

원전 배관 저합금강재의 용접열영향부에 대한 물성 연구
Mechanical Property of Heat Affected Zone in Low Alloy Steel Pipe Weld

오영진, 김지현¹⁾, 황일순
서울대학교
서울시 관악구 신림동 산 56-1

박윤원
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

저합금강 배관에 파단전누설(LBB) 설계 개념을 적용하기 위한 연구는 지금까지 대부분이 모재 부나 용접부에 국한되어온 반면, 용접에 의한 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)에 대한 연구는 상대적으로 등한시되어 왔다. 열영향부는 용접시 모재에 가해진 열에 의한 온도 이력에 따라 재결정화(Recrystallization)후에 결정립의 조대화(Grain Coarsening), 탄화물이나 황화물 등이 결정립계(Grain Boundary)에 응리(Segregation)되거나 불순물들이 석출(Precipitation)되는 과정을 통하여 기계적 성질을 더욱 저하시키기도 한다. 이와 관련하여, 본 연구에서는, SA106Gr.C 원전 배관재에서 나타나는 열영향부에 대하여, 열 이력과 미세 조직의 분포를 조사하였다. 아울러 각 영역의 기계적 물성을 측정하였고 이를 미세조직과 관련하여 설명하였다. 본 연구를 토대로, 용접부/열영향부의 물성 특이성이 관측되었으며, LBB충족 여유도에 대한 영향의 연구가 제시되었다.

Abstract

Most of previous elastic-plastic fracture studies for LBB assessment of low alloy steel piping have been focused on base metals and weld metals. In contract, the heat affected zone of welded pipe has not been studied in detail primarily because the size of heat affected zone in welded pipe is too small to make specimens for mechanical properties measurement. When structural members are joined by welding, the base metal is heated to its melting point and then cooled rapidly. As a result of this very severe thermal cycle, mechanical properties in the heat affected zone can be degraded by grain coarsening, the precipitation and the segregation of trace impurities. In this study, a thermal and microstructural analysis is performed, and mechanical properties are measured for the weld heat affected zone of SA106Gr.C low alloyed piping steel.

1) 현주소 : 삼창기업주식회사, 경기도 안양시 동안구 관양동 889-3

1. 서론

파단전누설개념(Leak Before Break)이란 배관이 파단에 이르기 전에 발생하는 누설을 감지함으로써 배관에 발생된 균열을 미리 발견할 수 있고, 이에 대한 적절한 조치를 취함으로써 양단순간파단과 같은 극한적인 상황을 사전에 방지할 수 있다는 개념이다.[1] 이와 같은 파단전누설 설계 개념 적용을 위한 동적변형시효를 포함한 전반적인 재료 물성치의 연구는 대부분이 모재부나 용접부에 집중되어 왔으며, 용접에 의한 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)에 대한 연구는 상대적으로 부진하였다. 이 부위는 용접시의 여러 단계의 절차에서 모재에 가해진 열부하에 의한 온도 이력 및 분포에 따라 재결정화 단계에서 결정립이 조대해지거나, 탄화물이나 황화물 등이 결정립계에 응리되거나 불순물들이 석출 되는 과정을 통하여 재료의 기계적 성질을 더욱 저하시키기도 한다. 따라서, 배관 구조의 건전성 및 파단전누설 설계 개념의 적용에 대한 여유도 평가의 신뢰성을 향상시키기 위해서는, 모재와 용접재뿐 아니라 열영향부에서의 인장 및 파괴 강도, 등의 기계적 물성치에 대한 충분한 평가가 선행되어야 한다. 이와 관련하여 최근에는, 실제 구조물에서의 열영향부뿐만 아니라, 용접시 재료가 겪게 되는 열이력 및 분포를 모사하는 재현열처리를 통한 모사 열영향부 시편을 이용한 몇몇 연구들[2-5]이 수행되었으며, 이에 따르면, 열영향부에서의 물성치의 저하는 아주 심각한 정도임을 밝히고 있어서, 이에 대한 면밀한 연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 원전 배관용 저합금강 SA106Gr.C의 원주 용접 열영향부에서의 역학적 물성을 미세조직의 함수로 측정하고, 열영향부의 물성 변화 경향 및 기구를 연구하였다.

2. 용접 열영향부

일반적인 구조용 강재를 용접에 의하여 접합시킬 때, 모재는 녹는점 근처까지 급격히 가열되었다가 다시 빠르게 냉각된다. 이 같이 형성된 열이력은 용접재에 근접한 모재의 미세 구조와 기계적 성질을 국부적으로 크게 바꾸게 되는데 이를 열영향부(HAZ) 라고 정의한다.

단층용접의 경우, 온도 상승기에 오스테나이트의 크기가 최고온도에 의해 결정된다. 온도가 높은 경우, 오스테나이트 결정립의 크기가 커지며, 온도가 낮을 경우는 재결정화 후 결정립 성장 시간의 부족으로 인해 작은 결정립을 갖게 된다. 온도가 최고점에 도달한 후 냉각되면서 세분화된 열영향부를 그림1에 나타내었다.

