

[논문] - 비파괴검사학회지
*Journal of the Korean Society
 for Nondestructive Testing*
 Vol. 27, No. 5 (2007. 10)

복합 유도전류-누설자속법과 고밀도 홀센서배열에 의한 니켈 코팅 인코넬 시험편의 비파괴검사

NDT of a Nickel Coated Inconel Specimen Using by the Complex Induced Current - Magnetic Flux Leakage Method and Linearly Integrated Hall Sensor Array

전종우*, 이진이**†, 박덕근***

Jong-Woo Jun*, Jin-Yi Lee**† and Duk-Keun Park***

초 록 전자기적인 방법을 이용한 비파괴검사는 금속의 표면 및 표면 근방의 균열을 탐상하는데 매우 유용하다. 그러나, 강자성체, 상자성체 또는 강자성체와 상자성체 조식이 혼재되는 경우가 발생하여 기존의 비파괴검사법에 의하면 탐상신호의 해석에 어려움이 많다. 또한, 경우에 따라서는 국부적인 자성체의 존재를 유사결함으로 오해 또는 큰 결함을 국부적인 자성체의 존재로 오해할 수 있다. 한편, 원자력 발전소의 구조물 소재로 중요하게 사용되고 있는 Inconel은 결함 발생시 Nickel로 피막 처리한 후 연장 사용하게 된다. 이때, 상자성체인 Inconel과 강자성체인 Nickel의 혼재에 의하여 결함을 탐상하기 곤란하다. 본 연구에서는 Inconel 부재, Nickel 코팅부위 및 경계면에 존재하는 결함을 탐상하기 위한 방법으로써, 복합 유도전류-누설자속법과 고밀도 홀센서 배열을 이용한 라인스캔형 자기카메라를 제안하고, 탐상 가능 결함의 깊이 및 정량 평가 가능성에 대하여 보고한다.

주요용어: 자기카메라, Inconel, Nickel 피막, 결함, 비파괴검사, 강자성체, 상자성체

Abstract Nondestructive testing (NDT) by using the electromagnetic methods are useful for detecting cracks on the surface and subsurface of the metal. However, when the material contains both ferromagnetic and paramagnetic materials, it is difficult for NDT to detect and analyze cracks using this method. In addition the existence of a partial ferromagnetic material can be incorrectly characterized as a crack in the several cases. On the other hand a large crack has sometimes been misunderstood as a partially magnetized region. Inconel 600 is an important material in atomic energy plant. A nickel film is coated when a crack appears on an Inconel substrate. Cracks are difficult to detect on the combined material of an Inconel substrate with a nickel film, which are paramagnetic and ferromagnetic material respectively. In this paper, a scan type magnetic camera, which uses a complex induced current - magnetic flux leakage (CIC-MFL) method as a magnetic source and a linearly integrated Hall sensor array (LIHaS) on a wafer as the magnetic sensors, was examined for its ability to detect cracks on the combined material. The evaluation probability of a crack is discussed. In addition the detection probability of the minimum depth was reported.

Keywords: Magnetic Camera, Inconel, Nickel Coating, Crack, NDT, Ferromagnetic, Paramagnetic

1. 서론

원자력 발전 설비와 같은 대형기기 구조물은 신뢰성이 충분히 보증되어, 안전하다고 확인되면 경제성이 허락하는 한 사용기간을 연장하여 유효하게 이용 가능하다. 이러한 손상허용(damage tolerance) [1,2]적 개념은 많은 자원과 에너지를 투입하여 건설된 원전기기의 유효이용, 환경보전의 관점에 비추어보면 매우 중요하다. 하지만 현실적으로는 사용온도, 환경, 부하조건 등에 의하여 경년적 열화가 발생할 가능성이 있고, 더욱이 그 예측이 곤란한 일도 있어 큰 안전여유도를 남겨놓은 상태에서 폐기되는 경우가 있다. 또한, 예상하지 못했던, 또는 예상보다 큰 손상이 진행하여 사고에 이르는 경우가 있으며, 이것은 손상 기구의 해명이 충분하지 않고 그 정량적 예지가 부정확한 것에 기인하며, 고품위 안전성의 관점에서 보면, 긴급한 해결이 강력하게 요구되고 있다. 손상허용공학에서 중요시하는 기술중 하나가 보다 미소한 결함을 검출하고 정량적으로 평가하며 경시적인 균열 map 데이터베이스를 구축하는 기술로서, 기존 방법들의 한계 극복을 위하여 새로운 미소결함 비파괴 검사기술이 요구된다.

