

마이크로파 X-밴드에서의 중단 개방 동축선 센서를 이용한 금속표면균열의 비접촉 검출 연구

Study on Non-Contact Detection of Surface Cracks of the Metals Using an Open-Ended Coaxial Line Sensor at X-band

양승환*, 김동석*, 김기복*[†], 김종헌**, 강진섭***

Seung Hwan Yang*, Dong-Seok Kim*, Ki-Bok Kim*[†], Jong-Heon Kim** and Jin-Seob Kang***

초 록 본 연구는 금속의 표면균열 검출을 위해 마이크로파를 이용한 비파괴측정에 관한 것이다. X-band 대역인 11 GHz 주파수와 중단 개방 동축선 센서를 이용하여 금속 표면에 주사된 마이크로파의 반사계수를 측정하여 균열 여부 및 균열의 폭을 판단하게 된다. 또한 반사계수의 최대값과 최소값의 차이를 매개변수 (K)로 하여 균열의 깊이를 평가하였는데 K값과 균열의 깊이는 선형 관계를 보였다. 따라서 본 연구는 중단 개방 동축선 센서를 이용한 비접촉식 금속표면균열 평가의 가능성을 보여주었다.

주요용어: 금속표면균열, 마이크로파, 중단 개방 동축선 센서, 비접촉 검출, 반사계수

Abstract In this paper, a non-contact microwave technique was presented to detect the surface crack of the metals. An open-ended coaxial cable line was used as a sensor at 11 GHz, and the reflection coefficients were measured by scanning along the metal surface including artificial surface cracks. A parameter, the K value which was defined as the difference between maximum and minimum reflection coefficients, was measured and used to estimate the crack depth. A linear relationship between the K value and crack depth was found. This study showed that non-contact detection of the surface cracks of metals is possible using the open-ended coaxial line sensor at X-band.

Keywords: Surface Crack of Metal, Microwave, Open-Ended Coaxial Line Sensor, Non-Contact Detection, Reflection Coefficient

1. 서 론

금속 재료는 다양한 구조물의 주요 재료로 활용되는 산업 소재이다. 이러한 금속 재료는 피로나 충격에 의해서 파괴될 수 있는데 이와 같은 현상은 재료의 균열에서부터 시작된다. 따라서 항공기 및 선박의 동체, 발전소의 배관, 교량 등과 같이 안전 유지가 필요한 구조물의 경우 재료 표면의 균열을 조기에 발견하고 조치하는 것이

매우 중요하다.

금속 표면의 균열을 검사하는 방법으로는 초음파를 이용한 비파괴평가 방법이 널리 이용되고 있다. 초음파는 공기 중에서의 감쇠가 매우 크기 때문에 대상체와 초음파 센서 사이에 음향 임피던스 매칭을 위한 접촉 매질이 필요하다. 따라서 대상체의 형상이 불규칙하거나 온도가 매우 높을 경우 또는 음향이 전달되기 어려운 재질 등에 의해 피복된 금속의 경우 초음파를 이용해 균열을

검출하는 데는 한계가 있다[1]. 이와 같이 접촉이 어려운 조건에서 금속 표면의 균열을 측정하고자 할 경우 마이크로파를 이용한 표면검사 방식은 초음파검사의 단점을 보완하는 새로운 방법이 될 수 있다.

마이크로파를 이용한 금속표면결함 측정 기술은 1960년대 이후 여러 연구자들에 의하여 연구되고 있다. 마이크로파를 이용한 재료 검사에는 종단 개방 도파관(open-ended waveguide)을 이용한 방법이 많이 연구되고 있다[2,3]. 그러나 도파관을 이용할 경우 고유의 차단주파수가 생기기 때문에 차단주파수 이하의 마이크로파의 전달이 불가능하다는 단점이 있다. 또한 센서 입구에 분포하는 전계의 방향이 주 모드(dominant mode)에 대해서 한 방향으로만 나타나기 때문에 전계가 균열의 길이 방향으로 진행하게 될 경우 금속의 표면균열을 검출하는 것이 어렵다[4,5].

