

초음파 적외선 열화상을 이용한 접합부의 미세균열 검출 연구

Study on the Micro Crack Detection in Joints by Using Ultrasound Infrared Thermography

박희상*, 최만용*[†], 박정학*, 이승석*, 허용학*, 이보영**, 김재성**

Heesang Park*, Manyong Choi*[†], Jeonghak Park*, Seungseok Lee*, Yonghak Huh*,
 Boyoung Lee** and Jaeseong Kim**

초 록 본 논문은 초음파 적외선 열화상과 위상잠금 방법을 이용하여 이종금속용접(STS304 and SA106 Gr. b)된 파이프의 응력부식균열 결함을 검출하였다. 초음파 가진장치는 출력 250 Watt, 주파수 20 kHz이었다. 실험 결과 이종금속용접부의 파이프 내부에 위치한 균열을 적외선 열화상을 이용하여 검출할 수 있었다. 실제 PT검사를 통하여 배관 내부의 균열이 하나가 아닌 일정한 범위 안에 하나 이상의 크랙이 존재하여 열화상 이미지 상에 넓은 범위의 hot spot 이미지를 만들어 냈음을 파악할 수 있었다. 또한 기존 기술로 검출이 용이하지 못한 마이크로 폭의 미세균열을 검출할 수 있었다. 또한, 초음파탐상기술은 10 μ m 미세크랙의 폭을 갖은 균열을 쉽게 검출하지 못하였다. 그러나 초음파 적외선 열화상 기술은 결함 검출하였다.

주요용어: 적외선 열화상, 초음파, 위상잠금, 이종금속용접부, 응력부식균열

Abstract This study detected SCC defects of dissimilar metal welded(STS304 and SA106 Gr. b) pipes using the ultrasonic infrared thermography method and the lock-in image treatment method among infrared thermography method. The infrared excitement equipment has 250 Watt of output and 20 kHz of frequency. By using the ultrasound infrared thermography method, the internal defects of dissimilar metal weld joints of pipes used at nuclear power plants could get detected. By an actual PT test, it was observed that the cracks inside the pipe existed not as a single crack but rather as a multiple cracks within a certain area and generated a hot spot image of a broad area on the thermography image. In addition, UT technology could not easily defects detected by the width of 10 μ m fine hair cracks. but, ultrasound infrared thermography technique was defect detected.

Keywords: Infrared Thermography, Ultrasound, Lock in Phase, Dissimilar Weld Metal, Stress Corrosion Crack

1. 서 론

2011년 일본에서 발생한 대지진으로 인한 일본 후쿠시마원전의 폭발 및 방사능 유출 등의 문제는 현재도 그 영향을 가늠하기 힘들만큼 엄청난 재난을 미치게 되었다. 이와 같이 원자력발전소에서 발생하는 사고로 인한 방사능의 유출에 따

른 위험성은 전세계를 위협에 빠뜨릴 수 있는 파괴효과를 가지고 있다. 일본의 경우 자연재해에 따른 문제로 나타난 재앙이었지만, 현재 국내에서 소비하는 전기에너지의 절반가량을 책임지고 있는 원자력발전소의 안전성 확보는 필수적이다. 현재까지 운용되고 있는 원자력발전소의 경우 수명이 다되어 다시 연장을 거듭하고 있는 상황에

