

원전 배관재 다층 용접부의 파괴 특성에 관한 연구

박재실* · 석창성†

(2000년 2월 23일 접수, 2001년 1월 18일 심사완료)

A Study on the Characteristic of Fracture Toughness in the Multi-Pass Welding Zone for Nuclear Piping

Jae-Sil Park and Chang-Sung Seok

Key Words: J-Integral(J-적분), Fracture Toughness(파괴인성치), Multi-Pass Welding(다층용접), Ductile Fracture(연성파괴), Brittle Fracture(취성파괴)

Abstract

The objective of this paper is to evaluate the fracture resistance characteristics of SA508 Cl.1a to SA508 Cl.3 welds manufactured for the reactor coolant loop piping system of nuclear power plants. The effect of the crack plane orientation to the welding process orientation and the preheat temperature on the fracture resistance characteristics were discussed. Results of the fracture resistance test showed that the effect of the crack plane orientation to the welding process orientation on the fracture toughness is significant, while that of preheat temperature on the fracture toughness is negligible. The micro Vickers hardness test, the metallographic observation and the fractography analysis were conducted to analyse the crack jump phenomenon on the L-R crack plane orientation in the multi-pass welding zone. As these results, it is shown that the crack jump phenomenon was produced because of the inhomogeneity between welding beads and the crack plane orientation must be considered for the safety of the welding zone in the piping system.

1. 서론

대부분의 산업 설비에는 배관 설비들이 많이 포함되어 있으며, 이러한 배관 설비의 용접부 결함은 가동 중 사고의 주요 원인이 되고 있다. 특히 원자력 발전소에는 많은 배관 계통 설비들이 포함되어 있으며 파단 전 누설(LBB; Leak-Before-Break) 설계 개념이 적용되면서 배관 재료의 인장 특성과 파괴 특성이 중요시되고 있다.⁽¹⁾

또한 고온 고압의 증기 또는 가스에 의한 손상, 부식 또는 크리프 현상에 의한 강도 저하, 방사선에 의한 손상, 부식 및 기기의 운전에 의한 마모 등의 원인으로 인한 경년 열화 현상은 설비의 안전성을

저하시키고 있으며, 가동 초기부터 결함을 내재하고 있거나 결함의 발생 가능성이 높은 용접부의 경년 열화 현상은 더욱 큰 문제가 되고 있다.^(2,3)

배관 재료의 인장 특성과 파괴 특성은 재료의 가공 성형 방향과 용접 방향에 대한 하중 방향, 균열 진전 방향에 따라서 변화한다고 보고되고 있다.^(4~9) 재료의 두께가 두꺼운 경우에는 한번의 용접으로는 재료를 용접할 수가 없기 때문에 다층 용접을 실시하게 된다. 이러한 다층 용접으로 인하여 용접부 내에는 용접 비드와 비드 사이에 균질하지 않은 부분이 포함될 가능성이 많으며, 이러한 용접부 내의 불균질성은 재료의 인장 특성과 파괴 특성에 영향을 미칠 수 있다.^(10,11) 또한 다층 용접을 실시할 경우 한번의 용접으로 짧은 시간 내에 용접을 마무리 할 수 없기 때문에 용접 도중 예열을 시키면서 용접을 하는 경우가 대부분이다. 이 때 예열 온도에 따라서 재료의 인장 특성과 파괴 특성이 영향을 받을 수 있다.

따라서 본 논문에서는 원자력 발전소 배관 계

* 성균관대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : csseok@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7446 FAX: (031)290-7482

통의 재료로 사용되는 탄소강에 대해서 다층 용접부의 하중 및 균열 진전 방향이 파괴 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 예열 온도에 따른 파괴 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 파괴 저항 시험

2.1 시험 장비 및 시험 온도

본 연구에 사용된 재료시험기는 25톤 용량의 전기유압식 만능시험기(Instron, Model 1332)이며, 파괴저항 시험 시 하중선의 변위 측정을 위하여 캐패시탄스 형(capacitance type)의 고온용 COD(crack opening displacement) 게이지와 증폭기(amplifier)를 사용하였다. 본 연구에 사용한 시험기 및 측정 장비는 ASTM E813⁽¹²⁾(Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness), E1152⁽¹³⁾(Standard Test Method for Determining Fracture Resistance Curves)와 E1737⁽¹⁴⁾(Standard Test method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness)에 제시된 요구 조건을 만족하

도록 구성하였다.