결정립(grain) 조대화 영역은 최고온도가 1100 °C이상 올라간 영역으로 큰 오스테나이트 결정립을 갖는다. 상대적으로 빠른 냉각속도로 인해, 합금 원소에 따라,

마르텐사이트와 베이나이트가 형성되며, 경화능이 작은 합금 원소들 (Nb 강 등)에서는 상간석출물이 발생하는 것으로 알려져 있고, 이 상의 존재는 인성을 떨어뜨리기 쉽다. 결정립 미세화 영역은 최대 온도가 1100 °C 미만(solubility limit 이하)인 영역으로 가열 및 유지기 동안에 형성된 오스테나이트들이 적절히 성장할 시간을 갖지 못했기 때문에, 입자의 크기가 매우 작고, 탄화물들은 충분히 용해되지 못했다. 용접 입열량이나 판의 두께 등의 영향을 받지만, 일반적으로 미세한 입자의 페라이트-펄라이트 구조를 갖게 된다. 부분적 변태 영역은 최대온도가 723-900 °C가 되는 구간으로, 낮은 오스테나이징 온도 때문에, 모재의 펄라이트가 부분적으로 빠르게 오스테나이트가 되어 탄소와 망간이 농축된다. 따라서, 페라이트 변태는 냉각속도에 따라, 펄라이트, 상부 베이나이트, 템퍼드 마르텐사이트 또는 고탄소 마르텐사이트 등의 다양한 구조가 나타날 수 있다. 탄소 구상화 영역은 대략 최고온도 700-723 °C의 구간에서 나타난다. 빠른 가열 이력동안에 상대적으로 오스테나이트 변태량이 상당히 적어져서, 판상 펄라이트 내부의 세멘타이트가 상당량 구상화(Spherodization)되는 특징을 갖게 된다. 이 같이 낮은 온도에서 탄소의 확산 채널은 입계에 한정되기 때문에, 구상화되는 세멘타이트 입자는 입계나 삼중입계에서 응집작용을 일으킨다.[6]

다층용접열영향부는 더 복잡한 구조를 갖게 되는데, 일반적으로, 입자 조대화 영역이 세부 영역으로 구분되어 입자 조대화 후 재결정이 일어나는 영역과 부분적 변태를 겪는 영역, 구상화를 겪는 영역으로 나누어지고, 이는 재결정 영역도 마찬가지로 된다.(그림2) 이런 영역에 대해서는 용접 열 이력을 모사하는 모사 열처리를 통해 어느 정도의 물성 재현이 가능하다. 저탄소강의 경우, 물성 재현 실험을 통해, 입자 조대화 후 부분적 변태를 겪게되는 InterCritical reheated Coarse Grain HAZ (IC CGHAZ)에서의 취화가 보고되었다.[7]

3. 실험방법

시험에 사용된 모든 재료는 한국 중공업에서 SA106Gr.C 배관 모재를 내경 305mm, 외경 335mm, 두께 30mm로 가공하여, 용접 절차서에 의거하여, 그림3 과 같이 Half-K 홈을 사용한 Gas-Tungsten Arc Welding (GTAW)을 시행하였다. 현재 원전 주증기 배관의 용접에는 V 홈을 사용한 용접이 시행되고 있지만, 이러한 V형의 홈은 용접 용융선 주위에서 서로 비슷한 미세조직 및 물성치를 가질 것으로 기대되는 영역들이 배관 벽면에 경사지게 되어 기계적 특성 측정을 위한 시험편 제작에는 상당한 어려움이 따른다. 따라서, 이러한 어려움을 제거하기 위해

본 연구에서는 그림3 과 같이 용접 용융선 주위의 비교적 직선적인 미세조직 및 특성 형성이 가능한 Half-K 홈을 사용한 배관 용접을 수행하였으며, 용접후의 잔류응력 제거를 위해 실제 배관에서 행해지고 있는, 용접후 열처리(PWHT)와 동일하게, $610^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 두 시간 동안의 열처리를 박스형 로를 이용해 수행하였다.

3.1. 인장시험

용접후 열처리를 시행하지 않은 모재, 용접후 열처리를 시행한 모재, 용접 열영향부, 및 용접부의 시편을 각각 시험하였으며, 시험편에 대한 도면은 그림4 에 나타내었다. 용접 열영향부 시편은 reduced-section내에 배관 용접재, 열영향부 및 모재를 모두 포함하고 있으며, 미세조직 검사 및 경도 측정으로부터 기계적 특성이 가장 취약할 것으로 판단되는 열영향부(용접 용융선으로부터 모재 쪽으로 4~5mm 떨어진 영역)가 시편의 중앙에 위치하도록 시편을 제작하였다. 특히 용접재의 경우 기존의 배관 용접재의 인장시험은 시편 전체를 순수한 용접재만을 사용하기 위해 시편의 방향이 모두 배관의 원주방향으로 이루어진 반면, 본 실험에서는 인장시편 내에 용접재의 부분만을 reduced section 내에 위치하게 함으로써 길이 방향의 인장시편을 제작하였다. 인장시험은 ASTM E8-93의 절차에 의거하였으며, 인장 속도는 모두 동적 하중속도인 $6.95 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 로 통일하였다.

