

자기탐상법을 이용한 용접부의 비파괴탐상기술

임종수

Nondestructive Testing for Welding Inspection Using Magnetic Methods

Zhong Soo Lim

1. 서론

철강재료의 용접시 발생할 수 있는 결함에 대하여 자기적인 방법에 의한 탐상기술의 기초적인 이론 및 그 응용방법에 대한 개략적인 설명을 한다. 용접부품 및 구조물의 사용시 내응력 강도는 표면 및 표층하에 존재하는 크랙성 결함에 민감하게 의존한다. 부품의 위해도는 응력이 가해지는 방향과 수직한 방향으로 존재하는 결함의 수직 깊이에 따라 증가하게 된다. 또한 결함의 효과는 용접 구조물에 대해 외부에서 작용하는 응력에 더해, 용접시 발생하는 잔류응력 및 미세구조의 변형에 따른 파괴인성치의 감소에 의해 강화된다. 따라서 용접물에 대한 미세결함의 존재유무의 파악 및 크기의 판별은 용접물의 사용에 있어 중요한 역할을 하게 된다.

2. 자기탐상의 기본원리

2.1 기본원리

강자성체에 대해 표면이나 표면하부에 발생하는 결함 또는 물성의 변화 등에 의한 국부적인 현상은 누설자속법을 이용하여 탐상이 가능하다. 최적의 조건일 경우 이 방법은 다른 비파괴탐상기법에 비해 월등한 탐상능력을 갖는다. Fig. 1은 일반적인 강자성체에 있어서의 자화곡선을 나타낸다. 그림에서 보이듯이 강자성체 내부의 자속밀도는 외부의 자기장에 따라 증가하다가 어느 일정한 값을 넘어설 경우 포화(saturation)하는 경향을 갖는다. 자속밀도(B)는 자화(M)와의 사이에 $B = \mu_0(H + M) = \mu\mu_0H$ 의 관계를 갖는다. 자화(M)는 외부의 자기장(H)에 따라 증가하다가 일정한 값에 이르면 더 이상 증가하지 않는 성질을 갖는다. 이 경우 자속밀도가 포화되었다고 말한다. 일반적인 강자성체의 경우 자기장의 크기를 변화시킬 경우 초기 상태로 돌아가는 대신에 이력현상(hysteresis)을 보인다.

즉 자화상태가 잔류하게 되며 이것을 잔류자기(remanent field)라고 한다. Fig. 1의 자화곡선을 자기이력곡선(hysteresis curve)이라고도 부른다. 이것은 강자성체인 물질의 조성, 열처리 이력, 응력의 상태, 온도 등에 매우 민감하게 작용한다.

충분히 강한 외부자기장을 사용하여 강자성체를 자기포화 상태로 만들었을 경우 이 강자성체의 내부에 결함이 존재하면 결함 내부의 자기투자율(μ)이 1이므로 자기투자율의 차이에 의해 이 결함을 주변으로 Fig. 2와 같이 누설자속(magnetic leakage flux)이 발생한다. 그림에서 보이듯이 누설자속은 결함의 전후방에서 미리 발생하여 결함 부위의 상하부에 공통으로 발생한다. 이것은 마치 결함의 전후에 각각 N, S극을 갖는 자석을 둔 것과 같은 양상을 보인다. 그림에서 알 수 있듯이 누설자속의 형태는 결함의 종류 및 형태에 밀접하게 의존한다. 크랙성 결함의 경우 진공에 의해 자기경로가

