

STS304 스테인리스강 용접부 결함평가에 대한 Pulse-echo법과 TOFD법의 비교연구

A Comparative Study of Pulse-echo Method and TOFD Method for the Defect in the Welding Joint of the STS304 Stainless Steel

길두송 · 최원두

Doo-Song Kil, Won-Doo Choi

Key Words : Ultrasonic Test(초음파탐상시험), Welded Test Block(용접시험편), TOFD(Time of Flight Diffraction), STS304 Stainless Steel(STS304 스테인리스 강)

Abstract : For the evaluation of a flaw in a welded stainless steel by the Time of Flight Diffraction(TOFD) Method, we have made the reference specimen for experimentation. As a result, we could analyze a specific character and the inner state of the structure in a welded stainless steel and we came to the conclusion as followed.

(1) For analyze the structure state of a section in a welded stainless steel through the optical microscope, we could have analyzed the generated shape and the location of a flaw and the inner parts of the structure state through the microscope of eighty magnification and two hundred magnification about the soundness, the heat affected zone(HAZ) and the welded part.

(2) Through the comparison with the shape and the size of a flaw in the welded part about the conventional ultrasonic test and the TOFD Method, we could make an observation the special character of the TOFD Method and principles.

(3) We analyzed and collected the merit of the TOFD Method on the basis of the experimental result by the shape and the size of a flaw in the inner welded parts. So, we made up a base that we could use as a basic data for a similar flaw like that.

Through the study as mentioned above, we could make an observation the flaw detective method and principles used in the TOFD Method.

기 호 설 명

- δB : 계인
- ° : 탐촉자 각도
- Hz : 탐상 주파수
- mm : 결함까지의 거리 또는 깊이

1. 서 론

비파괴검사에 있어서 초음파 탐상시험은 용접부

검사에 가장 많이 이용된다. 규격화된 초음파탐상 검사(수동접촉법)에 의한 용접검사는 일반적으로 10~12mm 또는 그 이상의 두께를 가진 판(plate)의 접합에 제한되어 있다¹⁾. 일반적으로 용접부에 내재될 수 있는 결함의 종류는 크게 균열, 용융부족(lack of fusion), 용입부족(lack of penetration) 등의 형태를 갖는 선형결함과 기공(porosity), 개재물(inclusion), 슬랙(slag) 등의 체적결함의 두 범주로 분류된다²⁾. 선형결함인 균열 등은 용접부의 기계적 강도에 치명적인 영향을 미치고 경우에 따라서는 예기치 않은 파괴를 일으키기도 하며, 용융부족과 용입부족 등은 발견하기가 어려운 것으로 보고 되고 있다³⁾.

일반적으로 압력용기의 경우 슬랙혼입(slag inclusion)이 가장 많아 84%이고 기공(porosity)

접수일 : 2002년 8월 24일
 길두송 : 전력연구원
 최원두 : 충남대학교 대학원

이 3%, 균열(crack)이 13%나 되는 것으로 알려져 있다. 가동 전중 검사 시 ASME Sec. XI에 의해 요구되는 초음파검사는 제작 검사 시 방사선투과검사로 기하학적인 형상 및 방향성 때문에 발견하지 못한 선형결함 및 체적결함이 동시에 발견되므로 결함의 형태 평가에 있어 어려움이 있다⁴⁾. Time of flight diffraction(TOFD)법은 G. M Silk에 의해 개발되었으며, 현재 영국, 독일을 중심으로 방사선투과검사를 대용할 수 있는 방법으로 각광을 받고 있다. 초음파 검사장치의 성능 향상으로 선진국을 중심으로 검사에 필요한 각종 Code 및 Standard가 제정되어 산업현장에서 널리 응용되고 있다. TOFD법은 음파의 회절현상을 이용한 초음파 탐상검사의 한 방법으로서 기존의 Pulse-echo법에 비해 검사수행 속도가 10배 이상 빠르며, 보다 알기 쉽게 결함을 검출, 표시하고 검사표면의 상태와 결함의 방향에 의한 검사결과가 기존의 방법에 비해 안정적인 특징을 갖고 있는 것으로 알려져 있다⁵⁻⁸⁾. 따라서, 본 연구에서는 TOFD법을 이용하여 스테인리스강을 재료로 한 용접부에 존재하는 결함을 검출해내고 선형 및 체적결함 여부를 정확히 평가함으로써, 이들 결함을 비교분석 하고자 한다. Fig. 1은 초음파를 이용한 용접부의 결함탐상을 3차원으로 나타낸 그림이며, 용접부의 탐상 시 같은 결함이라 하더라도 그 결함이 놓여 있는 방향에 따라서 결함형태가 어떻게 나타나는가를 잘 보여주는 그림이라 할 수 있다.