서 최근 V.C Summer 원전에서 발견된 이중용접 금속부의 균열은 우리나라에서도 발생할 수 있는 상황이다[1,2]. 이중금속용접부의 경우 주로 일차 수응력부식균열(primary water stress corrosion cracking; PWSCC)이 주로 나타났으며 이는 재료의 민감도, 용접부의 인장잔류응력 및 사용중 하중, 부식 환경과 같은 3가지 인자의 상호작용에 의해 발생한다고 알려져 있다. 응력부식균열(stress corrosion crack; SCC)이 발생하기 위한 필요조건은 세가지 주요인자들이 동시에 만족하는 경우이다. 원전 용접부는 대부분 배관 맞대기 용접부로 이루어져 있으며 최근 가압경수로 이중금속용접부에서 PWSCC이 발생한 점을 감안한다면 배관의 이중금속용접부 SCC 검출을 위한 검사 기법의 필요성은 계속되고 있다. 지금까지의 원전 설비의 검사는 초음파탐상검사(ultrasonic testing; UT)를 활용하였으나 원전시설물의 경우 방사선에 의한 피폭의 위험에 항상 노출되어 있고, UT의 경우 기량인증을 통과한 전문가의 기량에 전적으로 의존해야 하며, 넓은 범위를 검사하는데 어려움이 존재하였다. 특히 이중용접부의 결함 검출은 배관의 표면 상태가 고르지 못한 경우가 많고, 용접부 내부의 비드 등에 따른 신호 분석이 용이하지 못해 초기에 발생하는 미세균열의 검출은 더욱 힘든 상황이다. 본 연구는 이와 같은 문제점을 보완하는 기술로 초음파 적외선 열화상 비파괴검사기법(ultrasonic lock in infrared thermography; UIRT)을 활용하였다. UIRT는 절대 온도 0 K 이상의 모든 물체가 방출하는 적외선 에너지를 검출하여 검사자가 볼 수 있는 화상으로 이미지를 만들어 검사하는 기술에 초음파를 접목하여 결함 부위만을 검출하는 방법으로 비접촉으로 넓은 범위를 빠른 시간에 검사할 수 있는 장점을 갖춘 기술이다. 이러한 초음파적외선열화상 기술을 활용하여 인공결함이 아닌 원전배관의 이중금속용접부에 존재하는 응력부식균열의 미세결함 검출을 시도하여 초음파 적외선을 이용한 금속의 미세결함 검출의 가능성을 연구하여 본다.

2. 실험 재료 및 방법

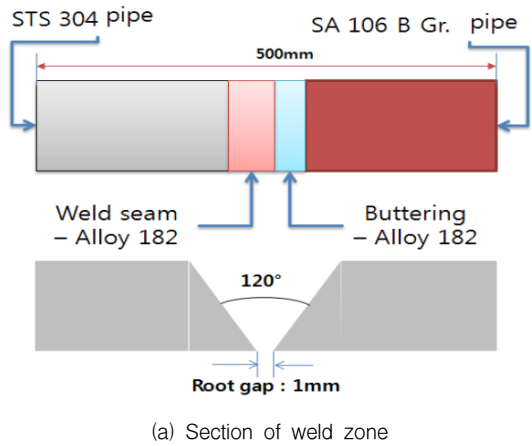
2.1. 실험 재료

본 실험에 사용된 이중금속 용접 배관 시험편

은 현재 원자력발전소에서 주로 사용되고 있는 이중용접부의 재질과 동일한 재질로 실제 원전 배관을 모사한 이중금속 용접 배관을 제작한 후 PWSCC 결함을 만들기 위하여 한국항공대학교 이보영 교수팀에 결함 제작을 의뢰하였다. 본 실험에 사용된 시험편의 경우 실제 압력과 온도 그리고 배관 내부에 강한 화학적 용액을 사용하여 PWSCC 발생 조건을 만들어 SCC를 제작하였다. 실험에 사용된 배관은 탄소강인 SA106 B Gr. 와 스테인리스강인 STS304 재질을 사용하여 제작하였다. 배관의 이중용접방법은 Fig. 1(a)와 같은 방법으로 진행하였으며, 배관의 직경은 89 mm, 두께는 7.6 mm, 용접후 길이는 150 mm로 제작되었

Table 1 The basic descriptions of DMW pipe

Materials	S	Si	Mn	C	Ni	Cr	P	Cu	Fe
STS304	0.02	0.90	1.80	0.08	8.00	18.00	0.04	-	Balance
SA106 Gr. b	<0.06	>0.10	0.29-1.06	<0.30	<0.40	<0.40	<0.04	<0.40	Balance



(a) Section of weld zone



(b) DMW defect specimen

Fig. 1 PWSCC DMW pipes specimen (STS304+SA106 Gr. b)

다. Fig. 1(b)는 내부에 크랙을 만든 후 모습을 나타내고 있다. 이에 활용된 실험 재료의 화학성분과 기계적 물성치는 Table 1과 같다.

