

음향방출법을 이용한 굽힘피로 손상된 소켓용접배관의 진단 및 감시

Diagnosis and Monitoring of Socket Welded Pipe Damaged by Bending Fatigue Using Acoustic Emission Technique

김정석*, 오세웅**, 박익근***†

C. S. Kim*, S. W. Oh** and Ik-Keun Park***†

초 록 소구경 배관 소켓 용접부의 고주기 피로특성을 평가하고 피로 균열의 발생을 음향방출법을 이용하여 실시간 모니터링 하였다. 스테인리스 316L강 시험편은 가스텅스텐아크용접 공정으로 루트부에 결함이 없는 시험편과 용입불량 결함이 있는 시험편으로 준비하였다. 피로파단은 고응력 일때는 토우부, 상대적으로 저응력일 때는 루트부에서 일어났다. 피로시험동안 음향방출 카운트가 급격히 증가하는 시점을 균열의 발생 사이클 (N_i)로 정의하였고 방사선투과법과 전자현미경을 이용하여 피로균열 생성 사이클 전과 후에서 균열을 확인하였다. 소켓용접배관의 굽힘피로 손상 진단 및 감시를 위해 균열의 존재와 파괴모드 그리고 균열의 발생 사이클에 관한 연구를 수행하였다.

주요용어: 굽힘피로, 소구경배관, 소켓용접배관, 음향방출, 용입불량

Abstract High cycle bending fatigue of socket welded small bore pipe was characterized, and also the fatigue crack initiation of small bore pipe was monitored *in situ* by the acoustic emission (AE) technique. The STS 316L stainless steel specimens were prepared by gas tungsten arc welding (GTAW) process having the artificial defect (i.e., lack of penetration) and defect free at the root. The fatigue failure was occurred at the toe for high stress and root for relatively low stress. The crack initiation cycles (N_i) was defined to the abrupt increase in AE counts during the fatigue test, and then the cracks were observed by the radiographic test and electron microscope before and after the fatigue crack initiation cycles. The socket welded pipe damaged by bending fatigue was studied regarding the welding defect, failure mode, and crack initiation cycles for the diagnosis and monitoring.

Keywords: Bending Fatigue, Small Bore Pipe, Socket Welded Pipe, Acoustic Emission, Lack of Penetration

1. 서 론

원자력 발전 설비에서 소구경배관 소켓 용접부는 대구경배관에서 소구경배관으로의 방향전환을 위해 소켓 이음관에 배관을 삽입하여 입구를 용접으로 연결하는 부위이다. 이들은 시공 및 보수 중 복잡한 형상으로 인해 용입불량이 발생되기 쉬운 곳으로 가동중 기계적 진동에 의해서 피로균열이 발생

될 가능성이 크다. 이러한 이유로 실제 발전소의 경우 파손으로 인한 누설이 보고되고 있으며 원인 규명 및 보수교체로 인한 갑작스런 가동정지 사례가 빈번히 발생하고 있다[1]. 그리고 이러한 사고는 장시간 사용에 따른 설비의 노후화로 구조물의 안전성에 큰 문제가 제기되고 있으며 파손 및 갑작스런 가동정지로 인한 경제적, 인명적 손실을 초래하게 된다.

이미 EPRI(energy power research institute)는 원자력발전소의 배관에서 발생하는 피로파괴의 약 80%에 해당하는 대부분은 소구경배관 소켓 용접부의 고주기진동피로에 의해서 발생되었다고 보고한 바 있다[2]. 그리고 Simonen과 Gosselin[3]은 미국 원자력발전소(1961-1996)의 전체 배관과손 중 29%의 진동피로, 23%의 마모부식, 14%의 응력부식피로 손상이 발생했으며 특히, 소구경배관에서는 45%의 진동피로에 의한 파손을 보고하였다. 따라서 소구경 배관 용접부에 대한 효율적, 안정적 운영 측면에서 피로손상에 대한 평가가 중요하다고 하겠다. 아직까지 파손원인에 대해 정확히 알려진 바는 없으나 용접시 생성된 결함 (용입불량, 용입부족, 언더컷, 기공 등)은 진동 및 열 등의 피로환경 하에서 응력집중이 크게 작용하고 파손에 이르는 것으로 생각된다. 최근 Iida에 따르면 상대적으로 높은 응력과 저주기피로를 받는 소켓용접부는 토우부에서 낮은 응력과 고주기피로에서는 루트부에서 파괴가 주로 일어난다고 보고하고 있다[4]. 하지만 국내 원전을 대상으로 소구경 배관의 소켓 용접부에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 소구경 배관 소켓 용접부의 필렛 부분에서 발생하는 미소균열은 갑작스런 파단을 유발할 가능성이 매우 크다. 따라서 배관 용접부에 발생하는 미소균열을 검출 및 감시함으로써 소켓 용접부의 파손을 미연에 방지할 수 있다. 이처럼 용접부 및 구조물에서의 갑작스런 파손을 예방하기 위하여 구조물을 파손시키지 않고 손상정도를 모니터링 할 수 있는 비파괴평가법을 적용하고자 하는 연구가 이루어져 왔다 [5-8]. 하지만 이들 방법들은 현장에 적용하고 실시간 모니터링 하기에는 많은 어려움이 있으므로 최근 음향방출법의 적용에 대한 다양한 기술이 적용되고 있다[9-12].

