(논 문) - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 19, No. 3 (1999. 6)

변조 고주파에 의한 금속표면 결함 검출

Detection of the Defect on the Metal Surface Using the Modulated Microwave

주광태*, 정성혜**, 송기영**, 김진옥***
G. T. Joo*, S. H. Jung**, K. Y. Song** and J. O. Kim***

초 록 고주파를 이용하여 금속 표면의 원형 프레스 결함, 원형 관통 결함 및 선형 프레스 결함 등을 조사하였다. 본 실험에서는 3kHz로 변조된 9.2GHz의 주파수를 사용했으며,조사 방법으로는 반사법, 투과법, 주파수 고정법 등을 이용하였다. 고주파가 원형 프레스 결함과 원형 관통 결함에서 반사 신호의 크기가 큰 폭으로 변했다. 원형 프레스 결함에서는 반사 신호에 의한 결함의 크기가 원래 크기의 2.5배로 확대되어 측정되었으며, 원형 관통 결함에서는 결함의 크기가 두 배로 확대되어 측정되었다. 또한, 선형 결함에서 고주파 반사신호의 크기는 결함폭의 증가와 함께 커졌으며, 결함 깊이가 2.4mm일 때 결함폭이 50mm에서, 결함 깊이가 1.2mm 및 0.45mm에서는 결함폭이 55mm일 때 각각 최대값을 나타냈다.

주요용어 : 고주파, 변복조, 혼 안테나, 직각 사각형 도파관, 변조 주파수

Abstract The defects on the metal surface, such as the ended circular pressed hole, the penetrated circular drilled hole, and the linear hollow lanes have been investigated by means of the microwave. In this experiment, frequency was set at 9.2GHz with 3kHz modulation, and the methods of reflection, transmission, fixed carrier frequency, and mod-demodulated technique have been used for investigating defects. The magnitudes of the microwave signals have been changed at the ended circular pressed hole and the penetrated circular drilled hole. The defect sizes that were estimated from the reflected microwave signals had the dimensions enlarged by twice the original size of the penetrated circular drilled hole and 2.5 times the original size of the ended circular pressed hole. The magnitudes of the reflected microwave signals from the linear hollow lane have increased with expansion of the width of the notch. In the linear hollow lane with the depth of 2.4mm, the reflected microwave signals versus the defect widths had a maximum value at the defect width of 50mm, and in the linear hollow lanes with the depths of 1.2mm and 0.45mm, the reflected microwave signals versus the defects widths had the maximum values each at the defect depths of 55mm.

Keywords : microwave, mod-demodulated, horn antenna, rectangular waveguide, modulation frequency

1. 서 론

고주파(microwave)는 300MHz에서 300GHz (1m~1mm의 파장) 주파수 범위를 지닌 전자파로서 현재 통신, 전자공학, 전력, 식품, 의료 등 전 산업 분야에 다양하게 이용되고 있으나 비파괴시험에 적용하는 예는 적은 편이다. 그러나 고주파는 물질의 전도도, 투자율 및 유전율에 따라 물질내에서 고주파의 흡수와 투과 그리고 반사, 굴절, 산란 등의 효과가 다르다는 특성으로 비파괴검사에 많은 응용이 기대된다[1,2].

(접수 : 1998. 7. 20) * 고려공업검사(주),** 한남대학교 물리학과(Department of Physics, Hannam University, Taejon 300-791), *** 미리본 21(주)

고주파 시스템은 보통 발진기, 전송선로 및 송신안테나로 구성된 송신 시스템과 수신안테나, 전송선로, 증폭기 및 수신기로 구성된 수신시스템으로 구성되어 있다. 이외에 공진기, 공동기, 마이크로 스트립 선로, 하이브리드 및 고주파 집적 회로와 같은 요소로 구성되어진다. 고주파를 이용한 비파괴검사법에는 고주파 발생장치 및 검출기에 대한 시험체 위치와 상호작용 방법에 따라 반사법, 투과법, 산란법, 정상파법 및 와전류법 등이 있고 고주파 발생기의 주파수 가변 여부에 따라 주파수 가변법과 주파수 고정법이 있으며 고주파 신호 방식에 따라 반사파와 투과파를 측정하는 반송파법, 펄스법, 고주파를 매개로 하고 다른 주파수로 변조한 후 다시 그 주파수로 복조하는 변복조법 등이 있다[2].