2.2. 실험 방법

적외선 열화상을 이용한 결함 검출 방법은 크게 수동적(passive) 방법과 능동적(active) 방법으로 나뉜다. 본 실험에 사용된 방법은 능동적 방법중 위상잠금(lock in) 방법으로 특정 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 전달하여 대상체의 응답신호를 처리하여 결함의 크기를 산출하는 방법이다. 본 논문에서는 결함을 효과적으로 검출하기 위해 초음파 가진 주기와 동기화된 신호를 사용하여 위상잠금기술을 적용하여 실험하였다. 적외선 열화상검사 장치는 초음파 가진장치와 적외선 열화상 카메라로 구성되며, 시험중 시험편과 외부열원과의 열교환을 최소화하기 위해 Fig. 2와 같이 단열챔버 내부에 실험장치를 구성하였다. 초음파 가진장치는 출력 250 Watt, 주파수 20 kHz이며, 적외선 카메라는 프랑스 Cedip의 Silver 480 m 모델(noise equivalent temperature difference; NETD) 25 mK을 사용하였다. 적외선 열화상의 검출 감도를 위하여 시험편 표면은 흑체와 흡사한 조건을 만족시키기 위하여 검정색 무광 페인트로 도포하여 방사율을 0.95이상으로 조절하였다.

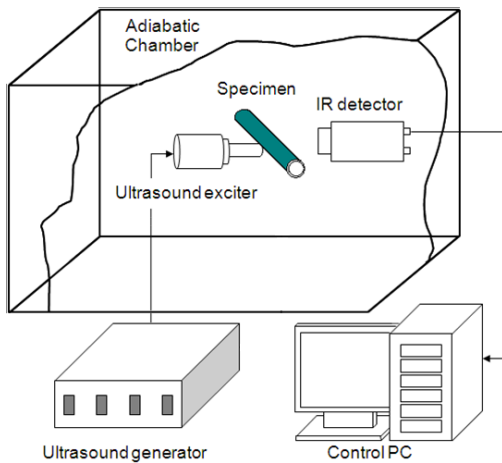


Fig. 2 Infrared thermography experiment system

3. 위상잠금 초음파-적외선 열화상 적용 이론

위상잠금 적외선 열화상 기법은 크게 두가지 알고리즘으로 나눌 수 있는데 하나는 이산푸리에 변환(discrete fourier transform; DFT)을 이용한 방법과 조화근사기반 알고리즘(harmonic approximation based algorithm)을 활용하는 방법이 있다. 먼저 이산푸리에변환(DFT)은 N개의 이산적인 복소수 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ 값들을 복소수값 $F_0, F_1, F_2, \dots, F_{n-1}$ 으로 변환하는 이산 푸리에 변환식 (1)로 정의된다.

$$F_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{N} jk} \tag{1}$$

$$= Re_j + i \cdot Im_j \quad j = 0, \dots, n-1$$

이때 DFT의 j 값은 주파수 증가의 실수부(Re)와 허수부(Im)로 나타낼 수 있으며, 실수부와 허수부를 이용하여 식(2)와 식(3)과 같은 진폭값 A_j (amplitude)와 위상값 \varnothing_j (phase)을 얻을 수 있다.

$$A_j = \sqrt{Re_j^2 + Im_j^2} \tag{2}$$

$$\varnothing_j = atan\left(\frac{Im_j}{Re_j}\right) \tag{3}$$

이를 이용하여 주파수 선정에 따른 진폭이미지와 위상이미지를 얻을 수 있다[3]. 조화 근사(harmonic approximation; HA)는 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 입사하고 이때 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 외부 자극원으로는 결함의 종류와 대상체의 재질에 따라 조화함수로 제어가 용이한 광, 초음파, 진동 등이 사용된다. 본 논문에서는 결함 검출을 위해 자극원을 초음파로 하는 초음파 열화상 기법을 적용하였으며, 조화함수 알고리즘이 포함된 정현파 신호를 초음파에 가하고 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다. 식(4)로 표현되는 고체 내의 1차원 열전도 방정식에서 외부 자극원으로서 초음파를 사용하여 대상체에 조화함수 ($T = T_0 \cos \omega t$)로 가진하고, 이때 대상체의 결함부에서 발생한 열원의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이다[4].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