3.2. 미세 경도 및 충격시험

용융선으로부터 모재 쪽으로 일정한 간격으로 미세경도를 측정하여, 용접 용융선으로부터의 거리에 따른 변화를 관찰하였다. 실험은 Vickers 미세경도 방법이 사용되었으며, 용접후 열처리가 수행된 시편과 용접후 열처리가 되지 않은 시편 모두를 시험하였다. 각각의 경우에 대하여, 배관의 두께 방향으로, 배관의 외벽 부분, 중간부분, 배관의 내벽 부분에 대해 모두 측정하였다. 이는 용접 절차에 따라, 용접의 첫 번째 선이 지나가는 내벽과, 많은 수의 용접이 중첩되는 내벽 부분, 마지막 용접선이 지나가는 외벽 부분이 각각 다른 특징을 나타낼 가능성을 고려했기 때문이다. 미세경도 시험시 하중 량과 하중시간은 각각 200g과 15초로 하였다.

열영향부에서의 충격시험은 Half-K Groove의 평행한 부분을 이용하여, 용접 용융선으로부터의 거리에 따른 충격인성의 변화를 측정하였으며, 시편 채취의 개략도를 그림5 에 도시하였다. 그림에서 보인 바와 같이, 균열은 용접을 따른 원주방향으로 진전하게 하였으며, ASTM E-23에 의거한 표준 충격시편을 제작하였다. 충격시험은 모두 상온에서 수행되었으며, 미세조직과 미소 경도 시험결과, 파

과 및 충격 인성치가 떨어질 가능성이 있을 것으로 예측되는 곳을 정하여 그 부분에서는 더 많은 개수의 시험편으로 시험을 수행하였다.

3.3 미세조직 관찰 및 용접열 해석

미소 경도 시험과 충격인성 시험의 결과에 따라, 용접재와 모재 그리고, 열영향부를 세 부분으로 분류하여, 미세조직을 관찰하였다. 먼저 충격 시험편의 노치 위치를 정하기 위해, 시험편 가공 중간 단계에 표면을 폴리싱하고, 2% Nital 용액에서 1분간 에칭 한 후 미소 경도 시험을 하였고, 미소 경도 시험 후 경도 indentation을 중심으로, 광학 현미경과 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 미세조직을 관찰하였다.

용접으로 인해 열영향부가 겪게 되는 온도의 이력은 아래의 식을 이용한 해석을 통해 예측하였다.[2],[9]

$$\frac{1}{T_m - T_0} = \frac{\rho C (r^2 - R^2)}{2\eta E} + \frac{1}{T_f - T_0}$$

여기서, T_0 는 예열온도, e 는 자연대수, ρ 는 비중, C 는 비열, r 은 용융금속의 중심으로부터의 거리, R 은 용융금속의 반경, η 은 열효율, E 는 열입열량, 그리고 T_f 는 용융점이고, 열이력 최고 온도는 T_m 이다. 이를 통해 구해진 거리에 따른 최고 온도 값을 바탕으로, 각 위치에서의 온도를 시간의 함수로 아래와 같이 구하였다.

$$T - T_0 = \theta_1 \frac{\Delta t}{t} \exp\left(-\frac{\Delta t}{e t} \left(\frac{\theta_1}{T_p - T_0}\right)\right)$$

$$\text{여기서, } \Delta t = \frac{q/v}{2\pi k \theta_1}, \quad \frac{1}{\theta_1} = \left(\frac{1}{773 - T_0} - \frac{1}{1073 - T_0}\right)$$

T_0 는 층간온도, Δt 는 800 °C - 500 °C 냉각시간, e 는 자연대수, T_p 는 열 cycle의 최고온도, q 는 heat flux, v 는 열원의 속도, k 는 열전도도를 나타낸다. 이 결과를 이용하여, 열영향부 미세조직의 형성 과정을 예측하였다.

3.4 파괴시험

파괴시험은 ASTM E813-89 및 ASTM E1152-87에 의거하였으며, 준정적 하중 속도의 하중선 변위 속도로 상온 상태에서 시험하였다. 시험편 두께는 1인치의 1T-CT 표준 시험편을 이용하였으며, 시험편의 모양 및 채취 개략도를 그림6에 도시하였다. 파괴시험시 초기 균열 길이는 피로 예비 균열을 포함하여 1.1인치로서 a_0/W 값을 0.55로 통일하였다. 피로예비균열 진전 후, 균열진전의 힘 방지 및 평면 변형 조건을 충분히 만족시키기 위해 시험편 양측면 홈(side groove)을 각각 시험편두께의 10%의 깊이로 가공한 후에 파괴시험을 수행하였다. 파괴시험시 균열의

길이 측정은 제하 컴플라이언스법(Unloading Compliance)을 이용하였으며, 이는 시험기에 부착된 Traveling Microscope를 이용한 균열 길이의 관찰을 통해, 비교 검사하였으며, 이 결과 제하 컴플라이언스법이 균열길이를 잘 측정하고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 실험결과