그러므로 일반적으로 고주파는 투자율과 도전율이 큰 재료에 있어서 표피효과 때문에 투과 깊이가 작으므로 유전율이 큰 유전체의 재료에서 흡수와 투과 등을 이용한 비파괴검사 연구가 이루어지고 있다. 최근 고주파에 의한 비파괴검사 연구 사례를 살펴보면 1993년 G. d'Ambrosio 등은 12.5GHz~18GHz(Ku band)에서 반사법으로 fiber glass를 탐상하였고[3], Sasan Bakhtoari 등은 X-band에서 도파관을 이용하여 주파수 가변법 및 반사법으로 유전체 시료의 두께를 측정하였다[4]. 그리고 1994년 Nachappa Gopalsami는 W band에서 반사법과 투과법으로 에폭시 복합 시료내부의 결함형상을 측정하였다[6]. 1995년 Gordon Kent는 8-14GHz에서 공동 공진기를 이용하여 투과법으로 유전체의 유전율을 측정하였으며[7] Richard G. Geyer는 7.7~13GHz에서 초전도 캐비티를 이용하여 투과법으로 수정과 테프론의 유전율을 측정하는[8] 등 유전체에 대한 연구가 대부분이다.

그러나 유전율이 작고 전도도와 투자율이 큰 금속에 대한 연구로서는 1994년 C. Y. Yeh 등이 38GHz rectangular 도파관을 이용하여 반사법으로 금속 표면 결함내 유전체 삽입 유무에 따라 반사신호 변화율을 비교 측정[9]한 실험을 하였다.

고주파에 의한 비파괴검사는 금속 표면 결함 검출에 많이 이용되는 자분탐상시험이나 액체 침투 탐상과 같이 어떤 정보 매체를 시험체 표면에 도포하지 않으며, 시험체에 고주파 입사로 물질과의 상호 작용 결과를 고주파 신호 크기가 위상으로 알 수 있고 초음파 탐상에서와 같이 접촉 매질이 필요없다는 등의 장점[2]를 지니고 있어 고주파에 의한 비파괴검사의 실용성이 필요하다고 볼 수 있다.

본 실험 연구에서는 9.2GHz의 주파수에서 고정하여 3kHz로 변조한 후 혼 안테나로 전파하여 원형 프레스 결함에서 투과되는 투과파의 진폭을 측정하는 방법과 혼 안테나에서 전파된 고주파가 다양한 결함의 형태에 따라 변화하는 반사파의 진폭을 측정하는 실험을 하였다.

이러한 변복조 고주파를 이용하여 결함의 크기 및 형태에 따른 반사파의 진폭 변화를 측정하여 실험체의 결함을 측정할 수 있는지 여부를 실험하였다.

2. 실험

2.1. 금속 시료의 형태

2.1.1. 원형 결함 시료

1) 원형 프레스 결함 시료(specimen with ended circular pressed hole)

크기가 107mm×107mm이고 두께가 1.5mm인 연철판의 중앙에 직경 22mm, 깊이 1.5mm로 원형 프레스 하여 Fig. 1의 금속시료 1과 같이 표면이 열려있고 아래 면이 막힌 원형 프레스 결함을 제작하였다.

2) 원형 관통 결함 시료(specimen with penetrated circular hole)

크기가 292mm×80mm 이고 두께가 1.2mm인 강철판 중앙에 드릴로 직경 9mm의 원형관통 구멍을 가진 시료로서 Fig. 1의 금속시료 2와 같다.

2.1.2. 선형 표면 결함 시료(Specimens with Ended Linear Surface Crack)

크기가 200mm×300mm이고 두께 1.7mm의 강철판 위에 두께(결함 깊이)가 각각 0.45mm, 1.2mm 및 2.4mm인 강철판을 두 개씩 나란히 놓아 결함폭을 만들었고 결함의 길이는 모두 150mm로 하여 Fig. 2와 같이 선형 결함 1, 2 및 3을 제작하였다. 이때의 결함폭은 0mm에서 80mm까지 조절할 수 있도록 하였다.