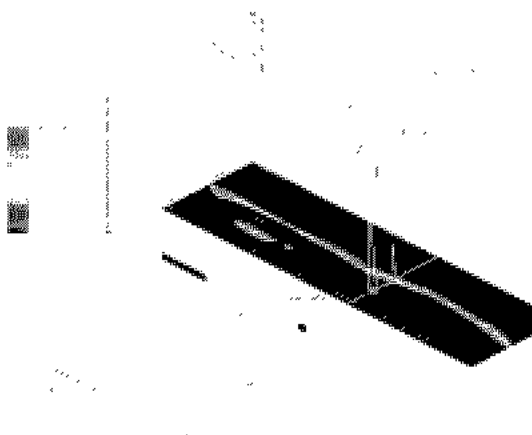


Fig. 1 Flaw of detection of welded joint (Three dimensional method)

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서 사용한 실험재료는 스테인리스 강

중 가장 많이 사용되는 STS304(USN S30400, ASTM A276)로서 화학적 조성과 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of test material (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
STS304	0.08	1.00	2.00	0.045	0.03	8.0-10.5	18.0-20.0	-	-

또한, Pulse-echo법과 TOFD법을 통한 비교 시험을 위하여 모두 3개의 시험편을 사용하였으며, 각 시험편에 대한 도면들을 Fig. 3, Fig. 6, Fig. 9에 나타내었다. TOFD용 Scanner는 두 개의 초음파 탐촉자를 사용하며 굴절각 45°, 60°의 사각종파를 사용하여 검사체에 초음파를 입사시켰다. 굴절각의 결정은 시험체의 두께에 따라 결정하는 것이 일반적이며, 본 연구에서는 시험체의 두께가 9.5mm, 16mm의 시험편을 사용하였다. 탐촉자의 제원은 Panametrics 사의 공칭 주파수 5MHz, 직경 12.7mm 탐촉자를 사용하였고, 시험체에 사각 종파입사를 위해 별도의 아크릴 Wedge를 제작하였다. 시험편은 Flaw Tech사의 Ultrasonic examination flawed specimen kits를 이용하였다.

본 연구에서 사용한 실험 장치는 2개의 탐촉자를 사용한 TOFD 용 Scanner 장치 및 Ultrasonic pluse/receiver board, 고속 A/D Convertor Board를 내장한 Pentium PC로 Photo 1과 같이 구성된다.

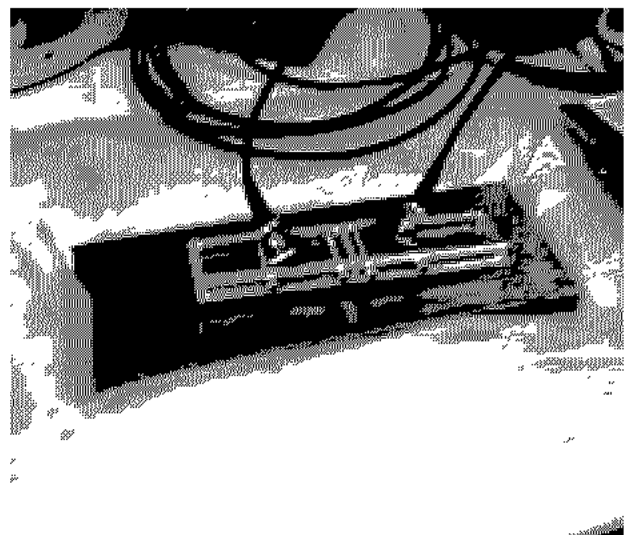


Photo. 1 Test scanner for TOFD

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 Incomplete Penetration에 대한 시험편의 도면을 나타낸 그림이다. Fig. 3은 도면상의 오른쪽 그림인 Incomplete Penetration에 대한 초음파 탐상신호를 나타낸 그림이고 45°의 탐촉자를 사용하였으며, 두께가 9.5mm, 결함까지의 직선거리가 9mm이고, 빔 경로가 12.73mm를 나타내었다.

