

균열의 고조파 발생에 대한 유한요소해석

Finite Element Analysis of Harmonics Generation by Cracks

양 승 용† 김 노 유*

Yang, Seung-Yong Kim, Nohyu

(논문접수일 : 2009년 9월 25일 ; 심사종료일 : 2009년 11월 25일)

요 지

균열에 초음파가 입사될 경우, 반사파와 투과파가 발생한다. 균열에 의해 발생한 반사파와 투과파는 구조물 내부의 균열을 검출하기 위한 유용한 정보로 사용된다. 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여, 4가지 균열의 경사각도에 대해 균열 주위의 모니터링 포인트에서의 동적변위를 계산하였다. 이를 바탕으로 푸리에 변환을 적용시켜 균열 주위에서 위치에 따라 주파수 특성이 변하는 경향을 조사하였다. 모델은 2차원 평면응력 경우를 고려하였고, 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS/Explicit을 사용하였다.

핵심용어 : 닫힘균열, 유한요소해석, 초음파, 고조파

Abstract

When ultrasound propagates to a crack, transmitted and reflected waves are generated. These waves have useful information for the detection of the crack lying in a structure. In this paper, using finite element analysis, displacements round a inclined crack were obtained for 4 different inclination angles. Fourier transformation is applied to the results to research the frequency characteristics depending on the various locations around the crack. 2-dimensional plane stress model is considered, and finite element software ABAQUS/Explicit is used.

Keywords : closed crack, finite element analysis, ultrasound, harmonics

1. 서 론

구조물 내부 균열의 위치와 크기를 검출하기 위하여 초음파를 이용한 방법이 널리 이용되어 왔다(Thomas 등, 2006). 최근에는 반사파 또는 투과파의 기본주파수(입사주파수) 뿐만 아니라 2차 이상의 고조파 성분의 크기를 이용한 금속 열화 검출 기법이 연구되고 있다(Kim 등, 2008). 선형 초음파로는 관찰할 수 없는 미세한 균열에 대하여 재질이나 기하학적 비선형 성에 의하여 발생하는 고조파 성분을 이용하여 균열을 검출하고자 하는 연구들이 진행되고 있다(Biwa 등, 2007; Donskoy 등, 2001; Kawashima 등, 2002). 그림 1은 균열면이 압축 응력 상태에서만 닫히게 되고, 따라서 균열에 작용하는 응력-변형률(또는, 표면력-변위) 곡선이 그림

과 같이 인장과 압축에 대하여 다른 성질을 가지고 있음을 나타낸다. 이에 따라 균열에 가해진 변위는 균열이 압축상태에서만 전달되고, 변위의 파형이 그림과 같을 때 푸리에 변환 결과는 기본주파수 외에 기본 주파수의 정수배 되는 주파수(고조파)에서 성분을 가지게 된다.

접촉균열의 응력-변형률 비선형 관계는 접촉면의 조도 및 재질의 항복응력 등에 관계된 것으로 생각된다. 접촉면에 가

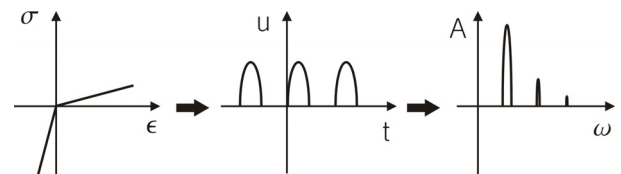


그림 1 균열의 비선형 응답 특성

† 책임저자, 정회원 · 한국기술교육대학교 기계정보공학부 교수
Tel: 041-560-1459 ; Fax: 041-560-1459
E-mail: ysy@kut.ac.kr

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

해진 수직 압축응력의 크기가 크면 접촉면은 밀착되고 접촉면의 비선형 정도도 변화할 것으로 생각된다. Biwa 등은 접촉면의 강성을 압축응력 값을 변화시키면서 초음파를 이용하여 측정하였다(Biwa 등, 2002).

