

적외선 열화상 카메라를 이용한 탄소강관 용접부 결함검출

권대주¹ · 정나라² · 김재열^{3*}

¹한국폴리텍대학 익산캠퍼스, ²조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과

³조선대학교 기계시스템공학과

Defect Detection of Carbon Steel Pipe Weld Area using Infrared Thermography Camera

DaeJu Kwon¹, NaRa Jung² and JaeYeol Kim^{3*}

¹Iksan Campus of KOREA POLYTECHNIC

²Dept. of Advanced parts and Materials Engineering, Chosun University

³Dept. of Mechanical Systems Engineering, Chosun University

(Received January 14, 2014 ; Revised March 2, 2014 ; Accepted March 4, 2014)

Abstract – The piping system accounts for a large portion of the machinery structure of a plant, and is considered as a very important mechanical structure for plant safety. Accordingly, it is used in most energy plants in the nuclear, gas, and heavy chemical industries. In particular, the piping system for a nuclear plant is generally complicated and uses the reactor and its cooling system. The piping equipment is exposed to diverse loads such as weight, temperature, pressure, and seismic load from pipes and fluids, and is used to transfer steam, oil, and gas. In ultrasound infrared thermography, which is an active thermography technology, a 15-100 kHz ultrasound wave is applied to the subject, and the resulting heat from the defective parts is measured using a thermography camera. Because this technique can inspect a large area simultaneously and detect defects such as cracks and delamination in real time, it is used to detect defects in the new and renewable energy, car, and aerospace industries, and recently, in piping defect detection. In this study, ultrasound infrared thermography is used to detect information for the diagnosis of nuclear equipment and structures. Test specimens are prepared with piping materials for nuclear plants, and the optimally designed ultrasound horn and ultrasound vibration system is used to determine damages on nuclear plant piping and detect defects. Additionally, the detected images are used to improve the reliability of the surface and internal defect detection for nuclear piping materials, and their field applicability and reliability is verified.

Keywords – ultrasound thermography (초음파 서모그래피), piping (관), ultrasound horn (초음파혼), infrared (적외선), defects (결함)

1. 서 론

전력수요의 증대와 지구 온난화 등의 문제를 해결할 수 있는 대체 에너지원으로서 원전 건설이 점차 증가되고 있으며 아시아지역을 중심으로 정부 주도하에 원전개발체제를 구축하고 있다. 우리나라는 1958년 공표

한 원자력 법을 기반으로, 에너지의 안정적인 수급을 위하여 원자력발전을 도입하기로 하여, 1978년 4월 고리원전 1호기가 처음으로 상업운전을 시작한 이후 원자력발전소를 지속적으로 건설해 왔고, 2012년 7월 기준으로 총 23기의 원자로를 가동 중에 있으며, 설비용량은 1,872만kW로 미국, 프랑스, 일본, 러시아, 독일에 이은 세계 6위의 규모이다. 2009년 기준으로 국내 원자력발전량은 1,478억kWh로 국내 총 발전량의 34.1%

*Corresponding author : jykim@chosun.ac.kr
Tel: +82-62-230-7745, Fax: +82-62-230-7035

를 차지했으며, 이는 서울시가 약 3.5년간 국내 전 가정이 약 3년간 사용할 수 있는 전력에 해당할 만큼 큰 비중을 차지하고 있다.

우라늄 1그램이 분열할 때 생기는 에너지는 석유 9 드럼, 석탄 약 3톤이 완전 연소할 때 생기는 에너지와 맞먹는다. 즉, 우라늄은 석탄보다 수치상 약 3백만 배의 열을 낸다고 할 수 있다. 원자력발전은 이 열로 만든 증기의 힘으로 터빈을 돌려 전기를 일으키는 것으로 매우 효율적인 청정에너지라고 할 수 있으나 방사선이 나온다는 취약점이 있다[1]. 그렇기 때문에 운전 중은 물론 정지 시에도 방사선 및 방사성폐기물은 철저히 관리되어지고 있지만 지금까지도 원전의 안전성 및 신뢰성에 대한 문제 제기는 끊임없이 이어지고 있었으며, 후쿠시마 원전 사고 이후 안전에 대한 신뢰성 확보가 중요한 문제로 대두되고 있다.