본 연구는 마이크로파를 이용한 금속 균열 측정의 단점을 보완하기 위한 종단 개방 동축선 센서(open-ended coaxial line sensor)의 활용 가능성을 확인하고자 수행되었다. 종단 개방 동축선 센서는 센서의 입구에서 전계 방향이 중심도체로부터 외부도체 방향으로 방사 형태로 분포하기 때문에 센서의 스캔 방향과 무관하게 균열을 검출할 수 있다. 또한 차단주파수가 없기 때문에 검출에 필요한 동작주파수가 높아지고 센서의 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다[6-9]. 본 연구의 마이크로파 주파수는 X-band 대역(11 GHz)이 이용되었으며 금속표면균열의 폭과 깊이에 따른 종단 개방 동축선 센서의 반사계수 측정을 통하여 금속표면균열의 검출 가능성을 검토하였다.

2. 표면균열 측정 원리

종단 개방 동축선 센서에서 발생된 마이크로파가 금속 표면을 향하여 진행할 때 금속 표면이 센서의 근거리 장(near field) 영역에 존재할 경우 TEM파(transverse electromagnetic wave)가 도체로 정규 입사하는 것으로 간주할 수 있고 이 때 발생하는 표면 전류는 맥스웰 방정식으로부터 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H} \quad (1)$$

여기서 \vec{J}_s 는 표면 전류, \hat{n} 는 금속 표면으로부터 수직인 법선 단위 벡터, \vec{H} 는 자계 성분이다. 이러한 현상을 동축선 센서에서 방사된 마이크로파의 분포로 나타내면 Fig. 1과 같이 전계의 방향은 중심 도체에서 외부 방향으로, 자계는 전계와 수직인 방향으로 분포한다[10].

동축선 센서가 균열을 만나게 되면 표면 위를 흐르는 전류가 균열을 따라 흐르게 되면서 전력 손실이 발생한다(Fig. 2(a)). 이 때 전력 손실량은 전계 내에서 균열의 영향으로 인하여 증가하게 되며 동축선 센서의 중심도체가 균열의 가장자리에 도달했을 때 최대가 된다(Fig. 2(b)). 동축선 센서의 중심도체가 균열 내로 들어가면 균열 내에서는 자계가 형성이 되지 않으므로 전력손실은 감소하고 균열의 중앙에 도달했을 때 최소가 된다(Fig. 2(c)). 센서의 중심도체가 균열을 빠져나오는 과정에서는 센서가 균열에 진입할 때 발생하는 경우와는 반대의 과정으로 전력 손실 변동이 발생한다.

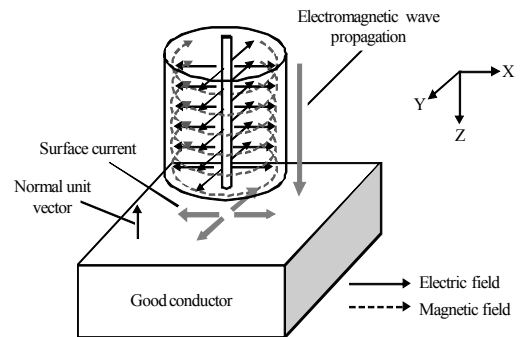


Fig. 1 Distribution of electric and magnetic fields by the coaxial cable line sensor

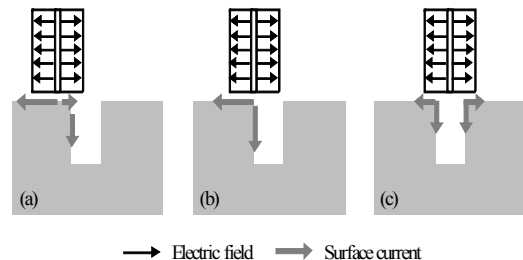


Fig. 2 Change of surface current by the interaction between the coaxial line sensor and the surface crack of metal

3. 실험 장치 및 방법

3.1. 중단 개방 동축선 센서의 제작

센서는 반강체형(semi-rigid type)의 동축 케이블 (YET-085/50-TP, YeEun-Tech, Korea)을 이용하여 15 mm 길이로 정밀하게 평행 절단하고 SMA 커넥터와 결합하여 제작하였다. 센서로 이용된 케이블의 최대 작동 주파수는 20 GHz 이다. Fig. 3에 도시한 것과 같이 케이블의 중심도체는 SPCW(silver plated copper clad steel wire)로 되어 있고 유전층은 PTFE(PolyTetraFluorEthylene), 피복도체는 주석도금 구리(tinned copper)로 제작되었다.