시험기의 제어, 데이터 처리 및 결과 해석에는 32비트 PC를 사용하였으며, 원자력발전소의 1차 계통 배관 계의 설계 온도인 316°C(600°F)에서 파괴저항시험을 수행하였다. 시험 온도를 일정하게 유지하기 위해 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 정확도를 가진 강제 순환 방식에 의한 환경로(environmental chamber)를 사용하여 시험 온도를 조절하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 파괴저항 시험용 실험 장치의 개

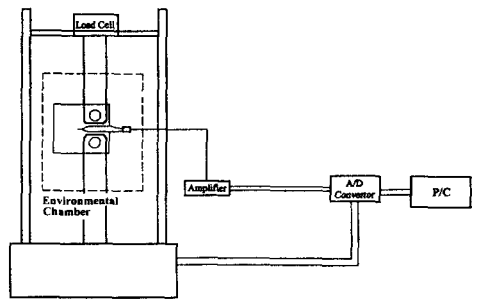


Fig. 1 Schematic diagram of a material testing system

Table 1 Chemical composition of SA508 Cl.1a and SA508 Cl.3 steels

Material	Heat number	Chemical composition (wt.%)											
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	N ₂
SA508 Cl.1a	2B63574	0.230	0.250	1.200	0.006	0.001	0.290	0.200	0.070	0.021	0.030	0.002	-
	2B63352	0.240	0.230	1.210	0.004	0.001	0.300	0.180	0.070	0.017	0.040	0.003	-
SA508 Cl.3	2C27916	0.190	0.090	1.440	0.007	0.002	0.850	0.150	0.510	0.016	0.040	0.004	0.0047
	2C27917	0.190	0.090	1.440	0.007	0.003	0.850	0.160	0.500	0.017	0.040	0.004	0.0044

Table 2 Summary of tensile test results at 316°C

Material	Specimen identification number	0.2 percent offset yield strength, (MPa)	Ultimate tensile strength, (MPa)	Ramberg-Osgood constant		Percent elongation, (%)
				Material constant, α	Strain hardening exponent, n	
SA508 Cl.1a to SA508 Cl.3	RCL-T1	330	521	1.73	6.43	35
	RCL-T2	352	527	1.61	7.04	30
	RCL-T3	350	531	1.48	7.09	26
	RCL-T4	349	528	1.50	7.14	29

Table 3 Welding procedure and PWHT conditions

Material	Preheat temperature	Heat input, (kJ/in)	Current, (A)	Voltage, (V)	Polarity	Welding speed, (in/min)	Filler metal	Filler metal diameter, (mm)	PWHT temperature	PWHT time
SA508 Cl.1a to SA508 Cl.3	121.1°C (250°F)	129.5	131~150	25~33	DCRP	1.6~4.2	SFA 5.1 E7016	4.0	607~611°C (1125~1132°F)	8hr 40min
	65.6°C (150°F)									

략도이다.

2.2 시험 재료 및 시험편

본 연구에서는 원자력발전소 주냉각재(reactor coolant loop) 배관 재료로 사용되는 SA508 Cl.1a 와 SA508 Cl.3과의 용접재에 대한 파괴저항 시험을 수행하였다. Table 1에 시험 재료의 화학적 조성을 나타내었고, Table 2에 인장 시험으로 구한 시험 재료 용접부의 재료물성치를 나타내었다.

용접재를 제작할 때 두께가 50.8mm(2inch)를 초과하므로 예열을 하였으며, 예열 온도에 의한 영향을 살펴보기 위하여 2가지 예열 온도를 설정하여 배관 재료의 용접을 수행하고 시험편을 제작하였다. SMAW(shield metal arc welding) 방법으로 용접을 수행하였으며 용접 조건 및 열처리 조건은 Table 3과 같다.

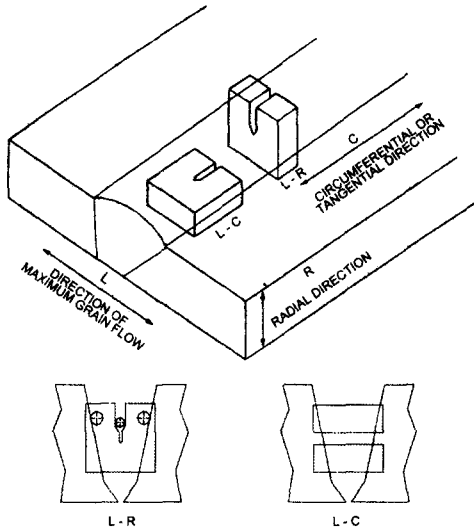


Fig. 2 Crack plane orientation code for rectangular sections of welding plate

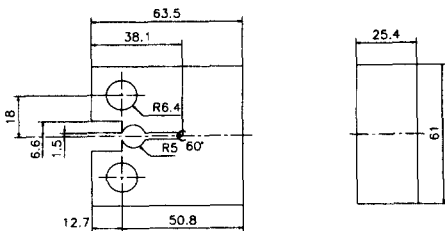


Fig. 3 Geometry for J-R test specimen

본 시험에 사용한 시험편을 Fig. 2의 L-R 방향과 L-C 방향으로 배관용 재료의 평판 용접부로부터 채취하였으며 ASTM E813, ASTM E1152와 ASTM E1737에 따라 두께 25.4mm(1inch)의 표준 시험편(1T-CT 시험편)으로 가공하였다. Fig. 3에 파괴저항 시험에 사용된 표준 시험편의 형상을 나타내었다.