원자력 사고는 다른 어떤 사고보다 초기 대응이 중요하다. 초기대응 방법에 따라 원자력 사고의 규모나 사태추이가 달라질 수 있기 때문이다. 그러나 이에 앞서 사전에 미리 예측하고 판단하여 사고를 미연에 예방하는 것이 더 중요하며 많은 국가에서 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

각종 구조물의 소재나 재료는 완전무결할 수 없기 때문에 그 수명 또한 영구적일 수가 없다. 자체적인 결함이 있을 수 있을 뿐만 아니라 가공 및 사용 중에도 결함이 발생하여 성장함으로써 재료에 영향을 주어 결국 구조물의 수명 단축으로 이어지게 된다. 그러므로 구조물이나 대상체의 내부 구조에 어떠한 결함이 존재하는지 그리고, 그 결함들이 사용함에 있어 얼마나 유해한가를 알아야 한다. 이러한 판단의 근거를 제시하는 것이 비파괴 검사 기술이다. 즉 비파괴 검사로 대상물에 존재하는 유해한 결함의 유무와 위치 및 크기 등을 확인하고 대처함으로써 대상체의 수명을 연장시켜 대형사고 및 파손을 방지하여 원전의 신뢰성을 높일 수 있다[1].

초음파 서모그래피(ultrasound thermography) 기술은 시편에 20~30 kHz 대역의 초음파를 입사하면 결함부에서 발열이 되고, 그 열원을 적외선 열화상 카메라로 측정함으로써 결함을 검출하는 기술이다. 이 기술은 넓은 면적을 동시에 검사 할 수 있고, 크랙 또는 박리와 같은 결함을 실시간으로 검출 할 수 있어 신재생에너지 산업, 자동차 산업, 우주항공 산업에서 차세대 비파괴 검사기술로 주목 받고 있다.

본 논문에서는 여러가지 비파괴검사 방법 중 초음파

서모그래피 기법을 적용, 원전 배관용으로 사용되는 탄소강관을 대상으로 시험편을 제작하고 최적 설계된 초음파 혼과 초음파 가진 시스템을 이용하여 탄소강관 용접부의 결함을 검출하고자 한다

2. 실험장치 구성 및 시험편

2-1. 시험편 제작

시험편은 원자력발전소 배관에 쓰이는 재질과 같은 탄소강관으로 채택하였으며, 직경이 65 mm, 두께 3 mm 직관과 이와 동일하도록 직경이 65 mm, 두께 3 mm의 90° 곡관, T분류관, 플랜지에 용접으로 접합하여 3개의 시험편을 제작 하였으며, Fig. 1과 같다. 붉은색 원으로 표시한 곳은 용접으로 접합한 부위에 드릴을 이용하여 인공적인 결함을 만든 곳을 표시한 것이며, 적외



Fig. 1. Specimens for ultrasound thermography imaging.

Table 1. Specifications of infrared thermography camera

Common Features	
IR resolution	640 × 480 pixel
Temperature range	-40°C~150°C, 100°C~650°C, 300°C~2,000°C
Thermal sensitivity/NETD	40 mK @+30°C
Zoom	1-8 × continuous, digital zoom, including panning
Focus	Automatic (one shot) or manual
Data communication interfaces	USB-mini, USB-A, Bluetooth, Wi-Fi
Size (L × W × H)	143 × 195 × 95 mm
Weight	1.3 kg

선열화상기법은 방사율에 큰 영향을 받으므로 시험편의 방사율을 낮추기 위해 검은색 무광페인트를 도포하여 실험을 진행하였다[9].