일반적으로 재료가 외부 응력에 노출되어 있을 경우 이 응력에 의해 재료내 결합이 발생하게 되면 에너지의 이완현상이 나타나게 되며 탄성파가 발생하게 된다. 이러한 탄성파는 초기발생시 재료의 탄성특성에 따른 벌크파로 방출된다. 이러한 탄성파가 재료의 계면에 이르게 되면 일정에너지는 인접 매질로 전달되고, 일부는 반사되며 일부는 계면을 따라 전파하는 표면파로 바뀌게 된다. 이렇게 재료의 외부계면을 따라 전파하는 표면파는 적절한 탐촉자를 이용하여 재료의 외부에서 용이하게 검출할 수 있다. 이렇게 검출되어진 탄성파를 이용하여 재

료의 물성변화를 평가하는 방법을 음향방출기법이라 할 수 있다. 검출되어진 탄성파는 재료 내 결합의 생성 및 이동 등과 관련한 내부에너지의 변화에 의한 현상으로 물리적으로 재료의 미시적인 현상과 밀접한 관련이 있다. 이러한 음향방출원으로써 지금까지 알려진 바로는 소성변형시 전위의 거동, 쌍정의 생성, 변형유기 마르텐사이트의 생성 그리고 균열의 생성 등 재료 내부에서 발생하는 에너지의 갑작스런 방출로 일어나는 현상이라 할 수 있다.

본 연구는 원자력발전기의 소구경배관 소켓용접부에 사용되어지는 실제형상과 크기의 소켓 용접부를 제작하고, 시공 및 보수 시 나타날 수 있는 용입불량 결함을 모사하여 이들에 대한 피로특성을 관찰하였다. 또한, 발전설비의 가동 중 구조 건전성 모니터링을 위해 실시간 모니터링이 가능한 음향방출법을 사용하여 고주기 피로시험 시 용접배관에서 발생하는 균열의 발생시점을 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 용접 시험편

본 연구에 사용한 소켓 용접용 파이프는 ASTM A-312 TP 316L이며 소켓은 ASTM A-182-Gr. B를 사용하였다. 파이프는 외경이 30 mm, 내경이 16 mm, 소켓은 환형형태로 입수하여 외경이 39 mm, 내경이 16 mm가 되도록 각각 가공을 하였다. Table 1은 파이프와 소켓의 화학적 조성을 나타내고 있다. Fig. 1은 소켓 용접부의 개략도를 나타내었다. 시험편은 ASME NB-4427 Code[13]에 준하는 대로 G를 1/16 in.로 하고 C₁를 4.9 mm로 정하였으며 가스 텅스텐 아크용접은 교류전류 150 A, 23 V, 100 mm/s의 용접조건으로 용접하였다. 소켓용접은 현장에서 설치의 용이성으로 매우 일반화되어 있지만, 피로에 대한 감수성의 영향은 덜 고려한 것이다. 소구경 배관은 조립시 형성되어진 배관사이의 유격으로인해 용접공정시 루트부에 피할 수 없는 응력집중부를 만들게 된다. 따라서 이러한 유격은 미세한 틈을 형성하여 이는 잠정적으로 루트부가 부식성 유체에 노출될 가능성이 큰 것을 의미하게 된다. 이러한 이유로 버트용접이 소켓용접 보다는 피로저항성에는 강하지만 소켓용접의 신뢰성, 높은 공정성과 중성자에 대한 노출을 최소화 할 수 있는 빠른 시공, 그리고 현장에서 설

치에 따르는 경제성 등의 이유로 앞으로도 지속적으로 사용될 것으로 생각된다.