2.3 시험 절차

파괴저항 시험의 모든 과정은 ASTM E813, ASTM E1152와 ASTM E1737에 준하여 단일시험편으로 수행하였다. 균열 길이는 제하 컴플라이언스법을 사용하여 구하였으며 하중-하중선 변위선도로부터 J-적분 값을 계산하였다.

고온 가열로 내의 온도 분포가 균일하게 자동적으로 조절되도록 시험편의 균열부와 가열로 내에 온도 감지 장치를 설치하였고, 시험편 전체가 동일한 온도가 되도록 실험 온도에 도달 후 적어도 60분의 유지 시간을 두고 실험을 수행하였다.

시험편의 무차원 균열 길이(a/W)가 0.55가 되도록 파로 예비 균열을 삽입하여 모든 시험편의 균열 선단을 동일하게 하였으며, 모든 시험편에 두께의 20%의 측면 홈을 가공하여 균열의 직진성과 평면 변형을 조건을 만족시키도록 하였다.

Table 4 Summary of fracture resistance test results at 316°C

Crack plane orientation	Preheat temperature	Specimen identification number	J _{IC} (kJ/m ²)	C ₁ (kJ/m ²)	C ₂
L-R	121.1°C (250°F)	RHJ1	616	636	0.31
		RHJ2	640	657	0.36
		RHJ3	662	671	0.30
		RHJ4	769	749	0.35
	65.6°C (150°F)	RLJ1	256	364	0.49
		RLJ2	351	391	0.21
		RLJ3	256	318	0.31
L-C	121.1°C (250°F)	CHJ1	373	447	0.38
		CHJ2	434	495	0.36
		CHJ3	443	505	0.38
		CHJ4	347	450	0.49
	65.6°C (150°F)	CLJ1	417	507	0.50
		CLJ2	456	532	0.47
		CLJ3	524	562	0.31
		CLJ4	460	535	0.47

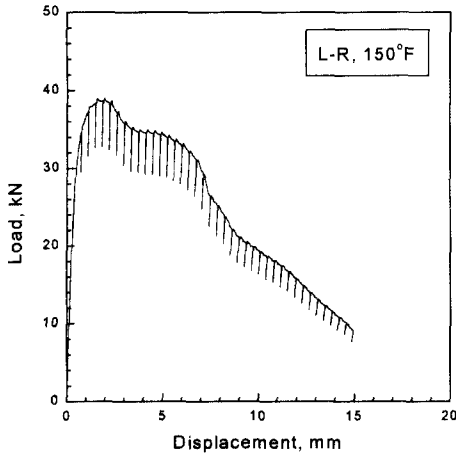


Fig. 4 Load-load line displacement curve for RLJ1 on L-R crack plane orientation

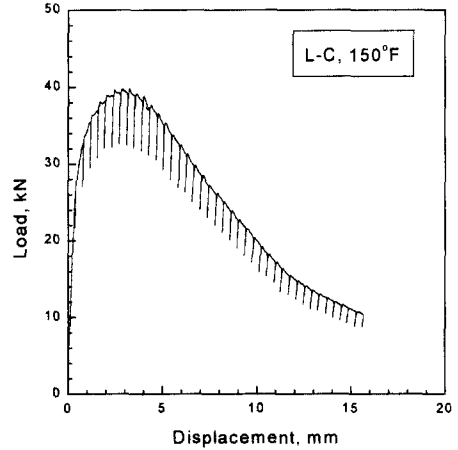


Fig. 5 Load-load line displacement curve for CLJ1 on L-C crack plane orientation

3. 시험 결과

원자력 배관 용접재의 용접 방향에 대한 균열 진전 방향이 파괴저항 곡선에 미치는 영향을 평가하기 위하여 L-R 방향과 L-C 방향으로 시험편을 채취하여 파괴저항 시험을 수행하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 균열 진전 시점에서의 J-적분 값인 J_C 는 ASTM E813 과 ASTM E1737에 의하여 식 (1)을 사용하여 최소자승법으로 파괴저항 곡선을 곡선 적합하여 상수 C_1 과 C_2 를 구한 후에 이 선도로부터 구한 값이다.

$$J_R = C_1(\Delta a/a^*)^{C_2} \quad (1)$$

여기에서, Δa 는 균열 진전량(mm)이고, a^* 는 1mm이다.

3.1 L-R 방향 시험

예열 온도가 121.1°C(250°F)인 경우에 대하여 4개의 시험편에 대한 파괴저항 시험을 수행하였고, 65.6°C(150°F)인 경우에 대하여 3개의 시험편에 대한 시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 4에 정리하였다.

Fig. 4는 예열 온도가 65.6°C(150°F)이고 균열

진전 방향이 L-R 방향인 시험편 RLJ1의 하중-하중선 변위 선도이다. L-R 방향의 시험 결과 대부분이 Fig. 4와 같이 하중이 급격하게 감소하는 부분이 반복되어 나타나는 형태를 보였으며, 파괴저항 곡선 또한 균열이 급격하게 진전하는 형태로 나타났다.

