

원자력 주증기 배관소재의 용접 열영향부에 관한 연구

The Study on Weld Heat Affected Zone of Primary Steam Pipe of Nuclear Power Plant

김 동진*, 하 준욱, 김 태완, 김 정태

한국중공업(주) 기술연구원, 경남 창원

1. 서 론

원자력 발전소는 운전도중 발생할 수 있는 모든 사고를 가정하여 가장 심각한 조건하에서도 모든 기기 및 부품이 제 기능을 발휘하고 충분한 건전성을 확보할 수 있도록 설계된다. 주증기의 배관은 운전 중 순간적인 취성파괴에 의한 양단순간파단(Double Ended Guillotine Break : DEGB)를 고려하여 설계되나, 실제 운전조건이 고온이므로 재료가 연성적인 거동을 보일 뿐만 아니라 파단전에 상당한 소성변형이 일어나므로 양단순간파단과 같은 취성적인 거동을 보일 가능성은 매우 희박하다. 따라서 최근에는 배관에 균열이 생성되어 양단순간파단을 일으킬 수 있는 임계길이까지 성장하기 전에 배관내부에서 누출된 유체를 감지하여 배관양단파괴를 방지하는 파단전누설(Leak Before Break : LBB) 개념을 설계기준으로 사용하고 있다^{1, 2)}.

LBB 설계기법을 적용하기 위해서는 일정 기준의 유체가 방출될 정도의 균열이 배관에 존재하더라도 배관의 불안정 파괴가 일어나지 않는다는 것을 파괴역학적으로 입증하여야 한다. 원자력 발전소 주증기 배관재로 사용되는 SA106 Gr. C강으로 제작한 배관계통에 대하여 모재와 용접부에 대해서는 LBB 개념의 적용 타당성을 검토³⁾한 자료는 있으나, 열영향부에 대해서는 보고한 자료는 없다.

용접 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ)는 용접열에 의해 모재에 비하여 조직, 경도 및 기계적성질 등이 현저하게 변화되는 영역으로 용접에 따른 열이력, 용접 최고온도(Peak Temperature : T_p) 및 냉각특성에 밀접한 관계가 있다. 특히 다층 용접부에서는 반복되는 용접에 의해 열영향부는 복잡한 거동을 나타내지만, 실용접부의 열영향부를 평가하기에는 열영향부의 영역이 좁아 물성을 재현성있게 평가하기에는 어려운 점이 많다.

본 연구에서는 주증기배관재인 SA106 Gr. C 강 용접시 용접 열영향부에 대한 온도 측정 결과와 SYSWELD를 이용한 열해석 결과를 비교, 검토하였다. 용접 열영향부를 재현한 열처리를 수행하여 재현 용접부 시편을 제작하여 기계적성질을 조사하였다. 또한 45° Single Bevel Groove를 가공하여 실 용접한 후 용융경계부에 평행하게 Notch를 용접 열영향부에 위치하도록 J-R 시험편을 가공, 파괴인성 시험을 하여 열영향부에 대한 파단전누설 개념의 적용을 검토하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서 사용한 재료는 원자력 주증기 배관재인 SA106 Gr. C 강으로 모재와 용재의 화학조성과 용접조건은 Table 1, 2와 같다. Gas Tungsten Arc Welding(GTAW)법에 의한 용접 열영향부를 재현하기 위하여 두께 25mm 판재에 $\phi 5$ mm의 End Mill로 구멍을 가공하여 R-type 열전대를 설치하여 열이력을 측정하였다. 용접후 610°C에서 2시간 용접후열처리(Post Weld Heat Treatment : PWHT)를 실시하였으며, 용접부에 대하여 미세조직과 미세경도를 조사하였다. 미세경도 측정결과로부터 용접 열영향부를 용융경계선의 인접부, 열영향부, 열영향부와 모재 사이의 천이영역(Transition Zone) 등으로 구분하였다. SYSWELD를 이용한 이론적인 열해석 결과와 실 용접시의 온도측정 결과를 비교하여 다층 용접할 경우 각 위치에서의 용접에 의한 최고온도(T_p)와 열이력 및 냉각시간($\Delta t_{800-500c}$)을 구하여 재현 열처리 조건을 설정하였다. 용접 재현열처리 실험은 고주파 유도가열과 직접 통전가열이 가

능한 Hot Deformation Simulator를 이용하였으며, 재현 열처리후 용접후열처리를 수행한 후 인장 및 충격시험을 실시하였다.