Hopkins와 Benac[14]의 의하면 SwRI(Southwest Research Institute)의 1988년부터의 기록을 인용하여 9개의 서로 다른 발전소에서 나타난 소구경배관 13건의 파손사례를 보고하였다. 이중 54%는 루트부에서 38%는 토우부에서 발생한 피로파괴였고 단지 한 건 만이 부식에 의한 파손임을 보고하였다. 또한, 루트부의 파손중 30%가 용입불량에서 발생한 것으로 판단하고있다. 이렇듯 피로 중에서도 용접시공시 나타날 수 있는 용접결함이 소구경배관의 수명에 큰 영향을 미칠것으로 생각된다. 따라서 루트부에 인공결함(용입불량)을 삽입한 시험편을 제작하여 결함 존재시 나타나는 피로특성을 관찰하고자 하였다. 루트부의 인공결함은 용접시 가로, 세로를 모두 1 mm로 제작하고자 하였다. 이렇게 제작되어진 소구경 배관 소켓 용접부의 건전시험편과 용입불량시험편의 단면 미세조직사진을 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of STS 316L steel

	C	Si	Cr	Mn	P	Ni	S	Mo	Fe
Pipe	0.021	0.40	16.09	2.10	0.30	11.21	0.005	0.063	bal.
Socket	0.015	0.51	17.10	1.87	0.36	10.68	0.03	2.09	bal.

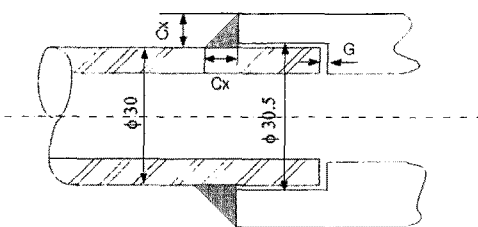


Fig. 1 ASME Code NB-4427 on the socket welded small bore pipe; C_x=4.9 mm and slip-on gap, G=1/16 in

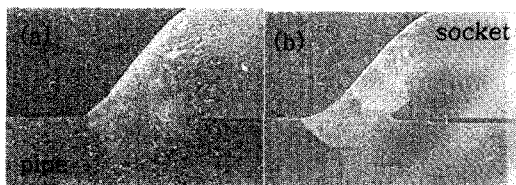


Fig. 2 Optical micrographs showing the cross section of socket welded pipe joint at each weldment; (a) without defect and (b) with defect

Fig. 3은 각 용접부위의 광학현미경 미세조직 사진을 나타낸 것이다. 제작 되어진 용접시험편의 미세조직을 관찰한 결과 용입부족, 언더컷, 기공 등의 용접결함들은 찾아볼 수 없었다. 용접부위별 미세조직을 관찰한 파이프 모재는 결정립 크기가 약 50 μm인 오스테나이트 단상으로 되어 있었으며 열 영향부에는 용접 열로 인하여 오스테나이트상 보다 Cr의 함량이 증가하고 Ni의 함량이 감소한 델타 페라이트가 생성 되었고 100 μm 정도의 결정립 크기를 보였다. 용접금속 가장자리에는 덴드라이트(dendrite)형상의 델타페라이트가 존재하고 중심부에는 셀(cell)형상의 델타 페라이트가 존재하는 것을 관찰 하였다. 또한 소켓부 모재의 결정립 크기는 10 μm 정도로 파이프 모재에 비해 결정립 크기가 매우 미세하였다.

용접 후 초음파 시험과 방사선투과사진법을 이용하여 용접상태를 관찰 하고 용접공정으로 루트부에 인위적으로 삽입하고자 했던 용입불량 결함에 대한 정량적인 크기 측정을 수행하였다. 이때 초음파 시험은 소켓용접부 탐상을 위하여 대한검사기술(주)에서 개발되어진 전용탐상 장비를 사용하였다. 이 탐상장치는 초음파 송신/수신장치를 내장하고 A/D 보드를 사용하여 프로그램을 이용 자동 4축 제어가 가능한 시스템으로 구성되었다. 초음파탐상 시험은 5 MHz 광대역 압전소자를 이용하여 입사각을 40°로 소켓 용접부 내의 인공결함인 용입불량을 평가하였다. 또한, 53 Ci의 Ir-192를 사용하여 방사선투과시험을 하였다.

