

SA106 Gr.C 모재와 용접재의 파괴인성에 미치는 온도와 하중속도의 영향

김진원*, 박치용*, 김범년*, 김인섭**

*전력연구원

**한국과학기술원

요 약

본 연구는 주증기배관으로 사용되고 있는 SA106 Gr.C의 모재와 용접재에 대해서 파괴인성에 미치는 온도와 하중속도의 영향을 살펴보기 위해서 다양한 온도와 하중속도에서 J-R 시험 및 인장 시험을 수행하였다. 두 재료 모두 동적변형시효의 영향을 받고 있는 온도영역에서 약 40% 정도의 파괴인성 감소가 관찰되었으며, 하중속도에 따른 파괴인성 감소영역은 serration과 인장강도 증가 영역의 하중속도 의존성과 일치하였다. 원자력발전소 운전온도에서 모재와 용접재 모두 하중선변위속도가 4.0mm/min 일 때 파괴인성치의 최저를 보였으며, 하중속도가 증가함에 따라 증가하여 동적하중속도(800, 40mm/min)일 때 최대를 보였다. 모재와 용접재를 비교하면 용접재에서 serration이 뚜렷했고, 보다 넓은 온도영역에서 관찰되었다. 또한 인장강도의 증가가 보다 고온에서 형성되었다. 이러한 특성은 용접재가 모재에 비해 냉각률이 크고 미세한 결정입으로 이루어져 있으며, 망간의 함량이 높기 때문으로 판단된다.

1. 서론

원자력발전소는 고온과 고압조건에서 운전되고 있기 때문에 주요 기기 및 배관들에 대한 건전성이 매우 중요하게 고려되고 있다. 따라서 최근 고에너지 배관의 경우 과단전누설개념에 적용됨에 따라 배관 재질에 대한 인장강도 뿐 아니라 충분한 파괴저항성이 확보되어야 한다. 탄소강배관은 일반적으로 동적변형시효 현상에 민감한 것으로 알려져 있고, 동적변형시효 현상은 재료의 인장강도의 증가와 연성의 감소뿐만 아니라, 파괴인성을 저하시키는 등 특유한 거동을 보이는 것으로 알려져 있다[1]. 일반적으로 동적변형시효 현상은 변형에 의해 이동하는 전위와 열적으로 활성화되어 격자 내에서 확산하는 용존원소들간의 반복적인 상호작용에 의해 일어나는 것으로 알려져 있다[1,2]. 따라서 동적변형시효는 전위의 이동속도를 결정하는 변형속도와 용존원소들의 확산속도를 결정하는 온도조건이 일치하는 경우에 일어난다. 탄소강의 경우 페라이트 내에 침입형으로 존재하는 용존 질소와 탄소가 동적변형시효의 원인이 되고 있으며, 일반 탄소강의 경우 $\sim 10^{-4}$ /s 정도의 준정적 변형속도 일 때, 원자력발전소의 운전온도를 포함하는 200~300°C의 온도영역에서 동적변형시효가 가장 활발한 것으로 알려져 있다[1]. 최근의 원자력발전소 배관의 건전성 관련 연

구들에서 수행된 많은 종류의 시편 및 배관시험 결과들은 원전 가동온도에서 동적변형시효의 영향들을 뚜렷이 보여주었고, 일부 탄소강 배관에서는 정적하중에 비해 동적하중 조건에서 파괴인성이 크게 감소하는 결과를 보여주었다[3,4,5]. 따라서 최근 지진하중과 같은 동적하중 조건에서의 동적변형시효 현상에 대한 관심이 집중되고 있고, 국내에서는 탄소강 배관의 파단전누설개념 적용에서 동적변형시효 현상을 고려하기 위해 동적 파괴인성 시험을 수행하도록 요건화하고 있는 상황이다.