4.1. 인장시험

그림7 은 $6.95 \times 10^{-2}/s$ 의 일정한 변형률 속도 조건에서, 다양한 온도 조건에 따른 실험 결과를 보여 주고 있다. 용접재와 모재, 열영향부를 모두 포함한 시편은 세 온도구간 모두에서 용접재 영역에서 necking 및 파단이 일어났다. 용접재, 열영향부 및 모재를 모두 포함하는 용접부위 시편을 통한 인장 곡선은 첫 번째 항복점 거동 후 다시 두 번째 거친 항복 거동을 보임을 알 수 있다. 첫 번째 항복의 하부 항복점은 모재의 값과 일치하고 있으며, 두 번째 항복은 용접재의 항복과 일치하고 있는 것으로 보아, 이는 서로 다른 물성을 가진 두 가지 재료의 복합재로서의 거동 특성을 보여주는 것으로 판단된다. 세 가지 온도 구간 모두에서, 용접재, 모재, 열영향부를 포함한 시편의 인장강도가, 용접재의 인장강도와 거의 일치하는 것을 볼 수 있는데, 이는 necking과 파단이 모두 용접재에서 일어났다는 사실에 비추어 일치되는 현상이다. 따라서 상대적으로 낮은 인장강도를 갖는 용접재의 특성에 기인함을 파악하였다.

모재와 용접재에 비하여 용접재, 모재, 열영향부를 포함한 시편에서 상대적으로 더 낮은 연신률을 보이고 있다. 이는 모재의 인장강도가 용접재의 인장강도보다 낮기 때문에, 용접재와 모재를 모두 포함하고 있는 시편에서의 모재 부분은 미처 인장강도에 해당하는 응력이 가해지기 전에 용접재에서 먼저 파단이 일어나게 되므로, 모재는 용접재의 인장강도에 해당하는 만큼만 연신이 일어나게 되며, 이 결과가 열영향부의 낮은 연신률을 보여주는 것은 아님을 알 수 있다. 이런 사실로 미루어, 국부적으로 존재하는 열영향부의 기계적 물성치를, 전체 재료를 통한 거시적 인장 실험 결과를 통해 파악하는 데는 한계가 있음을 알 수 있다.

4.2. 미소 경도 및 충격시험

미소 경도 시험 결과는 그림8 에서 보이는 바와 같이, 용접재가 모재에 비하여, 다소 높은 값을 가지며, 열영향부에서는, 용융선 근처에서 특히 높은 경도 값을 보이고 있다. 이는 용융선 근처에서의 빠른 냉각 속도로 인하여, 마르텐사이트, 템

퍼드 마르텐사이트, 또는 베이나이트, 등의 미세조직이 형성된 데 그 원인이 있을 것으로 추측된다. 용접 용융선으로부터 2mm에서 수 mm 떨어진 영역에서는 경도 값이 다소 하락하는 경향이 있는 것으로 보이는데, 이런 이유로, 본 결과를 바탕으로 수행된 충격시험에서는, 용융선 근처와 용융선으로부터 2mm 떨어진 영역에서 좀 더 많은 수의 시험을 수행하였다. 이때 시편의 노치 위치는, 충격시험편에 직접 미소 경도 시험을 수행한 결과에 기초하여 결정하였다. 측정된 미소 경도는 용접부에서 열영향부를 거쳐 모재까지의 일반적인 경도 변화와 거의 흡사한 경향을 보임을 알 수 있다.[6]

그림9 에 용접 용융선으로부터의 거리에 따라 측정된 충격 인성치의 변화를 나타내었다. 결과에서 보듯이, 모재영역에서도 측정치의 편차가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이는 열영향부에서의 결과도 마찬가지이다. 열영향부에서는 용접 용융선 근처와 이로부터 2mm 가량 떨어진 영역에서 더 많은 시험을 수행하였다. 부분적으로 값의 변화가 심하지만, 전체적으로 뚜렷한 물성의 저하를 확신하기에는 다소 어려움이 있다. 그러나, 용접후 열처리(PWHT)가 수행되지 않은 모재와 비교할 때는, 용융선으로부터 2mm 떨어진 영역에서 약간의 물성저하가 있을 가능성을 배제할 수는 없을 것이며, 차후에 모사 열처리 등의 방법을 통한 실험으로 보강되어야 할 것으로 판단된다.

4.3 미세조직 관찰 및 용접 열해석

그림10에 모재, 용접재, 열영향부의 미세조직을 나타내었다. 용접 용융선 근처의 미세조직은 결정립 조대화 영역의 전형적인 모양을 보이고 있음을 알 수 있다. 이 영역은 용접시 1100 °C 이상, 녹는점 근처까지 온도가 올라간 영역이며, 따라서, 결정립계는 1절에 설명된 바와 같은 과정을 통해 조대해 졌다고 판단된다. 결정립 조대화 영역은 결정립 크기로 인해 기계적 물성이 저하되었을 가능성이 있으며, 또한, 다층 용접에 의한 템퍼드 마르텐사이트 취화나, 하부 베이나이트에 의한 취화, 또는 잔존 오스테나이트가 마르텐사이트와 공존하는 MA 복합상 (Martensite-Austenite) 에 의한 취화도 이 영역에서 주로 발생하곤 한다. 그러나, 본 연구에서의, SA106Gr.C 저합금강에서는 이 영역에서의 취화가 뚜렷이 발견되지는 않았으며, 이는 다층용접에 의해 취화 영역의 부피 분율이 작아진 것이 원인일 것으로 생각된다. 용접 용융선으로부터 2mm 떨어진 영역은 펄라이트의 판상 세멘타이트 조직이 구상화되어 있음을 알 수 있다. 이 같은 조직은, 짧은 오스테나이트화 시간과, 낮은 오스테나이트화 온도로 인해, 상대적으로 안정한 페라이트는