Fig. 4에서처럼 하중이 급격하게 감소하는 부분이 나타나는 것은 시험에 사용된 용접재가 두꺼운 배관의 안쪽부터 여러 번 원주 방향으로 용접을 수행하여 용접 비드가 여러 층으로 쌓인 다층 용접부이기 때문에 용접 비드 사이에 균질하지 않은 부분이 존재할 가능성이 있고, 균열 진전 방향이 이러한 용접 방향과 수직이기 때문에 균열 진전면이 서로 다른 파괴 성질을 가진 부분을 통과하기 때문으로 생각된다. 따라서 이러한 원인을 조사하기 위한 연구가 필요하다.

3.2 L-C 방향 시험

L-R 방향 시험과 마찬가지로 예열 온도가 121.1°C(250°F)인 경우에 대하여 4개의 시험편에 대해 파괴저항 시험을 수행하였고, 65.6°C(150°F)인 경우에 대하여 4개의 시험편에 대하여 시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 4에 정리하였다.

L-C 방향의 시험 결과, Fig. 5와 같이 L-R 방향 시험에서 나타났던 하중의 급격한 감소가 나타나지 않았다. L-C 방향 시험편의 경우는 용접 방향이 원주 방향이므로 균열 진전 방향이 용접 방향

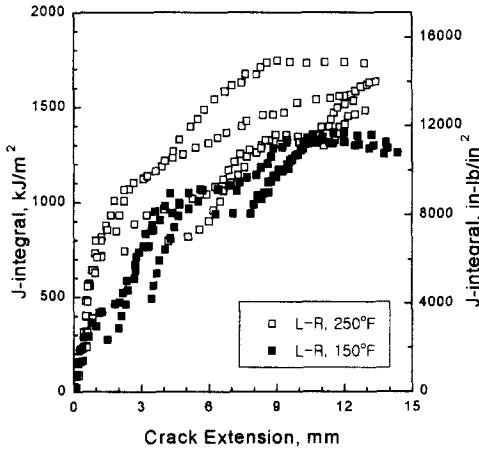


Fig. 6 Comparison of fracture resistance curve for different preheat temperature on L-R crack plane orientation

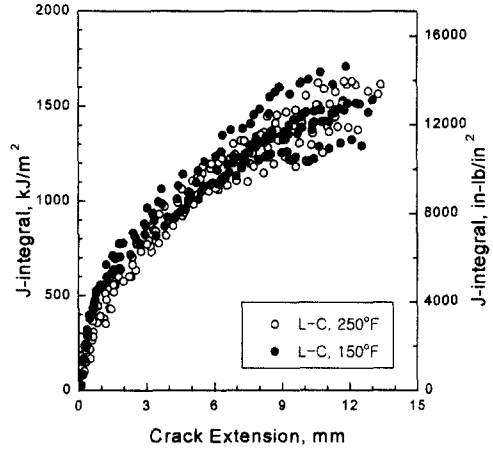


Fig. 7 Comparison of fracture resistance curve for different preheat temperature on L-C crack plane orientation

과 같게 되고 용접 비드를 따라 균열이 진전하기 때문에 일정한 파괴 특성이 나타난 것으로 보여진다.

3.3 시험 결과 분석

Fig. 6은 균열 진전 방향이 L-R 방향인 시험편에 대하여 2가지 예열 온도에 대해 시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보이는 것처럼 2가지 예열 온도 모두에서 균열이 급격히 진전하는 균열 점프(crack jump) 현상이 관찰되었으며, 이로 인한 데이터의 분산으로 정확한 J_{IC} 값을 구하기 위한 유효 데이터를 산출하는 데 어려움이 있었다.

ASTM E813에 따라 J_{IC} 값을 구할 경우 둔화선(blunting line)을 0.15mm 이동시킨 선(0.15mm offset line)과 1.5mm 이동시킨 선(1.5mm offset line) 사이의 데이터를 유효한 데이터로 선정하여 곡선 적합을 하게 된다. 하지만 Fig. 6에서 보이는 것처럼 유효 영역 안에서 균열 점프가 발생할 경우 유효한 데이터를 충분히 얻을 수가 없게 되고 곡선 적합으로 얻은 파괴저항 곡선 또한 실제 실험으로 구한 J-R 곡선과 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 0.2mm 이동시킨 선과 곡선 적합하여 구한 파괴저항 곡선이 만나는 점에서 구한 J_{IC} 값의 유효성이 적어지게 된다.

또한 현재 원자력 발전소 배관 계통의 설계에

LBB 개념을 적용할 경우 J-R 곡선의 기울기로 정의되는 균열 찢김 계수(tearing modulus)를 고려하게 되는데, 급격하게 균열이 진전되는 부분의 경우 균열 찢김 계수가 0에 가까워지므로 LBB의 적용이 곤란해진다. 따라서 Table 3에 보인 L-R 방향 시험에서 구한 J_{IC} 값은 L-C 방향 시험에서 구한 J_{IC} 값에 비해 유효성이 적다고 할 수 있다.

