

초음파 자동 검사시스템의 개발과 오버레이 용접부의 결함검사

Development of Ultrasonic Inspection System and Application to Overlay Weld Flaw Detection

남영현, 성운학

Young-Hyun Nam and Un-Hak Seong

초 록 발전 및 산업설비에 사용되는 많은 압력용기는 저합금강을 사용하여 제작되고 있다. 압력용기의 내면은 부식 이 미치는 영향을 최소화하기 위하여 오스테나이트계 스테인리스강으로 덧살용접을 하고 있으나, 용접층간의 계면에서 발생하고 있는 박리균열은 압력용기의 신뢰성에 중요한 변수가 되고 있다. 본 연구에서는 DSP를 사용하여 오버레이 용접부를 고속으로 검사할 수 있는 C-scan 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 신호 처리부 (오실로스코프, 펄서/리시버, 디지털라이저, DSP), 스캐너, 프로그램 및 위치 제어부로 구성되어 있다. 개발된 시스템을 사용하여 실제 오버레이 용접부에 대한 초음파검사를 실시한 결과 고속으로 신뢰성 높은 검사결과를 얻을 수 있었다.

주요용어: 초음파 검사시스템, 오버레이 용접, 결함 탐상

Abstract Many pressure vessels for power and industrial plant are fabricated from low alloy carbon steels. The inner sides of pressure vessels are commonly weld-cladded with austenitic stainless steels to minimize problems of corrosive attack. Disbonding cracks are often detected at the transition region of welding interlayer, which is serious problem to reliability of pressure vessels. We have developed C-scan system to high speed inspection of overlay weld using DSP(digital signal processor). This system consists of signal processing parts (oscilloscope, pulser/receiver, digitizer, DSP), scanner, program and position controller. The developed system has been applied to a practical ultrasonic testing in overlay weld, and demonstrated high speed with precision

Keywords: ultrasonic inspection system, overlay weld, flaw detection

1. 서 론

고온·고압의 가혹한 조건에서 사용되는 화학플랜트의 압력용기나 반응용기는 최근 들어 새로운 재료의 개발과 용접기술의 발달로 용기의 건전성과 경제성을 동시에 만족시킬 수 있도록 우수한 기계적 특성을 갖는 저합금강 용기 내부에 오스테나이트계 스테인리스강을 클래딩하여 내식성을 증대시키는 방법이 사용되고 있다. 현재, 각종 용기들은 플랜트의 효율성 향상을 위하여 점차 대형화되

고 있으며, 운전 조건도 더욱더 고온·고압의 분위기에서 사용되고 있다[1-4]. 탈황 반응용기는 운전 온도가 높고 내식성을 향상시키기 위하여 용기 내면에 오버레이 용접을 하여 사용하고 있으며 모재는 2.25Cr-1Mo강, 그 내면에는 1층에 309L, 2층에는 347L 스테인리스강을 사용하고 있다. 탈황 반응용기는 운전 온도와 수소 분압이 높기 때문에 종래에는 관찰되지 않았던 재료상의 문제가 발생되고 있다. 모재의 경우는 뜨임취화 및 수소취화이고, 용접부의 경우는 용접금속의 수소취화와 오버레이 용접금

속과 모재의 경계부에서 일어나는 박리균열이다. 박리균열은 용접 경계부의 조대 오스테나이트 결정 입계에 탄화물이 석출되어 균열에 대한 저항성이 현저히 저하되는 것으로 알려져 있다[5-6].

용접부에 대한 비파괴검사는 주로 방사선투과검사를 수행하고 있으며 일부 ASME 코드와 고객의 요구에 따라 초음파검사를 실시하고 있다. 방사선투과검사의 경우 큰 제품을 방사선 검사실까지 제품을 이동시키는 일이 불가능하고, 촬영에 소요되는 시간이 과다하며, 초기 장비 투자비가 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 초음파 자동검사의 경우 검사가 간단하고 장비의 휴대가 용이하다는 장점을 가지고 있으나, 데이터의 보존이 불가능하고 검사자의 주관이 결과에 영향을 크게 미치므로, 정량적인 결함 평가가 불가능하다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 용접제품의 품질을 감시하기 위하여 초음파 자동 검사시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 기존의 검사 방법의 정확도와 신뢰도를 향상시키는 측면과 장치의 경량화, 자동화, 고속화시키는 측면을 고려하였다. 또한, 실시간(Real time)에 검사 데이터를 처리하기 위해 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하였다. 본 논문에서는 개발한 초음파 자동 검사시스템과 인공결합 및 수소유기 박리결합에서 얻은 평면화상을 소개한다[7-9].