3.2. 실험 방법

제작된 센서를 통하여 X-band 대역의 마이크로파를 송수신하기 위하여 회로망 분석기(HP8720D, Agilent, USA)를 이용하였다. 표면균열을 생성한 금속 시편을 고정된 다음 시편의 표면 위를 센서가 수평하게 이동할 수 있도록 실험 장치를 제작하였으며 회로망 분석기와 결합된 시험 장치는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 센서 고정부에는 x,

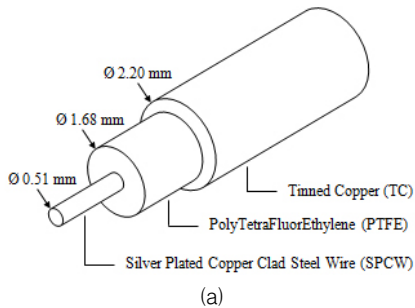


Fig. 3 Coaxial line sensor (a) dimension and materials of coaxial line and (b) photograph of manufactured sensor

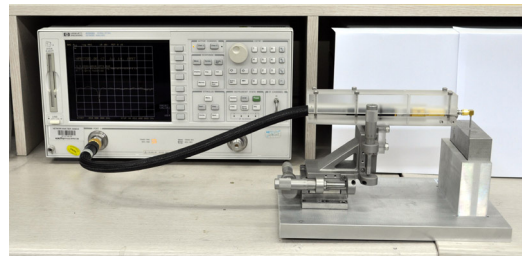
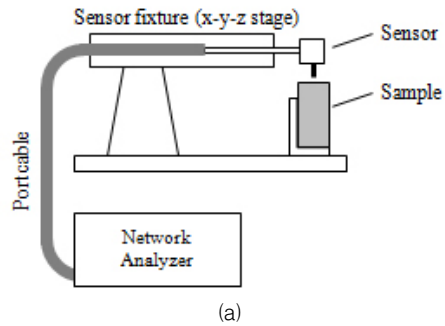


Fig. 4 Microwave measurement set-up (a) schematic diagram and (b) its photograph

y, z축으로 1/50 mm 단위로 정밀하게 이동할 수 있도록 버니어 마이크로미터를 장착하였다.

센서 고정부를 이용하여 센서의 끝을 금속 시편과 0.2 mm 간격까지 접근시킨 다음 표면균열에서 2.2 mm 떨어진 지점부터 총 4.4 mm를 0.2 mm 간격으로 이동(Fig. 5에서 X 방향)하면서 회로망 분석기의 반사계수 측정 모드(S11)를 이용하여 스캔한 다음 각각의 위치에서 반사계수를 측정하였다. 금속 시편은 스테인리스강을 이용하여 가로, 세로, 높이가 각각 70, 30, 70 mm로 가공하였고, 그 위에 폭(w) 0.2, 0.5, 1.0 mm, 깊이(d) 1, 2, 3, 4 mm의 총 12 가지 균열을 인위적으로 가공하였다(Fig. 5).

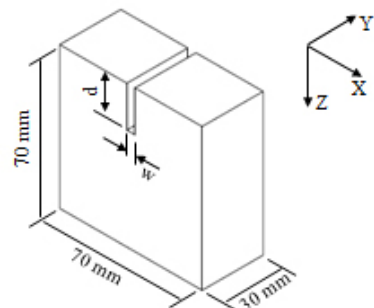


Fig. 5 Shape of the specimen with the surface crack

사용된 주파수는 실험 장치에서 이용이 가능한 마이크로파 X-band 대역(8~12 GHz) 중에서 1 GHz의 여유를 두면서 가장 높은 주파수인 11 GHz를 선택하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 표면균열에서의 반사계수 변화