2.2. 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 FLIR T640열화상 카메라는 최고(640×480) 픽셀의 IR해상도를 가지고 있으며, 측정온도 범위는 -40°C~2,000°C, 민감도는 30°C에서 0.035°C이며, 카메라 상세 스펙은 Table 1과 같다.

초음파 가진기는 대영초음파의 DYW-430H 핸드건 타입의 부스터 일체형 가진기이다. 사양은 입력전원 AC180~245V, 초음파 가진시간 0.1~5 sec 연속발진이 가능하며, 주파수조정범위는 30 kHz이다. 출력은 400W이며 제원은 Fig. 2와 같으며, 실험장치의 구성은 Fig. 3과 같다[5].

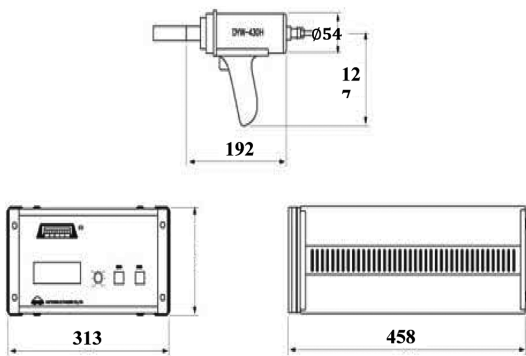


Fig. 2. Specifications of ultrasound.

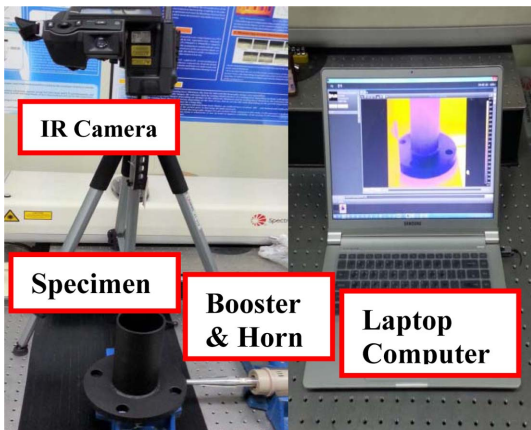


Fig. 3. The composition of Ultrasonic experiment equipment.

3. 결과 및 고찰

3-1. 열화상 이미지 분석

3-1-1. T분류관

T분류관 용접부에 임의의 결함을 주었으며, 실험 중 진동으로 인한 시험편과 가진기의 움직임을 최소화 하며, 시험편으로 초음파 펄스가 최대한 입사 될 수 있도록 시험편과 혼을 밀착시켰다. 그 상태에서 30 KHz의 초음파 펄스를 35초 동안 5초 간격으로 인가하였으며, 그 결과 인공결함 부위인 Spot2에서 Hot spot이 발생하였다. 즉 Spot2가 결함이 없는 정상 부위 Spot1, Spot3보다 온도가 높아지는 것을 적외선 열화상 카메라를 통해 계측할 수 있었다. Fig. 4는 지그에 고정되어 밀착된 시험편과 혼의 모습 및 열화상 이미지를 보여주고 있다.

3-1-2. 곡관

30 KHz의 초음파를 35초 동안 5초 간격으로 가진



Fig. 4. Image of the ultrasonic thermography test for T type pipe.

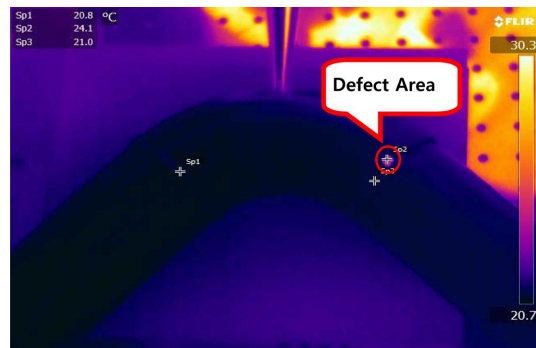


Fig. 5. Image of the ultrasonic thermography test for curved duct.

