서는 수치 해석적 방법을 사용하고 있다.<sup>(4,5)</sup> 최근에는 임의의 단면 형상을 가진 물체의 초음파 전달 특성을 구하는 방법들이 사용되고 있는데 그 중의 하나가 SAFE (Semianalytical Finite Element Method)법이다. SAFE법은 스펙트랄 유한요소법(spectral finite element methods)라고 불리기도 하는데 유도초음파의 전파거동을 해석하기 위해서 체적탄성파(bulk wave)의 중첩을 이용한 엄밀해 법을 대신하는 수치해석적 방법으로 연구되기 시작하였다. SAFE법을 활용한 임의의 형상을 갖는 구조물의 파동 전파에 대한 연구는 1973년에 소개되었다.<sup>(6,7)</sup> 최근에는 얇은 판재 구조물,<sup>(8)</sup> 철도 궤도<sup>(9)</sup> 내의 파동 전파 거동 해석에 적용되었고 주기적인 대칭 조건을 경계 조건으로 하여 상용 유한요소 프로그램을 응용하는 연구도 수행되었다.<sup>(10)</sup> 이 밖에도 비균질의 비등방성 빔의 연구<sup>(11)</sup>와 봉과 레일의 연구<sup>(12)</sup>도 진행되었다. 최근에는 철도변 노이즈 저감 대책을 연구하기 위한 방법으로 저주파

수 대역의 레일 분산 특성 해석관련한 연구도 보고되고 있고 이를 확장하여 고주파 대역의 감쇄 특성에 대한 연구도 수행되었다.<sup>(13,14)</sup> NDE 분야 연구를 위해서는 다양한 주파수 범위에서 유도초음파를 이용한 레일의 비파괴 검사에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.<sup>(15)</sup> SAFE법의 장점은 초음파 전달 방향에 수직한 단면에 대한 2차원 격자 작업만을 수행하면 된다는 데 있다. 파동의 전파방향의 변위는 조화함수를 이용하여 간단히 표현될 수 있다. 따라서 단면부의 2차원 격자만 필요하게 됨으로 3차원 격자를 필요로 하는 방법에 비교하여 계산시간을 현저히 줄일 수 있다. 또한 전통적인 3차원 방법에서 사용하는 근사화 과정이 없기 때문에 3차원 방법으로 해를 얻기 어려운 고주파 대역의 짧은 파장에 대한 해석결과도 얻을 수 있다. 본 논문에서는 상용 해석 프로그램들에 구현되어 있는 고유치 해석 절차를 사용하여 SAFE법을 실현하여 간편하게 복잡한 단면 형상을 갖는 레일의 분산선도를 구하는 방법을 연구하였다.

조화운동하는 유도 초음파가 Fig. 1에서와 같이  $ox_3$  축 방향으로 전달된다고 가정한다. 결과적으로 변위 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_i(x_1, x_2, x_3, t) = U_i(x_1, x_2) e^{I(kx_3 - \omega t)} \quad I = \sqrt{-1} \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 파수(wave number)이고  $w = 2\pi f$ 는 각주파수이고  $f$ 는 주파수이다.  $i = 1, 2, 3$ 이다.

변위구배(displacement gradient)는 식 (1)에서 다음과 같이 유도 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} &= \frac{\partial U_i}{\partial x_1} e^{I(kx_3 - \omega t)}, \\ \frac{\partial u_i}{\partial x_2} &= \frac{\partial U_i}{\partial x_2} e^{I(kx_3 - \omega t)}, \\ \frac{\partial u_i}{\partial x_3} &= IkU_i e^{I(kx_3 - \omega t)}. \end{aligned} \quad (2)$$

밀도( $\rho$ )와 탄성계수( $C_{ijkl}$ )를 가진 탄성체( $D$ )의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{j,k,l=1}^3 \left[ C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_k \partial x_l} \right] + \rho \omega^2 U_i = 0 \quad \text{in } D; \quad i = 1, 2, 3. \quad (3)$$

