[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 30, No. 4 (2010. 8)

발전소 열교환기 헤더와 튜브의 부분 용입형 용접부 초음파 자동검사시스템 개발

Development of Automated Ultrasonic Testing System for Partial Joint-Weld of Heat Exchanger's Header to Tube in Power Plant

이진혁*, 임성진**, 박익근***, 김대현***†

Jin-Hyuk Lee*, Seong-Jin Lim**, Ik-Keun Park*** and Dae-Hyun Kim***†

초 록 발전설비의 열교환기는 대형 헤더에 다수의 튜브가 용접된 구조로 협소한 튜브간격으로 인하여 안전성 확보와 수명진단을 위한 비파괴검사에 많은 제약을 받는다. 특히 일부의 헤더 용접부는 부분 용입형 용접구조로 이루어져 있어, 루트부에 용입부족 결함이 발생하기 쉽다. 이러한 용입부족 부분은 구조물의 형상과 결함을 구분하여 판정하기 어렵기 때문에 이를 검출할 수 있는 검사방법이 요구된다. 본 연구에서는 헤더와 튜브로 이루어진 열교환기 부분 용입형 용접부에서 발생하는 용입부족 결함과, 용접비드 내의 결함을 검출하고자 초음파검사 기법을 이용한 자동검사시스템을 개발하였고 이 시스템을 이용하여 용접부의 결함을 효과적으로 검출할 수 있었다.

주요용어: 열교환기, 부분 용입형 용접부, 초음파, 자동화검사

Abstract A power plant's heat exchangers work under poor conditions, such as high temperature, high pressure, corrosion, mechanical stress and vibration. Especially, partial joint-weld of heat exchanger's header to stub-tube is the place where incomplete penetration flaws can easily occur. But, it is hard to evaluate the safety of the structure by conventional nondestructive testing techniques. So it is necessary to test integrity of the weld inside and to develop testing technique and equipment that can detect the flaws at the weld point in order to enhance reliability of the test result. In this study, we developed a suitable automated ultrasonic testing system that can inspect the partial joint-weld of header to stub-tube of power plant. Finally, we showed the efficiency of the automated ultrasonic-testing-system from the application.

Keywords: Heat Exchanger, Partial Joint-Weld, Ultrasonic, Automated Inspection

1. 서 론

발전설비의 열교환기는 운전 중 고온, 고압, 부식, 기계적 응력 및 진동 등의 열악한 조건 하에서 가동된다. 따라서 가동 중에 부품의 결함발생 혹은 조기 파손의 가능성이 매우 높다. 화력발전소의 고온 가동부에 해당되는 터빈 로터, 보일러 헤더 및 주 증기 배관을 대상으로 적용되는 비파괴검사는 육안시험(VT), 침투탐상시험(PT), 자분탐상시험(MT), 방사선투과시험(RT), 초음파 두께측정, 초음파탐상시험(UT), 와류탐상시험(ECT), 음향방출시험(AE) 등의 기법 등이 있다. 그러나 현재 열 교환기 헤더와 튜브의 용접부에서 발생하는 균열을 검출하는 검사기법은 용접부 표면 결함만 검출 할 수 있

[접수일: 2010. 2. 19, 수정일: (1차: 2010. 7. 9, 2차: 2010. 8. 2) 게재확정일: 2010. 8. 6] *서울산업대학교 에너지환경대학원, **서울산업대학교 산업대학원, ***서울산업대학교 기계공학과, †Corresponding Author: Seoul National University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Seoul 139-743, Korea, (E-mail: dkim@snut.ac.kr)

는 자분탐상법을 적용 하고 있어 검사 결과의 신뢰도가 낮다. 특히 헤더, 스터브 튜브(stub tube)의 부분 용입형 용접부는 구조상 용입부족 결함이 발생될 가능성이 큰 곳이다. 특히 용입부족이 발생된 용접부의 경우 운전 중에 걸리는 유체의 압력과 진동, 열적 피로에 의하여 균열로 성장 되어 파손될 가능성이 아주 높다[1-3]. 또한 기존의 작업자의 수작업에 의한 재래식 초음파 비파괴검사 기법은 접근성과 검사 결과의 신뢰도 측면에서 한계가 있다. 따라서 열교환기의 초음파탐상검사는 탐촉자의 이동이 자동화된 기계적 이송장치에 의해 이루어지는 이른바 자동 초음파탐상검사가 각광을 받고 있다[4,5].