하여, 적외선 열화상 카메라를 이용해 계측하였다. 열화상 이미지를 살펴보면 초음파 가진시 결함이 있는 Spot2에서는 다른 정상정인 부위보다 온도가 상승하는 Hot spot이 발생하는 것을 확인하였으며, 결함이 없는 정상 용접부 Spot1과 Spot3의 경우에는 온도의 변화가 크지 않아 적외선 열화상 카메라 계측영상에서도 큰 변화가 없음을 확인 할 수 있었다. Fig. 5는 곡관에 초음파 서모그래피 기법을 적용해 비파괴 검사를 수행한 이미지 이다.

3-1-3. 플랜지

초음파 서모그래피 기법을 적용하여 비파괴 검사를 수행하였다. 30 KHz의 초음파 펄스를 35초 동안 5초 간격으로 인가하였다. 적외선 열화상 카메라 계측 영상을 통해 보았을 때 결함이 없는 정상 부분인 Spot1과 Spot3에서는 온도의 큰 변화를 알 수 없었으며, 인공적인 결함을 만든 부위 Spot2에서 Hot spot이 발생하는 것을 Fig. 6 플랜지의 열화상 이미지를 통해 알 수 있다.

3-2. 온도 데이터 분석

3-2-1. T분류관

본 실험에서는 용접부 결함에 대한 정확한 온도 데이터를 도출하기 위해 결함 부분에 1개, 결함이 아닌 부분 2개로 총 3개의 Spot을 지정하였다. 실험을 수행한 결과 Fig. 7의 그래프와 같이 결함이 있는 용접부 Spot2에서 최고 22.4까지 온도가 올라가는 것을 알 수 있었으며, 정상적인 용접부 Spot1과 Spot3은 온도는 서로 비슷했으며, 결함이 있는 Spot2와는 약 2차이가 나는 것을 알 수 있었다. 초음파를 가진하기 시작하였

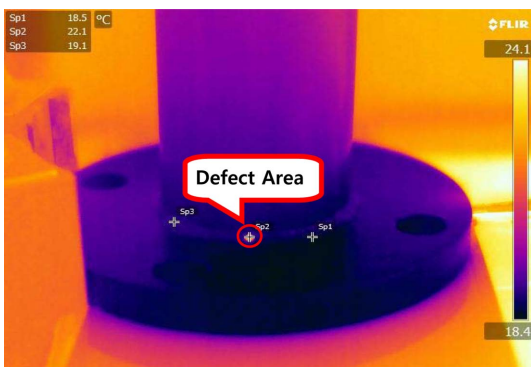


Fig. 6. Image of the ultrasonic thermography test for flange.

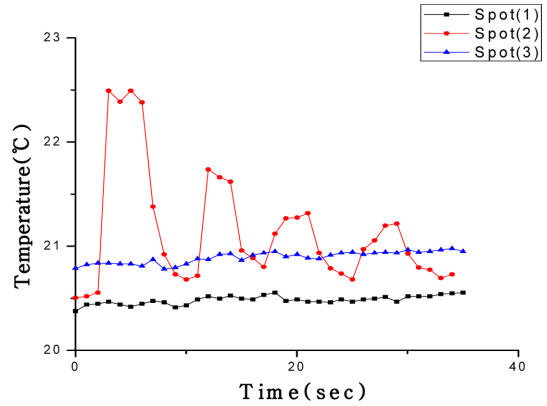


Fig. 7. Temperature result graph of the T type duct ultrasonic thermography test.

을 때 결함부위에서는 온도가 상승하여 열화상 이미지와 같이 Hot spot을 발생시키는 것을 알 수 있었다.