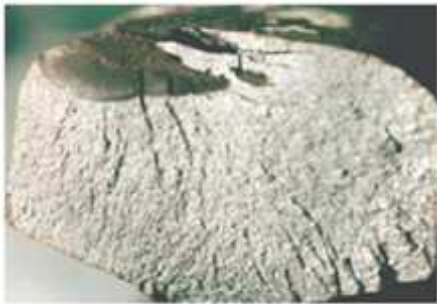
식 (2)를 이용하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{ikjl} \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_k \partial x_l} + I(C_{i3jk} + C_{ikj3}) \frac{\partial(kU_j)}{\partial x_k} - kC_{i3j3}(kU_j) \\ + \rho \omega^2 \delta_{ij} U_j = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

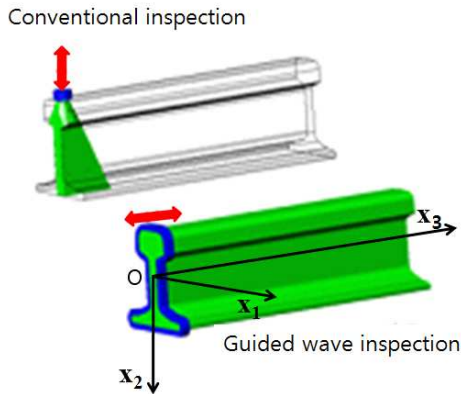
여기서  $j = 1, 2, 3$  그리고  $k, l = 1, 2$ 인 합을 의미하는 인덱스(summation index)이다.  $\delta_{ij}$ 는 크로네커(Kronecker) 기호이다. 경계( $\delta D$ )에서의 응력은 다음과 같다.

$$T_i = \sum_{j,k,l=1}^3 C_{ikjl} \frac{\partial U_j}{\partial x_l} n_k; \quad \text{on } \delta D \quad (5)$$

여기서  $n_k$ 는 경계( $\delta D$ )에 수직한 단위벡터  $n$ 의



(a) RCF Crack



(b) Ultrasonic rail inspection methods

Fig. 1 Rail crack and inspection methods

성분이다. 식 (2)를 적용하면 응력은 아래와 같다.

$$T_i = C_{ijkl} \frac{\partial U_j}{\partial x_l} n_k + IC_{ikj3} (kU_j) n_k; \text{ on } \delta D \quad (6)$$

여기서  $j=1,2,3$  그리고  $k,l=1,2$ 인 합을 의미하는 인덱스(summation index)이다.

상업용 FEM 소프트웨어에서 고유치 문제의 방정식 형태가 아래와 같이 주어진다.<sup>(16)</sup>

$$\nabla \cdot (c\nabla \tilde{U} + \alpha \tilde{U} - \gamma) - \beta \nabla \tilde{U} - a \tilde{U} + \lambda d_a \tilde{U} = 0 \quad (7)$$

여기서  $\tilde{U}$ 는 결정하려고 하는 변수이다. 식 (7)은 Comsol이 제공하는 일반적인 고유치 문제의 방정식 형태로 해당하는 문제에 따라 계수를 조정하여 해를 구할 수 있다. 식 (7)의 감마( $\gamma$ )는 Flux가 관련되는 문제에서 Source항을 나타내는 벡터이다. 본 문제에서는 궁극적으로 식 (4)의 문제를 Comsol의 고유치 문제 형태인 식 (7)을 이용하여 풀기 위하여 계수를 조정하였다. 이때 본 문제의 방정식을 표현하기 위해  $\gamma=0$ 으로 하고 계수를 조정하여 식 (4)를 표현한 고유치 문제를 구성하였다. 이때 식 (7)의 모든 행렬 계수는 복소 행렬이며 그 행렬의 구성은 Predoi et al의 논문에서 자세히 설명되어 있어 본 논문에서는 생략하였다.<sup>(17)</sup>  $\gamma=0$ 이면 식 (7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 \tilde{U}_j}{\partial x_k \partial x_l} + (\alpha_{ijk} - \beta_{ijk}) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x_k} - a_j \tilde{U}_j + \lambda d_{ij} \tilde{U}_j = 0 \quad (8)$$

일반적인 노이만 경계조건은 경계( $\delta D$ )에 대하여 COMSOL 소프트웨어에서 다음과 같이 표현된다.