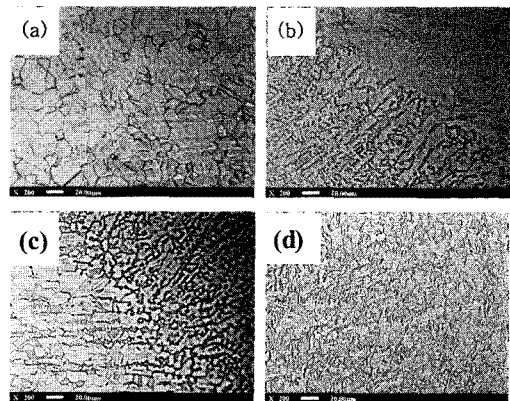


Fig. 3 Optical micrographs showing the surface morphologies of socket welded small bore pipe; (a) pipe base, (b)HAZ-pipe, (c) socket-HAZ and (d) socket base

Fig. 4는 건전 시험편과 용입불량 시험편을 방사선투과사진법을 이용하여 용접 후 검사를 실시한 결과이다. Fig. 4 (a)는 건전시험편의 방사선투과사진의 결과로 루트부 및 토우부에 기공 및 균열 등의 결함을 관찰 할 수 없었으며, Fig. 4(b)는 동일한 방법으로 촬영한 용입불량 시험편의 방사선투과사진으로 루트부에 인위적으로 만든 용입불량 결함을 관찰 할 수 있었다. 용입불량의 정량적 평가를 위해 총 100여개의 시험편에 대해 용입불량 크기를 측정된 결과 가로와 세로가 약 1.2 mm, 1.0 mm로 각각 측정되었다. 건전 시험편과 용입불량 시험편에 대하여 초음파 자동탐상법을 이용하여 용접 후 검사를 실시한 결과 Fig. 4(a)는 건전한 시험편의 초음파 자동탐상 결과 결함신호는 관찰되지 않았으나 Fig. 4(b)와 같이 용입불량 시험편에서는 기계적 잡음외에 용입불량으로 인하여 나타나는 결함신호를 관찰 할 수 있었다. 이와 같이 방사선투과사진법과 초음파 자동탐상법을 이용하여 용접 후 검사를 실시하여 결함이 없는 건전 시험편과 루트부에 용입불량 결함이 있는 시험편으로 분류 하였으며 용입불량의 크기를 정량화할 수 있었다.

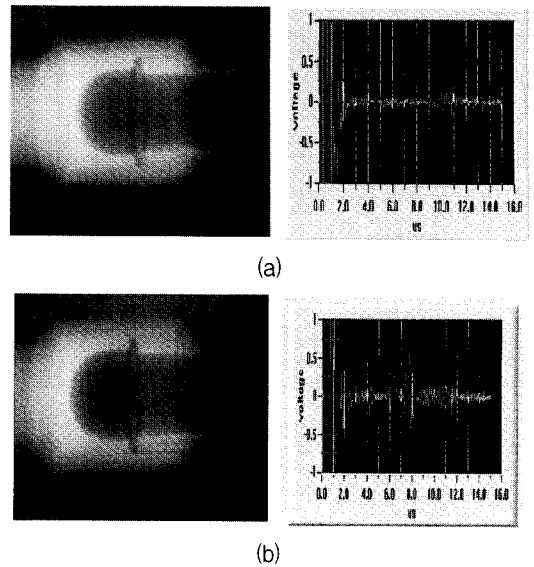


Fig. 4 Radiographs showing the socket welded small bore pipe and ultrasonic signal obtained from welding specimens; (a) without defect and (b) with defect

2.2. 고주기 피로 및 음향방출시험

소구경 배관 소켓 용접부의 4점 굽힘 시험을 수행하기 위하여 Fig. 5와 같이 특수 제작된 고정장치를 사용하였다. 고주기 피로시험은 최대용량이 10 t 인 유압식 만능시험기를 이용하여 상온에서 하중제어 방식을 이용하였고 진동수 10 Hz, 응력비 -1 의 조건에서 하중을 130 MPa 에서 280 MPa범위로 실시하였다. 피로시험시 균열의 발생시점을 예측하기 위하여 MISTRA사의 PAC-1220 AE 시스템을 이용한 음향방출시험을 수행하였다. 실험에 사용된 센서는 100 kHz - 1 MHz 주파수 범위를 갖는 광대역 센서를 사용하였고 피로 시험 시 발생하는 기계적 잡음과 주변의 잡음을 고려하여 문턱값은 35 dB, 전치증폭기에서 40 dB로 증폭을 하였다.

