Type 316 스테인레스 강 용접부의 크리프 강도에 미치는 탄소 함량의 영향

Effect of Carbon Content on Creep Strength of Type 316 Stainless Steel Weldment

윤 영철*, 백 광기, 윤 중근

현대중공업(주) 산업기술연구소, 울산시 동구 전하동 1

1. 서 론

Type 316 스테인레스 강은 우수한 고온 강도, 내식성으로 보일러, 석유 정제설비 등과 같은 각종 플랜트 설비에 널리 사용되고 있다. 구조물의 제작을 위해 필수적으로 적용되는 용접에 있어서는 작업성과 더불어 사용 목적에 맞는 용접재료의 선택이 무엇보다 중요하다. 오스테나이트계 스테인레스 강의 용접재료로는 모재와 유사한 화학성분을 갖거나 용접시 소멸되는 원소를 보완하기 위한 고합금 조성의 용접재료 적용이 일반적이다.

고온에서 사용되는 구조물에서는 크리프 강도(creep strength)가 안정성을 평가하는 중요한 척도이다. ASME Sec. II part D에서는 일부 재료에 대한 고온에서의 허용 응력은 탄소 함량이 0.04 wt.% 이상인 경우에 유효함을 규정하고 있다. 그러나 오스테나이트계 스테인레스 강의 용접재료에 대한 선정기준이 모호하여 종종 논쟁이 발생되고 있어 이에 대한 것을 정립할 필요가 있다. 특히 Type 316 스테인레스강의 상용 Flux Cored Arc(FCA) 용접재료로 사용되는 E316T와 E316LT의 탄소 함량이 ASME 규제치인 0.04 wt.%를 기준으로 각각 상하의 값을 갖기 때문에 오스테나이트계 스테인레스 강에서 용접부의 탄소 함량 차이에 따른 크리프 강도의 비교 평가가 필요하게 되었다.

따라서 본고에서는 316 스테인레스 강을 모재로 선정하여 탄소 함량이 다른 E316T 및 E316LT를 용접재료에 대한 용접부의 크리프 파단 강도를 평가함으로써 316 스테인레스 강의 용접재료 선정기준을 설정하고자 하였다. 또한 실험결과를 분석하여 316 스테인레스 강 용접부의 크리프 파단 기구를 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

크리프 시험을 위한 용접부는 맞대기 개선으로 Flux Cored Arc (FCA) 용접 방법으로 제작되었으며 이때의 용접 조건은 전류 180-210A, 전압 21-25V, 입열량 11.0-12.3kJ/cm 이었다. 모재는 12mm 두께의 316-Ti 스테인레스 강이며 용접재료는 탄소 함량이 다른 E316T와 E316LT를 용접 재료로 각각 사용하였다. 용착금속에 대한 화학성분 분석 결과, E316T (0.069%C)에 비해 E316LT (0.038%C)가 탄소 함량이 다소 낮다는 점 이외에는 상호간 큰 차이가 없었다. 따라서 크리프 파단 강도에 미치는 여타 화학성분의 영향은 무시할 수 있으며 주로 탄소 함량 차이에 의한 효과를 확인할 수 있을 것으로 예상된다.

크리프 시편은 용접부에 수직(이하 T/W) 및 수평 방향(이하 A/W)으로 채취하였으며, 조직 관찰 및 경도 시험을 위한 macro 시편을 얻었다. 크리프 시험에 사용한 시험기는 최대 하중이 1,000kg이며 6.7:1의 lever rule을 갖는 일정 하중형이다. 고온 가열을 위해 3 zone 제어가 가능한 수직 전기저항로를 사용하였다. 크리프 시험은 대상 제품의 설계 온도와 목표 파단 시간을 100hr 또는 1000hr를 기준으로 하여 결정하여 온도를 866 - 1004K 범위에서 가해준 하중은 12 - 25ksi 범위에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

각 용접부 미세조직 관찰 결과, 두가지 용착금속 모두 오스테나이트 기지에 다량의 δ-페라이트가 생성되었으며 양자간 특이한 형상적 차이는 거의 없었다. E316LT와 E316T 용접부의 경도 분포는 E316LT 용착금속의 경도가 전반적으로 E316T 용착금속보다 낮았다. 이는 용착금속의 탄소 함량과 관계가 있는 것으로 판단되며 이로부터 상온 강도가 E316LT 용접부에 비해 E316T의 경우가 다소 높을 것으로 추정할 수 있다.

두가지 용접부의 크리프 강도를 비교 평가함에 있어 ASME 규격에서 적용하고 있는 Larson-Miller parameter(이하 LMP)를 사용하여 크리프 시험 결과를 평가하였다. 그림 1에 E316LT 및 E316T 용접부의 T/W와 A/W 시편에 대한 크리프 시험 결과를 나타내었다. 크리프 강도는 E316LT 용접부가 E316T 용접부에 비해 높은 것으로 평가되었으며, 두가지 모두 T/W와 A/W의 차이는 없는 것으로 나타났다.