$$n \cdot (c\nabla \tilde{U} + \alpha \tilde{U} - \gamma) + q \tilde{U} = g \quad (9)$$

여기서 본 문제를 표현하기 위하여  $\gamma=0$ 으로 하였고 레일의 표면에 자유단 경계조건을 부여하기 위해 행렬  $q$ 와 벡터  $g$ 값을 0행렬과 0벡터로 조정하였다. 결과적으로 본 문제에 적용한 자유단 경계조건은 아래 식과 같다.

$$n[c\nabla \hat{U} + \alpha \hat{U}] = 0 \quad (10)$$

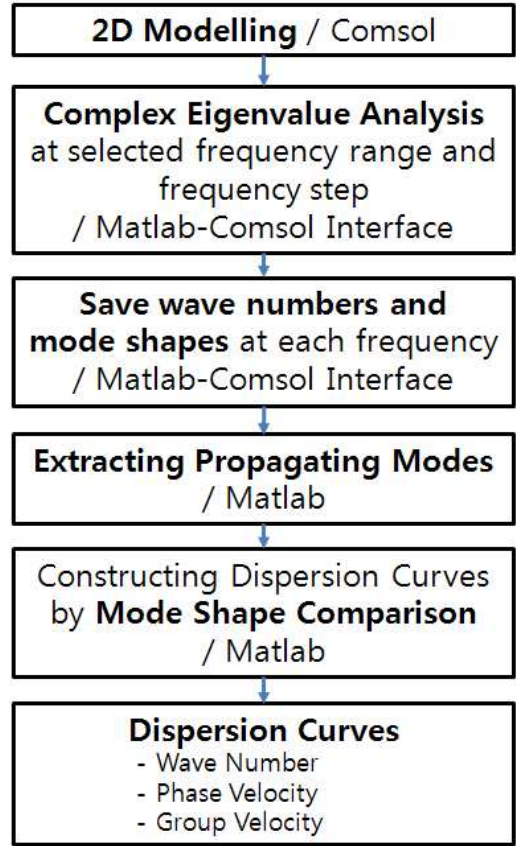


Fig. 2 Procedure for constructing dispersion curves

이 식은 텐서를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_{ijkl} \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_l} n_k + \alpha_{ijk} \tilde{U}_j n_k = 0 \quad (11)$$

이 경계조건은 식 (6)에서 응력항을 0으로 놓은 식과 등가의 식인 것을 알 수 있다.

결국 위에서 보인 문제는 선택된 각주파수  $w$ 에서 복소수 파수인  $k$ (wave number)를 구하는 고유치 문제가 된다. 본 연구에서 분산선도의 해석에는 복소수 고유치 문제(Complex eigenvalue problem)를 해결 할 수 있는 Comsol Multiphysics 소프트웨어가 사용되었다. Fig. 2는 분산 선도를 구하는 절차를 보여준다. 먼저 Comsol 프로그램에서 2차원 모델링을 수행한다. 해석에 따라 적절한 경계조건을 부여한 후 Matlab과 Comsol의 인터페이스 기능을 활용하여 Matlab에서 복소수 고유치 해석을 수행 할 수 있는 Matlab 파일을 생성한다.

Matlab상에서 관심 주파수 영역에서 일정 간격의 주파수 마다 반복적으로 고유치 문제를 풀어서 파수와 각 모드의 모드형상 벡터를 저장한다. Matlab상에서 각각의 파수의 허수부를 확인하여 허수부가 없거나 실수부와 비교하여 매우 작은 모드들을 전파형 모드(propagating mode)로 추출해 낸다. 각각의 주파수에서 전파형 모드를 추출한 후 구한 전파형 모드들의 모드 형상을 비교하여 제일 유사한 모드를 동일한 유형의 모드로 연결하면 분산선도가 구해진다. 이때 파수와 위상속도( $c_p$ ) 사이의 관계는 다음과 같다.

$$c_p = \frac{2\pi f}{k_R} \quad (12)$$

여기서  $k_R$ 은 파수(wave number)의 실수부이고  $f$ 는 주파수이다.