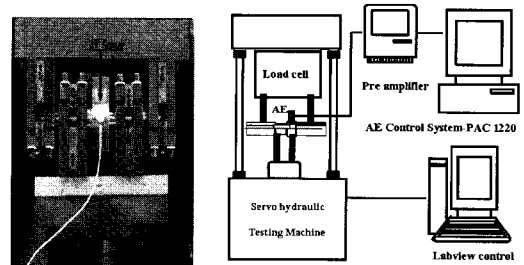


Fig. 5 Schematic diagram of high cycle fatigue test system for monitoring acoustic emission and fixture of bending fatigue

3. 시험 결과 및 고찰

3.1. 소켓용접부의 피로수명 평가

고주기 피로시험 결과 용입불량이 존재하는 시험편과 결함이 없는 건전한 시험편에 대해서 각각 응

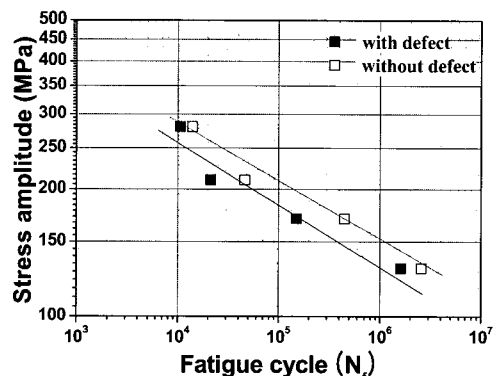


Fig. 6 S-N diagram of socket welded small bore pipe with defect and without defect specimen

력·사이클 (S-N) 곡선을 Fig. 6과 같이 나타내었다. 전체적으로 각 피로하중에 대해서 용입불량 결함이 존재하는 경우 피로수명의 감소를 나타내었다. 시험하중이 큰 경우가 다소 피로수명감소가 적은 것으로 보이거나 전체적으로 피로수명의 감소는 시험하중과 큰 상관성을 보이지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 시험 하중별 파단이 발생한 부위를 관찰한 대표적인 사진을 나타내었다. Fig. 7(a)는 건전한 시험편으로 시험하중 280 MPa의 고응력일 때 토우부에서 균열발생이 시작되어 수직한 방향으로 진전된 것이고 Fig. 7(b)는 결함시험편으로 시험하중 130 MPa의 저응력일때 루트부에서 파단된 결과이다. Fig. 7(c)와 Fig. 7(d)는 토우부와 루트부에서 생성되어 성장한 대표적인 균열의 모습을 나타내었다. 본 연구에서 시험편의 형상학적 특성상 응력집중은 토우부 혹은 루트부에서 특히, 결함을 포함한 시험편에선 결함이 존재하는 루트부 중 결함부위가 가장 큰 응력 집중원으로 작용할 것으로 생각된다. 또한 용접공정을 통하여 제작되어진 용접시험편이므로 용접공정중 응고과정에 따른 잔류응력은 피할수 없는 현상이 될 것이다. 용접공정중에도 역시 토우부 혹은 루트부에 인장이

나 압축 응력이 작용되리라 생각된다.

EPRI [2]의 보고에 따르면 고응력 저주기하에서는 토우부에서 파손이 일어나고 저응력 고주기하에서는 루트부에서 파단이 일어난다고 보고하고 있다. Choi 등 [15]은 소켓용접부에 대한 유한요소 해석을 통해 소구경배관의 응력분포를 해석하였고 응력 집중부는 루트부와 토우부에서 나타났으며 특히, 루트부가 토우부의 약 2배정도의 강한 응력 집중 현상을 보이는 것으로 보고하였다. 또한, Mochizuki[16]는 필렛용접부에 대한 응력-부식 균열에 대한 용접 잔류응력의 관계를 연구하였다. X-선 회절법으로 측정된 용접잔류응력은 토우부에 강한 인장잔류응력이 존재하고 있음을 보고하였다. 이상의 기존 연구보고에서와 유사하게 본 연구에서도 고응력일 때는 용접시 발행한 토우부의 강한 인장잔류응력의 영향이 크게 작용하여 토우부에서 파단이 발생하였고 저응력 일 때에는 용접시 발행한 잔류응력의 영향은 미비하지만 형상학적인 응력집중의 영향으로 인하여 응력집중이 가장 많이 작용하는 루트부에서 파단이 일어난 것으로 판단된다. 또한, 용입불량 처럼 결함이 존재하는 부위는 응력집중현상이 현저하게 일어나므로 상대적으로 고응력인 210 MPa에서도 루트부에서 파단이 일어난 것으로 판단된다.