거의 오스테나이트가 되지 않고, 펄라이트가 일부 오스테나이트로 변태했다가, 냉각되면서 형성된다. 세멘타이트의 구상화는 일반적으로 재료를 연화시키는 것으로 알려져 있는데, 이는 그림8의 미세경도 시험 결과에서도 잘 드러나고 있다. 그러나 일차적인 실험 결과로 볼 때, 파괴 및 충격인성의 감소는 발견되지 않았다.

열해석 결과는 그림11과 12에 나타나 있으며, 이를 이용하여 다층용접에 의한 용접 열영향부의 모습을 예측할 수 있었다.(그림13) 용접층간 간격은 2.4mm로 가정하였다. 이는 실제 용접부에서 관찰된 층간 간격의 평균을 취한 것이며, 각 열영향부 영역의 크기는 열해석 결과를 이용하였다. 용접 용융선 근처를 기준으로, 마지막 층을 제외했을 때, 결정립 조대화 영역은 단면의 30%를 넘지 않았으며, 또한, 그들 중 절반 이상이 이상영역의 온도를 다시 한번 더 겪게 된다.

4.4. 파괴시험

용접후열처리 모재, 용접후열처리 하지 않은 모재, 용접 용융선으로부터 1mm 이내, 2mm영역, 5mm영역, 모두 다섯 가지 경우에 대하여 시험한 결과를 그림14에 나타내었다. 시험 결과, 용접후 열처리를 수행한 모재가 용접후 열처리하지 않은 재료보다 다소 파괴인성이 떨어지는 것으로 나타났으며, 열영향부는 5mm 영역, 2mm 영역, 1mm이내 영역의 세 군데에서 모두 모재보다는 우수한 인성을 보였다. 그러나 1mm이내 영역 열영향부의 J-R 시험 결과는 데이터 포인트가 상당히 산만하게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 모재부에서는 관찰되지 않는 것으로 미루어 보아, 기계적 물성이 균일하지 않은 부분으로 균열이 전파함으로써 생기는 현상인 것으로 보인다. 이 부분은 다층용접에 의해 열영향 영역의 겹침 현상이 심하게 일어나는 부분일 뿐 아니라, 용접부가 매우 가까이 자리하고 있음으로 인하여, 균열 첨단 근처의 소성 영역이 용접재까지 넓게 자리하고 있으며, 실재의 용접 용융선은 정확한 일직선이 아니기 때문에 균열이 진전하는 동안 일부는 용접재를 통과할 가능성도 크다. 특히, 일부 균열 선단이 초기 진전면에서 이탈하여 분기하는 특성을 보였으며, 이는 추후 보다 세심한 측정이 요구되는 부분으로 판단된다.

4.5. 파면관찰

Charpy 충격시험의 파면으로 볼 때, 용접재와 열영향부(용융선으로부터 1mm 이내)시험이 모재보다 더 큰 shear-lip을 포함하고 있으며, 모재의 취성 파면이 상대적으로 넓었다. J-R 파괴시험의 파면을 주사형 전자현미경(SEM)을 이용하여

관찰하였으며, 이를 그림16에 나타내었다. 용접후 열처리를 수행한 모재와 용접 용융선 5mm 영역에 비하여, 용접 용융선 1mm, 2mm 영역에서 상대적으로 작은 크기의 덩플이 형성되어 있다.

5. 결 론

- 1) SA106Gr.C 주증기 배관의 원주방향 다층 용접 열영향부는 복잡한 미세구조 및 물성으로 구성되어 있으며, 이는 온도이력 및 상변태 분석으로 미세조직 및 물성간의 변천기구(mechanism)를 파악할 수 있다.
- 2) 모재, 용접재, 열영향부를 각각 포함하는 시편에 대한 인장시험 결과 용접재는 낮은 인장강도 및 연신률을 보였다. 모재부/용접부/열영향부를 포함하는 경우 가장 낮은 연신률을 보였으며 용접부에서 파단되었다.
- 3) 열영향부는 미소한 영역에서 발생하므로 불량한 기계적 물성을 포함하는 영역이 열영향부에 포함되어 있다고 하더라도 인장시험을 통해 이를 파악하는 것은 불가능하다는 것을 알 수 있다.
- 4) 모재와 비교했을 때, 용접부는 높은 Charpy 충격인성을 가진다. 용접 열영향부는 모두 세 부분에서 파괴시험이 수행되었는데, 용접 용융선으로부터 1mm 영역은 결정립 조대화로 인한 물성의 저하가 예상되는 영역이었으며, 2mm 영역은 이상영역의 온도이력을 겪는 부분이었으며, 5mm 영역은 과시효(over-aging)에 의해 연화될 수 있는 영역이다. 측정된 세 영역에서 뚜렷한 기계적 물성의 저하는 발견되지 않았다.
- 5) 용접에 의해 모재에 남게 되는 잔류응력의 제거를 위해 행해지는 용접 후 열처리(PWHT)에 의해 모재의 파괴인성이 다소 떨어진다. 열영향부에 대한 제한적 측정결과는 모재보다 우수한 것으로 나타났다. 그러나 국지적 균열 분화 현상이 발견되어 추가적인 연구가 필요함을 파악하였다.
- 6) 다층용접에 의한 열영향부의 형성을 용접 열해석을 통해 예측한 결과, 층간 간격이 좁아짐에 따라 결정립 조대화 영역의 체적 비를 현저히 줄일 수 있으며, 개선된 열처리를 통해 물성저하를 일으키는 영역을 줄일 수 있다고 판단된다.