그리고 재현 열처리에 의해 용접 열영향부의 충격, 인장시험편은 제작이 가능하나 LBB 해석을 위한 파괴인성 측정용 J-R 시험편을 제작하는 데는 어려움이 있다. 파괴인성시험시 Notch를 용접금속 및 열영향부 등에 위치하도록 하기 위하여 실 용접을 45° Single Bevel Groove 가공하여 용접한 후 직선 용접부에서 Notch의 위치를 용융경계선에 평행하게 1-CT의 J-R 시험편을 가공하여 열영향부의 각 위치에 대한 파괴인성시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 GTAW 용접후 PWHT 처리한 용접부의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 모재의 조직은 Ferrite와 Pearlite 조직이나 용접금속과 열영향부의 조직은 Tempered Martensite 조직을 나타내었다. (b)는 용접금속과 열영향부의 경계부에서 조대한 결정립을 가지는 열영향부, (c)와 같이 인접부에서는 미세한 결정립을 가지는 열영향부로 구분되며, 이는 용접열에 의하여 용융경계부의 인접한 열영향부에서는 고온 가열에 의해 조대한 결정립을 가지나 용융경계부에서 약간 떨어진 열영향부에서는 미세한 결정립을 가짐을 나타내고 있다. 또한 (d)에서 알 수 있는 바와 같이 HAZ와 모재의 경계부에서는 상변태 온도 이상으로 가열되지 않으므로 조직의 변화는 없으나, 탄화물이 응집되어 있는 조직을 나타내고 있었다.

Fig. 2는 610℃에서 2시간 용접후열처리한 용접부에서 측정한 미소경도 시험결과를 나타내었다. 용융경계부와 모재의 경도는 각각 약 Hv 210, Hv 160 정도이며, 용융경계부에서 약 3.0~4.0mm 떨어진 지점에서 비교적 경도가 낮은 영역이 나타남을 알 수 있다. 이는 모재에 인접한 열영향부에서는 용접후열처리 온도보다는 높으나, 상변태 온도 이하의 온도로 열영향을 받음으로써 변태는 일어나지 않은 것으로 판단된다. 즉 앞에서 나타난 미세조직과 관련하여 관찰하면 열영향부중에서도 모재와 인접한 영역은 상변태 온도 이하의 온도에서 탄화물이 응집되어 있는 것으로 보아 Over Tempering된 영역으로 경도가 모재보다도 상대적으로 낮은 경도 연화지역으로 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 3는 GTAW 용접에 따른 온도측정결과의 한 예를 나타내었다. 이러한 온도측정결과를 기본으로 하여 실험과 동일한 형상 및 용접조건을 대입하여 다층용접 열영향부를 상변태를 고려한 SYSWELD로 유한요소해석한 등온선도를 구하였다. 미세조직과 미소경도시험 결과로부터 용접 열영향부를 4개의 영역(0.2, 0.8, 2.4 및 3.6mm)으로 구분하여 해석한 결과로부터 용접 열이력을 구하였으며, 0.2mm 떨어진 위치에서의 열이력 해석결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5는 모재와 용접열영향부의 각 위치에서 해석결과로부터 구한 열이력으로 재현 열처리한 후 610℃에서 2시간 용접후열처리한 시편에 대한 충격시험결과를 나타내었다. 용융경계부로부터 0.2mm, 0.8mm, 2.4mm 떨어진 부위에 상당하는 열이력으로 재현 열처리한 시편에서의 50% 연성-취성 파면천이온도(FATT₅₀)와 68J의 Charpy 충격흡수에너지를 나타내는 천이온도(vTr_{68J})는 모재보다도 월등히 높은 값을 나타내었다. 이는 정확하게 용융경계부를 재현하는 것은 어려우나, 용융경계부의 인접부는 단층 용접시에는 최고온도가 높아 결정립이 조대화되지만, 다층 용접의 경우 후속 Pass의 용접열에 의하여 결정립이 미세화 되기 때문에 결정립 미세화에 의한 충격인성이 향상되는 것으로 생각된다. 또한 3.6mm에서의 FATT₅₀은 모재와 유사하거나 다소 높은 값을 나타내었는데 이는 이 지점에서의 용접열에 의한 최고 온도가 변태점을 넘지 않고 용접후열처리보다 다소 높은 온도의 열영향으로 탄화물의 응집 및 구상화에 따른 충격인성이 저하하는 것으로 생각된다.