이상의 하중에 따른 파단부위와 용입불량의 존재에 따른 수명감소정도를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 용입불량 결함으로 인한 피로수명 감소율은 최소 25%에서 최대 66% 까지 매우 큰 수명 감소를 나타내었다. 이미 기술한 바와 같이 고응력에서는 용접공정시 생성된 토우부의 강한 인장잔류응력이 지배적이고 저응력시 형상학적인 루트부의 응력집중현상이 지배적인 것으로 각 응력별 시험결과로부터 유추하였다. 하지만 Table 2에 나타난 바와 같이 루트부에 용입불량의 용접결함이 존재하게 되면 저응력시 지배적이던 루트부의 응력 집중현상이 더욱 현저하게 나타나 상대적으로 더 높은 응력에서조차도 루트부의 응력집중으로 인한 파손이 일어나는 것으로 판단되어 진다.

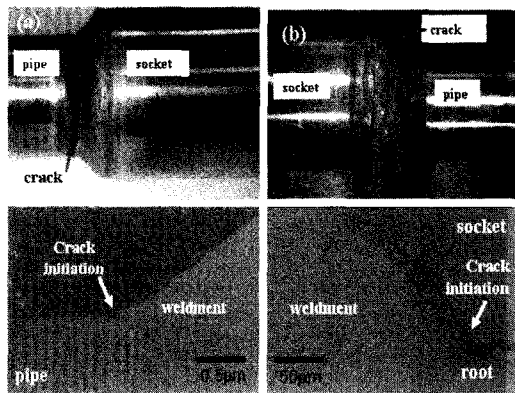


Fig. 7 Micrographs showing the fracture of socket welded small bore pipe; (a),(b) fracture position and (c),(d) crack initiation site

Table 2 Classification of failure position and life reduction

Stress (MPa)	130	170	210	280
without defect	root	toe	toe	toe
with defect	root	root	root	toe
life reduction (%)	25	54	66	36

3.2. 음향방출 시험

Fig. 8은 대표적인 건전 시험편과 용입불량 시험편에 대하여 피로 적용하중별 음향방출 카운트 (AE counts)의 변화를 나타낸 것이다. 음향방출 카

운트는 피로사이클에 따라서 오랫동안 변함이 없다가 갑자기 증가하는 현상을 나타내었다. 이는 균열의 생성과 연관성이 있는 것으로 생각되며 본 연구에서는 이 시점을 거시균열의 생성시점 (N_i)으로 정의 하였다.

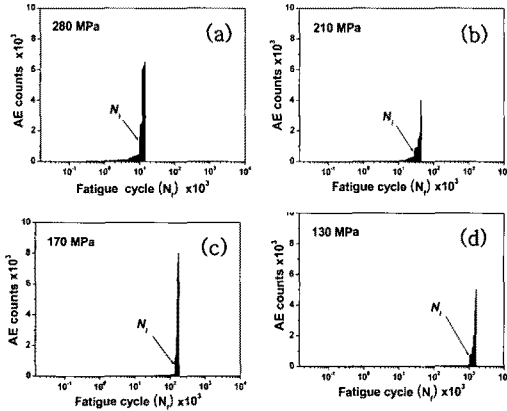


Fig. 8 Variation in AE counts as a function of number of fatigue cycles of socket welded small bore pipe; (a),(b) without defect, (c),(d) with defect

Table 3 Classification of fatigue failure cycles and crack initiation cycles with stress amplitude

Stress (MPa)	without defect		with defect	
	N_f	N_i	N_f	N_i
280	1.4×10^4	1.0×10^4	1.05×10^4	7.7×10^3
210	4.6×10^4	2.8×10^4	2.1×10^4	1.5×10^4
170	4.5×10^5	3.2×10^5	1.5×10^5	1.3×10^5
130	2.5×10^6	1.9×10^6	1.6×10^6	1.05×10^6

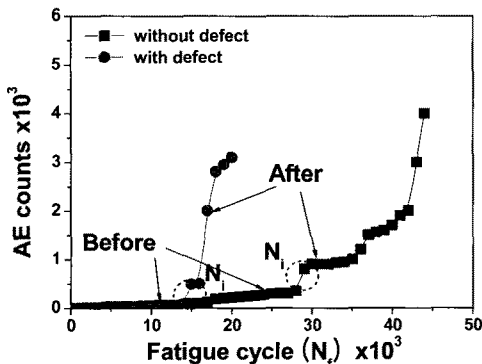


Fig. 9 Change of AE counts with number of fatigue cycles with defect and without defect specimen at 210 MPa

따라서 본 연구에서는 균열의 발생과 전파에 의한 탄소파의 생성원에 주목하고자 하였고 음향방출 데이터와 균열 거동과의 연관성을 살펴보았다. Ni 지점에서 음향방출 카운트가 급격하게 증가하였으며, 내부 균열의 발생 및 전파로 인하여 카운트수가 증가한 것으로 판단된다.