L-R 방향 파괴저항 시험의 경우 예열 온도가 파괴저항 곡선에 미치는 영향은 Fig. 6에 보이는 것처럼 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 6에 보이는 것처럼 초기에는 예열 온도가 121.1°C(250°F)인 경우의 파괴저항 곡선이 높게 나타나나 균열 점프가 발생하면서 급격한 균열 진전이 발생하여 결국은 같은 파괴저항 곡선의 형태로 나타났다.

Fig. 7은 균열 진전 방향이 L-C 방향인 시험편에 대하여 2가지 예열 온도에 대해 시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보이는 것처럼 2가지 예열 온도 모두에서 균열 점프 현상은 관찰되지 않았다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 균열 진전 방향이 용접 방향과 같으므로 같은 파괴 특성이 연속해서 나타나기 때문으로 생각된다.

또한 L-C 방향 시험에서도 L-R 방향 시험과 마찬가지로 파괴저항 곡선에 미치는 예열 온도의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 8과 Fig. 9는 파괴저항 곡선에 미치는 용접

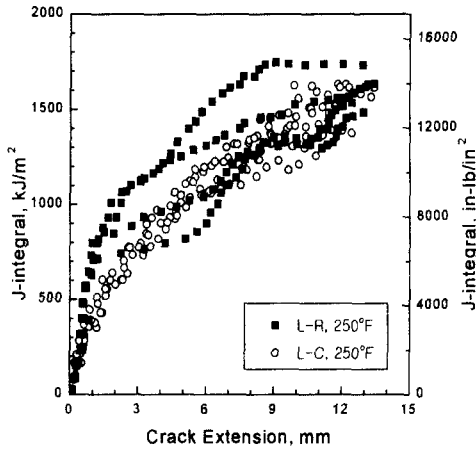


Fig. 8 Comparison of fracture resistance curve for different crack plane orientation at same preheat temperature 121.1°C (250°F)

방향에 대한 균열 진전 방향의 영향을 좀 더 명확하게 살펴보기 위해서 예열 온도 별로 L-R 방향 시험 결과와 L-C 방향 시험 결과를 같은 그래프에 도시한 것이다. Fig. 8은 예열 온도가 121.1°C (250°F)인 경우에 대한 용접 방향에 대한 균열 진전 방향 별 파괴저항 곡선을 나타낸 것이고, Fig. 9는 예열 온도가 65.6°C (150°F)인 경우에 대한 용접 방향에 대한 균열 진전 방향 별 파괴저항 곡선을 나타낸 것이다.

그림에서 보이는 것처럼 L-R 방향 파괴저항 곡선의 경우 2가지 예열 온도 모두에서 균열 점프 현상을 보이고 있으며, 균열 점프가 일정한 간격으로 반복되고 있음을 보이고 있다. 이것은 용접 비드가 일정한 간격으로 반복되며 쌓여 있기 때문으로 보이며, 이로 인해 균열 진전면이 하나의 용접 비드에서 다른 용접 비드로 진행될 때 용접 비드 사이의 불균질한 영역을 통과하기 때문으로 생각된다.⁽¹⁵⁾ 균열 진전면이 용접 비드 내를 통과할 때와 용접 비드 사이를 통과할 때의 파괴 양상이 다르게 나타나기 때문에 그림과 같이 일정한 간격으로 반복되는 균열 점프가 파괴저항 곡선에 나타나는 것으로 보여진다.

그러나 Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 것처럼 용접 진행 방향에 대한 균열 진전 방향 별 파괴저항 곡선의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 예열

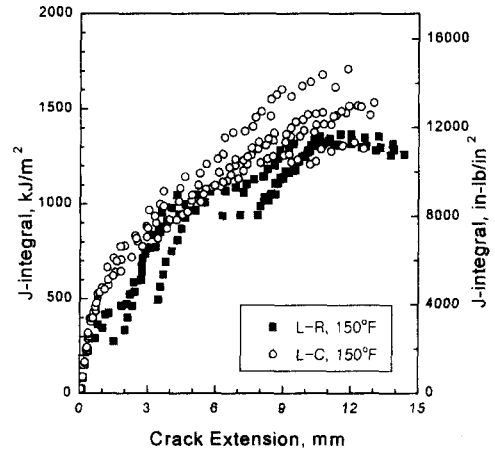


Fig. 9 Comparison of fracture resistance curve for different crack plane orientation at same preheat temperature 65.6°C (150°F)

온도가 121.1°C (250°F)인 Fig. 8의 경우에는 L-R 방향의 파괴저항 곡선이 L-C 방향의 파괴저항 곡선 보다 약간 높게 나타나는 것으로 보이나 균열 점프의 영향으로 인하여 전체적인 경향을 볼 때 같은 형태로 나타났다. 예열 온도가 65.6°C (150°F)인 경우에는 Fig. 9에서 보이는 것처럼 L-R 방향의 파괴저항 곡선이 균열 점프의 영향으로 L-C 방향의 파괴저항 곡선에 비해 약간 낮게 시작되나 점차적으로 높아져 전체적으로 같은 형태의 파괴저항 곡선을 보이고 있다.