본 연구에서는 발전소 보일러 열교환기의 헤더와 스터브 튜브 용접부의 내, 외부 검사에 적합한 초음파 탐촉자, 자동 초음파탐상을 위한 시스템을 개발하였으며 현장 적용을 통하여 시스템의 유효성을 확인하였다.

2. 보일러 과열기 부분 용입형 용접부

발전소 보일러의 열교환기 구조는 Fig. 1과 같이 대형 헤더에 다수의 튜브가 용접된 구조로 되어 있다. 다수의 열교환기는 헤더 용접부에 스터브 튜브가 중첩되고 튜브간 피치를 좁게 설계하여 용접 비드 겹침 및 조악한 용접시공으로 용접 잔류응력 및 입열량이 집중되어 주요 손상 원인이 된다.

또한 일부 보일러의 헤더와 튜브의 용접부는 Fig. 2와 같이 부분 용입 형식으로 제작, 보일러 가동 및 정지 시 노치 응력이 용접 루트부에 집중되는 취약한 구조 이다. 이와 같이 좁은 튜브 간격으로 접근의 한계성이 있고 용접내부의 결함 및 용입부족(*incomplete penetration; IP*) 결함을 갖는 튜브

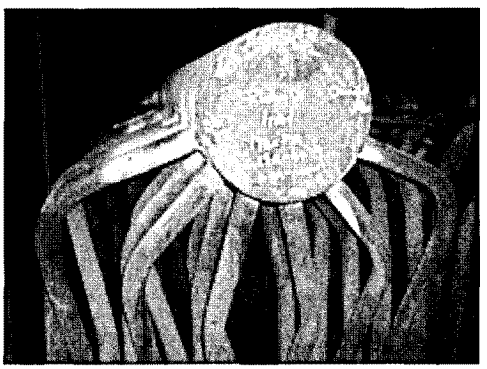


Fig. 1 Picture of boiler heat exchanger

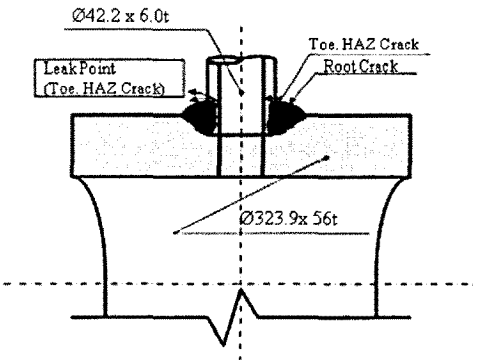


Fig. 2 Structure of header to tube weld

용접부의 검사를 위해서는 협소한 공간에서 용접부 내부의 검사가 필요하다. 이러한 검사 조건을 만족하기 위해서는 소형화된 로봇을 이용한 자동화 초음파검사가 적합하다.

3. 자동 초음파검사 시스템

3.1. 열 교환기 초음파검사 시뮬레이션.

발전소 보일러 열교환기 용접부 검사를 위해 CIVA 프로그램을 이용하여 초음파탐상검사 시뮬레이션을 실시하였다. 열교환기의 구조와 용접부의 형상을 고려하여 적용 가능한 탐촉자의 형상과 검사방법을 확인하여 자동초음파검사 시스템을 설계하였다. 또 검사 위치와 튜브의 두께에 따른 빔 진행 각도를 시뮬레이션과 빔 프로파일 확인을 통하여 탐촉자를 설계 및 제작 하였다. Fig. 3은 CIVA 프로그램을 이용한 용접부에서 초음파의 전파 시뮬레이션이다.