그리고 파수와 군속도( $c_g$ ) 사이의 관계는 다음과 같다.

$$c_g = \frac{dw}{dk_R} \quad (13)$$

여기서  $w$ 는 각주파수이다.

또한 감쇄(attenuation)는 파수의 허수부로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Attenuation} = k_I \quad (14)$$

결과적으로 관심 주파수 범위에서 복소수 고유치 해석을 반복하는 과정을 통하여 구한 파수로부터 위상속도, 군속도 그리고 감쇄 등을 구할 수 있고 모드형상 비교를 통하여 분산선도를 구할 수 있다.

### 2.2 해석 모델

해석에는 KS60 레일의 형상 및 물성치가 사용되었다. 레일은 등방성 재료로 가정하였고  $C_{11}$ 은 281.8 GPa,  $C_{66}$ 은 84.3 GPa, 그리고 밀도는  $7932 \text{ kg/m}^3$ 을 적용하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 레일 모델의 단면 격자를 보여준다. 2차원 선형 삼각형 요소가 사용되었고 총 617개의 요소가 사용되었다. 요소의 크기는 관심주파수 대역에서 모드 형상을 충분히 구분 할 수 있는 정도의 크기가 되어야 한다. 본 연구의 관심주파수 범위인 저주파 초음파 대역에서는 Fig. 3의 요소 크기가 충분하였고 계

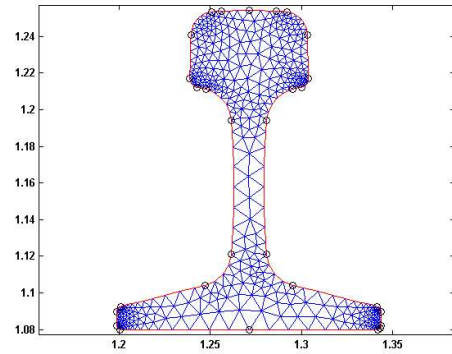


Fig. 3 Bi-dimensional discretization of the KS60 rail

산 시간도 작은 효과가 있었다. 고주파 대역에서는 모드 형상의 파장이 작아지므로 계산시간은 길어지지만 더 작은 크기의 요소를 사용하여야 할 것이다. 구한 분산선도 및 모드 형상을 확인하여 필요에 따라 더 작은 크기의 요소를 사용할 수 있다.

### 2.3 해석 결과 및 고찰

유도 초음파는 사용하는 주파수에 따라 전파속도가 달라지는 분산성을 가지고 있어서 대상체에 적용하기 전에 반드시 해당 대상체에 대한 분산선도를 구하여 분석하여야 한다. 분산선도는 크게 위상속도 분산선도와 군속도 분산선도로 나뉘게 되며, 군속도 분산선도는 실제로 전파하는 에너지 전파 속도를 나타내고, 위상속도 분산선도는 유도초음파의 발진 조건 및 전파하는 파동의 모드 형상을 고려하여 적절한 모드를 선택할 때 사용한다. 분산선도 계산시 결과값은 10 kHz에서부터 50 kHz 사이를 1 kHz 간격으로 구하여 그래프를 그렸다. Fig. 4는 파수 분산선도와 에너지의 전파속도인 군속도 분산선도 그리고 위상속도의 분산 선도를 보여 준다. 많은 모드들이 존재하는 것을 알 수 있고 분산의 정도는 모드마다 다르지만 매우 큰 분산특성도 보이는 것을 알 수 있다. 또한 서로 다른 모드가 유사한 속도를 가지고 전파하게 되어 모드의 중첩에 의한 효과로 정량적인 결함 평가가 매우 어려울 수 있다. Fig. 4(c)의 위상속도의 분산 선도 역시 레일에 매우 많은 모드들이 존재하는 것을 보여주고 있다. 이 모든 모드들이 레일의 검사에 적절한 것은 아니다. 첫째는 찾고자 하는 결함의 위치에 따라 어