Table 3은 피로시험중 음향방출시험으로 정의되어진 거시균열의 발생시점을 측정하여 전체 피로파단 사이클과 비교하여 나타내었고 균열발생 시점을 전체수명 에 대하여 함께 나타내었다. 결과에서 처럼 거시균열의 발생은 전체 피로수명에 대하여 시험 응력에 따라 조금씩 차이는 있지만 전체적으로 약 74%에 해당되고 있다.

본 연구에서 N_i 를 음향방출 데이터를 기반으로 용접 시험편 내에 거시균열이 생성되는 시점으로 정의 하였다. 하지만 이는 용접 시험편 내 실제 발생되었을지 모를 균열과 음향방출 데이터와의 상관성을 규명하지 못한 것으로 실제 균열의 발생여부를 확인하고자 하였다. 균열의 발생시점을 규명하고자 건전시험편과 용입불량시험편을 이용하여 210 MPa 하중조건에서 피로시험을 하였고 동시에 음향방출시험을 통하여 얻은 음향방출신호의 카운트 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 결과에서와 같이 음향방출신호가 급격하게 증가는 곳(N_i)은 용입불량시험편의 경우 $N=1.5 \times 10^4$ 이고 건전시험편의 경우 $N=2.8 \times 10^4$ 으로 나타났다. 따라서 피로균열이 발생하지 않은 부분으로 화살표 (Before)로 표시한 용입불량시험편의 경우 $N=1.1 \times 10^4$, 건전시험편의 경우 $N=2.5 \times 10^4$ 에서 시험을 중단하고 시험편을 회수하였다. 또한, 피로균열이 발생한 시험편은 화살표 (After)와 같이 용입불량시험편의 경우 $N=1.7 \times 10^4$, 건전시험편의 경우 $N=3.1 \times 10^4$ 에서 시험을 중단하였다. 이렇게 피로시험을 중단하고 회수한 시험편에 대해 방사선투과시험을하여 피로균열의 존재 여부를 확인하였다.

Fig. 10은 건전시험편과 용입불량의 결함시험편에 대한 피로시험 후 관찰한 방사선 투과사진을 나타내었다.

그 결과 Fig. 10(a-1)과 Fig. 10(b-1)은 Fig. 9에 표시한 바와 같이 음향방출 데이터의 큰 변화가 없는 두 시험편의 Before에 해당하는 시험편으로 피로에 의한 균열을 관찰할 수 없었다. 하지만, Fig. 10(a-2)에서처럼 건전한 시험편의 경우 토우부에 발생된 균열을 관찰할 수 있고 용입불량 시험편은

Fig. 10(b-2)에서처럼 루트부에 존재하는 결함에서 균열이 발생한 것을 관찰 할 수 있었다. 따라서, 이상의 균열발생 시점에 관한 규명실험을 통하여 피로균열의 발생 시점을 음향방출 신호의 카운트가 급증하는 지점으로 정의한 것이 타당함을 알 수 있었다.

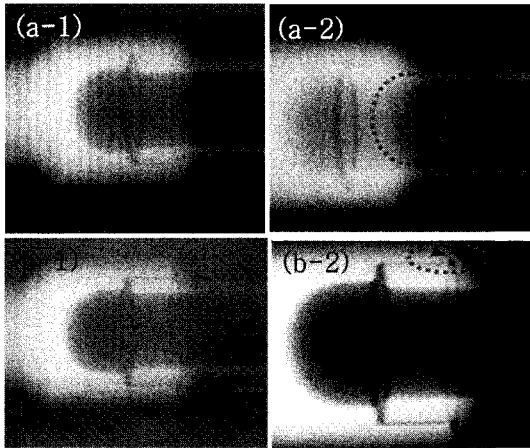


Fig. 10 Radiographs showing socket welded small bore pipe before and after Ni; (a) without defect specimen and (b) with defect specimen