한편, 원자력발전소 기계설비의 구조재는 강자성체, 상자성체 또는 조직의 변화로 강자성체와 상자성체 조직이 혼재되는 경우가 발생하여 기존의 와전류탐상법에 의하면 탐상신호의 해석에 어려움이 많고, 경우에 따라서는 국부적인 자성체의 존재를 유사결함으로 오해 또는 큰 결함을 국부적인 자성체의 존재로 오해할 수 있다.

본 연구에서는 웨이퍼상에 선형으로 배열된 고밀

도 자기센서(LIHAS, linearly integrated hall sensor array)[3]를 이용한 스캔형 자기카메라[4-9]를 이용한 강자성체, 상자성체 그리고 이들 조직이 혼재된 시험편의 표면 및 이면결함 탐상법을 제안한다. 자원(磁源, magnetic source)으로서 유도전류와 누설자속을 동시에 여기할 수 있는 방법, 즉 복합 유도전류-누설자속법(이하 CIC-MFL법, complex induced current - magnetic flux leakage method)을 적용하였다. Inconel 600으로 된 상자성체 판재에 니켈 코팅에 의하여 국부적인 강자성체 조직을 형성한 시험편을 이용하여 제안된 탐상법의 유용성을 검증하였다.

2. 원리

2.1. 자기카메라

자기카메라는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 자원, 대상체, 2차원 배열의 자기센서, 3차원 형상의 자기렌즈, 아날로그-디지털 변환기, 인터페이스, 컴퓨터 및 모니터로 구성된다[4-9]. 이러한 구성에 의하면, 균열의 존재에 기인하는 시험편 근방의 누설자속이 자기렌즈에 집중되고, 배열된 자기센서에 의하여 전기신호로 변환된다. 또한, 자장분포는 실시간으로 가시화되고, 해석을 위한 정량적인 데이터를 제공하기 위하여 기록된다. 여기에서 대상물이 강자성체인지 또는 상자성체인지에 따라, 전자석, 유도전류, 헬름홀츠코일 또는 지자기를 자원으로 활용할 수 있다. 특히 상자성체 재료의 시험편인 경우에는 교류전류에 의하여 구동되는 요크형 코일과 유도면전류[9]가 많이 사용된다. 한편, 스캔형 자기카메라

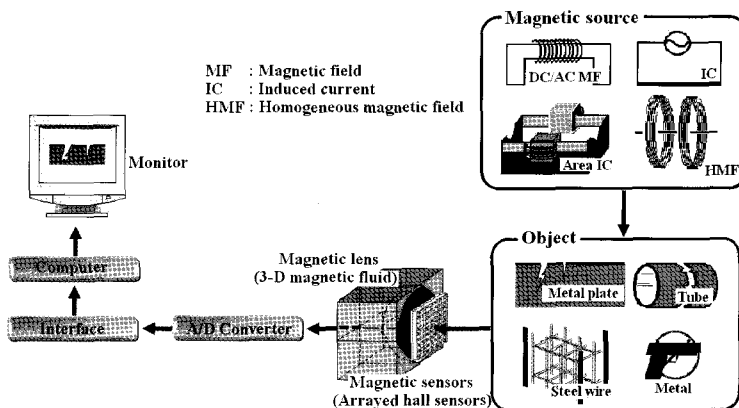


Fig. 1 Schematic of the magnetic camera

는 시험편이 이동하거나, 센서헤드가 이동하는 경우를 상정한 것으로서, 자기센서가 2차원으로 배열될 필요가 없다. 특히, Fig. 2에 나타난 바와 같이 웨이퍼상에서 배열된 홀센서(LIHaS)를 이용하면, 보다 고공간분해능(예를 들면, 0.52 mm)의 자기영상을, 센서간 리프트오프의 차이가 없이, 보다 빠른 속도로 취득할 수 있다.