4. 균열 점프 원인 분석

다층 용접부의 용접 방향에 대한 균열 진전 방향에 따른 파괴저항 곡선의 변화 원인인 균열 점프 현상의 원인을 살펴보기 위하여 본 연구에서는 균열 진전면을 따른 경도 시험, 용접부의 조직 관찰, 시험편의 파면 관찰을 수행하였다.

4.1 경도 시험

예열 온도가 121.1°C (250°F)인 경우에 대하여 L-R 방향 파괴저항 시험편과 L-C 방향 파괴저항 시험편에 대하여 균열 진전면을 따라 미세 Vickers 경도 시험기로 경도 시험을 수행하였다.

경도 시험은 각 방향의 파괴저항 시험 후 파단된 시험편에 대해 수행되었다. 시험편에 측면 홈

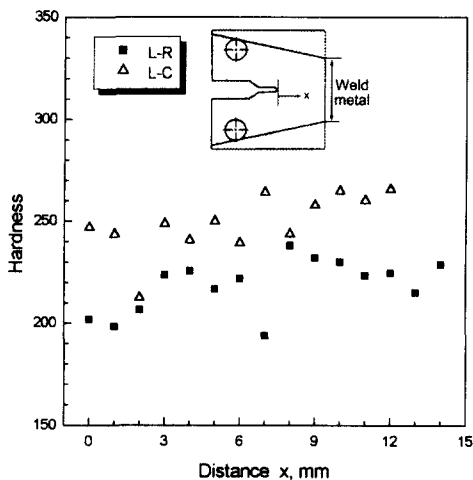


Fig. 10 Comparison of micro Vickers hardness for different crack plane orientation at same preheat temperature 121.1°C(250°F)

가공을 하였으므로 균열 진전면으로부터 3mm 아래 부분에서 균열 진전 시작점으로부터 최대 균열 진전 지점까지 1mm 간격으로 미세 Vickers 경도 시험을 수행하였다.

Fig. 10은 예열 온도가 121.1°C(250°F)인 경우에 대하여 균열 진전면에 따른 균열 진전 방향 별 경도 값을 나타낸 것이다. 횡축은 균열 진전 시작점으로부터의 거리를 나타내었으며 종축은 미세 Vickers 경도 값을 나타내었다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 균열 진전 시작점으로부터 거리가 멀어짐에 따라서 L-R 방향의 경우 경도 값이 증가하다가 감소하고 다시 증가하다가 또 다시 감소하는 경향을 보였는데, 이는 L-R 방향의 파괴저항 시험에서 구한 하중-하중선 변위 선도와 파괴저항 곡선의 경향과 비슷한 경향을 나타내었다. L-C 방향의 경우에는 어느 정도 분산은 있지만 일정한 값을 나타내었다.

이상의 결과로부터 균열 진전 방향이 용접 진행 방향에 수직인 L-R 방향의 경우 균열 진전면이 용접 비드를 통과할 때와 용접 비드와 비드 사이의 불균질한 부분을 통과할 때 서로 다른 파괴 양상을 보인다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 균열 진전면이 좀 더 약한 부분을 지날 때 균열 점프가 발생하여 급격한 균열 진전이 발생하는 것으로 보인다. L-C 방향의 경우에는 균열

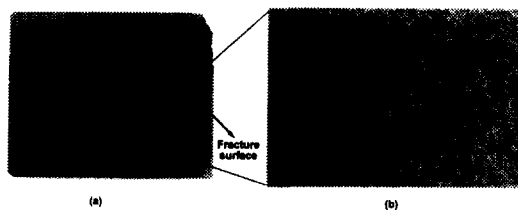


Fig. 11 Metallographic profile, (a) macrostructure of welding zone, (b) microstructure, ×50

진전 방향과 용접 진행 방향이 일치하므로 균열 진전면이 용접 비드를 따라서 같은 파괴 양상을 보이는 부분을 통과하기 때문에 균열 점프 현상이 나타나지 않는 것으로 보인다.

4.2 조직 관찰

용접부의 파괴저항곡선에서 균열 점프 현상의 발생은 결국 용접부의 미세조직에 의존하게 된다. 따라서 L-C 방향의 시험편을 균열 진전 방향과 수직인 방향으로 절단하여 그 미세조직을 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

조직 관찰 결과, Fig. 11(a)에서 보이는 바와 같이 용접 비드와 비드 경계면에 비드와 다른 조직이 비드 경계면을 따라 분포하는 것으로 나타났다. 또한 이러한 불균질한 부분을 통과하여 파괴가 일어날 때 불안정한 균열 성장이 일어남을 관찰할 수 있었다.