여기에서 T 는 온도, t 는 시간, k 는 열전도계수, ρ 는 밀도, c_p 는 비열, x 는 열유동 방향에서의 거리이다. 조화함수가 포함된 정현파로 가열된 식(4)의 해는 식(5)와 같이 나타낸다.

$$T(x, t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (5)$$

여기에서, 초음파 가진시 열확산길이(thermal diffusion length) $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$, 열확산계수(thermal diffusivity)는, $\alpha = k/\rho c_p$ 이다. 위상잠금 기법에서는 식(5)에서 측정 결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결함 검출 오류를 최소화할 수 있다. 식(6), (7)과 같이 고조파 근사는 변조 사이클 당 4개의 데이터 포인트가 정확한 위상과 또한 sine 신호의 진폭으로 제공된다는 개념을 바탕에 둔 푸리에 변환의 근사치이다. 더 많은 데이터 포인트를 활용할 경우 노이즈를 줄일 수 있지만, 등간격의 $S_1 \sim S_4$ 까지의 4개의 데이터 포인트에 집중하여 논하면 기준 변조와 관련된 진폭(A)와 위상변위(ϕ)값을 구할 수 있다[5].

$$A(x, y) = \sqrt{[S_1(x, y) - S_3(x, y)]^2 + [S_2(x, y) - S_4(x, y)]^2} \quad (6)$$

$$\phi(x, y) = \frac{x}{\mu} = \tan^{-1} \left(\frac{S_1(x, y) - S_3(x, y)}{S_2(x, y) - S_4(x, y)} \right) \quad (7)$$

푸리에 변환 기반 처리 방법뿐만 아니라 고조파 근사 기반 알고리즘도 Fig. 3과 같이 열화상 시퀀스로부터 이미지인 위상이미지와 진폭이미지가 제공된다.

기준이 되는 진폭 신호는 시뮬레이션 또는 위상잠금 열화상 실험의 가진 소스를 이용하여 사인주기로 제공되고, 각각의 픽셀 S_1 에서 S_4 는 네 개의 선택된 이미지의 방사값이다.

4. 실험 고찰

4.1. 초음파 적외선 열화상 실험

실제 초음파 적외선 열화상 기법을 이용하여

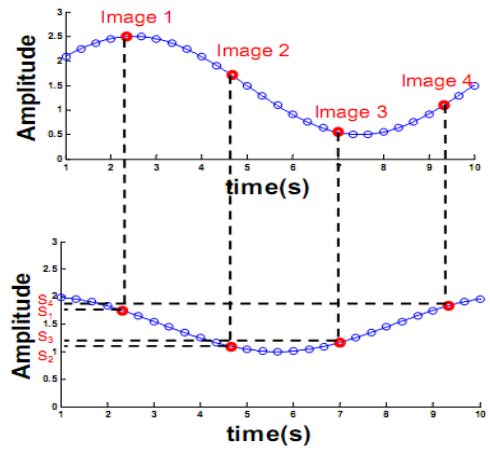


Fig. 3 Images selection during harmonic approximation processing algorithm

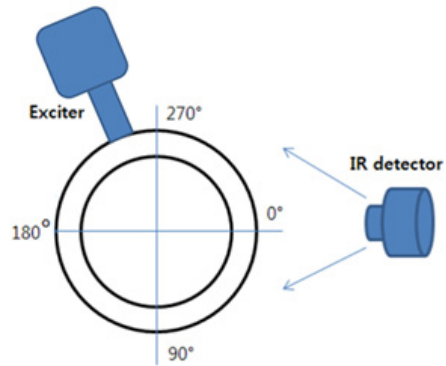
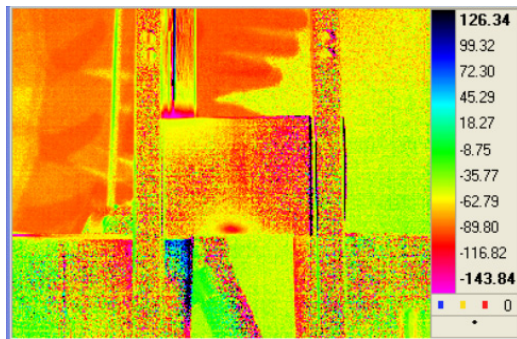