2.2. 실험장치

본 연구에서 사용한 고주파 실험 장치는 Fig. 3과 같이 고주파 발생장치, 변조기, 신호발생기, 방향성 결합기, 복조기, 혼 안테나, 도파관 및 lock-in 증폭기 및

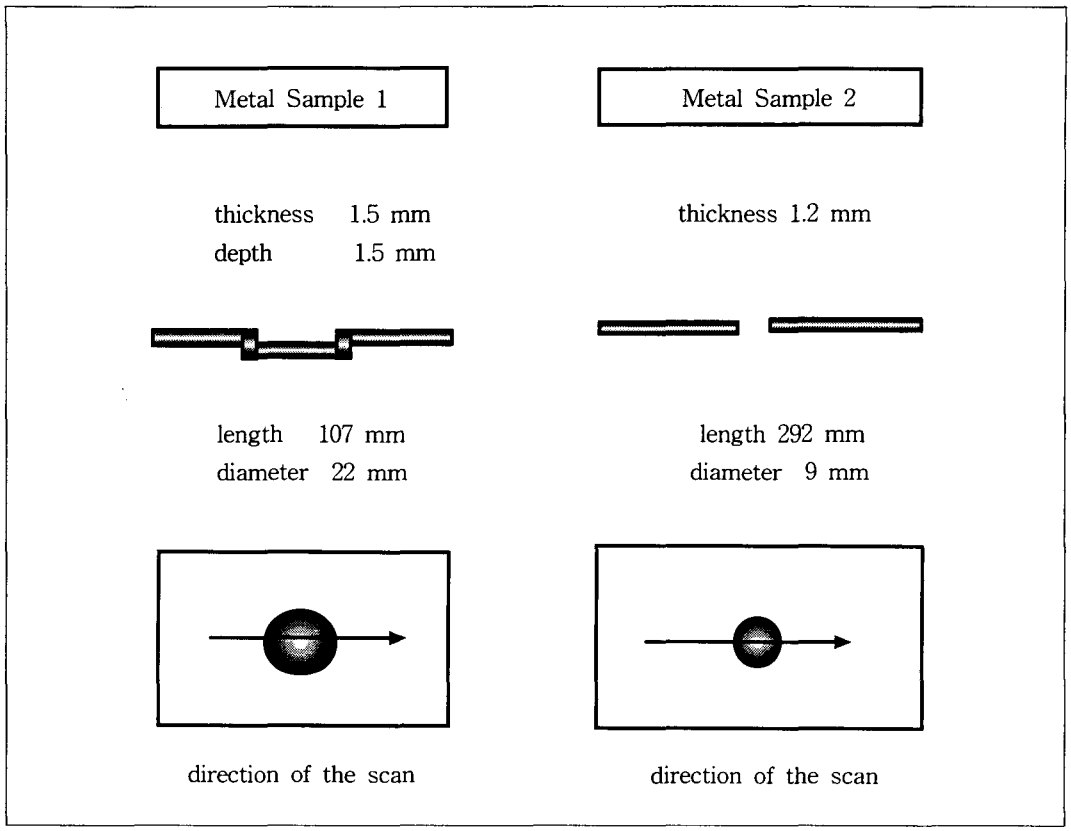

Fig. 1 Specification of the samples with ended circular pressed hole and the penetrated circular hole

디지털 전압계로 구성되어 있다.

사용한 직각 사각형 도파관은 X-band (8.02GHz ~ 12.4GHz)로서 면적이 10mm×20mm이며, 혼(Horn)은 밑넓이가 75mm×55mm이고 높이가 120mm인 것을 이용하였다. 주사 방향은 혼의 55mm 면쪽과 도파관의 10mm 면쪽인 H field 방향으로 놓았다.

2.3. 시료의 측정

금속 결함 형상에 따른 고주파 신호의 반사파와 투과파의 변화를 알기 위하여 혼과 직각 사각형 도파관 밑면을 금속 시료면과 평행으로 하여 9.2GHz의 고주파를 3kHz로 변조시켜 시료면에 수직으로 입사시키고 5mm 간격으로 수평 주사(scanning)하였다. 이때 수신기에서 검출되는 반사파와 투과파를 3kHz로 복조하고 lock-in 증폭기를 사용하여 주파수 동기식 측정법으로 잡음을 줄이고 감도를 높였으며 디지털 전압계를 컴퓨터에 연결하여 측정하였다.