6. 감 사

본 연구는 한국원자력안전기술원의 지원으로 수행되었다.

< 참고문헌 >

- [1] NUREG-1061, Vol.3, 1984
- [2] 김주학 외, 원자로압력용기강 용접열영향부(HAZ)의 사피시험편 노치 위치설정에 대하여, 한국원자력학회 '96 추계학술발표회 논문집, 1996, pp. 557-562
- [3] 김주학 외, 열 Cycle 재현법을 이용한 원자로압력용기(RPV)강 용접열영향부(HAZ)해석, 한국원자력학회 '97 춘계학술발표회 논문집, 1997, pp. 17-22
- [4] Z. Gao and K. Zhang, Comparison of the Fracture and Fatigue Properties of 16MnR Steel Weld Metal, the HAZ and the Base Metal, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 63, 1997, pp. 559-562.
- [5] Y. Lin, M.G. Akben, and J.T. Bowker, Mechanical and Microstructural Analysis of Multi-pass Welded HAZ, Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Welding Research, 1989, pp. 721-725.
- [6] K. Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths Monographs in Metals, 1983
- [7] C.D. Lundin, et al, Metallurgical Characterization of the HAZ in A516-70 and Evaluation of Fracture Toughness Specimens, WRC Bulletin 403, July 1995
- [8] C.L. Davis, and J.E. King, Effect of Cooling Rate on Intercritically Reheated Microstructure & Toughened in High Strength Low Alloy Steel, Material Science and Technology, Vol.9, 1993, p8
- [9] C.M. Adams, Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding, WRS, 1958, pp. 210-215.