Kawashima 등(2002)은 닫힘균열의 수직응력-변형을 관계를 비선형 적으로 고려하였고 투과된 초음파의 2차 고조파 성분의 크기와 기본파의 크기를 균열에 가해진 압축잔류응력 크기에 따라 조사하였다. Thomas 등(2006)은 압축응력 상태에서 닫힘 현상이 발생하는 미세한 균열에 대하여 닫힘 상태의 접촉면을 작은 기공의 배열로 모델링하고, ABAQUS를 이용하여 미세균열에서의 초음파의 반사현상을 시뮬레이션하였다. Kim 등(2008)은 초음파의 비선형 계수를 정의하고 합금강의 열화도에 따라 비선형 정도가 변화하는 경향을 실험적으로 조사하였다.

미세한 특정 형상의 균열을 포함한 실제 물체에 대한 실험은 유용한 결과를 얻을 수 있지만, 연구의 어려움으로 인해 실행하기가 쉽지 않다. 한편 수치모델을 이용한 유한요소해석은 원하는 특정 조건을 가정하고, 이에 대한 계산 결과를 관찰함으로써 경향을 파악하는데 널리 이용되고 있다.

본 논문에서는 균열 검지의 기초 연구로서, 재료의 비선형성을 제외할 때 균열의 기하학적 특성에 의한 초음파 변화 특성을 조사하였다. 입사파에 대한 균열의 경사 각도를 달리 해가며 유한요소해석을 수행하였다. 균열을 중심으로 한 원 주상의 점들에서 변위를 모니터링하였고, 그 값을 푸리에 변환하여 기본 주파수 f 와 2차 고조파 $2f$ 에서의 성분 크기 값을 조사하였다. 재료는 순수 탄성재질을 가정하였고, 물체는 2차원 평면응력 조건을 가정하였다. 결과로부터 주파수 성분은 특정 각도에서 상대적으로 크게 나옴을 확인할 수 있다.

2. 유한요소모델

해석 대상으로 고려한 형상을 그림 2에 나타내었다. 가로 길이는 0.4m이고, 세로 길이는 0.2m이다. 평판의 가운데에 20mm 길이의 균열을 수직선에 대하여 반시계 방향으로 θ 각도를 이루도록 배치하였다. 본 논문에서 고려한 θ 의 값은 0° (즉 균열방향이 수직), 15° , 30° , 45° 의 4가지 경우이다. 15° 와 30° 의 경우는 균열의 방향이 입사파의 진행방향에 대하여 비대칭적인 경우를 조사하기 위함이다. 응력이 없는 상태에서 균열의 두 면 사이의 거리는 0이고, 압축응력이 작용하면 접촉이 이루어진다. 접촉마찰계수 값은 0.2를 가정하였다. 평판의 재료는 순수탄성재질을 가정하였고, 탄성계수는 200GPa, 푸아송 비는 0.3을 가정하였다. 해석에는 2차원 4

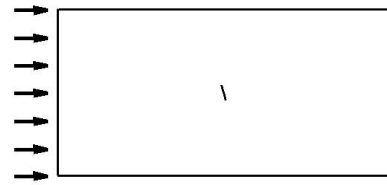


그림 2 고려한 평판의 형태. 균열의 각도 $\theta = 15^\circ$ 인 경우

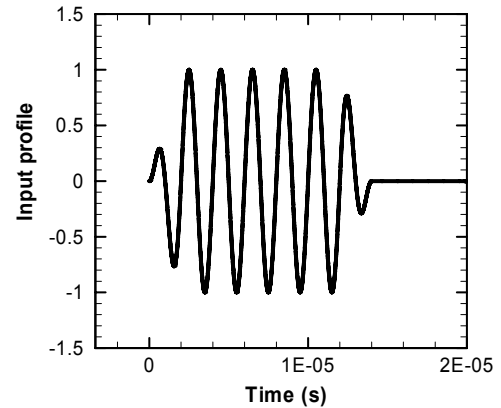


그림 3 입력된 변위의 형태(수직축의 값은 무차원임)