2.3.1. 원형 프레스 홈 결함

원형 프레스 홈으로 제작된 시료를 혼 안테나와 직각 사각형 도파관 사이에 배치시키고 원형 홈을 중심으로 하여 292mm 길이를 약 5mm 간격으로 주사하면서 반사파 신호 크기와 투과파 신호 크기를 각각 측정하였다. 이때 혼과 시험체면과의 거리를 7mm로 하고 반사파의 크기를 측정하였다. 원형 프레스의 홈이 없는 연철판(두께: 1.5mm)에 대한 3kHz로 변조된 9.2GHz 고주파의 반사파 진폭은 800mV이였다. 직각 사각형 도파관의 밑면과 홈이 있는 면의 거리를 7mm로 하여 원형 프레스의 홈이 없는 면에서의 투과파를 측정하였을 때 진폭은 500mV이였다.

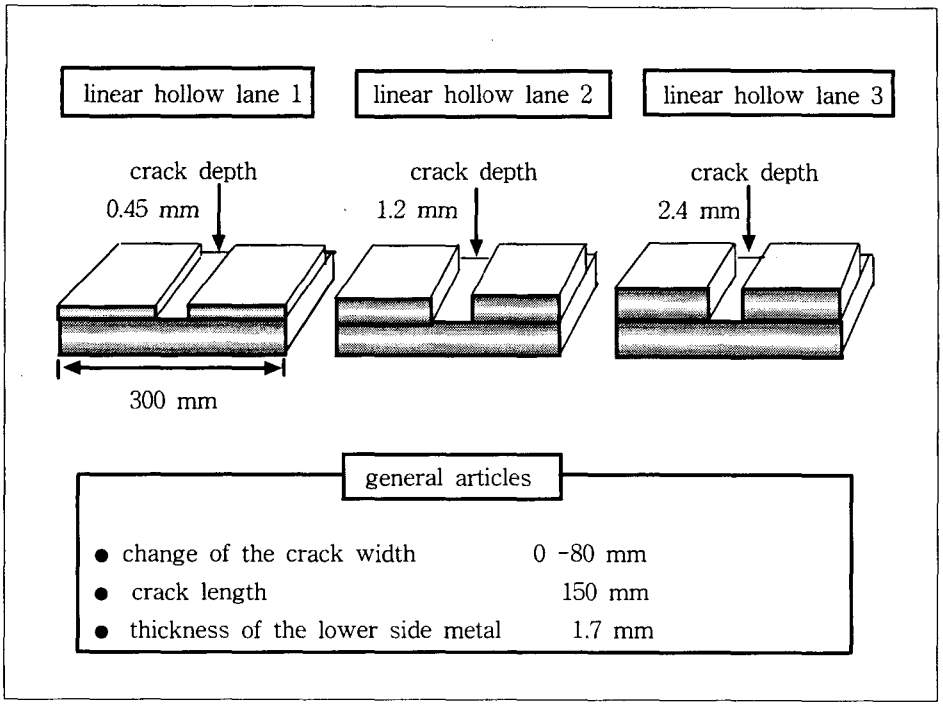

Fig. 2 Specification of the samples with ended linear surface crack

2.3.2. 원형 관통 결함

9mm 직경의 원형 관통 홈을 중심으로 하여 60mm 길이를 5mm 간격으로 혼 안테나를 수평으로 움직이면서 반사 신호 크기를 측정하였다. 결함이 없는 강철판(두께: 1.2mm)의 반사파의 진폭은 200mV이였다.

2.3.3. 선형 표면 결함

선형 결함 1, 2 및 3의 각 시료의 결함 위에 송수신용 혼 안테나를 위치시키고 결함 간격을 0에서 80mm 까지 5mm 간격으로 변화시키면서 반사파 신호의 크기를 측정하였다. 이때 혼의 밑면과 시료면까지의 거리는 7mm 이고, 바닥면에서 혼 안테나의 높이가 7mm 떨어져 결함이 없는 강철판(두께: 1.7mm)에서의 반사파의 진폭은 100mV이었으며, 바닥면위에 선형 결함의 시료를 올려 놓은 후 다시 혼 안테나 까지의 거리를 7mm로 한 후 3kHz로 변조된 고주파 9.2GHz의 반사파의 진폭은 25~28mV이였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1에서 금속 연철판 시료의 중앙에 프레스한 원형 결함에 대하여 혼 안테나를 사용하여 측정한 반사파와 혼 안테나로 전파하여 직각 사각형 도파관을 사용하여 측정한 투과파의 측정 결과는 Fig. 4와 같다. 투과신호는 원형 결함부분에서 고주파 신호의 진폭이 평면 바닥 접시 모양으로 아래로 낮아 졌으며, 투과파는 신호가 아주 미약하여 반사파에 비해 증폭도를 높여 주어야만 그 신호를 검출할 수가 있었다. 반사파는 엎어진 종 모양으로 진폭이 커져, 중앙의 프레스한 원형 결함에서 반사가 커짐을 보여 주었다. 혼 안테나의 사용으로 고주파의 전기장이 발산되어 결함의 직경은 실제 보다 크게 측정되었으며, 결함이 없을 경우의 연철판에 대하여 반사파는 800mV였는데 프레스한 원형 결함의 중심에서는 3000mV까지 증폭되어 원형 결함의 홈에서는 결함이 없는 면과 비교하여 약 3.7배의 반사파의 증가를 보여 주었다. 그리고 원형 프레스의 홈이 없 는 면에서의 반사파의 진폭 800mV를 기준으로 할 때 원형결함 직경이 50mm로 나타나 실제 시료에 대한 원형 결함 직경 22mm보다 2.5배 정도 확대되어 결함크기