2. 오버레이 용접 기술현황

현재 사용하고 있는 석유화학관련 압력용기의 오버레이 용접은 반응기의 사용조건에 따라 다양한 종류의 오스테나이트계 스테인리스강이 사용되고 있으며, 그 중에서도 중질유 탈황반응기와 같이 강한 부식성 분위기에서 사용되는 경우, 내부 및 덧살재로는 AISI-347이 이용되고 있다. 이 재료는 탄소와의 친화력이 큰 Nb를 첨가하여 C을 NbC로 고정시키므로, 입계에서의 Cr-탄화물 생성을 억제하여 내식성을 증대시킬 목적으로 합금 설계된 재질이다. 그러나, 용접성의 측면에서 볼 때 Nb는 그 자체가 페라이트 생성원소(Ferrite Former) 일뿐만 아니라, 강한 오스테나이트 생성 원소인 C를 고정시키므로 소량을 첨가시켜도 현저히 페라이트 생성을 촉진시키고 있다. 따라서, 다층용접에서 일층을 AISI-347계로 오버레이 용접할 경우 다량의 δ -Ferrite가 형성되고, 많은 Cr을 함유하므로 용접후 열처리시 균열의 발생 위험성(σ -Phase embrittlement)이 대단히 높다. 또한, AISI형 347만으로 일층용접에 의해 최소 소요두께 4.8 mm를 오버레이 용접하기 위해서는 낮은 용접속도, 높은 입열량의 용접조건

이 요구되는데 이러한 용접 조건하에서는 필연적으로 High dilution ratio(용접금속의 모재에 의한 희석에 따른 성분변화)에 의한 내식성 저하와 수소유기박리(Hydrogen Induced Disbonding: HID)에 대한 저항성이 크게 감소된다. 결정립의 조대화는 수소유기 박리결합 발생시, 균열 진전 경로가 되므로 경제성을 고려하여 AISI형 347로 일층을 오버레이 용접을 하려고 한다면 δ -Ferrite생성을 억제함과 동시에 내식성이 뛰어난 용접재질의 개발 및 그에 적합한 특수한 용접공정의 개발이 필요할 것으로 사료된다[10]. 압력용기는 제작시 용접부 내부의 품질확인을 위해서 주로 방사선투과검사가 수행되고 있으나, 사용중 안전확인을 위해서는 초음파검사에 의한 보수검사가 수행되고 있다. 제작시 검출 대상이 되는 결함은 용접 결함이며, 사용중 보수검사에서는 피로결합과 응력부식결함 이다. 특히, 사용중에 검출되는 결함에 대해서는 결함의 위치와 형상 데이터를 이용하여 파괴역학적 평가도 수행하고 있다. 운전중인 각종 압력용기 설비를 효과적으로 보수하기 위해서는 사용중 보수검사 데이터를 제작시 검사 데이터와 비교·평가하여 경년연화 상태를 정량적으로 파악할 필요가 있으며, 이를 위해 보수검사에 적용이 가능한 신뢰성 높은 비파괴검사 기술이 필요하다. TOFD(Time of Flight Diffraction)은 결함 검출능과 정밀도가 매우 우수하여 적용 분야가 널리 확대되고 있으며, ASME Code Section VIII에서는 압력용기의 방사선투과검사 대체용으로 TOFD법에 의한 초음파검사가 Case 2235에 규정되어 있다. 대형 구조물에 대한 Water-jet기술은 널리 적용되지 않고 있는 실정이다.