절점 평면응력 요소를 사용하였고, 균열 양쪽 면에 각각 200개의 유한요소가 배치되었으며, 전체 평판에 대하여 697081개의 요소가 사용되었다. 균열로부터 멀리 떨어진 위치에서 유한요소의 크기를 약간 증가시켜 계산 용량을 낮추었으나, 요소의 크기가 너무 클 경우, 시간에 따른 변화를 포착하지 못하므로, 요소의 크기는 최대 0.5mm로 제한하였다. 초음파 하중을 가하기 위하여 평판의 왼쪽 경계에 최대 진폭 1 μ m의 변위를 수평 방향으로 0.5MHz로 가하였다. 입력변위의 형태는 그림 3에 나타내었다. 고려한 평판의 위와 아래 면은 수직 방향으로 변위가 구속되었으며, 따라서 수직방향으로 주기 경계조건이 적용된 경우로 생각할 수 있다. 평판의 오른쪽 자유 경계에서 반사된 파가 균열에 도달하기 전에 계산을 종료하였다. 유한요소해석은 상용 소프트웨어 ABAQUS/Explicit v6.7.1을 사용하였다(ABAQUS, 2007).

3. 해석 결과

균열에서 멀리 떨어진 위치 (x, y) 에서의 수평변위를 $u_x(x, y)$ 라고 하면 이는 근사적으로 균열이 없을 경우 초음파에 의해 발생하는 변위 $u_{wc}(x, y)$ 와 균열에 의해 발생한 변위 $u_{scatter}(x, y)$ 의 합이라고 가정하기로 한다(금속재료공학 대사전, 1997).

$$u_x(x, y) \approx u_{wc}(x, y) + u_{scatter}(x, y) \quad (1)$$

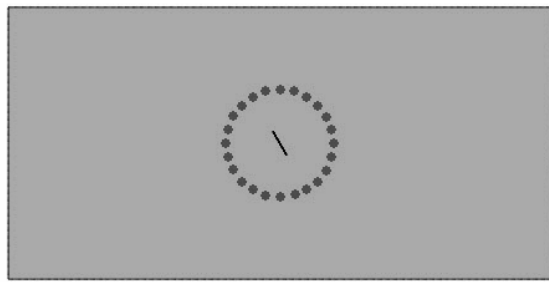


그림 4 균열 둘레의 모니터링 위치

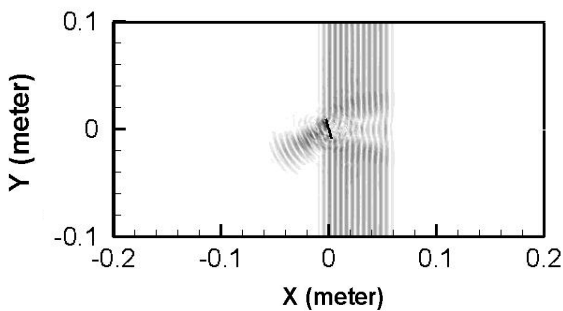
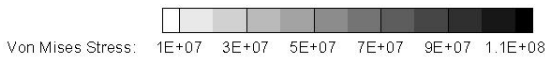


그림 5 시간=50 microsec에서의 Von Mises 응력 분포

위의 가정은 균열의 크기가 다른 길이 차원보다 작아 균열을 하나의 점으로 생각할 수 있을 때 엄밀하며, 본 논문의 경우에는 근사적으로 성립한다고 가정하였다. 따라서 순수하게 균열에 의해 발생하는 변위는 식 (1)을 정리하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_{scatter}(x,y) = u_x(x,y) - u_{wc}(x,y) \quad (2)$$