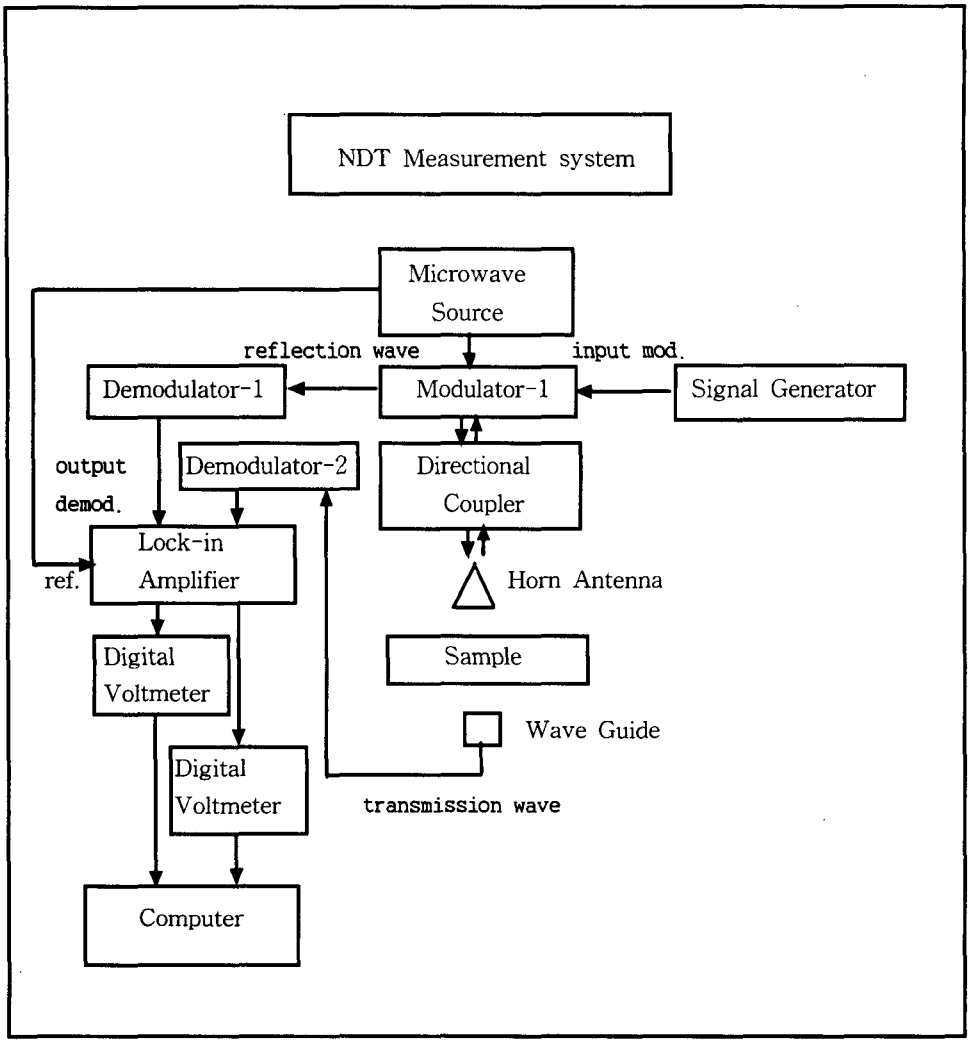

Fig. 3 Experimental setup

가 증폭됨을 보여주었다.