3-2-2. 곡관

곡관의 온도데이터는 Fig. 8의 그래프와 같으며, 용접부 결함에 대한 정확한 온도 데이터를 도출할 수 있도록 3곳에 Spot을 지정하여 온도를 측정 분석하였다. 초음파 서모그래피 기법을 적용하여 실험을 진행한 결과 인공적인 결함을 만든 부분인 Spot2에서 최고온도가 24.1까지 상승하는 것을 확인 하였고, 정상 용접부 Spot1과 Spot3같은 경우 20.8, 20.9였다. 결함이 없는 부분과 결함이 있는 부분은 약 3의 온도차이가 나는

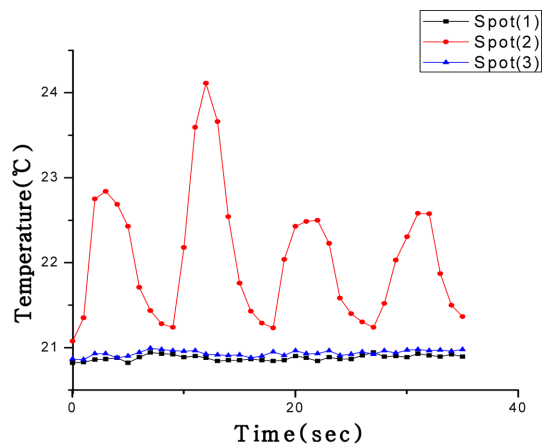


Fig. 8. Temperature result graph of the curved duct ultrasonic thermography test.

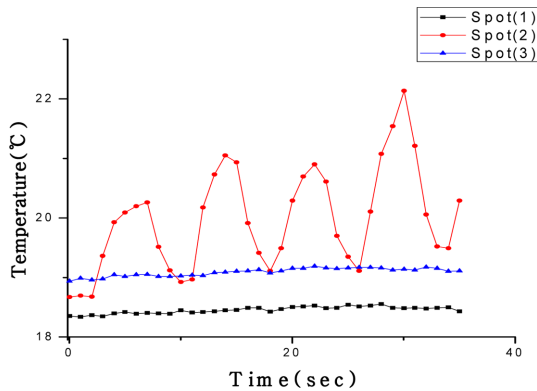


Fig. 9. Temperature result graph of the flange ultrasonic thermography test.

것을 확인할 수 있었다.

3-2-3. 플랜지

결함 부분에 1개, 정상 부분에 2개, 총 3개의 Spot을 지정하여 실험을 수행하였고, Fig. 9와 같은 온도 데이터를 수집하였다. 결함이 있는 용접부 Spot2에서는 온도가 최고 22.1까지 올라가는 것이 측정되었으며, 정상 용접부 Spot1과 Spot3에서 최고온도는 18.5와 19.1로 측정되었다. 정상 용접부에서는 초음파 가진시 온도의 변화가 크게 나타나지 않았다고 볼 수 있으며, 인공결함부위에서는 초음파 가진시 온도가 급격히 상승됨을 그래프를 통해 알 수 있었다. 결함이 없는 Spot1과 Spot3은 결함이 있는 부위 Spot2와 최고온도의 차이는 약 3차이가 나는 것을 알 수 있었다.

4. 결과 분석

본 논문에서는 T분류관, 곡관, 플랜지 3가지 유형의 탄소강관 배관용접부에 초음파 서모그래피 기법을 적용하여 총 35초 동안 5초 간격으로 시험편에 초음파를 가진 하였고, 이를 적외선 열화상 카메라로 측정하는 실험을 수행하였으며, 그 결과 온도데이터를 분석하였다. 초음파를 가진 하는 동안 용접결함부위에서 온도가 상승하였으며, 정상적인 용접부에서는 실험수행 35초 동안 온도의 변화가 없었다. 3가지 유형의 시험편의 실험에서 모두 비슷한 유형의 온도데이터를 얻을 수 있었고, 결함부와 정상적인 부분의 온도차이는 평균적으로 2°C~3°C차이가 나며, 초음파가 결함 부위를 통과할 때 결함 면 사이의 마찰이 탄성파를 일부 열로

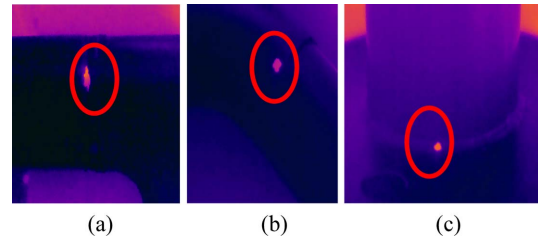


Fig. 10. Infrared thermography images of hot spots in (a) T type pipe, (b) curved duct, and (c) flange.