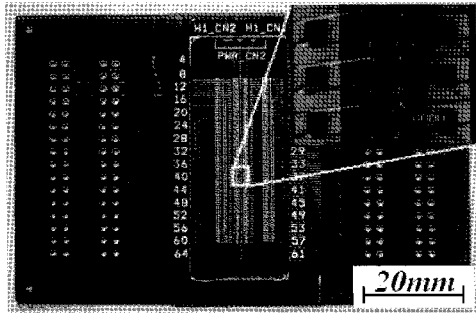


Fig. 2 Linearly integrated 64 InSb hall sensor array on the NiZn ferrite wafer

2.2. CIC-MFL법

Fig. 3(a)는 CIC-MFL법을 실현하기 위하여 본 연구에서 사용한 소형 요크형 전자석(이하 CIC-MFL 요크)의 개요도이다. LIHaS의 센서배열방향을 y축, 스캔방향을 x축, 시험편 평면의 수직방향을 z축이라 하자. Hall 센서의 감지방향은 Z축이다. LIHaS의 배면에 요크형 전자석을 설치하면, 전자석의 자극 선단에서 x방향으로 자속이 발생한다. 한편, xy-평면상의 강자성체 시험편이 전자석에 접근하면 시험편 표면 방향으로 자속이 집중된다. 이때, 결함의 존재에 의하여 누설자속이 발생(Fig. 3(b))하며, 결함의 길이방향이 자화방향(x방향)과 수직일 때 누설자속은 최대가 된다. 따라서, 이러한 구조에서 시험편이 강자성체일 때에는 결함방향이 LIHaS의 배열방향(y방향)과 근접할수록 결함탐상능력이 우수하다. 한편, 전자석에 교류전류를 입력하면, Fig. 3(c)에 나타난 바와 같이 xy-평면에서는 시험편의 재질에 관계없이 자기장의 방향(x방향)과 수직방향인 -y방향(또는 y방향)으로 유도전류가 발생하게 된다. 이러한 유도전류는 결함의 선단에서 흐트러져 결과적으로 z방향(LIHaS의 감지방향)으로 자기장이 발생하게 된다. 이때 발생하는 자기장의 세기는 결함의 길이 방향이 LIHaS배열의 수직방향(x방향)에 근접할수록 커지게 된다. 따라서, y축 방향으

로 장축을 가지는 CIC-MFL요크와 LIHaS를 도입하면, 강자성체 및 상자성체 시험편에 존재하는 결함을 탐상할 수 있게 된다. 이러한 CIC-MFL법에 의하면 강자성체일 때에는 누설자속에 의한 자기장의 세기가 증가하며, 상자성체일 때에는 유도전류에 의한 자기장의 세기가 보다 효율적으로 결함탐상에 기여하게 된다.

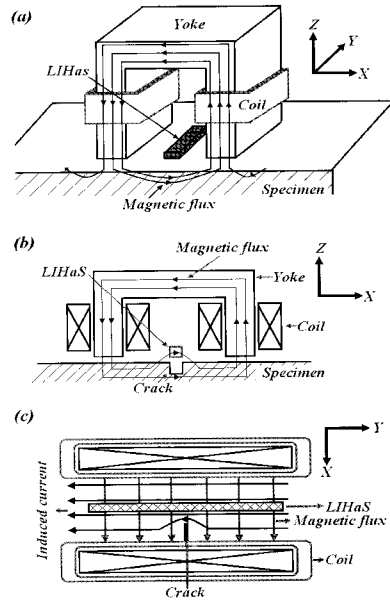


Fig. 3 Small size yoke type electromagnetic coil operated by alternative current

한편, 홀소자는 두 개의 전원핀과 두 개의 출력핀으로 구성된다. 두 개의 출력 핀의 전압차는 센서면에 수직으로 입사하는 외부자장의 세기에 비례한다. 따라서, 외부자장의 세기는 차동식 연산증폭기(이하 OP-Amp)를 이용하여 두 개의 출력사이의 전압차를 측정함으로써 계산할 수 있다. CIC-MFL법에서는 교류자기장의 검출이 필요하며, LIHaS에서 출력되는 각각의 홀전압의 진폭이 유도전류의 흐트러짐 또는 누설자속의 세기에 비례한다. 따라서, 홀전압의 진폭을 효과적으로 추출하기 위하여 본 연구에서는 RMS (root-mean-square) 회로[9]를 이용하였다. 즉, Fig. 2의 LIHaS의 각각의 홀소자에 독립된 RMS 회로를 설치하여 교류자기장의 진폭에 상응하는 신호(이하, VRMS)를 추출하였다. 또한 종래의 연구[4-9]에 의하면, VRMS의 스캔방향으로의 미분치(이하 $\partial V / \partial x$)는 결함을 효율적으로 검출하고, 평가하는데 유효한 정보를 제공한다.

3. 실험장치

3.1. 시험편

CIC-MFL 및 LIHaS의 유용성을 검증하기 위하여 Fig. 4와 같이 111.3×137.0×1.0 mm의 Inconel 600 판재를 이용하였다. 시험편의 상부에는 100×50×0.3 mm의 영역에 니켈 코팅하였다. 니켈 코팅부, 경계면, 인코넬부에 Table 1에 나타난 바와 같은 깊이를 가지는 길이 10 mm, 폭 0.127 mm의 인공 결함을 방전 가공하였다. 그림의 수평방향과 수직 방향을 각각 X방향과 Y방향이라고 하자. 결함의 길이방향은 코팅부(①, ②, ③, ④)와 인코넬부(⑨, ⑩, ⑪, ⑫)에서는 X방향, 경계면(⑤, ⑥, ⑦, ⑧)에서는 Y방향이다.