여기에서는 용접비드로 인해 바로 초음파를 주사할 수가 없기 때문에 빔 경로의 3배인 1.5Skip 법을 사용하였으며, 시험결과에서 알 수 있듯이 36.9mm에서 결함이 검출되었고, 다른 결함의 형상에 비하여 결함이 차지하는 체적이 커서 결함파형 또한 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었으며, 결함파형 끝의 모양이 뾰족하지 않은 것으로 보아, 결함의 모양 또한 어떤 일정한 체적을 가진 결함임을 확인할 수가 있었다. Fig. 4는 Incomplete Penetration에 대한 TOFD법을 이용한 탐상신호이고 그림의 중앙부분에 나타나 있는 검고 굵은 선모양이 Incomplete Penetration의 결함모양을 나타낸 것이고 이 선모양의 굵기가 결함의 크기를 나타낸 것이며, 결함 또한 용접부의 밑부분에 일정한 체적을 가지고 넓게 위치해 있어서 얇은 시

험편의 두께에도 불구하고 비교적 결함모양이 선명하게 잘 나타나 있는 것을 관찰할 수 있었다.

Incomplete Penetration에 대한 실험결과에서 알 수 있듯이 결함이 일정한 체적을 가지고 넓게 위치해 있을 경우에는 초음파 탐상시험을 통하여 결함을 검출한 것과 TOFD법을 통하여 결함을 검출한 것 모두가 결함모양을 확연하게 판별할 수가 있음을 알 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 6은 모재와 용접부의 사이 즉, HAZ부에 나타난 결함모양에 대한 시험편과 초음파 탐상파형을 나타낸 그림이고 Fig. 6은 Fig. 5의 밑부분 오른쪽 그림에 있는