변환시키게 됨으로, 결함부의 온도가 상승함으로 열화상 이미지에 휘도가 높은 밝은 영역으로 측정됨으로 결함 유무의 판단이 가능하였다. Fig. 10은 결함부위에서 밝게 빛나는 영역이 측정된 열화상 이미지를 보여 주고 있다.

5. 결 론

원전 및 산업 전반에서 많이 쓰이는 T분류관, 곡관, 플랜지 3가지 유형의 배관의 건전성 평가를 위해 적외선 열화상 기법의 적용성 및 신뢰성을 검증하고자 탄소강 소재의 시험편을 제작하였다. 용접부의 결함에 대해 초음파 서모그래피 기법을 적용하여 열화상 진단을 하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같이 내릴 수 있었다.

- 1) 실험수행결과 결함부위에서 정상부위보다 온도가 2°C~3°C 높게 측정되었으며, Hot Spot이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 초음파를 가진 하였을 때 15~20초의 짧은 시간 안에 결함을 검출 할 수 있었으며, 대형 배관의 경우 더 높은 출력의 초음파 가진기를 사용한다면 결함 검출이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 원전에서 배관의 결함은 누출사고로 이어질 수 있는 큰 위험이 내제되어 있기 때문에 비파괴 검사를 통해 결함을 미리 발견하고 조치함으로써 사고를 미리 예방할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] Konepa, Status of domestic nuclear power, http://naver-cast.naver.com/contents.nhn?rid=20&contents_id=5031, Accessed March 25, 2011.
- [2] Choi, Y. H., Choi, S. Y., Kim, H. K., "Enhancement of piping reliability in nuclear power plants", Proc. Spring

- Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 64-69, June, 2006.
- [3] Zweschper, T., Riegert, G., Dillenz, A., Busse, G., "Ultrasound burst phase thermography (UBP) for applications in the automotive industry", *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.*, Vol. 657, pp. 531-536, 2003.
- [4] Gleiter, A., Riegert, G., Zweschper, T., Busse, G., "Ultrasound lock-in thermography for advanced depth resolved defect selective imaging", *Insight (Non-Destructive Testing and Condition Monitoring)*, Vol. 49, pp. 272-274, 2007.
- [5] Kim, S. H., Kim, J. Y., Choi, S. H., You, S., "The research on thermal pattern using the method of ultrasound thermography", Proc. Spring Conference of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 127-128, June, 2011.
- [6] Cho, J. W., Seo, Y. C., Jung, S. H., Kim, S. H., Jung, H. K., "Fast defect detection of PCB using ultrasound thermography", *KIEE Rev.*, Vol. 55, No. 2, pp. 68-71, 2006.
- [7] Cho, J. W., Choi, Y. S., Jung, S. H., Jung, H. K., "A brazing defect detection using an ultrasonic infrared imaging inspection", *J. Korean Soc. Nondestr. Test.*, Vol. 27, No. 5, pp. 426-431, 2007.
- [8] Cho, Y. J. "An exploratory study on optimized test conditions of look-in thermography technique", *J. Korean Soc. Nondestr. Test.*, Vol. 31, No. 2, pp. 157-164, 2011.
- [9] Kim, K. S., Jung, H. C., Chang, H. S., Kim, H. S., La, S. W. "Defect detection of wall thinned straight pipe using shearography and look-in infrared thermography", *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 26, No. 11, pp. 55-61, 2009.
- [10] Zweschper, T., Riegert, G., Dillenz, A., Busse, G., "Ultrasound excited thermography - advances due to frequency modulated elastic waves", *Quant. Infrared Thermogr.*, Vol. 2-1, pp. 65-76, 2005.