편 모드들을 선택할 것인지에 대한 검토를 하여야 하고 둘째는 속도가 주파수에 의존하는 분산 특성을 보이지 않는 주파수 범위를 찾아서 발견

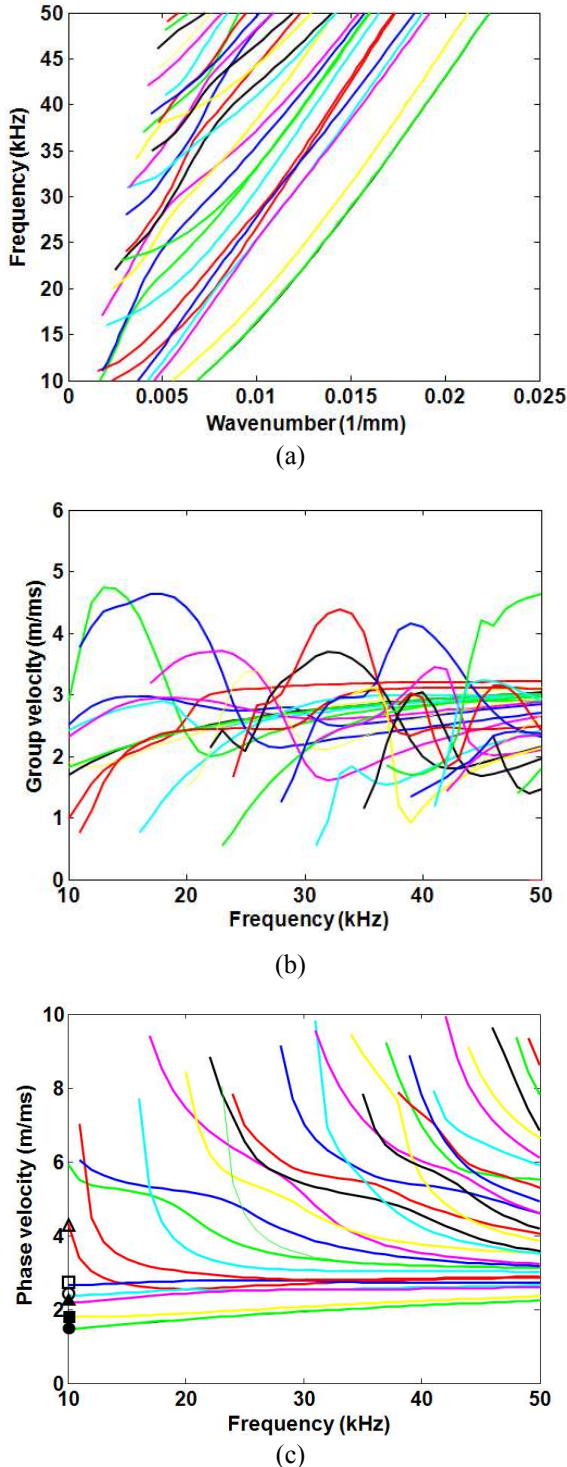


Fig. 4 Dispersion results for a KS60 rail for waves propagating along the rail running direction at frequencies between 10 kHz and 50 kHz: (a) wavenumber (b) group velocity (c) phase velocity

주파수를 선택하여야 한다. 이런 다양한 모드들이 존재할 때 이런 모드들은 서로 간섭을 일으키고 신호 분석을 어렵게 한다. 때로는 단일 모드가 가진 되어도 결함에서 모드 변환이 발생 하고 변환된 모드들끼리 간섭을 일으키게 됨으로 도착한 신호는 모드들의 중첩에 의해 위치에 따라 불규칙한 크기를 보여주기도 한다.

레일 분산 선도를 통해 확인한 것과 같이 레일에는 다수의 모드가 존재함으로 이런 간섭에 의한 효과를 줄일 수 있는 가진 방법 및 센서 시스템의 설계가 필요할 것이다.