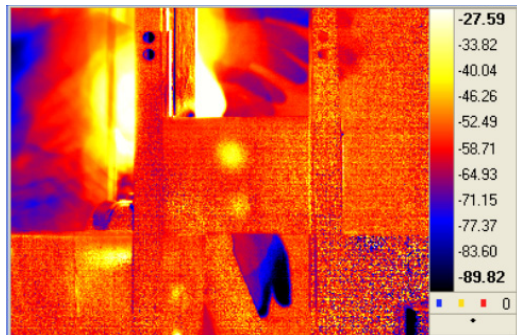
Fig. 4 Directions of defect detecting

이종용접배관의 결함 검출을 실험하였다. Fig. 4와 같이 배관에 초음파 가진장치의 자중만으로 접촉이 되도록 설치한 후 실험을 진행하였으며, 열화상 측정 방법은 90° 각도씩 네 방향으로 배관을 회전하며 진행하였다. 초음파 공구흔이 접촉한 부분은 STS304 재질의 위쪽에 접촉하였으며 50 mHz로 3분 동안 가진하였다.

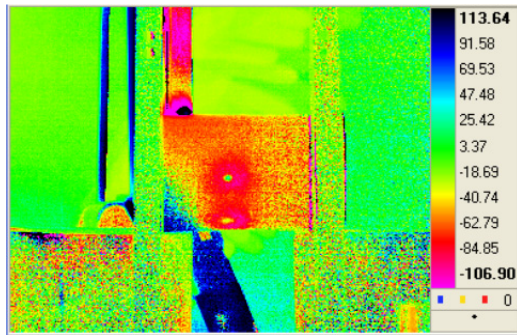
Fig. 5는 실제 이종용접배관에 초음파 가진을 이용한 적외선 열화상 검출을 실험을 통하여 얻은 이미지를 보여주고 있다. 각각의 각도에서 얻어진 핫 스팟(hot spot)을 통하여 결함의 위치를 판단할 수 있었다. 대부분 핫 스팟이 발생한 부분은 weld seam alloy 182와 버터링(buttering) 된 alloy 182 부근에서 결함을 나타내는 열화상 이미지가 검출되었다. 이는 실제 모재(basic material)에서 발생하는 결함보다는 용접부에 의한 열응력



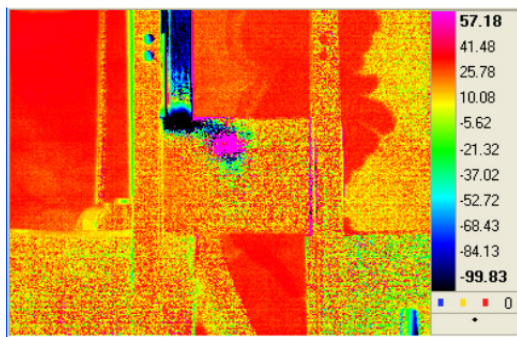
(a) 0°



(b) 90°



(c) 180°



(d) 270°

Fig. 5 Ultrasound lock in infrared thermography of DMW pipe specimen

에 따른 문제라 하겠다. 응력이 고르지 못하거나 이종금속재료의 물성이 일정하지 않은 부분에서 나타나는 문제로 판단되며, 실제 원전배관에서 발생하는 결함의 경우 또한 용접부와 연관된 부분에서 주로 발생한다는 보고와 밀접한 관련이 있다 하겠다.