Fig. 5는 시료 중앙에 9mm의 관통 구멍을 뚫은 Fig. 1의 금속시료 2에 대하여 혼 안테나를 사용하여 반사파를 측정한 결과이다. 중앙 구멍 부분에서 반사파가 15mV로 측정되었다. 이것은 관통 홀에서 고주파가 투과되어 반사파가 작아짐을 보여준다. 결함에 대하여 변화를 보인 반사신호 64mV를 기준으로 할 때, 구멍 크기가 18mm로 측정되어 실제의 구멍크기인 9mm보다 2배 확대되어 측정되었으며, 이는 혼 안테나를 사용하여 고주파의 반사파를 측정할 경우 전기장이 발산되어 시료의 결함이 확대되는 효과가 나타났다고 보여진다.

두께 1.7mm의 바닥 강철판 위에 두께가 각각 0.45mm, 1.2mm 및 2.4mm인 강철판을 2개씩 나란하게 놓고 결함폭을 0~80mm 범위에서 바꾸어 가면서, 반사파 신호를 측정한 결과는 각각 Fig. 6.1, Fig. 6.2 및 Fig. 6.3과 같다. 이 경우에 선형 표면 결함의 길이는 150mm로 고정하였다. 선형 결함의 경우 Fig. 6.1, 6.2 및 6.3에서 보는바와 같이 고주파 반사신호의 크기는 결함의 깊이에 따라 다소 차이가 있으나 결함 폭의 증가와 함께 커지는 현상을 나타내고 있다. 그러나 결함의 폭이 측정 혼 안테나의 길이(55mm) 보다 클 경

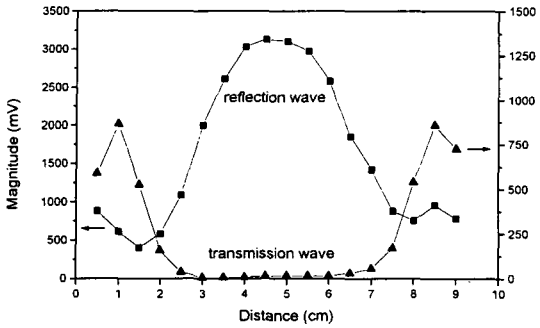

Fig. 4 Measured data for the sample with the ended circular pressed hole

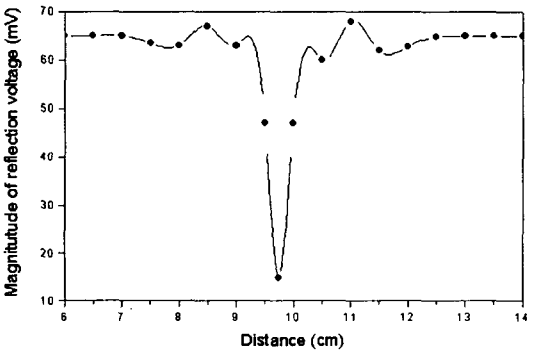

Fig. 5 Measured data for the sample with the penetrated circular hole

우 반사신호는 더 이상 증가하질 않거나 다소 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 6.1에서 보는바와 같이 결함 깊이가 0.45mm인 선형 결함에서는 결함폭에 따라 고주파 신호의 크기도 증가하다가 결함폭이 55mm일 때 최대값을 나타냈고 그 이상에서는 일정값을 유지했다. 또한 결함 깊이가 1.2mm(Fig. 6.2)와 2.4mm(Fig. 6.3)에서는 결함폭에 대한 고주파 반사신호 크기의 변화는 같은 모양을 보여 주고 있으며, 결함 깊이가 1.2mm와 2.4mm일 경우 결함 폭이 55mm와 50mm에서 고주파 반사신호의 최대값을 나타내고 있다.

4. 결 론

9.2GHz 고정 주파수에서 3kHz로 변조한 고주파를 표면이 열린 원형 및 선형 결함 형태의 금속 시료에 혼

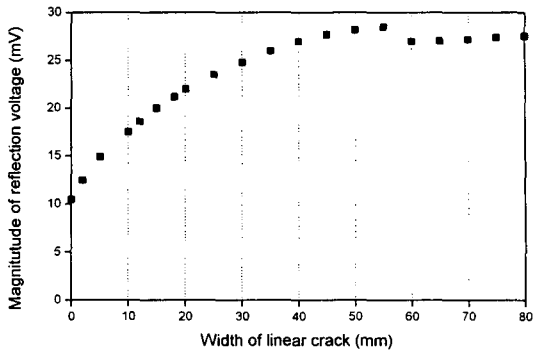

Fig. 6.1 Measured data for the sample with the two-dimensional surface crack depth of 0.45mm