그러나 동적변형시효에 대한 대부분의 연구들이 준정적하중 조건에서 수행되었으며, 높은 하중속도에서는 단편적인 실험결과들이 있을 뿐 동적변형시효 거동을 명확히 할 수 있는 연구결과들이 거의 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 준정적조건에서 지진하중에 근접하는 동적하중까지 다양한 하중조건과 폭넓은 온도영역에서 J-R 시험과 인장시험을 수행하고, 이들 결과로부터 주증기배관으로 사용되고 있는 SA106 Gr.C의 모재와 용접부에 대한 동적변형시효 거동을 살펴보고자 한다.

2. 실험방법 및 절차

시험재료 및 시편

본 연구에서 사용된 재료는 영광 3&4 호기의 주증기배관 재료인 SA106 Gr.C 탄소강으로 인출에 의해 제작되었고, 용접재는 이 배관을 GTAW 방법으로 용접하고 후열처리한 재질이 사용되었다. 이들 재료에 대한 화학성분은 표1에 나타낸 바와 같으며, 모재는 전형적인 페라이트-펄라이트 미세구조를 보이고 있고, 용접부는 미세한 결정크기를 가진 페라이트 구조를 보였다. 인장시편은 ASTM 기준에 따라 제작되었으며, J-R 시편은 10%씩의 측면 홈을 가진 1인치 CT시편이 이용되었다. CT시편은 모재와 용접재 모두 경우 L-C 방향으로 시편을 채취하였고, 인장시편의 경우 모재는 L 방향, 용접재는 C방향으로 시편을 채취하였다.

시험방법 및 절차

J-R 시험은 상온에서 380℃까지의 온도영역에서 모재의 경우 0.4, 4.0, 40, 800mm/min, 용접재의 경우 0.4, 4.0, 40mm/min의 하중선변위속도에서 수행되었다. 0.4mm/min의 하중선변위속도는 준정적 조건에 해당하고, 800mm/min은 동적하중속도에 상응하는 시험속도이다. 인장시험은 모재와 용접재 모두 상온에서 350℃의 온도범위에서 $1.39 \times 10^{-4}/s \sim 6.95 \times 10^{-2}/s$ 의 변형속도로 수행되었다.

J-R 시험에서 균열길이는 DCPD(direct-current potential drop)방법을 사용하였으며, 하중속도에 따라 하중선변위속도가 0.4, 4.0mm/min일 때 12A, 40mm/min인 경우 45A, 그리고 800mm/min에서는 90A의 입력전류를 사용하였다. 이것은 자성재료에서 급격한 균열성장이 있을 때 균열선단에서 발생하는 내부전압의 영향을 최소화하기 위한 것이다. 하중선변위-전압 곡선에서 초기 기울기가 급변하는 위치를 균열진전의 시작점으로 선택하고, 균열진전길이는 시험후 측정된 최종 균열길이를 보정한 Johnson식을 이용하여 계산하였다.

3. 결과 및 토의

온도와 하중속도에 따른 파괴인성

모재와 용접재 모두 모든 하중 및 온도조건에서 균열의 불안정성장은 관찰되지 않았다. 그림 1과 2는 모재와 용접재에 대한 준정적 및 동적하중에서의 J-R 곡선을 온도에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 하중속도에서 J-R 곡선은 일정온도에서 최저 값을 보이고 있으며, 하중속도에 따라 약간 차이가 있지만 모재와 용접재 모두 상온 J-R 곡선과 비교하여 약 40% 정도 파괴인성이 감소하였다.(그림 3). 이러한 파괴인성의 감소는 재질의 동적변형시효 현상에 기인한 것이고, 앞선 연구결과들도 이를 잘 설명하고 있다[6,7]. 그림 4는 최저 파괴인성치를 보이는 온도를 인장시험 결과에서 얻은 동적변형시효 온도영역과 함께 하중속도에 따라 나타낸 것이다. 이는 파괴특성의 하중속도 의존성이 인장성질에서와 동일하다는 것을 잘 설명해주고 있다.