그림 4에 나타낸 것과 같이 균열 둘레의 원호 상에 24개의 모니터링 위치를 정하여 균열이 없는 경우와 균열이 있는 경

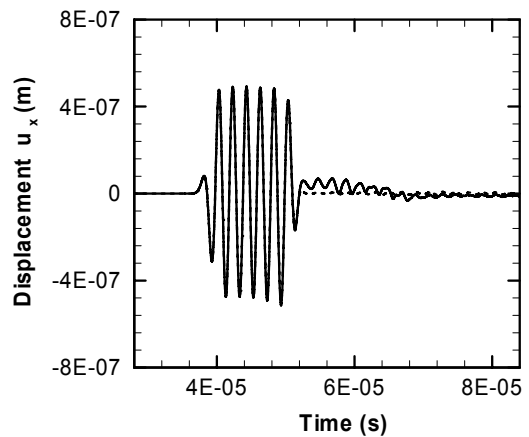
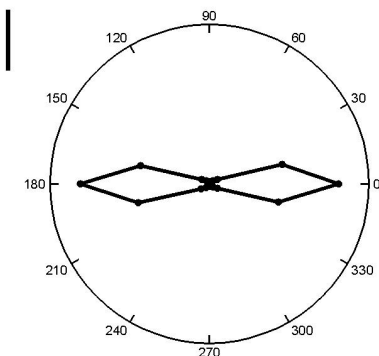


그림 6 수평 변위-시간 결과의 예(실선은 $\theta=45^\circ$ 균열이 있는 경우이고, 점선은 균열이 없는 경우이다.)

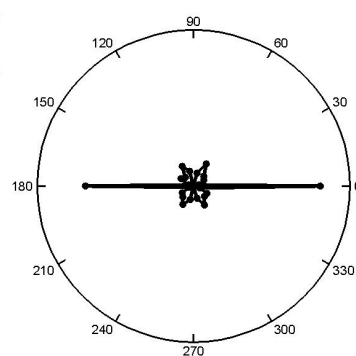
우 각각에 대하여 변위를 구하였고, 그 차이를 이용하여 균열에 의해 발생한 변위를 계산하였다. 이 신호를 Numerical recipes(Press 등, 1988)의 FFT(Fast Fourier Transform) 서브루틴을 이용하여 푸리에 변환하여 주파수 성분을 구하였다. 시간 데이터의 개수가 충분치 않을 경우 주파수 곡선은 부드럽게 나오지 않으므로 충분한 수의 0값을 추가하였다(Figliola 등, 2006). 그림 5는 $\theta=15^\circ$ 인 경우의 유한요소해석 결과의 예이다.

그림 6은 $\theta=45^\circ$ 경우에 모니터링 포인트 중 균열 중심으로부터 수직 상향에 위치한(거리 0.0395미터) 점에서의 수평 변위를 시간에 대하여 나타낸 것이다.

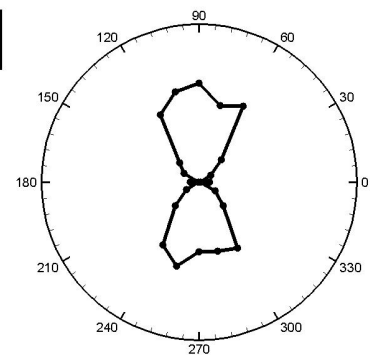
그림 7(a)~그림 10(c)에 4가지 균열 방향($\theta=0^\circ$, $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$)에 대하여 유한요소해석 결과로부터 얻어진 변위의 수평성분을 FFT하여 계산한 기본 주파수(입사파의 주파수 f)에서의 푸리에 변환 계수 A_1 과 2차 고조파($2f$)에서의 푸리에 변환 계수 A_2 , 그리고 그 둘 사이의 비 A_2/A_1 값을 균열 둘레의 극좌표 상에 표시하였다. 각 그림의 왼쪽 위에 균열의 방향을 작은 그림으로 나타내었다.