3. 용접방법

초음파 자동 검사시스템의 신뢰성을 검증하기 위하여 사용한 용접시편의 화학조성은 Table 1과 같다. 모재는 3Cr-1Mo 저합금 내열강이고, 단조공정을 거친후 불림(1223K×10hr), 담금질(1273K×8.5hr), 뜨임(948K×10hr) 처리를 실시한 강재를 사용하였다. 오버레이 용접에 사용한 용접재는 150 mm(W), 0.4 mm(L) 이며 309L 오스테나

Table 1 Chemical compositions of base metal and electrode(wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	V	Cu	Ni
Base metal	0.14	0.11	0.41	0.009	2.9	0.95	0.3	0.03	0.1
Electrode	0.02	0.82	1.60	-	22.6	-	-	-	11.42

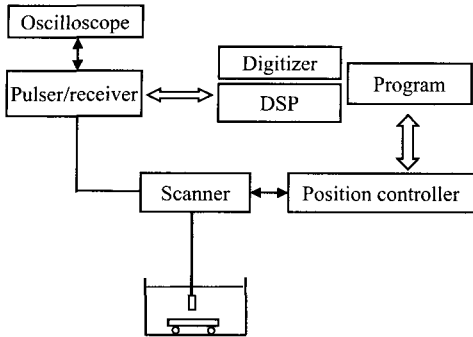


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up for C-scan

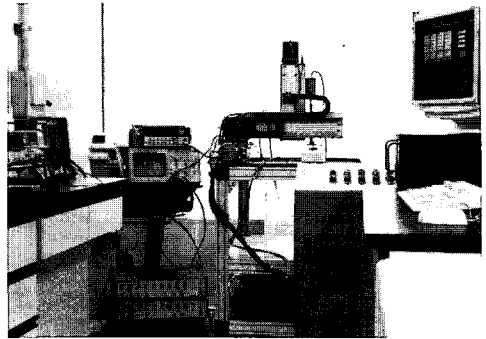
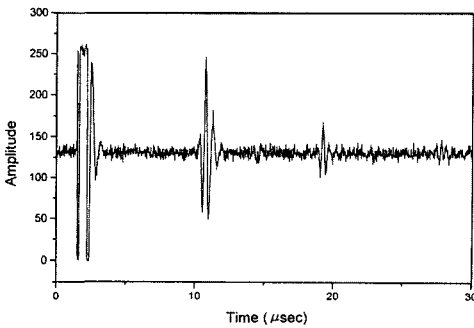
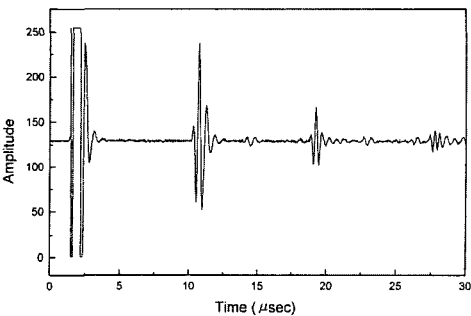


Fig. 3 Developed system photograph



(a) Raw RF signal



(b) Result processed by DSP from raw RF signal

Fig. 2 Signal processed by Digital Signal Processor

이트 스테인리스강을 사용하였다. 용접방법은 ESW(Electro Slag Welding)법으로 하였다. 전압은 27V로 일정하게 하였고, 용접속도는 전류 1200A에서는 10~25cm/min, 1500A에서는 10~30cm/min, 2000A에서는 15~40cm/min로 변화 시켰다. 예열 및 페이스간의 온도는 373~423K로 하였고, 플럭스는 CaF₂-Al₂O₃계를 사용하였다.