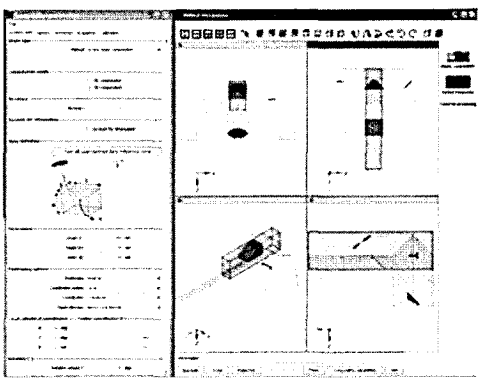


Fig. 3 Simulation of ultrasonic propagation using CIVA software

3.2. 장비의 구성 및 기능

초음파검사를 위한 장비는 초음파를 발생시키고 반사파를 수신하는 탐촉자와 이를 구동하고 신호를 처리하는 펄서/리시버 및 수신된 신호를 표시하는 스코프로 구성된다. 초음파 자동검사장비는 펄서/리시버, 탐촉자와 이를 이송해주는 장치와 제어부 및 프로그램이 추가적으로 구성된다[5,6]. Fig. 4는 개발된 초음파 자동검사장비의 구성도이다.

튜브 용접부 검사용 자동 초음파검사장비는 초음파 탐촉자에 전기적 펄스를 인가하고 수신신호를 증폭하는 펄서/리시버와 수신된 전기 신호를 모니터에 나타내도록 A/D board를 사용하여 구성하였다. 또 초음파 탐촉자를 자동으로 이송하여 검사를 수행할 수 있는 스캐너와 이를 구동하기 위한 제어 모듈이 내장되어 있으며, 이를 컴퓨터를 기반으로 제어할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 그리고 용접부의 결함과 용입부족 결함을 검출하기 위하여 제작된 스캐너에 결합되는 초음파 탐촉자를 개발하였다. Fig. 5는 개발된 초음파 자동검사 시스템이다.

3.3. 제어 프로그램의 구성 및 기능

자동 초음파검사 장비의 제어를 위해 PC를 기반으로 제어하는 프로그램을 개발하였다.

이 프로그램은 펄서/리시버와 A/D board로부터 초음파의 신호의 송·수신 및 설정을 제어할 수 있다. 그리고 스캐너의 이동과 탐상 속도 등을 제어하며, 수신된 초음파신호를 진행거리와 진폭 및 스캐너의 위치를 저장하여 A/B/C-scan 이미지로 구현할 수 있다. 추가로 탐상 결과를 저장하여 데이터를 필요할 때 이용할 수 있게 하였다. Fig. 6은 프로그램에서 탐상신호의 A/B/C-scan 이미지를 보여주고 있다.

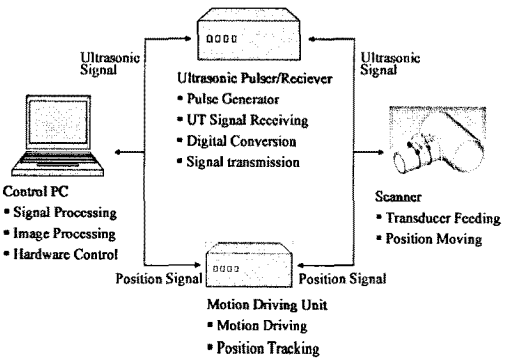
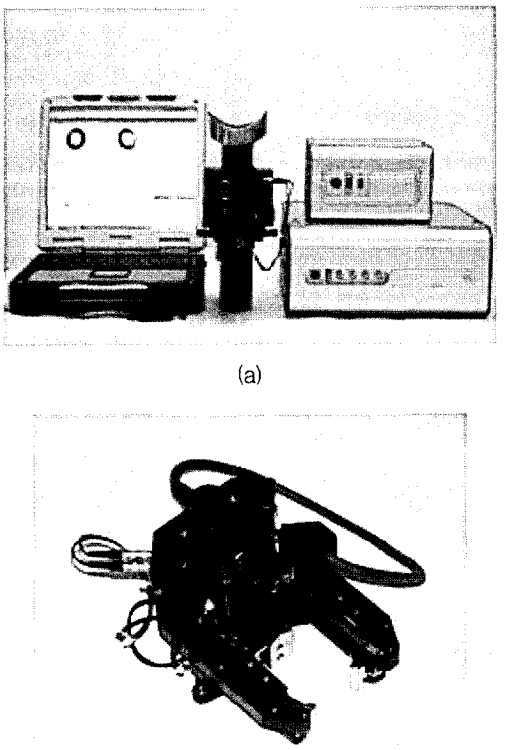