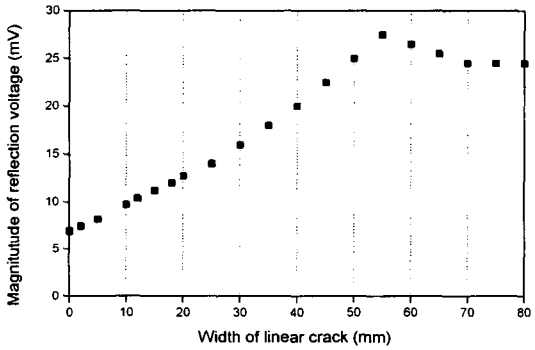

Fig. 6.2 Measured data for the sample with the two-dimensional surface crack depth of 1.2mm

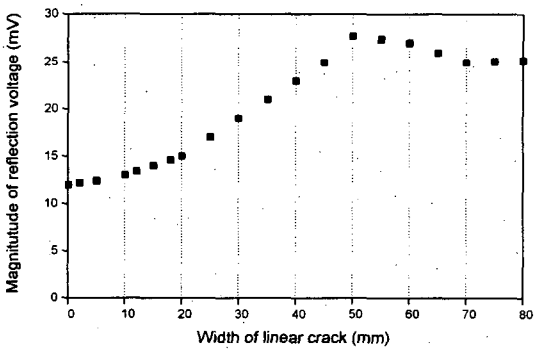

Fig. 6.3 Measured data for the sample with the two-dimensional surface crack depth of 2.4mm

안테나 또는 직각사각형의 도파관으로 주사시켜 반사신호 진폭 크기를 측정한 결과는 다음과 같다.

1) 직경 22mm이고 깊이 1.5mm인 원형 프레스 결함에서 반사신호 진폭은 3.7배 변화되었고 결함의 크기는 2.5배정도 확대되었으며, 직경 9mm이고 깊이 1.2mm인 원형 관통 결함에서의 결함크기는 2배로 확대되어 나타났다.
2) 고주파 반사 신호의 크기는 선형 결함에서 결함폭의 증가와 함께 커지는 현상이 나타났다.

위의 결과 금속 표면 결함 크기 및 형상에 따라 고주파 반사 신호의 크기 변화가 나타났다. 따라서 변조된 고주파를 이용하여 전도율이나 투자율이 큰 금속에 대하여 결함을 탐색할 수 있다

참고문헌

[1] 金榮海역, 工業用 마이크로파 應用技術, 機電硏究九社, (1993)
[2] William L. Rollwitz "Microwave Inspection", Handbook of Material Inspection, Southwest Research Institute, pp. 202-230, (1989)
[3] G. d' Ambrosio, R Massa, M. D. Migiore, A. Ciliberto, and C. Sabatino, "Microwave defect detection on low-loss composites", Materials Evaluation, Feb., pp. 285-289, (1993)
[4] Sasan Bakhtoari, Evaluation I. Ganchev and Reza Zoughi, "Microwave swept-frequency optimization for accurate thickness or dielectric property monitoring of conductor-backed composites", Materials Evaluation, June, pp. 740-743, (1993)
[5] Chin-Yung Yeh, E. Ranu, and Reza Zoughi, "A novel microwave method for surface crack detection using higher order waveguide modes", Materials Evaluation, June, pp. 676-681, (1994)
[6] Nachappa Gopalsami, Sasan Bakhtiari, Stephen L. Dieckman, Apostolos C. Raptis, and Matthew J. Lepper, "Millimeter-wave imaging for non-destructive evaluation of materials", Material Evaluation, March, pp. 412-416, (1994)
[7] Gordon Kent, "Non-destructive permitivity measurement of substrates", GDK Products, Proceedings of 1995 CPEM, pp. 352-357, (1995)
[8] Richard G. Geyer and Jerzy Krupka, "Dielectric properties of materials at cryogenic temperatures and microwave frequencies", Proceedings of 1955 CPEN, pp. 350-351, (1995)
[9] Stoyan I. Ganchev, Resa Zoughi, Christian Huber, Robert J. Runser, and Emarit Ranu, "Microwave method for locating surface slot-crack tips in metals", Materials Evaluation, May, pp. 598-603, (1996)