Fig. 5는 또한 10 kHz에서의 6개의 모드의 모드 형상을 보여준다. 변형된 형상은 x-y 평면에서의 모드 형상을 보여주고 컨투어(contour)는 z방향 응력 분포를 보여준다. Fig. 4(c)의 위상 속도 분산선도에는 10 kHz에서 6개의 모드의 위상속도가 6가지 기호로 표시되어 있다. 모드 m2, m4, m5는 x-z 평면에 대하여 비대칭인 형상이고 m1, m3, m6은 대칭인 모드 형상을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 모드형상을 보면 모드에 따라서 레일의 두부(head), 저부(base) 또는 레일의 웹(web) 부위 등 레일의 특정 부위가 더 많이 가진되는 것을 알 수 있다. m2의 경우는 거의 단면의 모든 위치에서 변위가 발생하는 것을 보여준다. 이러한 정보는 다양한 위치에 존재하는 레일 결함을 검출

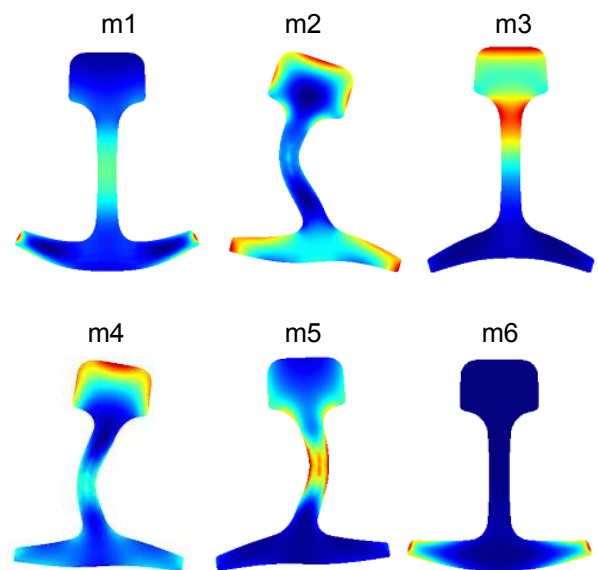


Fig. 5 First six cross-sectional mode shapes at 10 kHz marked in Fig. 4(c) as ● mode m1, ■ mode m2, ▲ mode m3, ○ mode m4, □ mode m5, △ mode m6

하기 위한 NDE 시험시 검출 신뢰성을 높일 수 있는 실용적인 정보 등을 제공한다. 특정 위치에 따라 그 위치에서 가진이 더 잘 되는 모드를 선택하여야 결함 검출 확률을 높일 수 있기 때문이다. 따라서 이런 특성의 이해는 레일 결함 검출을 위한 최적의 가진 및 수신 시스템의 설계에도 필수적이라고 할 수 있다.

결과적으로 저주파 대역의 유도 초음파 중 분산 특성이 작은 모드들을 사용 할 때 결함의 검출의 신뢰성을 높일 수 있고 신호 분석도 가능하리라 생각된다. 그러나 모드들의 간섭 효과 및 분산 특성으로 인하여 정량적인 결함 평가는 매우 어려울 것으로 판단된다. 따라서 향후 실험적 연구를 통하여 본 연구에서 확보한 분산 선도의 타당성을 평가하고 대상 크랙의 검출에 맞는 적절한 모드 선택 및 원하는 모드가 가진 될 수 있도록 가진 시스템을 적절히 설계하는 연구가 필요할 것이다. 또한 장거리 전파 특성이 좋은 모드의 분리를 위하여 감쇄 특성에 대한 해석 및 실험적 연구도 필요하다. 이러한 연구에 본 연구에서 개발한 분산 선도 해석 절차는 유용하게 사용되어 질 수 있을 것이다.

### 3. 결론

본 논문에서는 레일 내에 존재하는 크랙의 검출에 유도초음파를 적용하기 위한 기초 연구로서 레일내를 전파하는 유도초음파의 분산선도를 구하였다. SAFE법을 활용한 해석을 통하여 분산선도를 구하는 절차를 수립하였고 임의의 단면형상을 갖는 물체의 분산선도를 상용 프로그램의 기능을 활용하여 간편하게 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 레일의 분산선도로부터 다수의 모드의 존재로 인하여 적절한 모드의 선택이 매우 중요함을 알 수 있었다. 본 연구에 사용된 해석 방법은 향후 레일 검사를 위한 유도초음파 검사 장치 설계시 효과적으로 사용 될 수 있으며 적절한 센서 및 발진 방식의 설계에 효과적으로 사용 될 수 있을 것이다. 또한 임의의 단면형상을 갖는 빔이나 봉 형태의 긴 구조물내를 전파하는 초음파의 거동 해석에 간편하게 적용될 수 있다.