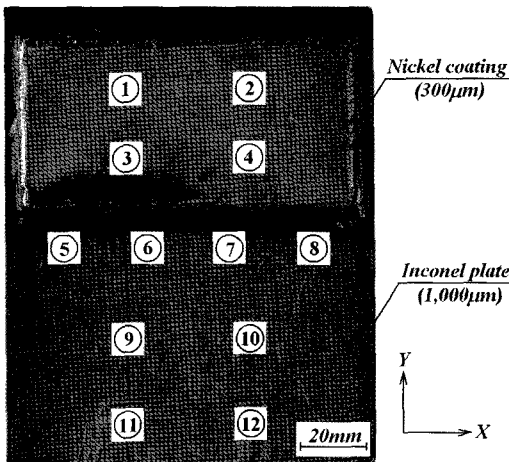


Fig. 4 Nickel coated Inconel 600 specimen

Table 1 Depths of cracks [unit: mm]

No.	Ni-Coat	No.	Boundary	No.	Inconel 600
1	1.0	5	1.0	9	1.0
2	0.76	6	0.81	10	0.76
3	0.51	7	0.56	11	0.51
4	0.25	8	0.30	12	0.25

3.2. 실험장치

Fig. 5는 실험장치의 개요도이다. 정밀자동이송장치에 LIHaS(홀소자 64개, 0.52 mm 간격) 및 CIC-MFL 요크(극간최소거리 9 mm, 권수 1112회,

1 kHz, 0.25 A)를 설치하고, Fig. 4의 X방향 또는 Y 방향으로 스캔하였다. 이때, 스캔방향(Fig. 3의 x방향)의 수직방향(Fig. 3의 y방향)으로 LIHaS의 센서가 배열된다. LIHaS로부터 출력되는 64채널의 홀전압은 각각 독립적인 증폭회로 및 RMS회로를 거쳐, AD 변환기를 통하여 컴퓨터에 저장되고, 연산 및 표시된다.

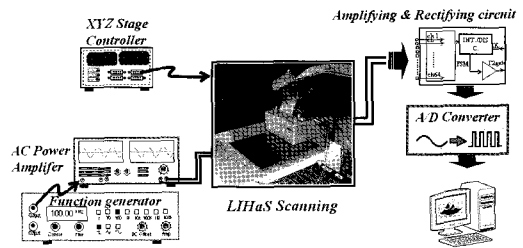


Fig. 5 Experimental set-up

4. 결과 및 고찰

4.1. 재질, 균열방향, 위치에 따른 결과 및 고찰

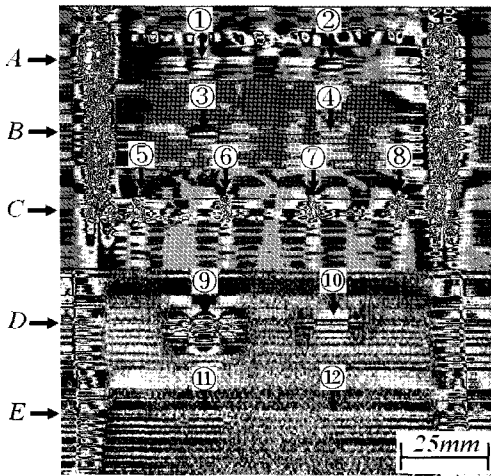
Fig. 6은 시험편 니켈 코팅부 표면의 리프트오프 1.0 mm에서 X방향으로 스캔하였을 때(Fig. 6(a))와 Y방향으로 스캔하였을 때(Fig. 6(b))의 각각의 $\partial V / \partial x$ 영상을 나타낸다. 니켈코팅부는 인코넬부에 비하여 0.3 mm의 두께를 더 가진다. 따라서, 인코넬부의 리프트오프는 1.3 mm가 된다.