크리프 파단된 E316LT 및 E316T 용접부에 대한 주사전자현미경(SEM) 파면 관찰 결과를 그림 2에 나타내었다. 모든 시편의 파면에서 용착금속에서 전형적으로 관찰되는 응고 조직인 dendrite 형상이 나타났으며 이로부터 크리프 파단 양상이 inter-dendritic mode임을 확인할 수 있다.

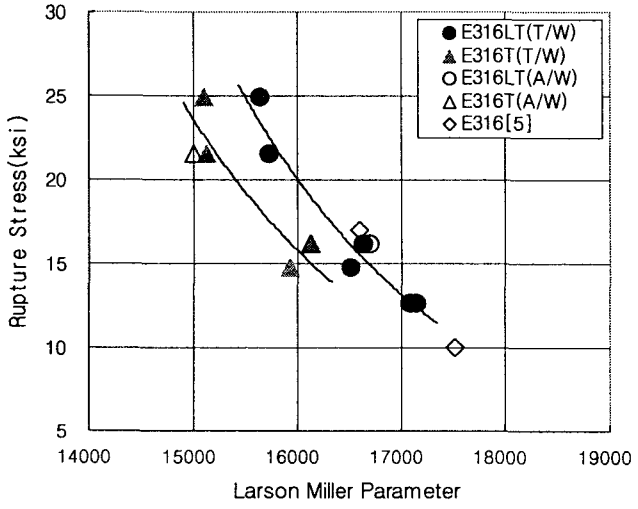
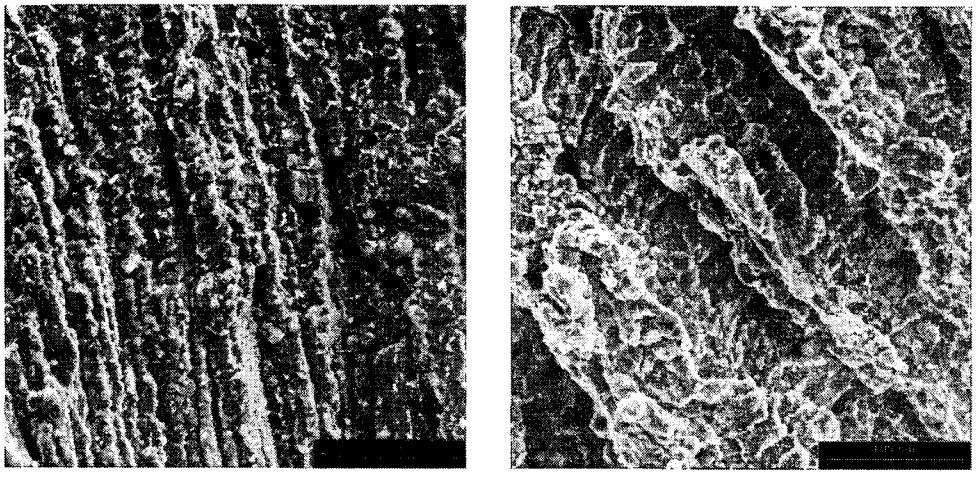


그림 1. 316Ti 스테인레스 강 FCA 용접부의 크리프 시험 결과



(a) E316LT, T/W (b) E316T, T/W

그림 2. 316Ti 스테인레스 강 FCA 용접부의 크리프 파면 관찰 결과(X500)

용접부 파단면을 관찰한 결과에서도 E316LT 및 E316T 용착금속에서의 파단 양상이 inter-dendritic mode임을 확인할 수 있었으며 파면의 직하부에서 관찰되는 작은 균열의 형상으로부터 inter-dendritic mode로 생성된 균열이 서로 연결, 합체되어 최종 파단이 발생함을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합하여 고찰하면, 크리프 파단 양상이 inter-dendritic mode인 점으로부터 크리프 손상 기구가 용접부의 오스테나이트와 페라이트(또는 σ상) 계면에 석출된 탄화물에서 생성된 crack이 성장, 합체되어 최종 파단을 유발함을 알 수 있다. 이러한 거동은 크리프 시험의 온도 및 시간 범위가 $M_{23}C_6$ 탄화물이 계면에서 생성되는 영역이며, 입계에서 생성된 탄화물이 크리프 손상에 직접적인 영향을 준 것으로 판단된다. 따라서 탄소 함량이 높은 E316T 용접부가 E316LT에 비해 크리프 시험중 계면에서 석출되는 탄화물이 조기에 다량 생성되며, 이러한 탄화물이 균열의 생성처로 작용하여 크리프 강도를 저하시키는 것으로 판단된다.

4. 결론

Type 316 스테인레스 강의 용접시 탄소 함량이 다른 E316LT와 E316T를 용접재료로 적용한 FCA 용접부에 대한 크리프 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 크리프 파단 강도는 E316T 용접부에 비해 탄소 함량이 낮은 E316LT 용접부가 오히려 높았다.
2) 파단은 용접부의 용착금속에서 일어났으며, 파단 양상은 inter-dendritic mode이었다. 이와 같은 양상은 용착금속의 오스테나이트와 페라이트 계면에 석출되는 탄화물이 크리프 분위기에서 균열의 생성처로 작용하기 때문이다.