표면균열이 있는 임의의 시편에 대하여 동축선 센서를 균열의 수직 방향(X 방향)으로 이동하면서 반사계수를 측정할 결과 Fig. 6과 같이 균열의 중심부분(X=0)에서 반사계수의 크기가 가장 작은 좌우 대칭의 패턴을 확인할 수 있었다. 측정 원리에서 예상되었던 바와 같이 센서가 균열에 근접해감에 따라서 반사계수가 점점 증가하다가 균열 사이로 센서의 중심도체가 진입하면서 반사계수는 크게 감소하게 되며 균열의 중심부에서 반사계수는 최소가 된다. 센서의 중심도체가 균열을 빠져 나가는 경우 센서가 균열에 진입할 때와는 반대의 패턴으로 반사계수가 변화하게 된다.

4.2. 균열의 폭과 깊이에 따른 반사계수 변화

균열의 폭과 깊이가 서로 다른 시편에 대한 반사계수 변화는 Fig. 7(a) - (c)에서 보는 바와 같다. 표면균열에 의해서 측정되는 반사계수는 균열의 중심을 기준으로 대칭 형태를 보이기 때문에 실험은 균열의 중심까지만 수행하였고 나머지는 대칭인 것으로 가정하여 그래프를 완성하였다.

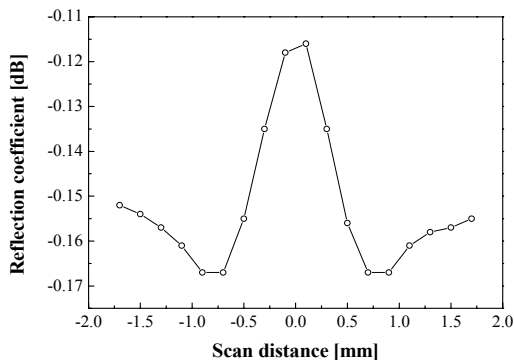


Fig. 6 Change of reflection coefficients at the surface crack of selected specimen (The center of crack is 0.0 mm)

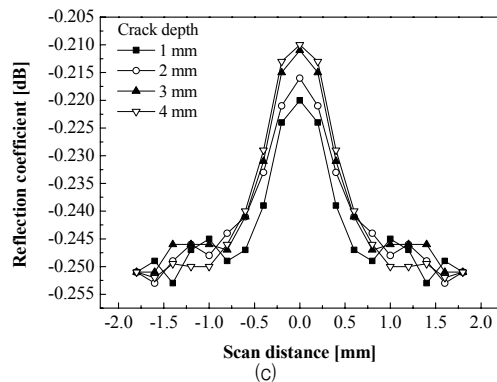
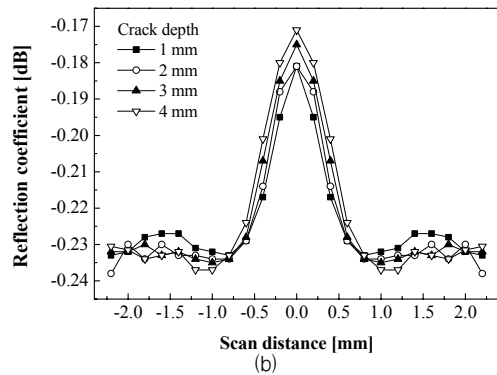
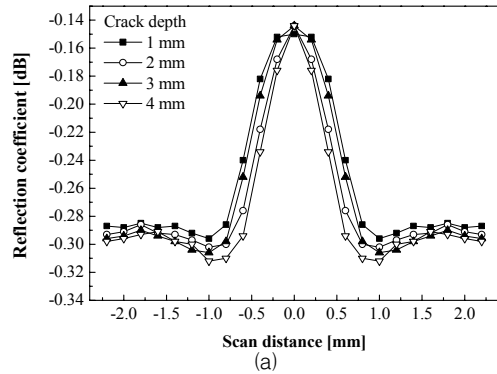


Fig. 7 Change of reflection coefficient at various surface crack conditions of test specimen. (a) 1.0 mm, (b) 0.5 mm and (c) 0.2 mm of crack width

다. 균열의 폭과 깊이에 관계없이 센서가 표면 균열 위를 지나가면서 표면의 경계면까지 반사계수가 점차 증가하다가 경계면 이후 반사계수가 급격히 감소하였다.