Fig. 4 Schematic diagram of automated ultrasound testing system



(a)

(b)

Fig. 5 Picture of the automated ultrasonic testing system and tube scanner, (a) Automated ultrasonic testing system, (b) Tube scanner

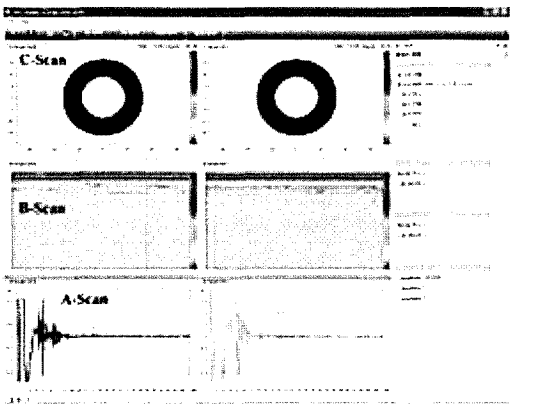


Fig. 6 Program window with A, B, C-scan

4. 자동탐상시스템의 결함 평가

4.1. 모의시험편을 통한 결함 평가

4.1.1. 모의시험편의 제작

자동 초음파검사 장비의 성능 검증을 위해 발전소 열교환기 헤더와 튜브의 용접 모의 결함 시험편을 제작하였다. 각각의 시험편은 실제 열교환기의 구조와 같이 협소한 간격으로 고정하여 제작된 스캐너의 적용성을 확인 하였다. 시험편 튜브의 두께는 검사 대상 발전소의 튜브 두께와 같은 6.2 mm, 7.3 mm의 두 가지이며 각각 다른 위치와 크기의 내부결함을 제작하였다. 결함은 일부 용접 후 설계한 결함이 내재 되도록 노치형태로 방전 가공한 후 용접하여 제작 하였으며, 방사선투과검사 결과 설계와 유사한 결함의 형상과 크기를 확인 할 수 있었다. Fig. 7은 제작된 모의 시험편이며, 시험편의 용접부에 내재되어 있는 결함의 설계내용은 Table 1과 같다.

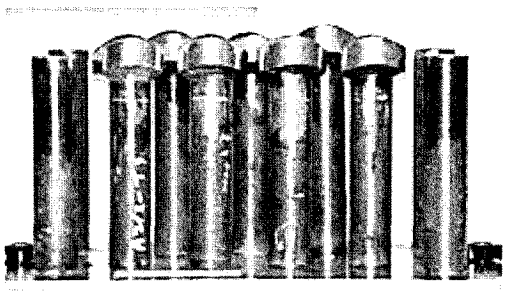


Fig. 7 Mock-up specimen with defect in the weld

Table 1 Substance of flaws in the mock-up specimen

Specimen	Substance (unit : mm) Height length width
A	▶ Thickness : 7.3mm ▶ Flaw : Nothing
B	▶ Thickness : 7.3mm ▶ Flaw : IP in the whole weld
C	▶ Thickness : 7.3mm ▶ Flaw: #1: 0.5×5×2 #2: 0.5×5×9 #3: 5×0.5×4 #4: 7×2×9
D	▶ Thickness : 7.3mm ▶ Flaw : #1,2: 0.5×3×8.5 #3,4: 0.5×6×9
E	▶ Thickness : 6.2mm ▶ Flaw : Nothing
F	▶ Thickness : 6.2mm ▶ Flaw : IP in the whole weld
G	▶ Thickness : 6.2mm ▶ Flaw : #1: 0.5×5×2 #2: 0.5×5×9 #3: 5×0.5×4 #4: 7×2×9

4.1.2. 모의시험편의 결함 측정

모의시험편의 튜브의 두께와 용접부를 고려하여 용접부 결함과 용입부족을 검출하기 적합한 빔 진행 각도를 시뮬레이션을 통하여 선택하였다. 시뮬레이션 결과 2 skip 거리에서 튜브의 두께에 따라 용접부를 탐상하기 위하여 초음파의 진행 각도를 45° 선정하였으며, 튜브 끝부분과 용입부족을 검출하기 위한 초음파의 진행각도를 55°로 선정하였다. 선정된 빔 진행 각도의 사각탐상용 2채널 초음파 탐촉자를 제작하여 결함을 탐상하였다.