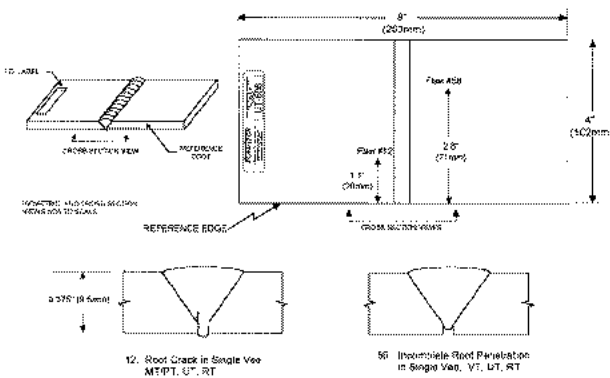


Fig. 2 Specimen kit of incomplete penetration

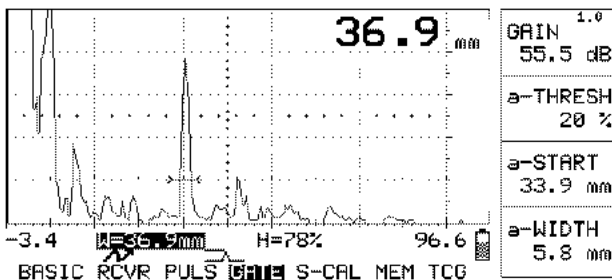


Fig. 3 Ultrasonic flaw detection of incomplete penetration

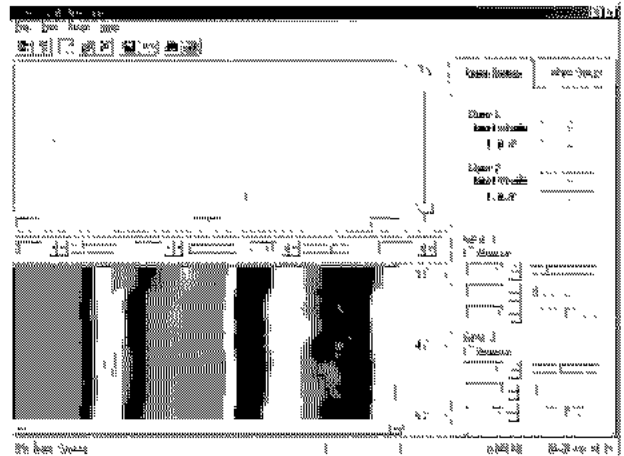


Fig. 4 TOFD Flaw detection of incomplete penetration

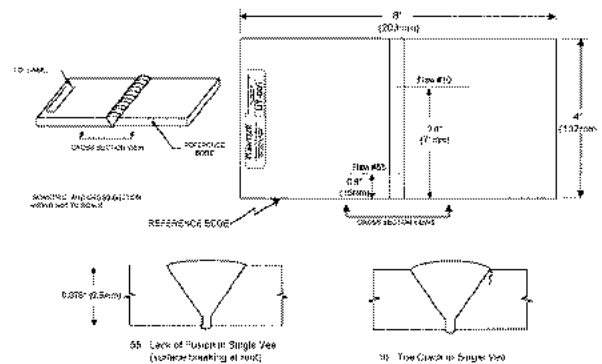


Fig. 5 Specimen kit of toe crack

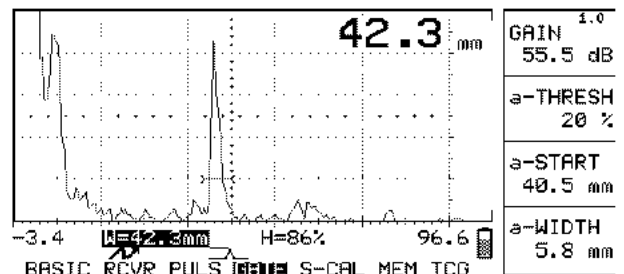


Fig. 6 Ultrasonic flaw detection of toe crack

Toe-crack에 대한 결함을 초음파 탐상시험을 통하여 나타낸 그림이다.

여기에서는 45°의 사각탐촉자를 사용하였으며, 시험편의 두께가 9.5mm, 결함까지의 직선거리가 15mm이고 빔의 경로가 약 21.21mm인데, 결함이 시험편의 윗쪽에 위치해 있어서 직접적으로 결함을 검출할 수가 없으므로 1Skip법으로 결함을 검출하여 빔 경로의 두배인 42.3mm에서 결함이 검출되었으나, 그림에서 보는 바와 같이 결함의 모양이 초음파의 경로에 수직이 아닌 비스듬하게 경사져 있어서 실제의 결함의 크기보다 파형의 크기가 작게 나타난 것으로 생각되며, 결함의 모양이 선형이므로 파형 또한 끝이 뾰족한 모양으로 나타나 있음을 알 수 있었다. 결함이 용접부와 모재의 경계 지역인 표면에 거의 근접해서 발생하여 Fig. 7의 오른쪽에 있는 결함 모양에서 보는 바와 같이 거의 구별하기가 힘들 정도로 나타나 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 시험체의 표면을 따라 전파되어진 낮은 주파수의 Lateral wave의 영향으로 볼 수 있으며, 결함의 상단부 신호는 이 Lateral wave와의 중첩으로 인해 구별이 되지 않고 결함의 하단부 신호만이 나타나게 됨을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5에 나타나 있는 Toe-crack에 대한 실험 결과에서 알 수 있듯이 결함이 시험체의 표면에 근접해서 선형모양으로 위치해 있을 경우에는 Pulse-echo법에 의한 결함파형이나 TOFD법에 의한 결함파형 모두 결함의 모양과 크기를 구별하기가 힘들다는 것을 알 수 있었다. Fig. 8과 Fig. 9는 용접중심 부위의 Porosity에 대한 결함시험의 모양과 초음파 탐상파형을 나타낸 그림이며, Fig. 9는 Fig. 8의 오른쪽 밑부분에 있는 Porosity에 대한 결함파형을 나타낸 그림이다. 여기에서는 결함입자들이 미세하게 분포되어 있어 파가 분산되어 결함에코가 크게 나타나지 않으므로 게인을 7dB 높여 결함에 대한 초음파 탐상시험을 하였으며, 60°의 탐촉자를 사용하여 두께가 16mm, 결함까지의 직선거리가 15.59mm, 빔 경로가 18mm이고, 결함이 용접부의 중앙에 흩어져 있어서 빔 경로의 두배보다 적은 29.6mm에서 결함이 검출됨을 알 수 있었다. Fig. 10에서는 결함이 용접부의 중앙에 산재해 있어서 아주 선명하게 나타나 있지는 않지만 그림에서 보는 바와 같이 중앙부분에 흐리게 결함모양이 나타나 있는 것을 관찰할 수 있었으며, 결함의 크기 또한 선명하게 나타나 있지 않아서 구분하기가 어렵다는 것을 알 수 있었다.