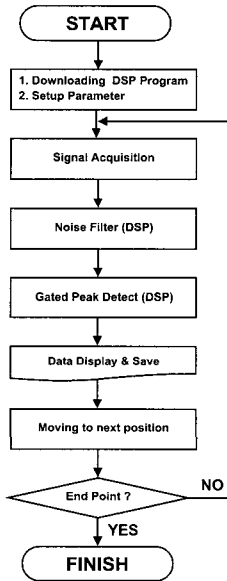


Fig. 4 Flow chart of control program in C-scan system

4. 초음파 자동 검사시스템

본 검사시스템은 Fig. 1에 표시한 것과 같이 Oscilloscope, Pulser/Receiver, Digitizer, DSP가 포함되는 신호 처리부, Scanner, Program 및 Position controller부로 구성되어 있다. Pulser/Receiver는 탐촉자가 초음파를 발생시키기 위해 필요한 전기 펄스신호를 보내고 결함에서 반사된 신호를 검출하여 증폭하는 역할을 한다. Digitizer는 아날로그인 초음파 신호를 디지털 신호로 바꾸기 위한 것으로 사용 주파수와 분해능에 따라 여러 종류가 있으나, 본 시스템에서는 테이타양의 신속한 처리를 위해서 컴퓨터의 AT Bus에 직접 연결하는 방식을 선택하였다. Scanner

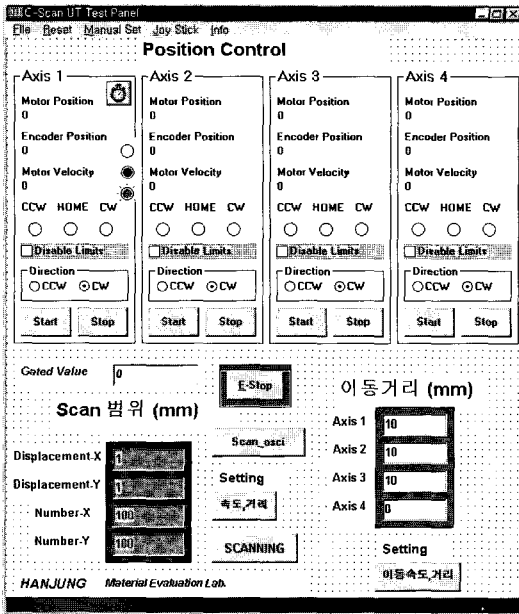


Fig. 5 Primary screen with main program being executed

프로그램의 순서도이다. 위치 제어부는 스캐너의 위치를 컴퓨터의 명령에 따라 최소 40μm 단위로 이동 시킬 수 있으며, 이때 위치값은 위치 제어부 내의 기록계에 저장되어 컴퓨터에 feed-back 하도록 되어 있다. 신호 처리부에서는 아날로그 신호를 digitizer에서 디지털 신호로 변환한 후, DSP에서 각종 신호처리를 실시하므로 얻고자 하는 다양한 정보를 실시간에 측정할 수 있다. 검사 프로그램은 속도에 직접 관여하는 Data acquisition부분 (Digitizer, DSP)은 어셈블리로, 그 이외의 부분은 Visual basic으로 작성하였다. 화상 처리부에서는 탐촉자로부터 송신된 초음파가 경계면이나 접합 저면에 초점이 정확히 집중될 때, 반사파는 가장 높은 에코(echo)를 가지게 된다. 반사파의 음압분포는 256등분(8bit) 표시하였으며 에코 레벨[0~255]은 청색(blue: 0), 녹색(green: 128), 빨간색(red: 255) 등의 칼라 contrast를 이용하여 표시하였다. 결함이 존재하지 않는 부분은 반사파의 신호가 거의 존재하지 않기 때문에 에코 레벨이 가장 낮은 청색으로, 결함은 에코 레벨이 높은 빨간색으로 표시하였다.

Fig. 5는 프로그램의 초기화면으로 0.1초 간격으로 현재의 정보가 화면에 표시되도록 되어 있다.

Fig. 6은 검사시스템의 신뢰성을 평가하기 위하여 사용한 시험편으로 인공결함은 표면으로부터 깊이가 3, 11 mm 위치에 있고, 결함의 크기는 8×30 mm이다.