균열의 폭과 반사계수의 상관관계를 분석한 결과 균열의 중심에서의 반사계수는 균열의 폭이 1.0 mm일 때 -0.15 ~ -0.14 dB, 0.5 mm 일 때

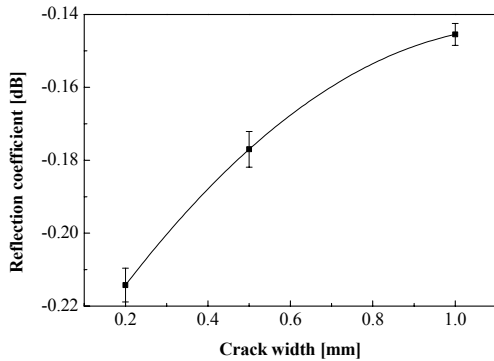


Fig. 8 Change of reflection coefficient at the center of crack by the crack width

-0.18 ~ -0.7 dB, 0.2 mm 일 때 -0.22 ~ -0.21 dB로 균열의 폭이 좁아질수록 반사계수의 절대값이 증가하였다. Fig. 8은 균열 폭에 따른 균열 중심에서의 반사계수 평균과 표준편차를 표시한 것이다. 반사계수 평균값(Γ)과 균열의 폭(w_c)은 식(2)와 같은 2차식이 관계를 보여주었다. 이러한 현상은 균열의 폭이 좁아지면 균열의 내부에서 상쇄되는 전자기장의 크기가 줄어들게 되어 반사계수 감소 효과가 줄어들는 것으로 설명될 수 있다. 반면에 균열로 진입하는 초기 과정에서 반사계수는 균열의 폭이 넓은 시편에서 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 균열로 유입되는 표면 전류량이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서 측정된 반사계수를 이용하여 균열의 폭을 검출할 수 있을 것으로 판단된다.

$$w_c = 113.74\Gamma^2 + 52.55\Gamma + 6.24 \quad (2)$$

한편, 균열의 깊이와 반사계수의 상관관계를 검토하기 위하여 다음과 같은 이론적인 고찰을 수행하였다. 균열의 깊이가 증가할수록 균열 내로 유입되는 표면 전류량이 증가한다고 가정하면 센서가 균열의 경계로 접근할 때 균열이 깊은 금속 표면에서의 반사계수가 증가할 것이다. 반대로 센서의 중심도체가 균열 내로 진입하게 되면 균열 내의 표면 전류량 증가에 따른 전계 감쇄현상도 커지게 되어 반사계수 감소는 커지게 될 것이다. 따라서 균열의 깊이가 증가 할수록 센서가 균열로 진입하는 초기에 측정되는 반사계수와 센서의 중심도체가 균열의 중심부에 위치할 때 측

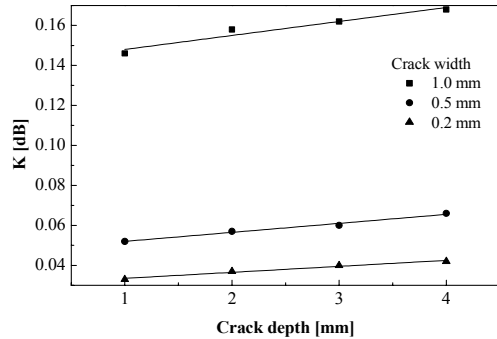


Fig. 9 Change of K value by the crack depth (K: difference of maximum and minimum reflection coefficient)

정되는 반사계수의 차이가 클 것으로 예상된다. 이에 따라 측정된 반사계수의 최대값과 최소값의 차를 이용하여 균열의 깊이를 평가하고자 하였다. 반사계수의 최대값과 최소값의 차를 K라고 할 때 균열의 깊이와 K값의 관계는 Fig. 9에서 보는 바와 같다. 동일한 균열 폭에서 균열의 깊이가 증가 할수록 K값은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