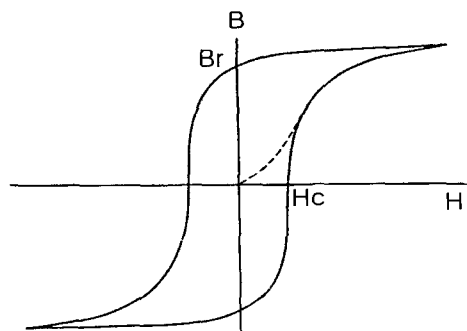


Fig. 1 Magnetization curve for a ferromagnetic material

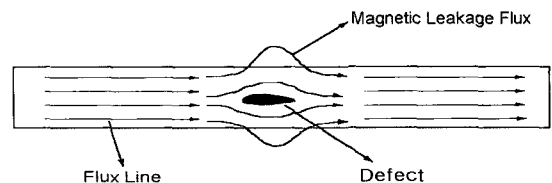


Fig. 2 Generation of the magnetic leakage flux

끊어진 것으로 간주할 수 있으며 자속선의 방향과 수직 한 결합에 대해 민감하게 반응하며, 평행한 경우에는 누설자속의 발생이 미미하게 되어 크랙의 방향이 자기장의 방향에 수직인 경우 최적의 탐상조건을 갖는 것을 알 수 있다. 표면에 수직한 형태를 갖는 크랙에서 발생하는 누설자속에 대해서는 Zatsepın과 Shcherbinin에 의해 이론적 모델이 제시되었다. 이에 따르면 수직 한 크랙면 전후에 자기쌍극자(magnetic dipole)가 형성되어 이에 따른 자기장이 누설자속을 이루는 것으로 이해할 수 있다. 이것을 그림으로 보면 Fig. 3과 같고 식 (1)로 표현할 수 있다. 누설자속의 크기는 결합의 길이보다는 결합의 부피에 의해서 결정된다. 최적의 탐상능을 확보하기 위해 가급적 큰 자기장을 가할 필요가 있다. 누설자속에 있어 잡음의 효과는 표면거칠기, 국부적 경화도, 기타 미세조직의 편차에 기인한다.

$$H_y = m \frac{y}{[(x+b)^2 + y^2]^{3/2}} - \frac{y}{[(x-b)^2 + y^2]^{3/2}} \quad (1)$$

2.2 탐상능

결합의 탐상능은 외부자기장의 크기, 자기장과 결합의 상대적 방향, 결합의 위치, 종류 및 크기, 검사물의 표면상태 등의 요소에 의해서 좌우된다.

(1) 외부 자기장의 크기

결합에 의한 누설자속의 크기는 결합의 부피 및 외부에서 인가하는 자기장의 크기가 증가함에 따라 증가한다. 대부분의 용접물에 대해 2.4 kA/m 이상의 피크값을 갖는 자기장이 권고된다.

(2) 자기장과 결합의 상대적 방향

외부 자기장에 수직한 평면성 결합이 최적의 탐상능을 갖는다. 따라서 기공성 결합 및 개재물성 결합은 크랙성 결합에 비해 탐상능이 저하된다. 결합의 방향성에

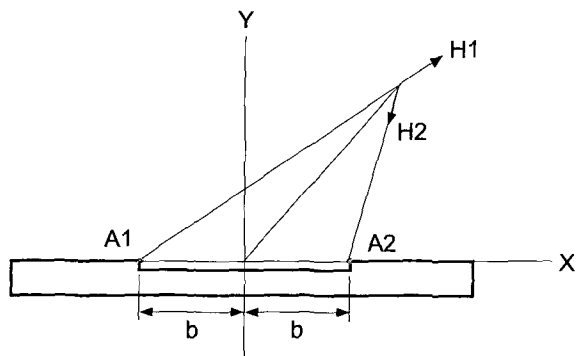


Fig. 3 Schematic model of crack by Zatsepın and Shcherbinin

의한 탐상능이 다르므로 수직하는 서로 다른 두 방향으로 자기장을 인가시켜 검사하는 것이 권장된다.

(3) 결합의 위치, 종류 및 크기

표면에 있는 결합에 비해 표면 아래 숨어있는 결합의 경우 탐상능이 떨어진다. 일반적인 경우 1 mm 이상 깊이 있는 결합에 대해서 자기탐상은 적용하기 곤란하다.