X방향 스캔(Fig. 6(a))에서는 코팅부(①, ②, ③, ④) 및 경계부(⑤, ⑥, ⑦, ⑧)의 모든 결함이 탐상 가능하였다. 경계부에서의 결함탐상능력은 용접비드와 같이 표면이 불연속적이면서도 이중금속에 걸쳐 발생한 균열을 CIC-MFL 및 LIHaS에 의하여 탐상할 수 있음을 보여주고 있다. 또한, 인코넬부에서는 깊이 1.0 mm(⑨) 및 0.76 mm(⑩)의 결함을 탐상할 수 있었다. 전술한 바와 같이 CIC-MFL에서 누설자속은 스캔방향(Fig. 3의 x-방향), 유도전류는 LIHaS의 배열방향(Fig. 3의 y-방향)에 유효하게 사용된다. 균열의 길이방향이 자화방향 또는 유도전류방향과 수직일 때 최적의 결함탐상능력을 가지므로, Fig. 6(a)의 코팅부(①, ②, ③, ④)와 인코넬부(⑨, ⑩)에서는 유도전류가 결함탐상에 유효하게 작용되었음을 알 수 있다. 또한, 경계부(⑤, ⑥, ⑦, ⑧)에서는 누설자속이 결함탐상에 유효하게 작용하였다.

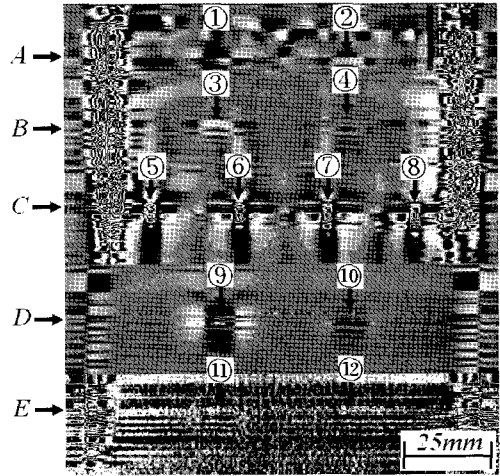
Y방향 스캔(Fig. 6(b))에서는 코팅부(①, ②, ③, ④)의 결함이 X방향 스캔(Fig. 6(a))에 비하여 보다 확연하게 탐상되었음을 알 수 있다. 이것은 강자성체의 결함이 CIC-MFL의 누설자속에 크게 영향을 미쳤음을 의미한다. 한편, 경계부에서는 결함 탐상능력이 현저하게 떨어졌는데, 이것은 코팅 경계면에서 결함의 크기 이상의 누설자속이 발생하였기 때문이다.

한편, 인코넬부의 결함은 검출할 수 없었다. 이것은 재질이 상자성체로써, 유도전류에 의한 결함의 탐상이 유효하게 작용되어야 하나, 결함의 길이방향이 유도전류와 평행하게 되어, 결함 탐상능력이 현저히 저하되었기 때문이다.

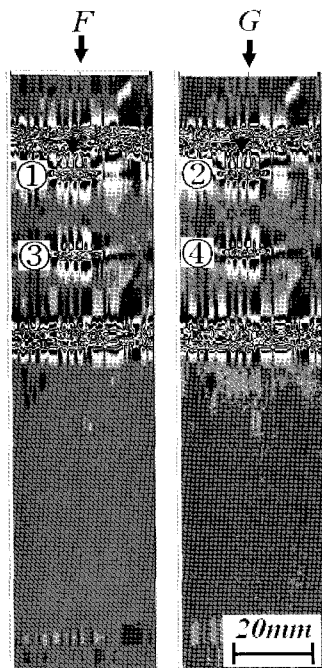
Fig. 7은 시험편 이면의 리프트오프 1.0 mm에서 X방향으로 스캔하였을 때(Fig. 7(a))와 Y방향으로 스캔하였을 때(Fig. 7(b))의 각각의 $\partial V / \partial x$ 영상을