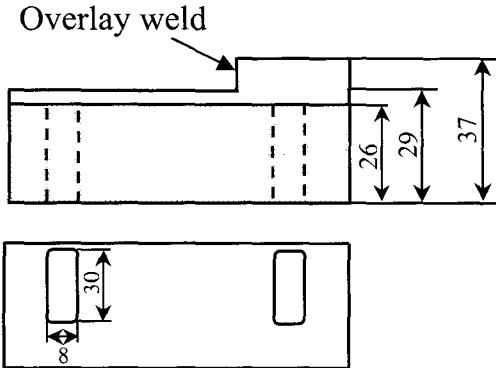


Fig. 6 Overlay weld specimen of stainless steel

5. 초음파 검사결과

Fig. 7은 인공결함을 이용하여 얻은 평면화상으로 오버레이 용접층의 두께는 3 mm와 11 mm 이다. 검사에 이용한 수직탐촉자의 주파수는 15MHz이고, 빔(beam)의 집속거리는 38.1 mm 이다. 용접층의 두께가 3 mm인 경우, 인공결함과 같은 정확한 화상을 얻지 못하였으나 결함의 형상 및 크기를 예측하는 데는 큰 문제가 없다고 생각된다. 용접층의 두께가 11 mm인 경우는 반사신호가 너무 불규칙하여 선명한 평면화상을 얻을 수 없었다. 이는 오버레이 용접층을 전파하는 초음파 빔의 초점이 정확히 한 점에 집중되지 못하고, 결함 단부(端部)에서 반사파가 상쇄 및 간섭을 일으켜 진폭이 급격히 변화하기 때문이다. 또한, 스테인레스강 내를 전파하는 초음파 에너지가 매질 자체의 거칠고 불규칙한 입자분포 때문에 높은 감쇠를 가져온 것도 한 원인이라고 사료된다. 따라서, 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 높은 에너지 발생이 가능한 Pulsar/Receiver, 탐촉자의 특성과 사용주파수, 매질의 선택, 신호처리 및 영상처리 기술등을 종합적으로

는 탐촉자의 위치를 검사위치로 이동시키는 장치로 검사 제품의 형상에 따라 제어 프로그램을 수정하여 자유롭게 검사할 수 있도록 3축으로 되어 있으며, 탐촉자를 지지하고 운동방향을 결정하는 Motion units와 units에 힘을 가하여 이동시키는 모터로 구성되어 있다.

Fig. 2는 Noise필터의 사용 전후에 얻은 초음파 파형을 비교한 것으로, DSP를 사용하므로 Noise가 제거된 선명한 반사신호를 얻을 수 있었다.

Fig. 3은 검사시스템의 전경을 보여주고 있다.

Fig. 4는 검사시스템을 제어하기 위하여 개발한 제어

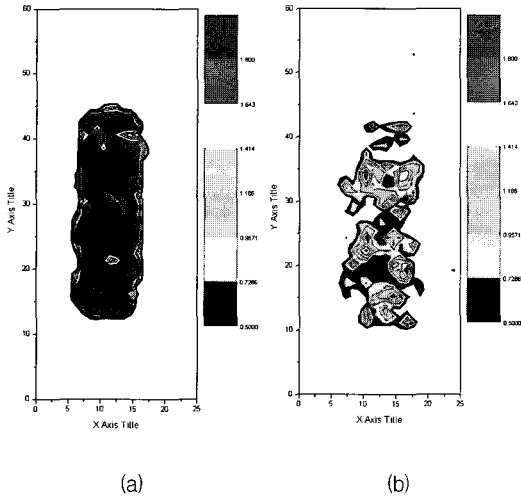


Fig. 7 C-scan image obtained in overlay weld of stainless steel (a) Thickness of overlay weld layer= 3 mm(Rectangular defect) (b) Thickness of overlay weld layer=11 mm(Rectangular defect)

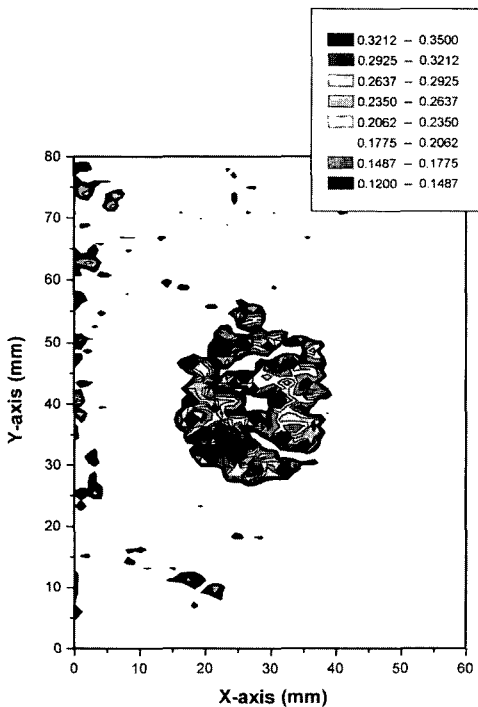


Fig. 8 C-scan image of hydrogen induced disbonding

고려한다면 해결될 것으로 사료된다.