(4) 검사물의 표면상태

표면에 존재하는 찰흔, 용기, 그루브, 가공마크 등은 누설자속에 영향을 미치게 되어 잡음으로 작용하게 된다. 따라서 미세결합의 탐상능은 표면의 상태에 의해 좌우된다.

2.3 탐상방법

2.3.1 자분탐상

자분탐상은 자기탐상법 중 가장 광범위하게 사용되는 방법으로서 표면에 노출된 크랙성 결합에 가장 민감하게 반응한다. 미세한 연자성 분말의 주위에 감광성 유기물질을 코팅한 미세한 자분을 물체에 도포할 경우 크랙에 의해 발생하는 누설자속에 의하여 크랙 주위에 모이는 성질을 이용한다. 이 자분을 형광 또는 백색광에 의해 육안 또는 카메라로 검사하며, 침투탐상법과 마찬가지로 미세한 결합을 가장 정밀하게 검사할 수 있는 방법의 하나이다. 크랙의 존재 유무 및 길이를 판별하는 데는 매우 유용하나 크랙의 깊이에 대한 정보를 알아내는 것이 곤란하다. 대부분의 경우 육안검사를 목적으로 하나 검사결과와 기록의 보존을 위해 카메라에 의한 영상정보의 형태로 보관하기도 한다.

2.3.2 마그네토그래피

검사 대상체의 표면에 자기테이프를 접촉시킬 경우 누설자속의 양상을 자기테이프에 기록할 수 있다. 이렇게 기록된 자기테이프를 별도의 장치를 이용하여 분석함으로써 누설자속의 형태를 정량적으로 평가하는 것이 가능하다. 전자동 시스템의 경우 테이프를 무한궤도 형태로 구동시키면서 자기기록과 분석을 온라인 형태로 연동시킬 수도 있다. 그러나 검사표면의 조건에 따라 자기테이프가 손상될 수 있는 가능성이 높아 유지비가 비싸다는 단점이 있다.

2.3.3 자기센서

자기센서를 이용하여 검사체의 표면을 주행시킴으로써 누설자속의 벡터 성분 중 수직 또는 수평 성분을 선택적으로 읽은 결과를 컴퓨터를 이용하여 디지털 값으로 저장 및 정량적 분석을 행함으로써 결합의 종류 및 형태를 분석할 수 있으나 검사체의 형태가 단순한 평면

및 실린더 형태 이외에는 자동화가 곤란하다는 단점이 있다.

3. 자화방법

3.1 자기장

검사할 대상체는 충분히 강한 자기장에 의해 포화 상태로 자화되어야 한다. Nd계의 고정자석을 사용하는 경우도 있으나 자기장의 강도가 충분치 못하므로 대부분의 경우 철심을 갖는 코일에 전류를 흘림으로써 발생하는 자기장을 이용한다. 이 경우 전류의 종류에 따라 자기장을 구분하게 되며 직류(DC), 교류(AC), 반파정류(HWDC, half wave DC), 전파정류(FWDC, full wave DC), 펄스전류로 구분한다. 교류전원에 의해 발생하는 교류자기장은 일정한 침투깊이에 국한하는 포피 효과를 갖게 되며 이 침투깊이(δ)는 다음과 같이 정의 된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (2)$$

여기서 σ 는 전기전도도, μ 는 자기투자율, f 는 주파수이다. 예를 들어 일반적 강자성(철 등) 물질에 대해 교류전원의 주파수가 60Hz일 경우 $\delta \approx 1.6$ mm의 값을 갖는다. 따라서 직류의 경우에 대비하여 교류의 경우 표면에 더욱 민감한 탐상능을 갖는다. DC의 경우 전원장치가 고가가 되므로 삼상전원을 전파정류하여 유사 DC로 사용하는 경우도 있다. 교류자기장의 경우 대상체 내부에 유도되는 와류에 의하여 발열이 되므로 검사 시간이 길어질 경우 펄스전원이 유리할 수도 있다. 따라서 피검사재의 특성 및 검사 조건에 따라 전원을 최적으로 설계할 필요가 있다.