탐상방법은 용접부를 2 skip 거리에서 탐상할 수 있도록 계산된 입사점에 탐촉자를 위치하여 스캐너를 고정하였다. 시작점에서 탐촉자를 원주 방향으로 360° 회전하여 1회 탐상 후 탐촉자를 전진시켜 역방향으로 360° 회전하며 탐상하였다. 총 6회에 걸쳐 원주방향으로 회전하며 용접부 전 범위를 탐상하여 결과를 확인하였다. Fig. 8은 모의시험편 C의 탐상 결과이다. 용접부 탐상을 위해 설계된 굴절각 45°의 탐촉자에서 4개의 결함이 확인 되었다.

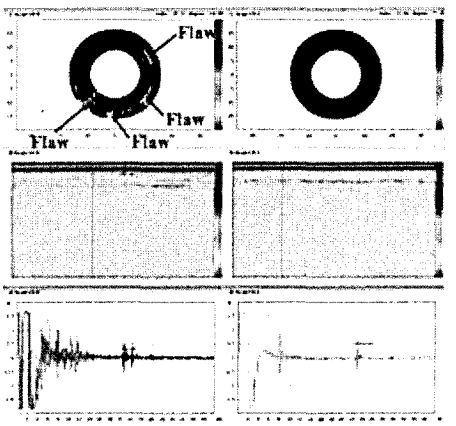


Fig. 8 Test result of specimen C

이와 같이 전체 모의 결함 시험편의 적용을 통해 초음파자동탐상 장비를 이용한 결함 검출이 가능함을 확인하였다.

4.2. 초음파 자동탐상장비의 현장 적용

개발된 초음파자동탐상 장비를 현재 가동 중인 화력발전소의 보일러 열교환기 헤더 용접부에 Fig. 9와 같이 적용하여 성능 시험을 수행하였다. 모의 시험편에 적용한 것과 같이 용접부의 결함과 용입부족 부분을 동시에 측정하기 위하여 각각 45°, 55° 굴절각의 사각탐상용 초음파 탐촉자를 사용하여 총 8회 원주 방향으로 회전하여 용접부 자동검사를 수행하였으며, 1 point의 검사 시간은 약 4분 30초가 소요되었다. 결함의 판정은 Gate의 문턱값을 사용하여 20% 이상의 초음파 반사 신호를 B, C-scan의 이미지로 표시되도록 하였으며, Gate는 튜브 파이프의 끝단부와 용입부족 결함이 구분될 수 있도록 위치와 폭을 설정하였다. Fig. 10은 발전소 division 열교환기의 헤더와 튜브 용접부의 검사 결과이다. 굴절각 45° 탐촉자를 이용하여 용접부를 탐상한 결과 C-scan에서 넓은 구간에서 문턱값을 넘는 반사신호가 확인되었으며, 이때의 A-scan 신호를 확인한 결과 결함으로 판정할 수 있는 높은 전압의 반사신호와 신호 형상을 확인할 수 있었다. 굴절각 55° 탐촉자를 이용한 용입부족 결함의 탐상 결과 C-scan 결과 일정한 구간의 결함이 확인되었고, A-scan 신호 분석 결과 튜브 끝단부와 확연히 구분되는 결함 신호가 나타났다. 장비를 통한 탐상 결과로부터 루트부의 용입부족 결함이 전체적으로 내재된 것으로 판단되었으며, 탐촉자의 시작점 부분의 용접내부에서 루트부까지 폭 40 mm 정도, 길이 8 mm 이상의 융합불량 또는 이물질이 혼입된 용접 결함이 내재하는 것으로 판단되었다. 이와 같이 발견된 결함을 용접부 사상을 통하여 실 부제의 내부를 확인한 결과 개발된 장비를 통하여 검출 및 평가된 결함과 유사한 결함을 확인 할 수 있었다.

Fig. 11은 이와 같이 검출된 결함을 용접부의 사상을 통하여 확인한 결과이다.

모의 결함 시험편과 발전소 현장에 초음파 자동탐상 시스템을 적용하여 열교환기 헤더 용접부의 결함 탐상 결과 용접부 결함과 용입부족 결함 평가가 가능하였다. 그러나 튜브 끝단부와 용입부족을 정확히 구분하고 용접부의 결함을 평가하기 위해 검사 부재의 두께에 따른 탐상 각도 및 시작 위치의 선정을 고려해야 한다.