그림 5는 모재와 용접재의 균열진전에 대한 저항치를 온도와 하중선변위속도에 따라 나타낸 것으로 발전소 운전온도에서는 모재와 용접재 모두 약 4.0mm/min 의 하중속도에서 최저 값을 보이고, 하중속도가 증가함에 따라 증가하여 동적하중 조건에서 최대를 보이고 있다. 이들 결과는 최근의 일부 연구결과들이 동적하중 조건에서 파괴인성이 정적하중 조건에 비해 상당히 감소하는 경향을 나타내고 있는 것에 반해 상반된 하중속도 의존성을 나타내는 것이다[5]. 가동온도에서 이와 같이 상반된 하중속도 의존성이 보이는 것은 본 연구에서 시험된 재질들이 상대적으로 높은 온도영역에서 동적변형시효 현상이 활발하기 때문이다. 이는 선행 연구에서 인장강도의 최대 값들이 비교적 높은 온도영역에서 형성되는 것과 일치하고 있다[8]. 일반적으로 탄소강에서 동적변형시효 현상은 용존 질소나 탄소의 함량이 증가함에 따라 낮은 온도영역에서 활발한 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 발전소 가동온도에서 하중속도 의존성은 재료의 합금원소나 제조공정 등에 직접 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

모재와 용접부에서의 동적변형시효 특성

앞절에서 모재와 용접재 모두 파괴인성에 미치는 동적변형시효의 영향이 비슷하게 관찰되었다. 그러나 용접재의 경우 동일한 하중선변위속도에서 모재에 비해 약간 높은 온도에서 파괴인성의 감소가 나타났다. 그림 6은 각 변형속도에서 온도에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 것으로 이러한 특성은 잘 설명해 주고 있다. 인장강도의 증가 정도는 모재와 용접재 모두 비슷하지만, 인장강도의 최대가 나타나는 온도영역이 용접재의 경우 보다 높은 온도에서 형성되었다. 따라서 모재에 비해 용접재에서 동적변형시효 현상이 보다 고온에서 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 7과 8은 두 재료의 응력-변형률 곡선에서 관찰되는 serration과 serration 영역을 변형속도에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 용접재에서 모재에 비해 뚜렷한 serration의 진폭을 보였고, 보다 넓은 온도 영역에서 serration이 관찰되었다. 따라서 모재에 비해 용접재에서 동적변형시효의 영향이 크게 나타난다고 볼 수 있다.

용접재의 경우 모재에 비해서 동적변형시효의 영향이 뚜렷이 나타나는 것은 비록 후열처리 과정을 거쳤지만 용접부에서의 냉각속도가 모재에 비해 크고 결정입의 크기가 작기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 결정입의 크기가 작으면 전위와 용존원소간의 상호작용이 일어날 확률이

증가하는 것으로 알려져 있다[9,10]. 또한 표1에서 알 수 있는 바와 같이 모재에 비해 용접재의 경우 망간과 규소의 함량이 높게 나타나고 있다. 앞선 연구에서 언급한 바와 같이 망간의 함량증가는 동적변형시효 영역을 고온으로 상승시키는 역할을 하고 있고, 이는 그림 8에서와 같이 활성화 에너지가 모재에 비해 크게 나타나는 것에서 이를 뒷받침 할 수 있다.