3.2 자화방법

피검사재를 포화자화시키는 방법은 크게 1) 자속인가법 2) 전류인가법으로 나눌 수 있다. 각각의 방법도 다양한 방식으로 구현할 수 있으며 이것을 종류별로 보면 다음과 같다.

- (1) 축통전법 : 시험체의 축방향으로 직접 전류를 흐르게 한다.
- (2) 직각통전법 : 시험체의 축에 대하여 직각방향으로 직접 전류를 흐르게 한다.
- (3) 프로드법 : 시험체의 국부에 2개의 전극(프로드)을 대어서 전류를 흐르게 한다.
- (4) 전류관통법 : 시험체의 구멍 등에 통과시킨 도체에

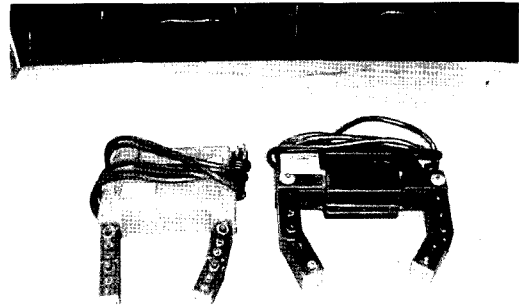


Photo 1 Magnetic particle inspection yokes

전류를 흐르게 한다.

- (5) 코일법 : 시험체를 코일 속에 넣어 코일에 전류를 흐르게 한다.
- (6) 극간법 : 시험체 또는 시험할 부위를 전자석 또는 영구자석의 자극 사이에 놓는다. (Photo. 1)
- (7) 자속관통법 : 시험체의 구멍 등에 통과시킨 자성체에 교류자속 등을 가함으로써 시험체에 유도전류를 흐르게 한다.

전류를 인가하는 방법에 따라 1) 연속법, 2) 잔류법으로 나눌 수 있다. 잔류법은 일정 시간 전류를 인가하여 자기장을 유도시켜 자기포화상태로 만든 후 전류를 끊음으로써 검사체의 잔류자기에 의해 자기탐상을 행하게 된다.

상기의 자화방법은 검사체의 용접형태에 따라 다양하게 설계할 필요가 있으며 몇 가지 경우의 예를 Fig. 4에 보였다.

3.3 자화의 결정

결합의 지시가 충분한가의 여부는 결합이 존재하는 부분에서의 자기장의 강도에 의해 결정되므로 실제 검사환경 하에서의 결합이 있는 위치에서의 자기장의 강도를 사전에 알 필요가 있다. 이를 위해 다음의 방법을 사용한다.

(1) 이론적 계산

긴 원기둥, 솔레노이드 코일과 같이 단순한 형상에 대해서는 엄밀해가 존재하나 실제의 경우 적용가능한 경우는 거의 없다. 그러나 근사적인 경우로 가정하여 개략적인 자기장의 크기를 유추할 경우에 편리하게 사용할 수 있다. 실제의 경우를 계산하기 위해서는 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 이용한 컴퓨터 소프트웨어를 사용한다. 이 경우에는 검사체의 자화곡선을 미리 알아야한다. 충분한 정밀도까지 확보