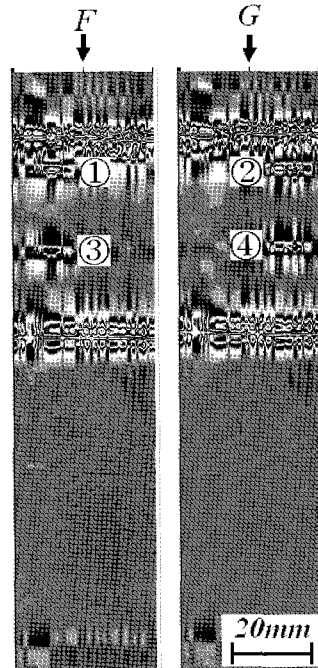
(a) X-directional scanning



(a) X-directional scanning



(b) Y-directional scanning



(b) Y-directional scanning

Fig. 6 Processed magnetic images at the near-side on the lift-off 1.0 mm

Fig. 7 Processed magnetic images at the far-side on the lift-off 1.0 mm

나타낸다. 표면결함 탐상결과(Fig.6)와 마찬가지로 X방향 스캔(Fig. 7(a))에서는 코팅부(①, ②, ③, ④) 및 경계부(⑤, ⑥, ⑦, ⑧)의 모든 결함이 탐상 가능하였다. 또한, 인코넬부에서는 깊이 1.0 mm(⑨) 및 0.76 mm(⑩)의 결함을 탐상할 수 있었다. Y방향 스캔(Fig. 7(b))에서는 코팅부(①, ②, ③, ④)의 결함이 X방향 스캔(Fig. 7(a))에 비하여 보다 확연하게 탐상되었음을 알 수 있다.

4.2. 결함의 정량평가 가능성

Fig. 8은 상기 Fig. 6에서 스캔방향과 결함방향이 평행할 때(A, B, D, E)의 표면결함(Fig. 8(a))과 이면결함(Fig. 8(b))의 $\partial V/\partial x$ 분포를 나타낸다. 니켈 코팅부(A, B)의 경우에 약 10 mm 및 110 mm 근방에서 큰 변화를 보이고 있으며, 이것은 코팅의 경계면에서의 누설자속이 기인한다. 균열 근방에서

는 주위에 비하여 비교적 큰 $\partial V/\partial x$ 값을 가지며, 결함의 깊이에 따라 그 최대값과 최소값의 차이(이하 Height[$\partial V/\partial x$])가 커지고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 이면결함의 경우에서도 나타나고 있다. 한편, 스캔방향이 CIC-MFL 요크에 의한 자기장의 방향과 같으며, 또한 결함의 길이방향과도 동일함을 생각하면, Fig. 8(a) 및 Fig. 8(b)에서 결함신호로 추출되고 있는 $\partial V/\partial x$ 분포는 유도전류에 의한 신호가 지배적임을 추정할 수 있다. 실제로 누설자속이 발생하지 않는 인코넬부(D, E)의 경우에서도 Height[$\partial V/\partial x$]가 결함이 깊어질수록 증가하고 있는 것은 유도전류에 의한 결함탐상이 이루어지고 있음을 보여준다.

Fig. 9는 스캔방향과 결함의 길이방향이 직각인 경우(Fig. 6의 C 및 Fig. 7의 F, G)의 표면결함(Fig. 9(a))과 이면결함(Fig. 9(b))의 $\partial V/\partial x$ 분포를 나타낸다. 인코넬부에서는 결함에 해당하는 신호를 찾

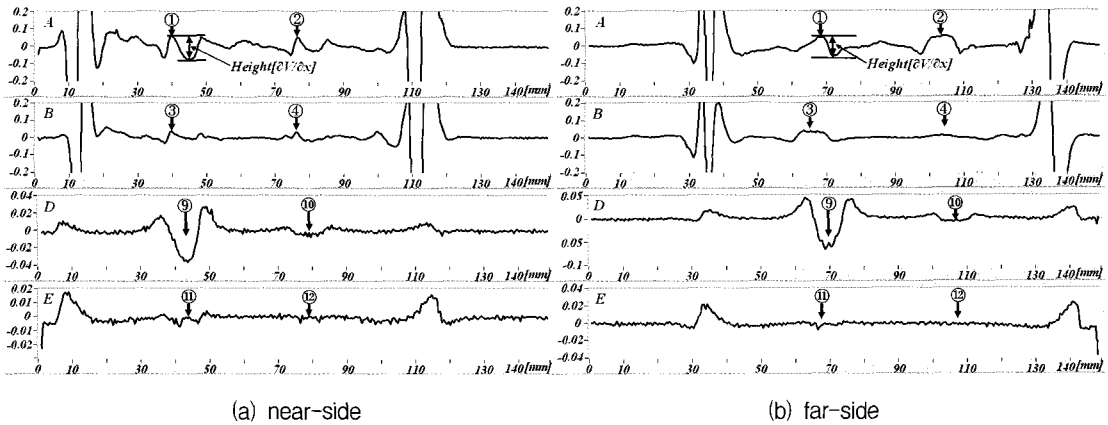


Fig. 8 The $\partial V/\partial x$ sectional distributions on the cracks when the scanning direction and crack length direction is parallel