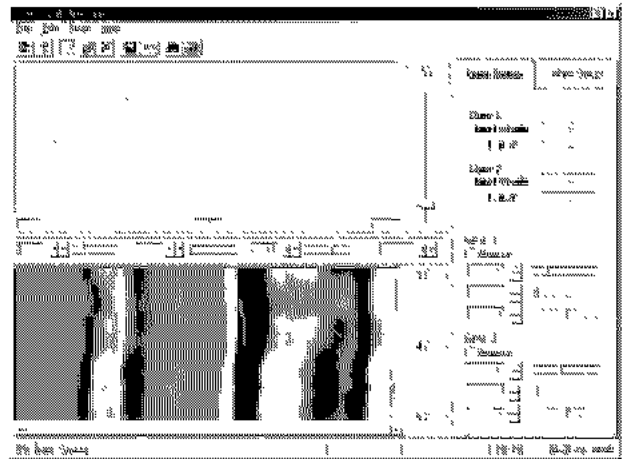


Fig. 7 TOFD Flaw detection of toe crack

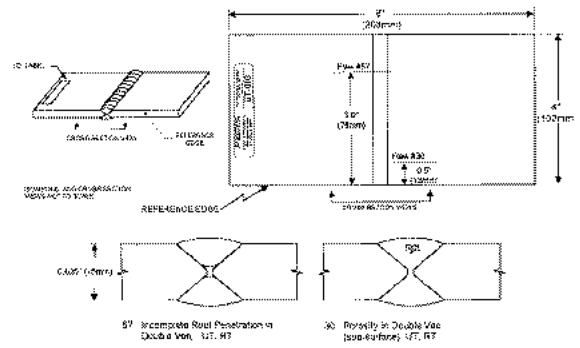


Fig. 8 Specimen kit of porosity

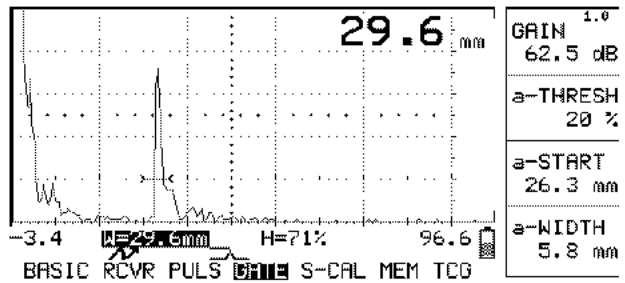


Fig. 9 Ultrasonic flaw detection of porosity

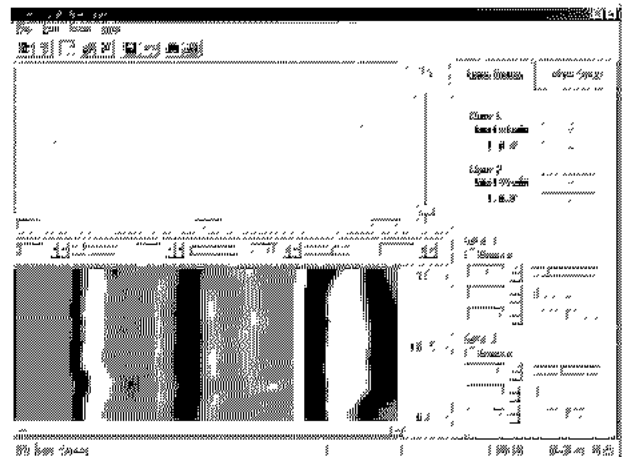


Fig. 10 TOFD Flaw detection of porosity

위의 실험결과에서 볼 수 있는 것처럼 Porosity의 경우에 있어서도 Pulse-echo법에 의한 결함 파형이나 TOFD법에 의한 결함파형 모두 결함의 모양과 크기를 구별하기가 힘들다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

검사용 Scanner는 두 개의 초음파 탐촉자를 사용하여 굴절각 45°와 60°의 사각종파를 사용하여 검사체에 초음파를 입사시켜 시험하였으며, 본 연구에서는 두께가 9 ~ 16mm의 시험편을 사용하였고, 공칭 주파수 5MHz, 직경 12.7mm의 탐촉자를 사용하였으며 시험체에 사각 종파의 입사를 위해 별도의 아크릴 Wedge를 제작하여 검사를 하였다. TOFD를 이용한 STS 304 스테인리스강의 용접부에 존재하는 결함에 대한 연구결과와 일반적인 Pulse-echo법에 의한 연구결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Incomplete Penetration의 경우에 있어서 다른 결함의 형상에 비하여 결함이 차지하는 체적이 커서 Pulse-echo법에 의한 결함 파형 또한 확연하게 나타남을 알 수 있었으며, TOFD를 이용한 탐상신호에 있어서도 비교적 얇은 시험편의 두께에도 불구하고 결함모양이 선명하게 나타남을 알 수 있었다.
2. 기존의 초음파 탐상검사가 횡파를 사용하여 검사를 하는 것과는 달리 TOFD법에서는 종파를 사용하기 때문에 초음파 파장의 길이가 길어 결함의 경계가 명확히 나타나지 않는 결과를 나타냈으며, Fig. 6의 Toe-crack에서 보여지는 바와 같이 결함이 시험체의 표면에 근접하게 되면 표면의 바로 밑에 있는 결함들은 표면을 따라 흐르는 Lateral wave의 영향으로 탐촉자의 분해능이 저하되어 검출이 불가능한 현상을 나타내었다.