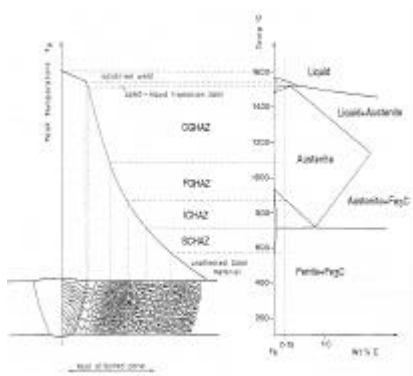


그림 1. 저합금강의 다중 용접에서의 최고도달 온도에 따른 미세 조직의 분포

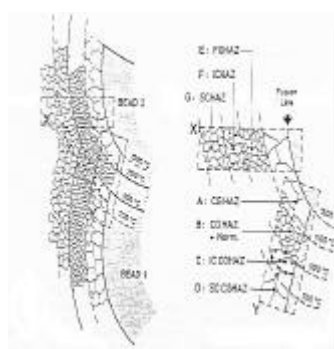


그림 2. 저합금강의 다중 용접에 따른 열영향부의 분류

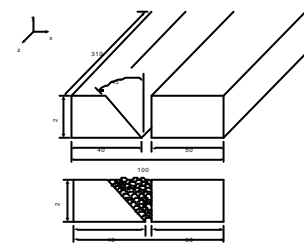


그림 3 Half-K Groove용접

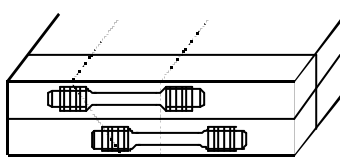


그림 4. 인장시험편 취취 거락도

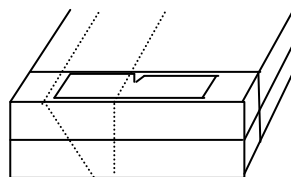


그림 5. Charpy 시험편 취취 거락도

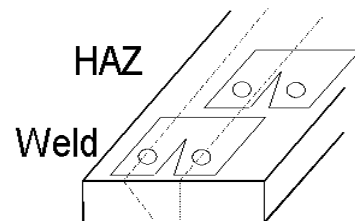
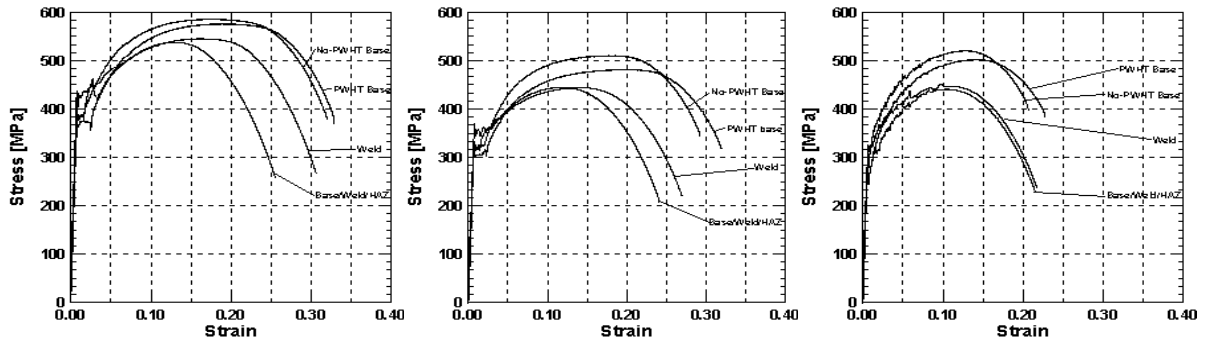


그림 6. CT 시험편 취취 거락도



(a) 상온에서의 인장시험 결과 (b) 177°C에서의 인장시험 결과 (c) 289°C에서의 인장시험 결과

그림 7 SA106Gr.C의 용접재, 모재, 열영향부에서의 온도에 대한 인장 시험 결과

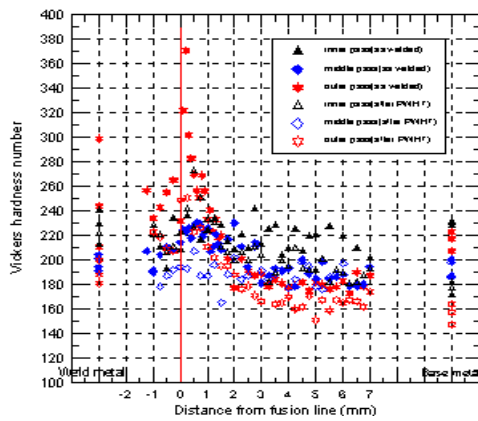


그림 8 SA106Gr.C 배관재의 원주 방향 용접 용융선으로부터의 거리에 따른 미소 경도의 변화

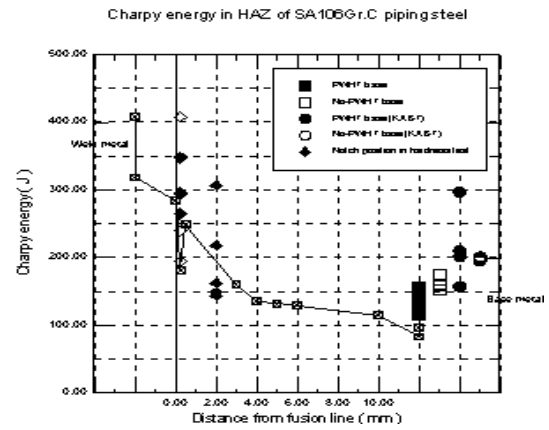
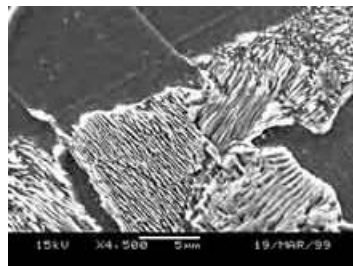
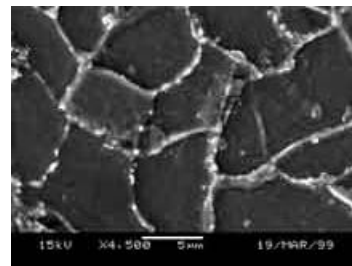


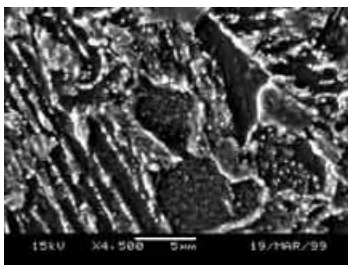
그림 9, SA106Gr.C 원주방향 용접 용융선으로부터의 거리에 따른 Charpy 에너지