4. 결론

- 1) SA106 Gr.C의 모재와 용접재 모두 동적변형시효의 영향을 받고 있는 온도영역에서 약 40% 정도의 파괴인성 감소가 관찰되었으며, 하중속도에 따른 파괴인성 감소영역은 serration과 인장강도 증가 영역의 하중속도 의존성과 일치하였다.
- 2) 발전소 운전온도에서 모재와 용접재 모두 하중선변위속도가 4.0mm/min 일 때 파괴인성이 최소가 되고, 하중속도가 증가함에 따라 증가하였다. 또한 운전온도에서의 하중속도 의존성은 재질 고유의 동적변형시효 특성에 의존하며, 따라서 재질의 합금원소나 제조공정에 의해 영향을 받고 있었다.
- 3) 모재에 비해 용접재에서 serration이 뚜렷했고, 보다 넓은 온도영역에서 관찰되었다. 또한 인장강도의 증가가 보다 고온에서 형성되었다. 이러한 특성은 용접재가 모재에 비해 냉각률이 크고 미세한 결정입으로 이루어져 있으며, 망간의 함량이 높기 때문으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J.D.Baird and A.Jamieson, J. Iron Steel Inst., Vol.203, 1996, p793.
- [2] A.S.Keh, Y.Nakada, and W.C.Leslie, Dislocation Dynamics, A.R.Rosenfield and others,Eds.,McGrow-Hill, New York, 1968, p381.
- [3] C.W.Marschall et.al, NUREG/CR-6226, Oct. 1996.
- [4] B.Mukherjee, Int. J. Press. Ves. & Piping, Vol.31, 1988, p363.
- [5] C.W.Marschall et.al, ASME STP 1074, 1990, p581.
- [6] I.S.Kim and S.S.Kang, Int. J. Press. Ves. & Piping, Vol.62, 1995, p123.
- [7] K.R.Naresdnath et.al, Eng. Frac. Mech., Vol.30, 1988, p.349.
- [8] J.W.Kim and I.S.Kim, Nuc.Eng.& Des., Vol.172, 1997, p.49.
- [9] A.H.Cottrell, Philos. Mag., Vol.74, 1953, p829.
- [10] P.G.McComick, Acta Metall., Vol.20, 1973, p945.

표1 SA106 Gr.C 모재와 용접재의 화학조성(w/o)

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu	H _{boon}
B.M	0.19	1.22	0.009	0.007	0.27	0.11	0.05	0.03	0.004	0.029	0.13	1.60
W.M.	0.073	1.44	0.015	0.017	0.83	0.007	0.02	0.03	0.007	-	0.28	1.60