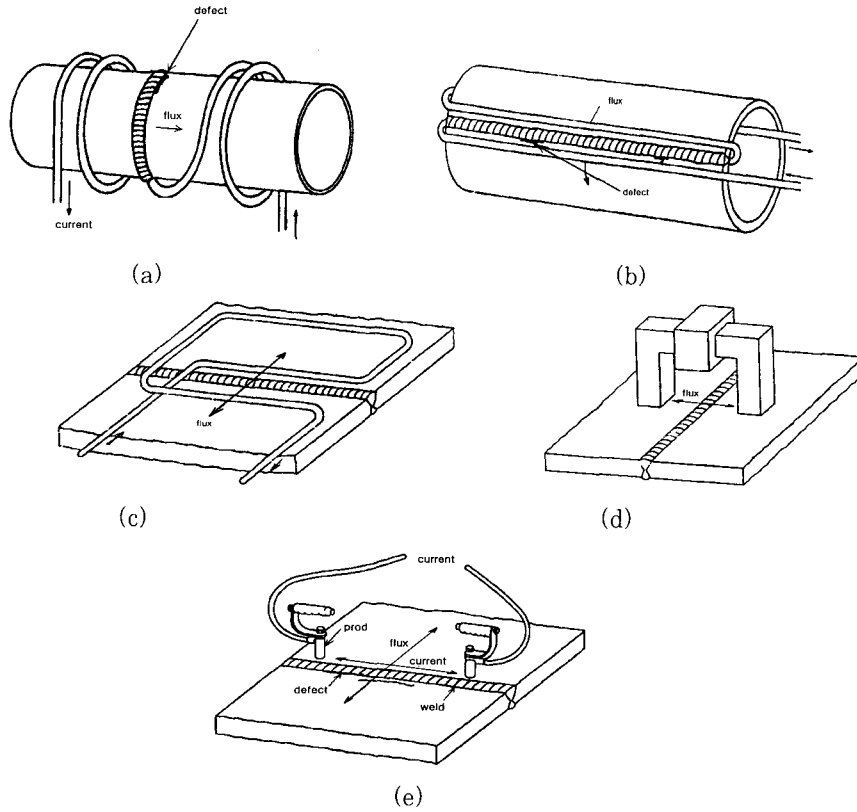


Fig. 4 Various types of magnetization

- (a) magnetization by an electric current used for circumferential weld
- (b) magnetization by an electric current used for longitudinal weld
- (c) magnetization by parallel current leads for defects in a plate
- (d) magnetization by hand yoke
- (e) magnetization by prod

하는 것은 경우에 따라 쉽지 않으나 경향성에 대한 파악에는 문제가 없다.

(2) 측정

원기둥 형상 등의 단순한 경우 코일을 이용하여 자속 밀도 (B)를 실험적으로 측정할 수 있으나 그 이외의 경우에는 자속밀도의 측정은 매우 곤란하다. 이 경우 자속밀도를 측정하는 대신에 자기장 (H)의 크기를 측정한다. 이 경우에도 검사체의 경계면을 따라 자기장의 수평성분이 연속하다는 점을 이용하여 표면 근방에서 자기센서를 이용하여 수평성분을 측정한다. 자기센서로서는 홀(Hall)소자, 자기다이오드(magneto-diode)소자, 픽업코일 등이 일반적으로 사용된다. 표면결함 등에 의해 자기장의 왜곡이 발생하므로, 기하학적으로 유사하나 결함이 없는 위치에서의 자기장의 크기를 측정하여 결함이 존재하는 위치에서의 값을 유추한다.

(3) 지시계(field indicator)를 이용

일정 크기의 모의결함이 있는 얇은 철판(지시계, field indicator)을 검사체의 표면에 부착하여 실제 측

정의 경우와 동일한 조건에서 지시계의 위치에 있는 모의결함이 측정가능한가를 파악함으로써 간접적으로 충분히 자화되었는가를 판단한다. 자분을 이용할 경우 많이 사용된다.