Fig. 6은 Fig. 5(a)의 온도 이미지를 보여주고 있다. 위상잠금을 이용한 Fig. 5의 이미지에 비하여 Fig. 6에서는 결함부를 찾기 쉽지 않다. 그러나 Fig. 5의 이미지를 통하여 핫 스팟 부분을 검출할 수 있었고 이러한 온도 이미지를 이용하여 Fig. 7의 온도 그래프를 구할 수 있었다. 그래프는 50 mHz로 3주기(cycle) 동안 가진한 후 온도를 나타내고 있다. 배관의 원주방향 중 결함 이미지로 나타난 곳을 원주에 수직인 방향으로 온도 측정을 하였다. 그래프의 82 pixel은 배관의 위쪽을 176 pixel은 배관의 아래쪽을 나타내고 있다. 배관의 위쪽은 초음파 가진흔의 위치와 가까운 관계로 배관의 온도가 상대적으로 높게 측정되고

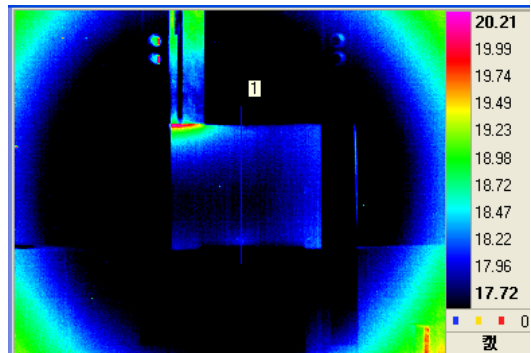


Fig. 6 Ultrasound temperature infrared thermography of DMW pipe specimen(Fig. 5(a))

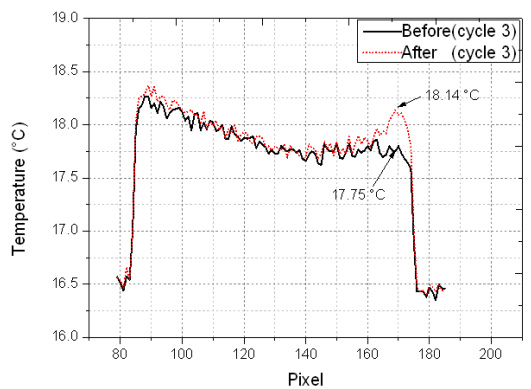


Fig. 7 Temperature graph of DMW pipe specimen (Fig. 6)

배관의 아래쪽은 상대적으로 낮게 측정되었다. 하지만 초음파 가진 하였을 때 초기온도와 가진 후의 온도에 차이가 발생한 부분은 169 pixel에 위치한 부분에서 0.39 °C의 온도 차이를 나타냈다. 이는 위상잠금 이미지의 핫스팟 형태가 실제 온도 차이에 의한 이미지임을 나타낸다 하겠다.

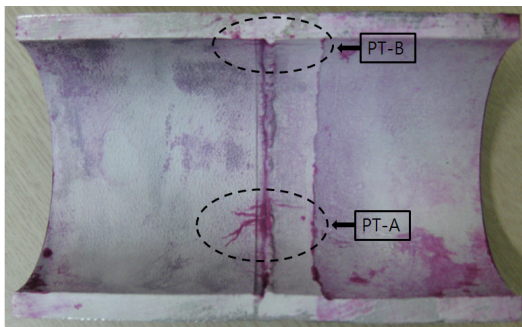
4.2. 액체침투탐상 실험

초음파 가진을 통한 결함 검출 후 결함이 예상되는 부분을 피하여 축 방향으로 배관의 정중앙을 절단한 후 침투탐상시험(penetrant testing; PT)를 통하여 실제 검출된 열화상 이미지와 배관 내측의 결함 위치와 형태를 비교하였다. Fig. 8은 배관 내측에 존재하는 결함을 보여주고 있다. 결함은 크게 세개가 존재하였으며, 이는 초음파 적외선 열화상에서 핫스팟으로 나타난 결함의 수와 일치하였다.

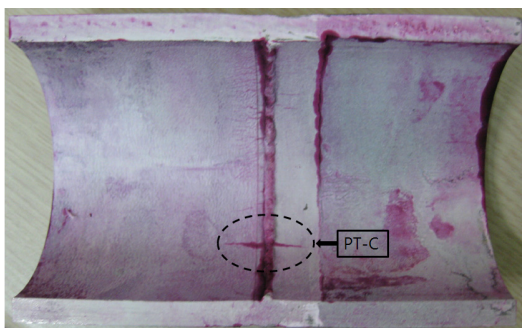
Fig. 9(a)의 결함 PT-A는 Fig. 5(b) 핫스팟 중 위에 나타난 결함으로 면적이 넓게 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 핫스팟의 크기는 실