Fig. 9 Picture of the weld automatic testing

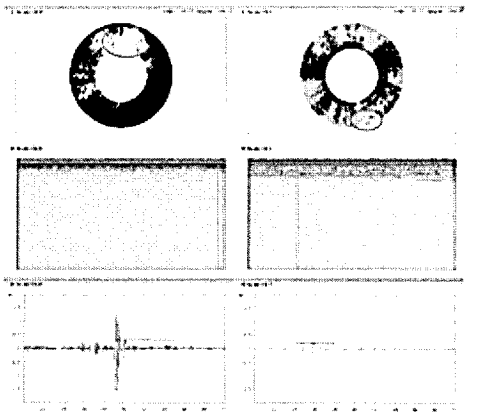


Fig. 10 Test result of the heat exchanger weld

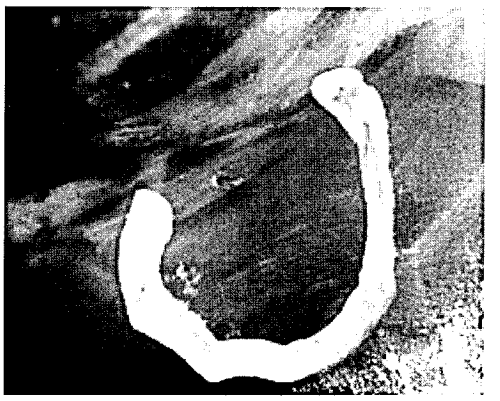


Fig. 11 The detected flaw in the weld

5. 결 론

본 연구에서는 발전소 보일러 열교환기 헤더와 튜브의 부분 용입형 용접부의 초음파 탐상을 위해 초음파 펄서/리시버, 스캐너 및 스캐너 구동부와 자동 초음파검사 프로그램으로 구성된 초음파검사 시스템을 개발하였다.

헤더와 튜브 용접부는 구조적으로 불완전 용입으로 용접부 끝단부에 용입부족 결함이 발생하기 쉬우며 이에 따라 용접부에도 결함(root crack)이 발생할 수 있다. 용입부족 결함과 용접부 검사를 동시에 수행하기 위해 각각 45°, 55°의 굴절각을 가지는 2채널 탐촉자를 제작하였다. 개발된 시스템을 발전소 보일러 헤더와 튜브 용접부의 모의시험편과 현장에 적용하여 검증한 결과는 다음과 같다.

(1) 개발된 시스템을 이용하여 division, platen, final super heater 등의 열교환기 헤더와 튜브 용접부의 초음파자동탐상이 가능하였다.
(2) 초음파탐상 결과 용접부의 결함과 내부의 용입부족 결함을 검출할 수 있었다.
(3) A, B, C-scan 이미지로 검출된 결함을 효과적으로 평가할 수 있었다.

참고문헌

[1] Greg J. Nakoneczny and Carl C. Schultz, "Life assessment of high temperature headers," Proceeding of American Power Conference, Barberton, Ohio, USA (1995)
[2] James P. King, "Condition assessment of boiler piping and header components," Proceeding of ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Seattle, Washington, USA (2000)
[3] Carrado Delle Site, Carlo de Petris and Cani Mennuti, "NDT tools for life assessment of high temperature pressure components.," ECNDT, Tu.2.7.4, Berlin, Germany (2006)
[4] W. A. K. Deutsch, P. Schulte, M. Joswig, R. Kattwinkel and Karl Deutsch, "Automatic inspection of welded pipes with ultrasound," ECNDT, Tu.2.3.1, Berlin, Germany (2006)
[5] 이정기, 박문호, 박기성, 이재호, 임성진, "소켓 용접부 결함검사용 초음파자동검사 장비 개발", 비파괴검사학회지, Vol. 24, No. 3, pp. 275-281 (2004)
[6] 최성남, 유현주, 김형남, "용접부 자동 초음파검사 신호 취득 프로그램 개발", 한국비파괴검사학회 춘계학술대회, pp. 310-324 (2006)