그리고 용융경계부로부터 1.0mm와 3.6mm 떨어진 용접 열영향부, 모재 및 용접금속에 대하여 49℃와 289℃에서 평가한 파괴인성 시험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시험 결과로부터 289℃에서 파괴인성값은 용접금속, 용융경계부에서 1.0mm 떨어진 위치, 모재, 3.6mm 떨어

진 위치순으로 낮았으며, 이는 경도 및 충격시험결과와 마찬가지로 용융경계부에서 3.6mm 떨어진 부위가 취약한 것으로 보인다. 그러나 용융경계부에서 3.6mm 떨어진 위치와 모재의 J-R Curve 특성이 뚜렷한 차이가 없고, LBB 특성평가용 시편을 정확히 용융경계부로부터 3.6mm 떨어진 위치에서 물리적으로 준비하기가 어렵다. 따라서 현재의 LBB 특성평가방법을 적용하더라도 안전성 해석에 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 결 론

SYSWELD를 이용한 주증기 배관재인 SA106 Gr. C 강의 GTAW 용접열영향부에 대한 온도해석 및 기계적성질을 조사한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실 용접에 따른 온도측정결과와 SYSWELD를 사용하여 상변태를 고려한 유한요소해석으로 용접 열영향부의 열이력을 예측할 수 있었다.
- 2) 해석결과로부터 용접 열영향부의 위치에 따른 열이력을 재현 열처리한 시험편의 기계적성질을 조사한 결과 용융경계부로부터 0.2~2.4mm에 해당하는 열이력으로 재현 열처리한 시편에서는 모재보다 우수한 충격인성을 나타내었으나, 3.6mm에 해당하는 열이력으로 재현 열처리한 시편에서는 모재와 유사하거나 다소 낮은 충격인성을 나타내었다.
- 3) 289℃에서 파괴인성값은 용접금속, 용융경계부에서 1.0mm 떨어진 위치, 모재, 3.6mm 떨어진 위치순으로 낮았으나, 용융경계부에서 3.6mm 떨어진 위치와 모재의 J-R Curve 특성이 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 따라서 현재의 LBB 특성평가방법을 적용하더라도 안전성 해석에 문제가 없을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

- 1) H. H. Woo, G. S. Holman and C. K. Chou, 1984, Failure Probability of PWR Reactor Coolant Loop Piping, LLNL Report UCRL-862491)
- 2) 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
- 3) 김영진 외, 영광 원자력발전소 3/4호기 2차계통 배관소재의 응력변형($\sigma - \epsilon$) 및 파괴저항 (J-R) 특성 보고서, 1992

Table 1. Chemical compositions of base metal and filler metal(wt%).

	C	Mn	P	S	Si	Cu
Base Metal	0.31	1.08	0.011	0.011	0.2	-
Filler Metal	0.06~0.15	1.4~1.8	≤0.025	≤0.035	0.8~1.15	≤0.5

Table 2. Welding condition of gas tungsten arc welding.

Current	Voltage	Travel Speed	Preheating & Interpass Temp.	PWHT
170~190A	13~15V	14~15cm/min	160~180℃	610±10℃ ×2hr