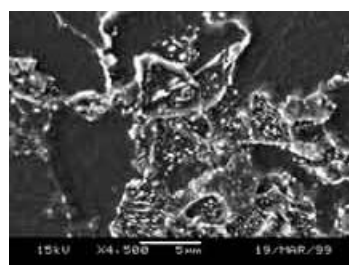
(a) 모재



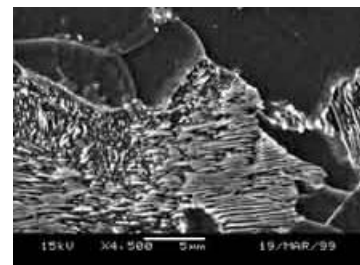
(b) 용접재



(c) 용접 용융선 0.5mm 이내



(d) 용접 용융선으로부터 2mm



(e) 용접 용융선으로부터 5mm

그림 10, SA106Gr.C 모재 용접재 및 열영향부 미세조직 SEM 사진

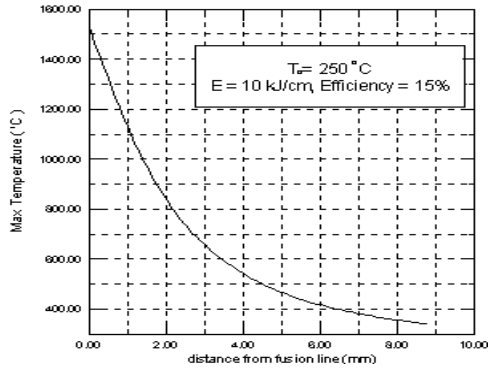


그림 11. 용접 용융선으로부터의 거리에 따른 도달 최고 온도

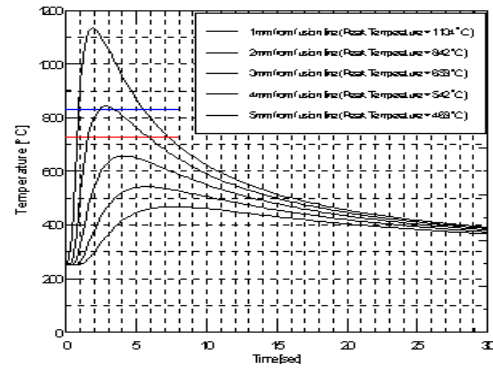


그림 12. 용접 용융선으로부터의 거리에 따른 온도 이력

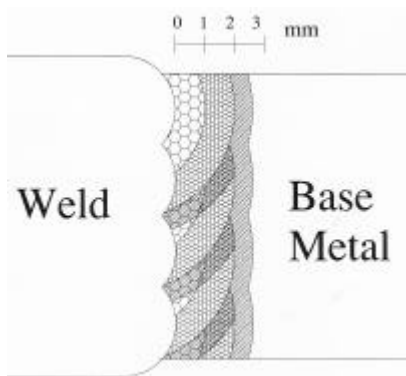


그림 13. SA106Gr.C 배관재의 다중용접 열영향부의 미세조직

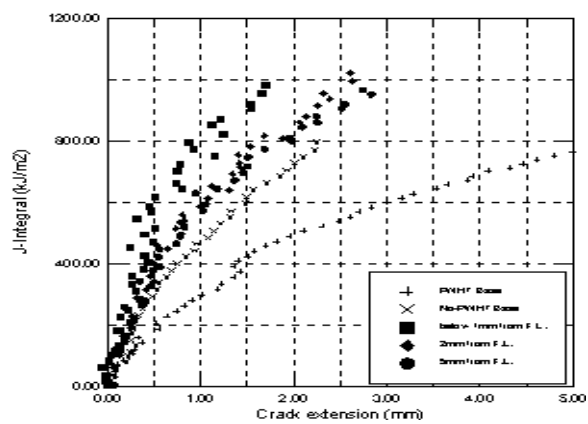
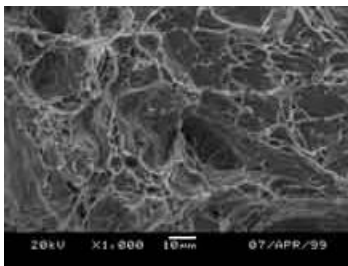
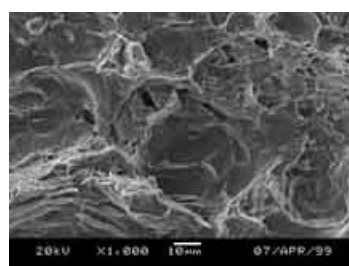


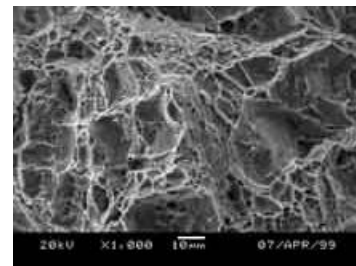
그림 14. SA106Gr.C 모재 및 용접열영향부 J-R 곡선



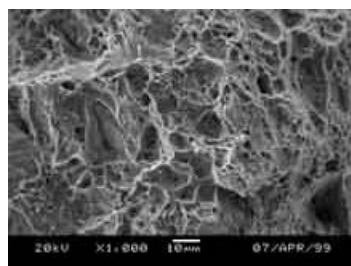
(a) 용접후 열처리 하지 않은 모재



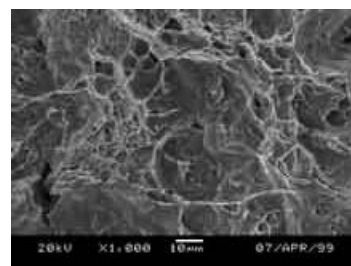
(b) 용접후 열처리 된 모재



(c) 용접 용융선 1mm 이내 영역



(d) 용접 용융선 2mm 영역



(e) 용접 용융선 5mm 영역

그림 15. SA106Gr.C의 J-R 시험 후 모재 및 용접 열영향부 파면