### 참고문헌

(1) Sawley, K. and Reiff, R., 2000, Rail Failure

Assessment for the Office of the Rail Regulator, Report No. P-00-070 Produced by Transportation Technology Center, Inc., Pueblo, Colorado, USA.

- (2) Wilcox, P. D., Pavlakovic, B. N., Evans, M. J., Vine, K. A., Cawley, P., Lowe, M. J. S. and Alleyne, D. N., 2003, "Long Range Inspection of Rail Using Guided Waves," in Review of Progress in Quantitative NDE, edited by D. O. Thomson and D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, Vol. 22, pp. 236~243.
- (3) Alleyne, D. N. and Cawley, P., 1992, "Optimisation of Lamb Wave Inspection Techniques," *NDT and E International*, Vol. 25, pp. 11~22.
- (4) Wilcox, P. D., Evans, M. J., Diligent, O., Lowe, M. J. S. and Cawley, P., 2002, "Dispersion and Excitability of Guided Acoustic Waves in Isotropic Beams with Arbitrary Cross Section," in Review of Progress in Quantitative NDE, edited by D. O. Thomson and D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, Vol. 21, pp. 203~210.
- (5) Pavlakovic, B. and Lowe, M., 2003, Disperse User's Manual, Imperial College London, London, UK.
- (6) Lagasse, P.E., 1973, "Higher-Order Finite Element Analysis of Topographic Guides Supporting Elastic Surface Waves," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 53, pp. 1116~1122.
- (7) Aalami, B., 1973, "Waves in Prismatic Guides of Arbitrary Cross Section," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 40, pp. 1067~1072.
- (8) Gavric', L., 1994, "Finite Element Computation of Dispersion Properties of Thin-Walled Waveguides," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 173 pp. 113~124.
- (9) Gavric', L., 1995, "Computation of Propagating Waves in Free Rail Using a Finite Element Technique," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 185 pp. 531~543.
- (10) Wilcox, P., Evans, M., Diligent, O., Lowe, M.J.S. and Cawley, P., 2002, "Dispersion and Excitability of Guided Acoustic Waves in Isotropic Beams with Arbitrary Cross Section," *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 21, pp. 203~210.
- (11) Volovoi, V.V., Hodges, D.H., Berdichevsky, V.L.

- and Sutyryn, V.G., 1998, "Dynamic Dispersion Curves for Non-Homogeneous, Anisotropic Beams with Cross-Section of Arbitrary Geometry," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 215, pp. 1101~1120.
- (12) Hayashi, T., Song, W.J. and Rose, J.L., 2003, "Guided Wave Dispersion Curves for a Bar with an Arbitrary Cross-Section, a Rod and Rail Example," *Ultrasonics*, Vol.41, pp. 175~183.
- (13) Wu, T.X. and Thompson, D.J., 1999, "Analysis of Lateral Vibration Behavior of Railway Track at High Frequencies Using a Continuously Supported Multiple Beam Model," *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 106, pp. 1369~1376.
- (14) Wu, T.X. and Thompson, D.J., 1999, "A Double Timoshenko Beam Model for Vertical Vibration Analysis of Railway Track at High Frequencies," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 224, pp. 329~348.
- (15) Wilcox, P., Evans, M., Pavlakovic, B., Alleyne, D., Vine, K., Cawley, P. and Lowe, M.J.S., 2003, "Guided Wave Testing of Rail," *Insight-NDT & Condition Monitoring*, Vol. 45, pp. 413~420.
- (16) COMSOL, User's Guide and Introduction (Version 3.3 by COMSOL AB 2007, <http://www.comsol.com/>, Most Recently Viewed 30th September 2010).
- (17) Predoi, M. V., Castaings, M., Hosten, B. and Bacon, C., 2007, "Wave Propagation Along Transversely Periodic Structures," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 121, pp. 1935~1944.