3.4 탈자

강자성체의 특성상 포화자화를 시키는 경우 외부의 자기장을 제거할 경우에도 내부에 잔류자기가 존재한다. 이것이 검사체의 정상 사용시 문제를 야기시키는 경우 잔류자기를 제거(탈자, demagnetization)할 필요가 있다. 원형 실린더 형상의 경우에는 코일 등을 이용하여 간단하게 탈자할 수 있으나 복잡한 형상에 대해서는 매우 어려운 경우가 많다. 원리적으로 자기이력곡선이 최대자기장의 크기에 따라 다른 곡선을 그리는 사실을 이용한다. 저주파의 교류전원을 코일에 인가하여 코일 중앙부에 교류자기장을 발생시킨다. 코일 내부에 연속자기장을 발생시킨 상태에서 검사체를 먼 거리에서부터 코일 내부를 통과시키는 경우와, 검사체를 고정시

킨 상태에서 교류자기장의 크기를 0까지 연속적으로 줄이는 두 가지의 방법이 있다. 검사체의 표면에 계단 형상의 불연속점이 존재하는 경우에는 탈자가 매우 곤란하다. 이를 위해 특수 형상의 탈자기의 설계가 필요하다. 엄밀한 의미에서의 완전한 탈자는 실질적으로 불가능하며 검사체의 응용시 문제가 없는 충분히 작은 잔류자기의 크기 범위 내에서 탈자를 수행하게 된다.

4. 자기탐상의 적용

본 설명에서는 자분에 대해서만 다룬다.

4.1. 자분

전달체에 자분을 실어 검사체에 분사하게 된다. 결함 주위에 멩쳐진 자분의 판독성을 높이기 위해 다음 변수들을 고려할 필요가 있다.

- (1) 자분의 농도 : 낮은 농도는 육안탐상시 휘도를 떨어뜨리며 높은 농도는 전달체에서의 유동성을 떨어뜨리는 상보적인 효과를 보이므로 자분 및 전달체의 종류에 따라 적당히 제어한다.
- (2) 자분의 자기적 성질 : 자분의 조성(Fe 및 Co계 연자성 물질의 분체를 사용)에 따른 물질계의 자기적 특성에 따라 탐상능이 의존한다.
- (3) 광학적 특성 : 광학적 특성(비형광자분의 경우에는 색상, 형광자분의 경우에는 형광)에 따라 탐상능이 좌우된다.
- (4) 자분의 크기 : 검사체에 존재하는 결함의 크기에 따라 그에 적합한 크기의 자분을 선정해야 한다. 지나치게 작은 자분은 표면조도에 따른 배경잡음을 증가시키며 큰 자분은 결함에 멩치는 힘이 떨어져 탐상능이 저하된다. 분체의 직경 분포함수를 사전에 파악할 필요가 있다.

4.2 전달체

- (1) 건식 : 건식의 경우 전달체는 공기를 사용한다. 자분을 공기를 사용하여 검사체 표면에 도포한다. 습식에 비해 탐상능이 떨어지는 단점이 있으나 상대적으로 고온에 적용이 가능하며 부식의 위험이 없다는 이점이 있다. 검사 후 세척이 간단하다. 자분의 크기는 수십 μm 이상이다.
- (2) 습식 : 습식의 전달체는 물 또는 기름을 이용하여 분산제 및 부식방지제를 첨가한다. 형광물질을 코팅하여 암실 내부에서 자외선을 조사한 상태에서 육안으로 검사한다. 자분의 크기는 수 μm 정도로 미세한 결함을 검사하는 데 적합하다.

4.3 자화

표면에 노출된 크랙성 결함을 탐상하기 위해서는 2.4 kA/m 이상의 자기장(DC, AC, FWDC, HWDC)을 인가시키면 충분하다. 그러나 표층 하부에 숨은 결함을 탐상하기 위해서는 4kA/m 이상의 자기장(DC, HWDC)이 필요하다.

4.4 노광조건

(1) 비형광자분

광원에 의한 노출강도가 $E > 500 \text{ lux}$ 이어야 한다. 판독성을 높이기 위해 검사체 표면에 충분히 얇은 백색 페인트를 사전에 칠하기도 한다.

(2) 형광자분

자외선(320-400nm) 광원(Photo. 2)의 강도가 $E_e > 15 \text{ W/m}^2$ 이어야 한다. 광원에 의한 노출강도는 $E < 50 \text{ lux}$ 이어야 한다(암실을 권장).