4. 결 론

원자력발전설비인 소구경배관의 소켓용접부 시험편에 대한 고주기 피로시험 결과 응력이 증가할수록 용입불량시험편에서 결함으로 인한 피로수명 감소율이 증가하는듯하나 고주기 피로 그리고 형상학적인 복잡성을 고려할 때 수명감소율과 작용하중에는 큰 연관성을 나타내지 않는 것으로 판단되었다. 수명감소율은 전체적으로 약 25%에서 66%정도를 나타내었다. 소구경배관 소켓 용접부는 용접시 생성되어진 용접잔류응력과 형상학적인 응력집중현상으로 인해 피로하중에 따라서 고응력일 때는 토우부에서 균열이 생성 성장하였고 상대적으로 저응력일때는 루트부에서 우선적으로 균열이 생성되고 파단이 되었음을 관찰하였다. 소구경배관의 피로시험 중 실시간으로 음향방출시험을 하여 배관의 손상을 모니터링 하였으며 음향방출 신호의 카운트가 급격하게 증가하는 시점을 균열이 발생된 시점으로 정의하였다. 음향방출 신호의 급격한 증가시점을 전후로 시험을 중단하여 방사선 투과법과 현미경법을 이용하여 발생한 피로균열을

관찰할 수 있었다. 이상과 같이 원자력발전소재료로 실제 사용되고 있는 재료와 동일한 형상을 갖는 소구경배관 소켓 용접부를 제작하고 용접과정으로 생성될 수 있는 용입불량결함에 의한 피로특성을 관찰하였다. 그리고 피로균열의 발생시점을 음향방출법을 이용하여 실시간으로 모니터링 할 수 있었다.

후 기

본 연구의 재료를 제공해 주신 한전기공(주)의 김승태 소장님과 방사선검사와 초음파검사 장비사용을 허락해 주신 대한검사기술(주)의 이정기 박사님께 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] EPRI, Vibration Fatigue of Small Bore Socket Welded Pipe Joint, Electric Power Research Institute, Final Report TR-107455, (1997)
- [2] EPRI, Fatigue Management Handbook, Electric Power Research Institute, Research Project 3321-01, (1994)
- [3] F. A. Simone and S. R. Gosselin, "Life prediction and monitoring of nuclear power plant components for service-related degradation," Transactions of the ASME, Vol. 123, pp. 58-64, (2001)
- [4] K. Iida, et al., "Study on crack generation at root of socket welds," Nuclear Engineering and Design, Vol. 166, pp. 85-98, (1996)
- [5] A. J. McEvily, "Failures in inspection procedures: case studies," Engineering Failure Analysis, Vol. 11, pp. 167-176, (2004)
- [6] H. Huang et al., "Design of an eddy-current array probe for crack sizing in steam generator tubes," NDT & E International, Vol. 36, pp. 515-522, (2003)
- [7] 김정석, 권숙인, 박익근, "크리프-피로 손상된 페라이트기 9Cr 내열강의 미세조직 발달과 자기적 특성," 비파괴검사학회지, Vol. 27, No. 5. pp. 374-382, (2007)
- [8] C. S. Kim and S. I. Kwun, "Influence of

- precipitate and martensite lath on the magnetic properties in creep damaged 11Cr-3.45W steel," *Materials Transactions*, Vol. 48, pp. 3028-3030, (2007)
- [9] R. Geng, "Modern acoustic emission technique and its application in aviation industry," *Ultrasonics*, Vol. 44, pp. 1025-1029, (2006)
- [10] R. Oliveira and A. T. Marques, "Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks," *Computers and Structures*, Vol. 86, pp. 367-373, (2008)
- [11] C. Jomdecha, et al., "Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types," *NDT & E International*, Vol. 40, pp. 584-593, (2007)
- [12] 이상국, "음향방출기술에 의한 발전설비 비파괴검사 및 응용," *비파괴검사학회지*, Vol. 24, No. 4, pp. 396-409, (2004)
- [13] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Division 1, Subsections NB-/NC-/ND-, Article 4427, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, (1998)
- [14] D. N. Hopkins and D. J. Benac, "Investigation of fatigue-induced socket-welded joint failures for small-bore piping used in power plants," *Practical Failure Analysis*, Vol. 1, pp. 71-82, (2001)
- [15] Y. H. Choi and S. Y. Choi, "Socket weld integrity in nuclear piping under fatigue loading condition," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 237, pp. 213-218, (2007)
- [16] M. Mochizuki, "Control of welding residual stress for ensuring integrity against fatigue and stress-corrosion cracking," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 237, pp. 107-123, (2007)