이러한 비드 경계면을 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 비드 경계면의 미세조직을 확대하여 관찰한 결과를 Fig. 11(b)에 나타내었다. 그림의 결과에서 A로 표시된 부분은 비드 부분이며, B로 표시된 부분은 비드 경계면이다. 그림에서 보이는 바와 같이 비드 경계면의 조직은 비드 조직에 비하여 상당히 다른 양상을 보이고 있으며, 비드와 비드를 연결하는 방향으로 조직이 길게 늘어서 있는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 균열 점프 현상은 이러한 형태의 조직으로 인하여 균열이 비드에 비해 약한 비드 경계면을 지날 때 길게 늘어선 조직의 경계면을 따라 급작스런 진전이 일어난 것으로 생각된다.

4.3 파면 관찰

이러한 균열 점프 현상을 발생시키는 파괴 양상을 좀 더 명확하게 관찰하기 위하여 파괴저항 시험 후 파단된 시험편에 대하여 파단면을 관찰

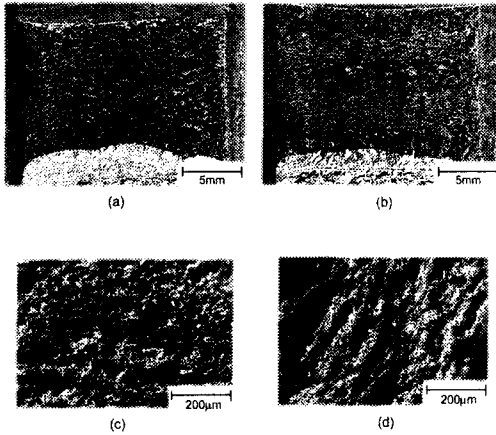


Fig. 12 Comparison of fractography for different crack plane orientation at same preheat temperature 121.1°C(250°F), (a) L-C crack plane orientation, (b) L-R crack plane orientation, (c) ductile fracture, $\times 100$ (d) fracture surface at crack jump, $\times 100$

하였다.

예열 온도가 121.1°C(250°F)인 경우인 시험편에 대하여 파면을 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12(a)에서 볼 수 있듯이 L-C 방향의 파괴 저항 시험을 수행한 시험편의 경우에는 균열 진전 방향과 평행한 방향으로 서로 다른 파괴 양상을 보이는 부분이 일정한 간격으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 용접 진행 방향이 균열 진전 방향과 동일하므로 용접 비드와 비드 사이에 불균질한 부분이 존재하더라도 균열의 진전에 따른 조직의 변화가 없으므로 균열의 점프 현상을 발생시키지 않은 것으로 보인다.

이에 비하여 Fig. 12(b)에서 볼 수 있듯이 L-R 방향의 파괴저항 시험을 수행한 시험편의 경우에는 균열 진전 방향과 수직인 방향으로 서로 다른 파괴 양상을 보이는 부분이 일정한 간격으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 균열 진전면이 용접 비드를 통과할 때와 용접 비드와 비드 사이를 통과할 때를 나타내는 연성 파면과 취성 파면이 규칙적으로 나타났다. 다층 용접으로 인해 생성된 용접 비드와 비드 사이의 불균질한 부분으로 균열이 진전할 때, 취성 파괴로 인한 균열 점프 현상이 발생된 것으로 생각된다.

이러한 파면 양상을 좀 더 세밀하게 관찰하기 위하여 Fig. 12(b)에 표시한 C와 D 부분을 100배 확대하여 관찰한 사진을 Fig. 12(c), (d)에 나타내었다. 그림 (c)에서 보이는 바와 같이 균열이 비드 부분을 통과할 때에는 전형적인 연성 파면의 형태를 나타내고 있다. 하지만 균열이 비드 경계면을 통과하는 그림 (d)의 경우에는 불안정한 파면의 양상을 보이고 있다. 앞 절의 조직 관찰 결과에서 보이는 바와 같이 균열이 비드 경계면을 통과할 때 불균질하고 약한 부분을 따라 급작스럽게 진전되면서 균열 점프 현상을 발생시키는 것으로 생각된다.

4.4 분석 결과 고찰

이상의 결과로부터 두께가 두꺼운 배관 다층 용접부의 파괴저항 시험 시 균열 진전 방향과 용접 진행 방향을 고려한 평가가 동시에 수행되어야 할 것이다. 용접 진행 방향과 균열 진전 방향이 수직인 경우 용접 비드와 비드 사이의 다층 용접으로 인한 불균질성으로 인하여 급격한 균열 진전이 발생하고 이러한 균열 점프는 재료의 균열 진전에 대한 저항성이 없다는 것을 의미하는 것이므로 배관 계통 설비의 설계 시 반드시 고려되어야 할 것이다.