4.5 적용순서

결함탐상을 수행하기 이전에 검사체의 표면을 충분히 깨끗하게 세척할 필요가 있다. 검사방식에 따라 검사체의 표면을 적당한 구간으로 나누어 탐상을 수행한다 각 구간을 탐상할 때 경계영역을 중첩함으로써 놓칠 위험을 방지한다.

4.6 결함지시의 판독

결함지시는 자분의 멩침을 육안에 의해 판독한다. 그러나 의사결함지시를 유효결함지시로부터 구분해야 한다.

(1) 유효결함지시(relevant indications)

검사원이 사전에 자분탐상에 대한 충분한 지식을 습득하고 있어야 한다. 또한 용접조건에 따른 의사지시 발생 가능성에 대한 판독 능력이 있어야 한다.

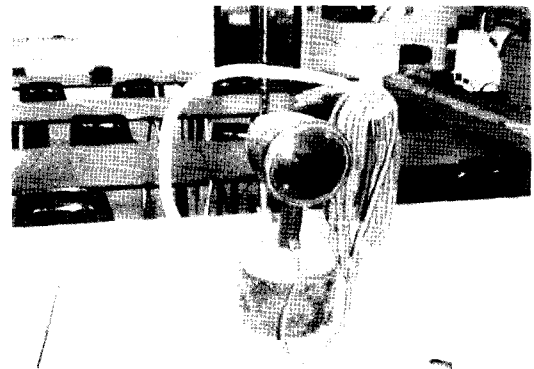


Photo 2 Ultraviolet inspection lamp (black light)

(2) 의사결합지시(pseudo-indications)

결함에 의한 자분의 뭉침 이외에 용접 조건, 검사체의 특성에 따라 의사지시를 보일 수 있다. 노치 등은 자분지시를 나타내므로 노치를 제거한 후 이차검사를 수행해야 한다. 코너 부위에서도 자분지시가 발생하며 이 경우 자기장의 크기를 낮춤으로써 지시를 사라지게 할 수 있으나 결함지시를 판독할 수 있을 정도의 크기를 확보하는 것이 중요하다. 열변형 경계 부위에서 크랙성 결함과 유사한 명확한 자분지시가 발생하나 자화를 줄이면 사라지게 할 수도 있다. 이것이 불가능할 경우 자기탐상법을 적용할 수 없을 경우도 있다. 이 경우 다른 종류의 탐상법(초음파법 등)을 적용해야 한다.

4.7 검사결과의 보관

이상에서 검사한 결과를 보관의 목적을 위해 표면에 부착된 자분을 테이프를 사용하여 떼어내거나 카메라로 녹화한다(Photo. 3).



Photo 3 Example of wet fluorescent magnetic particle inspection result

참고 문헌

1. International Institute of Welding : Handbook on the Magnetic Examination of Welds, 1988
2. 日本非破壊検査協會 : 非破壊検査技術シリーズ, 磁粉探傷試験 II, 1989
3. 日本非破壊検査協會 : 非破壊検査技術シリーズ, 磁粉探傷試験 B, 1989
4. 비파괴검사규격편찬회 : 비파괴검사규격 (2001)
5. J. Blitz : Electrical and magnetic methods of nondestructive testing, Adam Hilger, 1991
6. 표준안은 다음을 참고할 것
 ASTM E109 Dry Powder Magnetic Particle Inspection
 ASTM 138 Wet Magnetic Particle Inspection
 ASTM E125 Reference Photographs for Magnetic Particle Indications
 KS D0213 철강재료의 자분탐상 시험 방법 및 자분 모양의 분류



- 임종수(林宗秀)
- 1959년생
- 포항산업과학연구원 기전자동화연구팀
- 비파괴평가기술, 지능형 Robot를 이용한 자동비파괴탐상, EMAT 기술
- e-mail: zslim@rist.re.kr