Fig. 8는 실제 압력용기의 오버레이 용접층에서 발생한 수소유기 박리결함을 검사시스템을 이용하여 얻은 평면화상이다. 오버레이 용접층의 두께는 7 mm이고, 기준점으로부터 X-축으로 15~40 mm, Y-축으로 25~55 mm 영역에 분포하고 있으며 면적은 750 mm² 이었다.

6. 결 론

압력용기의 품질과 신뢰성을 향상시키기 위하여, 본 연구에서는 오버레이 용접부에 발생하는 박리결함을 정확하고 신속하게 검사할 수 있는 초음파 자동 검사시스템을 개발하였다. 본 검사시스템은 신호 처리부, 스캐너, 프로그램 및 위치 제어부로 구성되어 있으며, 현장의 검사자들이 초음파에 대한 기본적인 지식과 컴퓨터의 간단한 조작으로 신속 정확하게 용접제품을 검사할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 오버레이 용접층의 두께가 3 mm인 인공결함의 경우, 선명한 평면화상을 얻을 수 있어 정확한 크기(sizing)를 측정할 수 있었으나, 11 mm인 경우는 결함의 검출만이 가능하였다. 또한, 용접층의 두께가 7 mm인 실제 수소유기 박리결함의 경우 결함 위치(X-축, Y-축) 및 면적을 정확히 측정할 수 있었다.

참고문헌

- [1] J. Watanabe, K. Ohnishi: Hydrogen induced disbonding of stainless weld overlay found in desulfurizing reactor ASTM/MPC conference, pp. 422-429, (1981)
- [2] Anon: Technical data sheet of 3Cr-1Mo-1/4V-Ti-B steel for elevated temperature applications, Report No. MR83-3, The Japan Steel Works, pp. 134-140, (1983)
- [3] M. R. Ruthan & R.G. Derrick, "Hydrogen transport in austenitic stainless steel," Corrosion Science, Vol. 15, pp. 565-572, (1975)
- [4] 지병하, 김정태, 박화순, "압력용기용 강의 기술개발 동향 및 문제점", 대한용접학회지, Vol. 18, pp. 16-29, (2000)
- [5] 김동진, 김병훈, 지병하, 김정태, 김성근, 강정운, 박화순, "3Cr-1Mo강/STS-309L 오버레이 용접부의 천이 영역 조직에 미치는 용접조건의 영향", 대한용접학회지, Vol. 18, pp. 176-183, (2000)

-
- [6] 김동진, 김병훈, 공병욱, 김정태, 권용형, 박화순, 강정윤, "3Cr-1Mo-V강의 재현 열영향부에서 최고가열온도가 수소침식 감수성에 미치는 영향", 대한용접학회지, Vol. 18, pp. 232-238, (2000)
- [7] L. Stuart, "Wave digital filters DSP applications," IEEE Circuit & Devices Magazine, Vol.8, pp. 27-31, (1992)
- [8] K.I. McRae, T.L.Miller, "Signal Processing and data acquisition technique for the ultrasonic nondestructive evaluation of aerospace materials," Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol. 38, pp. 16-21, (1992)
- [9] P.V. Raja, S. Ganesan, "SIMD multiple DSP microprocessor system for image processing," Microprocessors and Microsystems, Vol. 15, pp. 493-501, (1991)
- [10] 김정태, 지병하, 김동진, 양병일, 김병훈, 증질유 분해 및 탈황용 압력용기 제조 기술에 관한 연구 보고서, 한국중공업(주) 소재개발연구실, (1994)