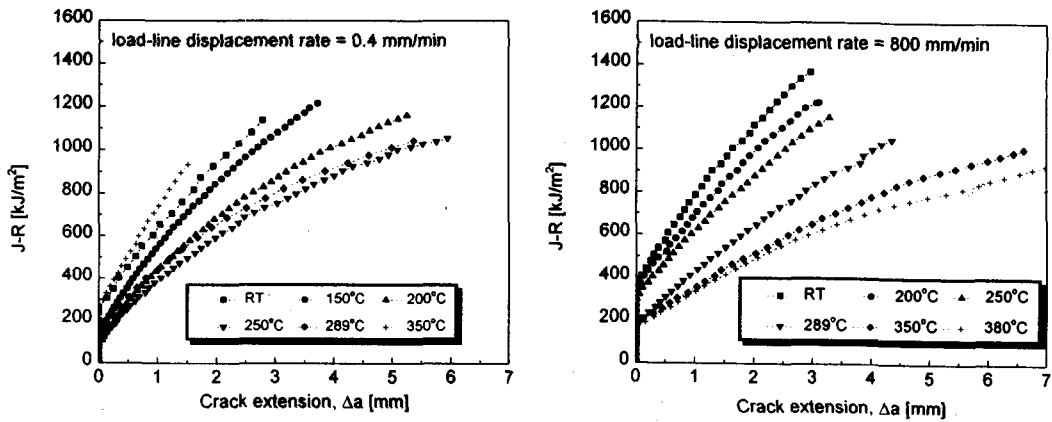


그림 1 모재에서 온도에 따른 J-R 곡선의 변화 : (a) 0.4mm/min (b) 800mm/min

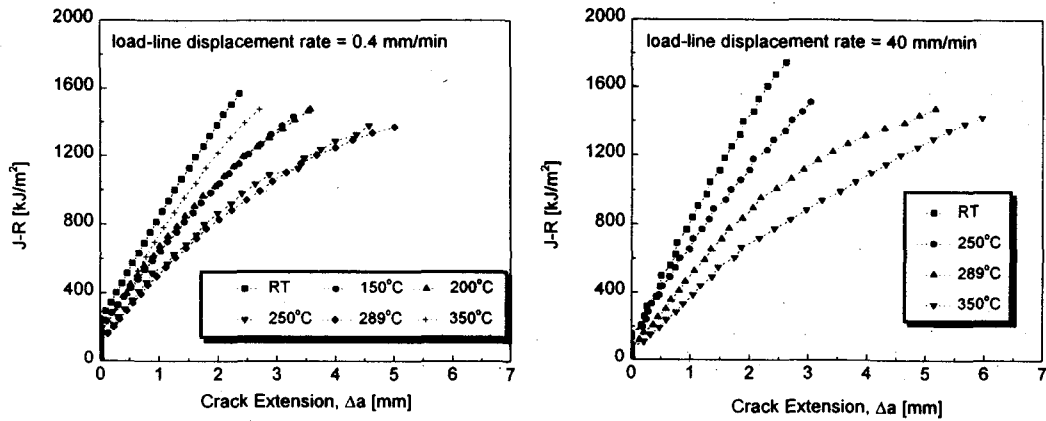


그림 2 용접재에서 온도에 따른 J-R 곡선의 변화 : (a) 0.4mm/min (b) 800mm/min

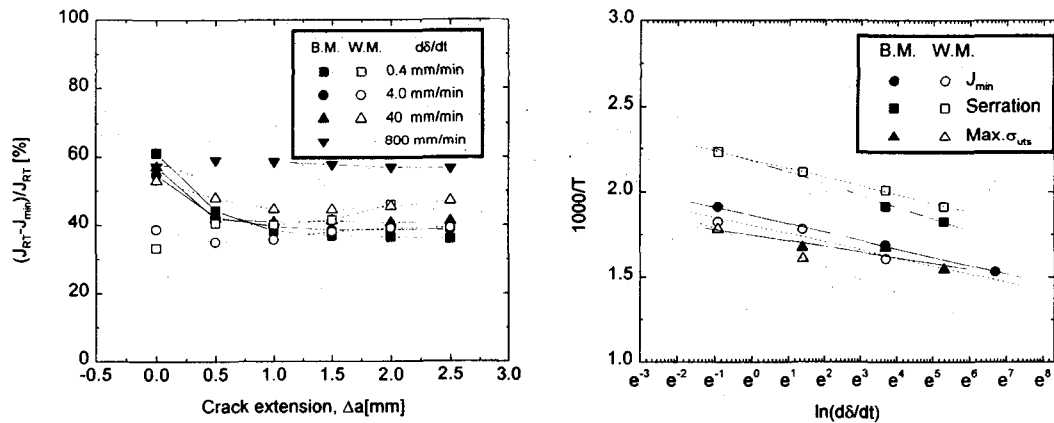
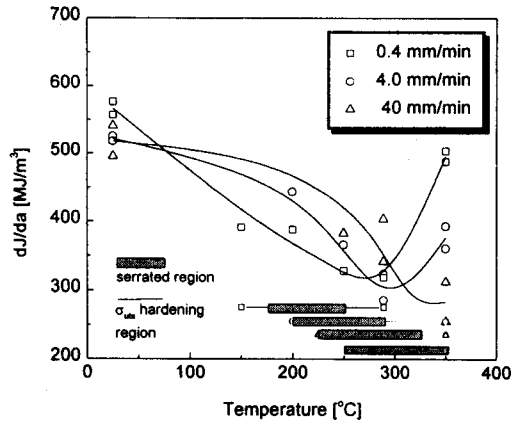
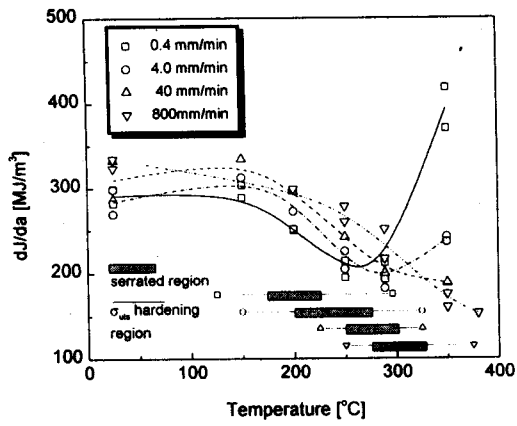
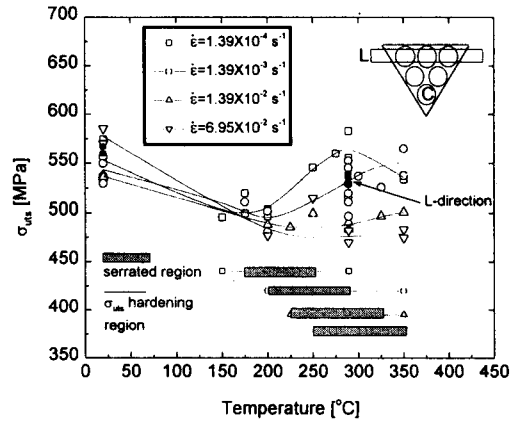
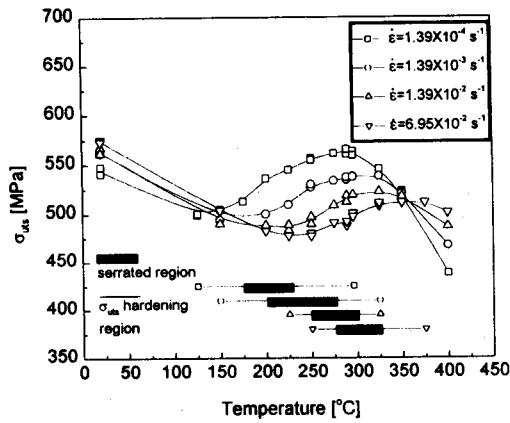