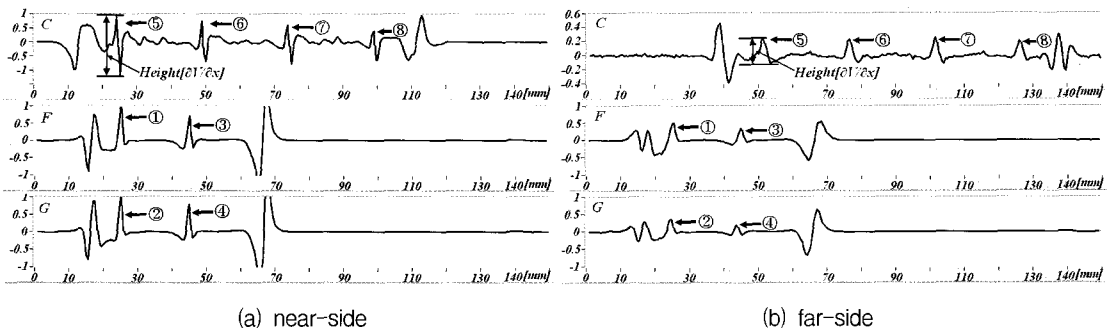
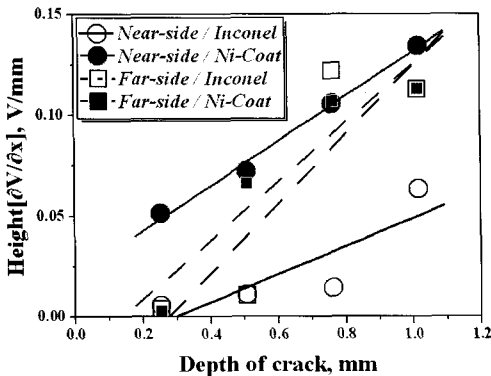


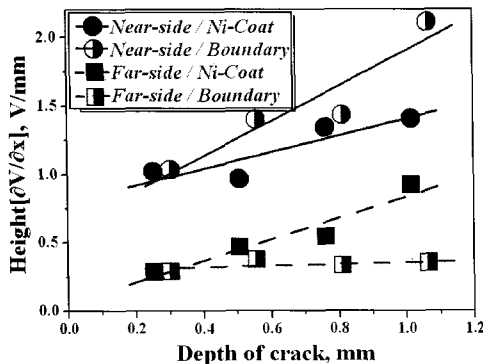
Fig. 9 The $\partial V/\partial x$ sectional distributions on the cracks when the scanning direction and crack length direction is vertical

을 수 없었다. 이것은 전술한 바와 같이 CIC-MFL에서는 상자성체의 경우 유도전류가 유효한 탐상수단을 제공하지만, 결합의 길이방향이 유도전류와 평행하여 결합검출능력이 현저히 저하되기 때문이다. 반면에 코팅부(①, ②, ③, ④)에서는 자화방향이 균열의 길이방향과 수직이 되므로 누설자속이 최대가 되고, 결과적으로 상기 Fig. 8보다 큰 $Height[\partial V / \partial x]$ 를 얻을 수 있다. 그리고, 코팅의 경계면이 자화방향과 수직으로 되어, 결합으로부터의 유도전류의 흐트러짐보다 훨씬 큰 경계면에서의 누설자속이 발생하여 결합 탐상을 곤란하게 하고 있다.

Fig. 10은 지금까지의 실험결과를 종합하여 결합의 깊이에 따른 $Height[\partial V / \partial x]$ 의 변화를 나타낸다. 전체적으로 결합의 깊이가 깊어짐에 따라 $Height[\partial V / \partial x]$ 가 증가한다. 결합의 길이방향이



(a) crack length direction \perp induced current direction



(b) crack length direction \perp magnetization direction

Fig. 10 Relationship between the depth of crack and $Height[\partial V / \partial x]$ in the case of that the crack length direction is vertical to the (a) induced current, (b) magnetization direction

유도전류의 방향과 수직인 경우(Fig. 10(a), 0.15 V/mm)는 자화방향과 수직인 경우(Fig. 10(b), 2.0 V/mm)에 비하여 약 7.5% 정도의 $Height[\partial V / \partial x]$ 값을 보이고 있어, CIC-MFL에서 누설자속이 보다 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

따라서, 유도전류가 지배적으로 영향을 미치고 있는 경우(Fig. 10(a))에도 니켈 코팅부의 표면 및 이면결합 탐상신호($Height[\partial V / \partial x]$)가 인코넬부에 비하여 큰 값을 가지는 것은, 결합의 길이방향이 자화방향과 평행으로써 누설자속이 최소화됨에도 불구하고, 유도전류에 비하여 무시할 수 있을 정도의 크기는 아님을 반증한다. 한편, 4.1절에서 서술한 바와 같이 인코넬부의 표면결합 탐상은 리프트 오프가 1.3 mm이며, 이면결합 탐상의 경우는 1.0 mm이다. 따라서, 인코넬부의 이면결합 탐상결과가 표면결합 탐상의 결과보다 우수한 것으로 나타난 것은 리프트오프의 차이로 해석할 수 있다.