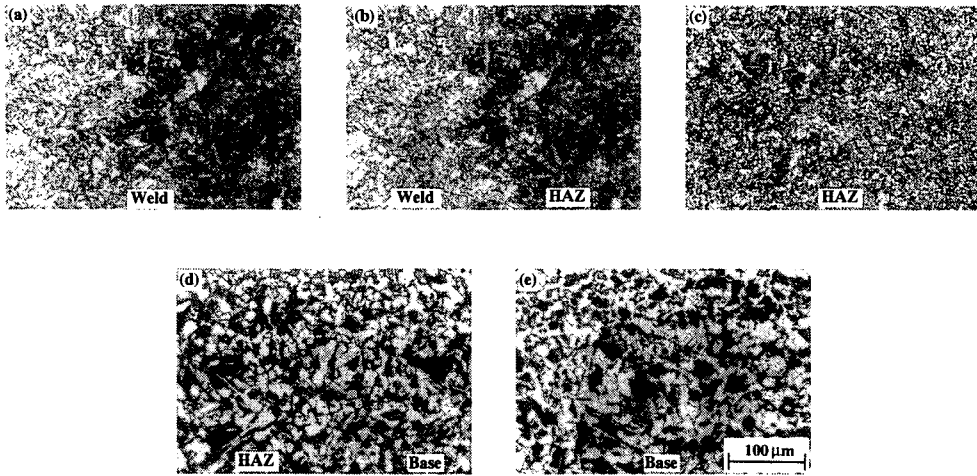


Fig. 1 Microstructures of weld metal, HAZ and base metal after PWHT at 610°C for 2hr.

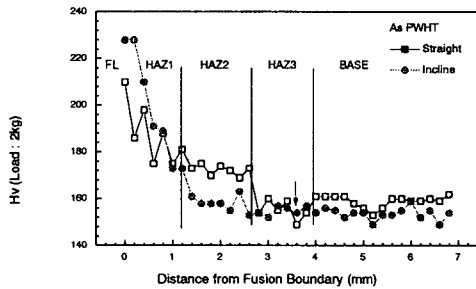


Fig. 2 Vickers hardness of weld joint after PWHT at 610°C for 2hr.

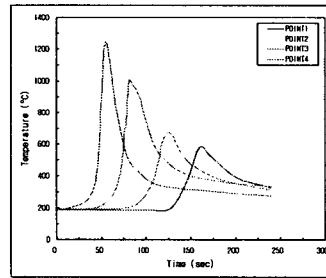


Fig. 3 Results of measuring temperature at various location of HAZ for welding

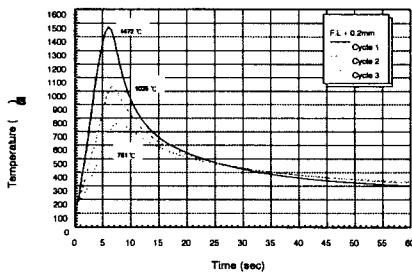


Fig. 4 Result of temperature analysis at 0.2mm from fusion boundary.

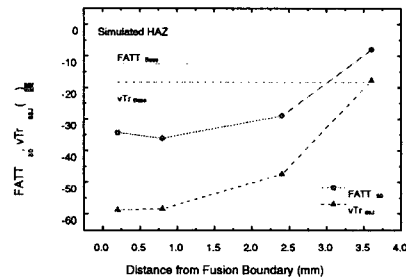


Fig. 5 Variation of transition temperature with distance from fusion boundary.

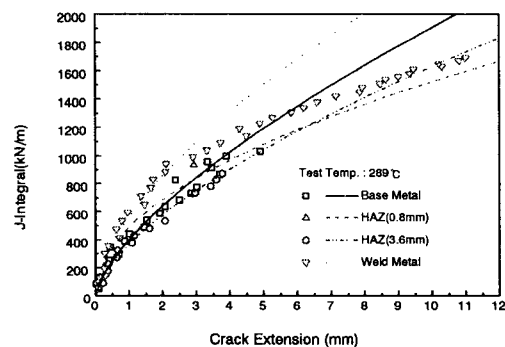
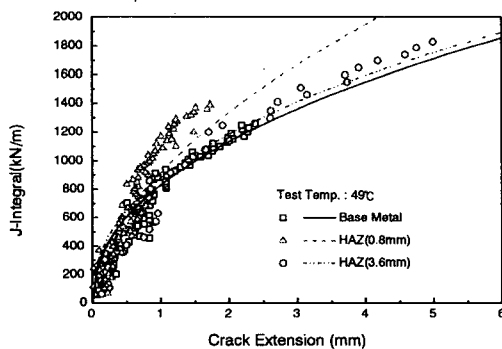


Fig. 6 Fracture toughness of base, weldment and HAZ at 49°C and 289°C.