균열의 깊이와 K값의 관계는 균열의 폭이 1.0, 0.5, 0.2 mm일 때 식(3), (4), (5)와 같이 높은 선형성을 보여주었다. 따라서 측정된 반사계수를 이용하여 균열의 깊이를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

$$d_{1.0} = 142.9K - 20.1 \quad (3)$$

($R^2=0.92$) at 1.0 mm crack width

$$d_{0.5} = 222.2K - 10.6 \quad (4)$$

($R^2=0.98$) at 0.5 mm crack width

$$d_{0.2} = 333.3K - 10.2 \quad (5)$$

($R^2=0.97$) at 0.2 mm crack width

5. 결론

본 연구에서는 마이크로파 대역에서 종단 개방 동축선 센서를 이용하여 금속 표면의 균열 측정 가능성을 검토하였다. 회로망 분석기와 반강형 동축 케이블을 이용한 센서, 그리고 센서를 금속 표면 위에서 정밀하게 수평 이동시키기 위한 센서 고정부로 실험 장치를 구성하였다. 균열의 폭

과 깊이가 다른 12 종류의 표면균열 금속 시편을 제작한 후 11 GHz의 마이크로파 주파수에서 균열 위를 센서가 지나갈 때 측정되는 반사계수를 분석하였다. 균열의 폭이 1.0 mm에서 0.2 mm로 감소함에 따라 반사계수는 -0.14 dB에서 -0.22 dB로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 측정된 반사계수의 최대값과 최소값의 차이를 K라고 할 때, 균열의 폭이 동일한 경우 균열의 깊이가 증가함에 따라 K값이 선형적으로 증가하였다. 따라서 마이크로파와 중단 개방 동축선 센서를 이용할 경우 금속표면균열의 폭과 깊이를 모두 측정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 비접촉으로 측정이 가능하여 초음파 기술을 적용하기 힘든 형상이 불규칙한 대상체나 고온 재료 또는 음향이 전달되기 어려운 재질 등에 의해 피복된 금속의 표면균열 검출에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

후기

본 연구과제는 한국표준과학연구원의 차세대 전자파 측정표준기술사업(사업번호: 12011016)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. G. Bøving and D. Vedligeholdsforening, "NDE Handbook: Non-Destructive Examination Methods for Condition Monitoring," Butterworths (1989)
- [2] F. Mazlumi, S. H. H. Sadeghi and R. Moini, "Detection of surface cracks of arbitrary shape in metals using an open-ended waveguide probe," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 615, pp. 491-497 (2001)
- [3] R. Zoughi, S. I. Ganchev and C. Huber, "Measurement parameter optimization for surface crack detection in metals using an open-ended waveguide probe," *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Vol. 2, pp. 1391-1394 (1996)
- [4] C.-Y. Yeh and R. Zoughi, "A novel microwave method for detection of long surface cracks in metals," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 43, No. 5, pp. 719-725 (1994)
- [5] R. Zoughi, S. I. Ganchev and C. Huber, "Microwave measurement-parameter optimization for detection of surface breaking hairline cracks in metals," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 14, No. 5, pp. 323-337 (1998)
- [6] N. Qaddoumi, S. Ganchev and R. Zoughi, "A novel microwave fatigue crack detection technique using an open-ended coaxial line," *Precision Electromagnetics Measurements*, pp. 59-60 (1994)
- [7] Y. Ju, M. Saka and H. Abé, "Microwave nondestructive detection of delamination in IC packages utilizing open-ended coaxial line sensor," *NDT & E International*, Vol. 32, No. 5, pp. 259-264 (1999)
- [8] M. Saka, Y. Ju, D. Luo and H. Abe, "A method for sizing small fatigue cracks in stainless steel using microwaves," *The Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 45, No. 4, pp. 573-578 (2002)
- [9] 김기복, 김동석, 김종현, "X-band 대역에서의 중단 개방 동축 케이블선을 이용한 금속표면균열의 비파괴 검출 연구", *한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집*, pp. 230-236 (2007)
- [10] J. D. Jackson, "Classical Electrodynamics," John Wiley & Sons, p. 266 (1999)