제 크랙의 크기와 범위가 넓게 존재함을 미리 예상할 할 수 있었으며, 초음파 적외선의 특징으로 크랙이 존재하는 부분에서 발생하는 마찰열이 핫스팟 형태로 표면으로 도출되며 그 과정에서 결함과 연관된 부분에서 발생한 열이 묻혀져 하나의 핫스팟으로 나타남을 PT-A를 통하여 확인하였다. 결함 PT-A의 실측 크기는 용접부의 축방향으로 15.60 mm, 근처에 위치한 STS304 균열은 135° 방향으로 17.41 mm로 측정되었다. 총 34.01 mm의 길이로 나타났다.

Fig. 9(b)는 결함 PT-B를 타나낸다. 전체 길이 27.40 mm 중 STS304 방향으로는 10.07 mm의 길이로 크랙이 진전되었고 대부분의 크랙은 용접부

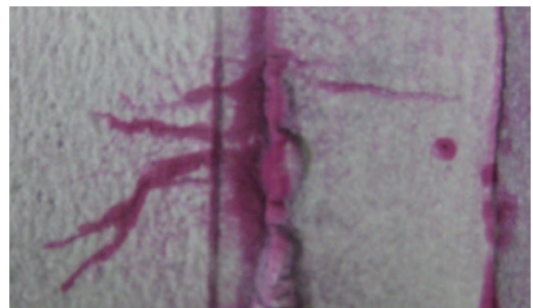


(a) Section A

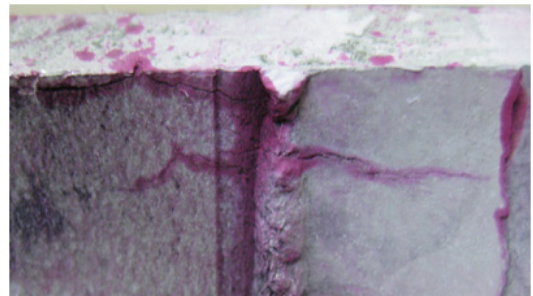


(b) Section B

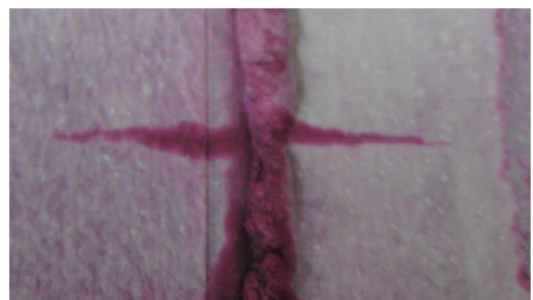
Fig. 8 Liquid penetrant testing of the half pipe specimen



(a) PT-A



(b) PT-B



(c) PT-C

Fig. 9 Penetrant testing defect images magnified

에서 발견되었다. 특히 파단면 바로 아래에 위치한 크랙의 경우 STS304 방향에 위치하여 있는데 길이는 17.01 mm이었으나 깊이는 1.12 mm로 두께 대비 15 % 깊이에 위치한 결함이나 용접부까지 진전되지 않은 상태로 아래쪽에 발생한 균열보다 상대적으로 작은 균열이라 판단되었다. Fig. 9(c)의 PT-C의 크랙은 전체 25.54 mm 중 STS 304 방향으로는 10.11 mm 가량 진전되어 있었으며, 용접부까지 하나의 균열로 이어져 나타났다.

이와 같은 방법으로 액체침투탐상법을 통하여 실제 열화상 결함이 검출된 부근에서 실제 결함이 존재하고 있음을 확인 할 수 있었다.

4.3. STS304의 미세균열 조직

실제 발생한 균열의 경우 원전 배관에서 발생하는 PWSCC의 생성 조건과 같은 조건하에 제작된 균열로 실제 만들어진 균열이 SCC 결함인지를 판단하기 위하여 조직사진을 촬영하였다. Fig. 10에 나타나는 것처럼 응력부식균열의 전형적인 특징인 가지형태(branch type)의 입계응력부식균열(inter granular stress corrosion cracking; IGSCC)의 형태가 뚜렷하게 나타나고 있으며 PWSCC의 대표적인 결함 형태인 입계를 타고 균열이 전진되는 모습을 나타내고 있다. 이와 같은 결함의 형태로 판단하였을 때 초음파 적외선 열화상을 이용하여 검출한 열화상 이미지를 통하여 배관의 이중금속용접부에 존재하는 SCC 균열의 검출이 가능함을 판단할 수 있다 하겠다.