3. 기존의 초음파 탐상검사에 있어서 결함의 크기를 측정하고자 할 때에는 탐촉자를 좌우로 움직이거나, 상하로 움직여서 결함에코가 나타났다가 사라지는 모양을 보고 결함의 크기를 판별할 수가 있었으나, TOFD법에서는 CRT상에 결함의 크기가 2차원적으로 나타나므로 결함에 대한 크기판별이 쉬워졌다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. E. Ginzel, "Weld Inspection of Ultrasonic Inspection 2-Training for Nondestructive Testing", the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 3, No. 4, pp.12~14, 1998
2. 안희성, "용접 물리 야금 특론", 국제정보시스템, pp.433~440, 1991
3. EPRI, "Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Component, ASME Boiler and Pressure Vessel Section XI Code", the American Society of Mechanical Engineers, New York, pp.112~121, 1989
4. 심철무 외 3인, "형상인식을 이용한 압력용기용접부 결함특성 분류", 비파괴검사학회지, 제13권, 제2호, pp.11~18, 1993
5. M. G. Silk, "The interpretation of TOFD data in the light of ASME XI and similar rules", British Journal of NDT, Vol. 3, No. 10, pp.84~89, 1989
6. M. G. Silk and P. E. Kear, "The time of flight diffraction technique theoretical aspects and practical application", L'informatica nelle technigie nondestructive, Vol. 7, No. 5, pp.5~7, 1993
7. ASNT, "Nondestructive Testing Handbook", Vol. 7, 2nd Edition, pp.316~324, 1991
8. L. Bernard, "Time of flight diffraction technology for ultrasonic inspection of piping and pressure retaining components", Materials Evaluation, Vol. 45, No. 5, pp.68~74, 1987