그림 3 각 하중속도에서 파괴인성의 최대감소를 그림 4 파괴인성치 감소영역의 하중속도 의존성



(a) (b)
 그림 5 온도 및 하중속도에 따른 (a)모재와 (b)용접재의 균열진전에 대한 저항치



(a) (b)
 그림 6 온도와 변형속도에 따른 (a) 모재와 (b) 용접재의 인장강도의 변화

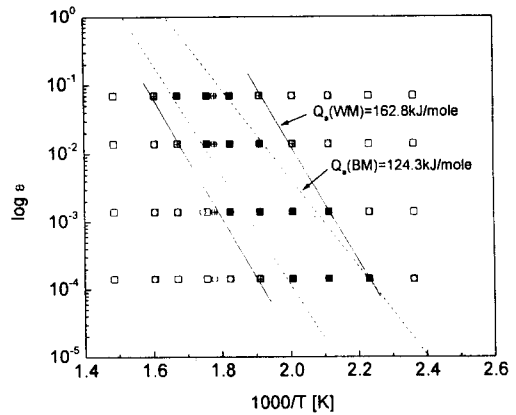
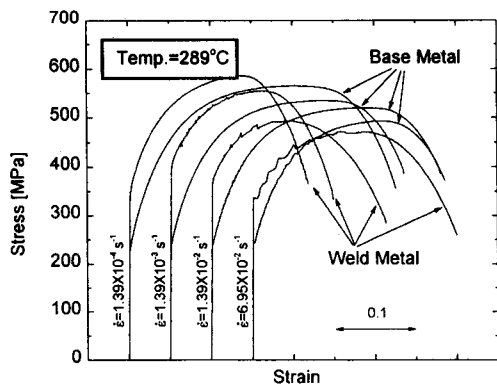


그림 7 모재와 용접재에 대한 응력-변형률 곡선 그림 8 모재와 용접재에 대한 serration 영역 및 활성화에너지의 비교