이러한 불균질성을 제거하기 위해서는 적절한 용접 조건의 선택과 용접의 신뢰도 향상을 위한 연구가 우선되어야 할 것이다. 또한 용접의 신뢰성을 확인하고 배관 계통 설비의 설계 안전성 평가를 위해 다층 용접부의 균열 진전 방향에 따른 파괴저항 시험을 반드시 수행하여야 할 것이다.

특히 배관 계통 용접부에 원주 방향 균열이 성장할 때 초기의 균열(표면 균열) 성장은 용접 진행 방향과 수직인 방향으로 진행되므로 초기의 급격한 균열 성장으로 배관의 양단 순간 파단의 원인이 될 수도 있을 것이다. 또한 원자력 발전소의 배관 계통 설계에 LBB 개념을 적용할 때에도 용접부의 경우에는 초기의 급격한 반경 방향 균열 성장을 고려한 설계 기준을 마련해야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 배관 다층 용접부에서의 용접 진행 방향에 따른 균열 진전 방향을 고려한 파괴

저항 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다층 용접부에서 용접 진행 방향과 수직인 방향으로 균열이 진전할 경우 용접 비드와 비드 사이의 불균질한 부분의 영향으로 균열 점프 현상이 발생하였다.

(2) 배관 용접 시 예열 온도의 변화가 배관 재료의 파괴저항 곡선에 미치는 영향은 용접 진행 방향에 대한 균열 진전 방향과 관계없이 크지 않았다.

(3) 파괴저항 시험 후 파단 시험편에 대한 경도 시험, 조직 관찰, 파단면 관찰 결과 다층 용접으로 인한 용접 비드 사이의 불균질한 부분이 규칙적으로 나타나며, 이 부분의 취성 파괴로 인해 급격한 균열 진전이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 배관 계통의 설계 시 용접부에 대하여 원주 방향 균열 성장뿐만 아니라 초기의 반경 방향 균열 성장을 고려한 설계가 이루어져야 하며 균열 점프를 발생시키는 불균질성을 제거하기 위한 용접의 신뢰도 향상을 위한 연구가 수행되어야 한다.

후 기

본 논문은 한국과학기술원 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) U. S. NRC Piping Review Commission, 1983, "Evaluation of Potential for Pipe Break," *Report of the U. S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee*, Nureg-1061, Vol. 3.

(2) 정호신, 1991, "원자력발전기와 압력용기의 안전 규제 및 용접에 관한 제작기준에 대하여," *대한용접학회지*, 제9권, 제2호, pp. 1~10.

(3) 정세희, 1995, "고온기기의 재질 경년열화와 수명예측," *대한용접학회지*, 제13권, 제2호, pp. 1~11.

(4) 홍준화, 이봉상, 오종명, 1993, "영광 3/4호기

1차계통 배관 소재의 파괴저항(J-R) 특성," 제1회 배관건전성 평가기술 Workshop 논문집, 한국원자력안전기술원, pp. 41~52.

(5) 석창성, 최용식, 김영진, 장윤석, 김종욱, 1994, "영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(I) - 정지냉각계통-," *대한기계학회논문집*, 제18권, 제5호, pp. 1106~1116.

(6) 김영진, 석창성, 김종욱, 장윤석, 1995, "영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(II) - 안전주입계통-," *대한기계학회논문집*, 제19권, 제6호, pp. 1451~1459.

(7) 김영진, 석창성, 장윤석, 김종욱, 1995, "영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(III)," *대한기계학회논문집*, 제19권, 제6호, pp. 1460~1468.

(8) 석창성, 강병구, 김수용, 박재실, 윤병곤, 1999, "울진 원자력 발전소 3, 4호기 1차계통 배관소재의 파괴저항특성 평가," *한국산업안전학회지*, 제14권, 제1호, pp. 25~32.

(9) 석창성, 강병구, 1999, "SA508 Cl.1a 탄소강 배관소재의 파괴저항특성 평가," *대한기계학회논문집 A권*, 제23권, 제7호, pp. 1147~1154.

(10) Siewert, T. A., Trevisan, R. E and Purtscher, P. T., 1987, "The Effect of Electrode Weave Procedure on HY-80 GMA Welds," *Welding Journal*, 67(7), pp. 203s~209s.

(11) Allen, D. J., Chew, B and Harris, P., 1982, "The Formation of Chevron Cracks in Submerged Arc Weld Metal," *Welding Journal*, 62(7), pp. 212s~221s.

(12) "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness," *ASTM E813-89*, 1995, pp. 646~660.

(13) "Standard Test Method for Determining J-R Curves," *ASTM E1152-87*, pp. 763~773.

(14) "Standard Test method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness," *ASTM E1737-96*, pp. 67~90.

(15) Nishimura, A., Inoue, N. and Muroga, T., 1998, "Fracture Toughness of Low Activation Ferritic Steel (JLF-1) Weld Joint at Room Temperature," *Journal of Nuclear Materials*, 258-263, pp. 1242~1247.