(a) $\theta=0^\circ$ 인 경우의 기본주파수의 크기



(b) $\theta=0^\circ$ 인 경우의 2차고조파의 크기



(c) $\theta=0^\circ$ 인 경우의 2차고조파/기본주파수 비

그림 7



그림 8



그림 9



그림 10

$\theta = 0^\circ$ 인 경우 균열 면에 수직인 방향에서 기본주파수와 2차고조파의 성분이 다른 각도 보다 매우 크게 나옴을 볼 수 있다. 이러한 현상은 초음파의 반사와 투과에 의해 발생한 것으로 생각된다. 한편 A_2/A_1 의 분포는 균열의 방향과 평행한 방향에서 가장 크고 최대값은 0.094이었다.

나머지 3가지 균열 방향에 대한 결과를 관찰할 때 반사파 영역(즉 2사분면과 3사분면)에서는 균열면에 수직인 방향에서 주파수 성분이 크게 나왔고, 투과파 영역(즉, 1사분면과

4사분면)에서는 수평방향에서 주파수 성분이 크게 발생함을 볼 수 있었다. A_2/A_1 의 값은 모든 경우에 대하여 입사파에 수직인 방향에서 크게 나오는 경향이 미약하게 관찰되나 정확한 경향을 판별하기는 어려웠다. 다만 최대값은 $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 에 대하여 각각 $A_2/A_1 = 0.064, 0.146, 0.192$ 로 계산되었다.

현재 계산에서 푸리에 변환에 사용된 변위는 수평성분 u_x 이며, 수직변위는 상대적으로 작은 값으로 간주하여 무시하

였으나 향후 변위의 수직성분까지 포함하여 반경방향으로의 변위성분을 이용한 주파수 분석이 필요하리라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 균열에 초음파가 입사될 때 발생하는 변위를 유한요소법으로 계산하였다. 균열의 각도는 $\theta=0^\circ$, $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ 의 4가지 경우를 고려하였고, 균열둘레의 모니터링 포인트에서의 균열에 의해 발생한 변위를 구한 후 푸리에 변환하여 각 지점에서의 주파수 특성을 조사하였다. 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 반사영역에서 기본주파수 및 2차 고조파 성분이 크게 나오는 위치는 균열면에 수직한 방향이다.
- ② 투과영역에서 기본주파수 및 2차 고조파 성분이 크게 나오는 위치는 입사파가 가해진 방향(수평방향)이다.
- ③ 2차고조파 성분과 기본주파수 성분의 비는 대략 0.064 ~ 0.192로 계산되었다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-00467).

참 고 문 헌

금속재료공학 대사전 (1997) 집문사, p.677.
 ABAQUS (2007) *Users Manual v. 6.7.1*, HKS Inc.
 Biwa S., Hiraiwa, S., Matsumoto, E. (2007) Stiffness

Evaluation of Contacting Surfaces by Bulk and Interface Waves, *Ultrasonics*, 47, pp.123~129.

Donskoy, D., Sutin, A., Ekimov, A. (2001) Nonlinear Acoustic Interaction on Contact Interfaces and its use for Nondestructive Testing, *NDT&E International*, 34, pp.231~238.

Figliola, R.S., Beasley, D.E. (2006) *Theory and Design for Mechanical Measurements*, John Wiley and Sons, Inc., pp.58~61.

Kawashima, K., Omoto, R., Ito, T., Fujita, H., Shima, T. (2002) Nonlinear Acoustic Response Through Minute Surface Cracks: FEM Simulation and Experimentation, *Ultrasonics*, 40, pp.611~615.

Kim, C. S., Park, I.K., Jang, K.Y. (2009) Nonlinear Ultrasonic Characteristic of Thermal Degradation in Ferritic 2.25Cr-1Mo steel, *NDT&E International*, 42, pp.204~209.

Kim, J.Y., Baltazar, A., Rokhlin, S.I. (2004) Ultrasonic Assessment of Rough Surface Contact Between Solids from Elastoplastic Loading-Unloading Hysteresis Cycle, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52, pp.1911~1934.

Press, W.H. Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. (1988) *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, pp.407~424.

Thomas, R., Drinkwater, B.W., Liaptsis, D. (2006) The Response of Rough Partially Closed Cracks to Ultrasound at Oblique Incidence, *ECNDT*, pp.Th.3.3.4.