또한, 누설자속이 지배적으로 영향을 미치고 있는 경우(Fig. 10(b))에는 표면탐상이 이면탐상에 비하여 큰 $Height[\partial V / \partial x]$ 값을 보이고 있다. 한편, 경계부에서의 표면탐상 결과가 코팅부에서의 표면탐상 결과보다 우수함을 보이고 있다. 이것은 Fig. 9(a)에서 보인 바와 같이 표면탐상의 경우, 이면탐상(Fig. 9(b))에 비하여 큰 잡음(최대 0.71 V/mm)을 보이기 때문이다. 이러한 잡음은 경계부의 불균일한 형상에 기인한다.

5. 결론

본 논문에서는 강자성체, 상자성체 및 혼재된 조직을 가지는 표면 및 이면결합의 비파괴 검사를 위하여, 웨이퍼상에 선형으로 배열된 고밀도 자기센서(LIHaS)와 복합 유도전류-누설자속법(CIC-MFL)을 제안하였다. 또한, 국부적으로 니켈 코팅된 Inconel 600 판재의 코팅부, 경계부 및 인코넬부에 폭 0.127 mm의 미소 결함을 방전가공에 의하여 도입하여 LIHaS와 CIC-MFL법의 유용성을 검증하였다. 니켈 코팅된 부분에서는 깊이 0.25 mm 이상의 결함을 결합 길이방향에 관계없이 탐상할 수 있었다. 또한, 인코넬 부분에서는 LIHaS의 길이방향과 직각인 방향의 깊이 0.76 mm 이상의 결함을 탐상할 수 있었다. 경계부에서는 LIHaS의 길이방향과 동일한 방향의 깊이 0.30 mm 이상의 결함을 탐상할 수 있었다. 특히, 경계부분은 이중금속의 용접부

비드형태를 띄고 있어, 차후 용접부 결함탐상에도 LIHaS와 CIC-MFL법이 유용하게 활용될 수 있음을 보여주었다. 한편, 스캔방향으로 미분 처리된 LIHaS의 출력의 최대값과 최소값의 차이는 결함의 깊이가 깊어질수록 커지고 있어, 차후 이종금속간 용접부위에 발생하는 표면 및 이면결함의 정량평가에 활용될 수 있음을 밝혔다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NO. R01-2005-000-10029-0)

참고문헌

- [1] U. G. Goranson, "Damage tolerance facts and fiction," 17th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, Vol. 1, pp. 2-105, (1993)
- [2] D. Hwang, "Damage tolerance design and prediction of fatigue life in aircraft structure," KSME Int. Journal Vol. 35, pp. 468-480, (1995)
- [3] J. Hwang, J. Jun and J. Lee, "Scan type magnetic camera images with a high spatial resolution for NDT obtained by using a linearly integrated hall sensor array," Proceedings of IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, pp. 1-6, (2007)
- [4] J. Lee, W. Choe, M. Kim, D. Kim and M. Kang, "Magnetic flux density apparatus for, E.G., Detecting an internal crack of a metal or a shape of the metal," US Patents 6,683,452 B2., (2004)
- [5] J. Lee and J. Hwang, "The detection probability improvement of the far-side crack on the high lift-off using the magnetic camera," Int. J. of Mod. Phys. B 20 Nos. 25, 26, & 27 pp. 4631-4636, (2006)
- [6] J. Lee and J. Hwang, "The QNDE using image processing of the magnetic camera," Int. J. of Mod. Phys. B 20, Nos. 25, 26, & 27 pp. 4625-30, (2006)
- [7] J. Lee, J. Hwang, S. Choi and J. Lim, "Detection probability improvement for nondestructive evaluation using a magnetic camera," Key Eng. Mater. pp. 306~308, 241~6, (2006)
- [8] S. Choi, J. Hwang, J. Jun, J. Lee and C. Kim, "Improvement of crack detection probability by using magnetic camera and image processing," Key Engineering Materials, Vols. 353-358, pp. 2375-2378, (2007)
- [9] J. Jun, J. Hwang, K. Kim, K. Ogawa and J. Lee, "Development of signal processing circuit of a magnetic camera for the NDT of a paramagnetic material," Key Engineering Materials, Vols. 353-358, pp. 2379-2382, (2007)