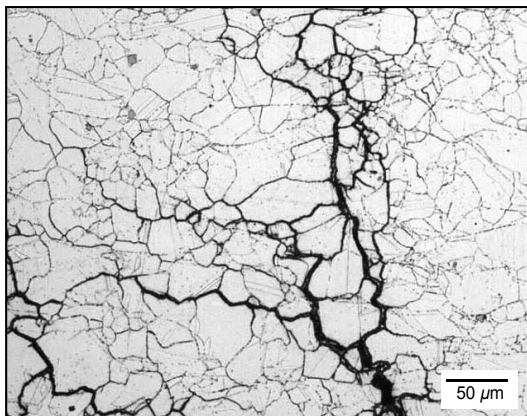


Fig. 10 Microstructure of STS304

미세결함의 폭은 시작분의 100 μm 이상의 크기로 측정되었지만, 실제 마찰에 의한 발열이 활발하게 일어나는 크기인 10 μm 의[6] 존재는 조직검사를 통하여 확인할 수 있었다. 이는 탄소강에 존재하는 균열의 경우 10 μm 의 비선형적 크랙의 폭에서 가장 큰 마찰열이 발생한다는 기존의 논문을 참고로 할 때 본 시험편 나타난 열화상과는 상당한 연관성이 존재한다 하겠다. 마찰이 발열의 가장 중요한 인자임을 고려할 때 결함의 폭과 함께 길이 또한 중요한 변수이다. 실험을 통하여 10 μm 크기로 일정한 균열 폭과 25 mm 이상의 길이 조건이 충족된 경우 초음파 가진을 통한 열화상 검출이 가능함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문은 초음파 적외선 열화상을 이용하여 원전 배관에 사용중인 이중금속용접부의 SCC 미세균열을 검출에 관한 연구 결과 초음파 적외선 열화상에 나타난 핫 스팟의 경우 재료를 파단하여 침투탐상시험을 한 결과 실제 결함이 존재함을 관찰 할 수 있었다. 또한 하나 이상의 미세결함이 가까운 위치에 존재할 경우 핫스팟이 넓은 하나의 결함으로 나타났다. 실험에 사용된 시험편에 존재하는 크랙이 IGSCC 크랙이었으며 이는 실제 PWSCC에 존재하는 IGSCC 미세결함을 초음파 적외선 열화상을 이용하여 초기균열을 검출할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였으며, 향후 균열의 종류 및 깊이, 길이, 결함 폭에 관한 연구를 수행할 경우 더욱 효과적인 비파괴검사 기술로 활용이 가능하 다 할 것이다.

후기

본 연구는 2010년도 지경부 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원과제(No. 20103020020010)와 교육과학기술부 원자력기술개발사업의 결과물입니다.

참고문헌

- [1] F. W. Brust and P. M. Scott, "Weld residual stresses and primary water stress corrosion cracking in bimetal nuclear pipe welds," Trans.

- of ASME PVP Conference, PVP2007-26297 (2007)
- [2] J. S. Kim, T. E. Jin, P. Dong and M. Prager, "Development of residual stress analysis procedure for fitness-for-service assessment of welded structure," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, pp. 713-723 (2003)
- [3] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J Appl. Phys.*, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965 (1992)
- [4] V. P. Vavilov, "Infrared and thermal testing: heat transfer," *Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed)*, X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., pp. 54-86, ASNT, Columbus, USA, (2001)
- [5] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gen. Therm.*, Vol. 37, pp. 693-703 (1998)
- [6] Man-Yong Choi, Seung-Seok Lee, Jeong-Hak Park, Won-Tae Kim and Ki-Soo Kang, "Analysis of heat generation mechanism in ultrasound infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No.1, pp. 10-14 (2009)