'2000 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

Hump시편에 의한 Alloy 600의 응력부식 시험

Stress Corrosion Crack Tests of Alloy 600 with Hump specimens

맹완영, 김문환, 최명식, 김우철
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

험프(hump)시편을 사용하여 일정연신률 시험을 수행하면 입계응력부식 유발시간이 단축되고, 다양한 환경에서 입계응력부식균열의 민감성을 용이하게 상호 비교, 평가할 수 있다. 곡률이 다른 alloy 600 험프 시편에 대해 여러 환경에서 CERT (constant elongation rate test)시험장치를 사용하여 응력부식 시험을 수행하였다. 시험 후, 변위-하중 곡선의 형상 및 파면을 비교하여 각 조건에서의 입계응력부식민감성을 평가하였다. 입계 응력부식 민감성은 험프 시편 굴곡부의 곡률 및 그에 따른 결정립의 변형 거동에 큰 영향을 받는 것으로 관찰되었다. 한편, 균열 생성 시점을 파악하기 위해 일정한 변형에서 일정연신률 시험을 중단한 후 단면 조직을 관찰하여 균열의 생성여부를 확인하였는데 균열은 하중-변형 곡선의 최대 하중 근처에서 생성되는 것으로 사료된다.

Abstract

CERT tests with hump specimens are useful to determine the IGSCC susceptibility of an alloy 600 specimen within a short time period in various corrosion environments. Stress corrosion crack tests with constant elongation rate tester were carried out for the hump specimens of different radius curvature in various environment. IGSCC susceptibility was evaluated based on the shape of load-deformation curve and the morphology of fracture surface. It was observed that IGSCC susceptibility of a hump specimen was significantly affected by the radius of curvature and the related deformation behavior of grains around the bended area of hump specimen. Interrupt tests were carried out to determine the crack initiation time during the CERT tests. It was considered that the crack initiation occurs at the maximum load of load-deformation curve.

1. 서론

원자력발전소의 1차 계통 냉각수는 순수(pure water)에 여러 첨가물이 주입된 형태로 사용되어 부식저항성을 향상시키고 누적 방사선량의 저감화를 도모한다. 1차 계통 원전수의 첨가물로서 Zn를 주입하면 계통재료의 입계응력부식저항성이 증가하고 누적 방사선량이 감소한다는 연구 결과가 보고되고 있다. 실제로 Zn주입방법은 BWR 원전에 적용되어 상당한 성과를 거두고 있고 PWR에도 실험실적 실증 시험 및 원전 적용이 검토되고 있다[1-4]. 원전 계통재료의 부식저항성에 미치는 첨가제의 영향을 파악하는 것은 원전의 건전성 향상 및 수명 평가를 위해 중요한 문제이다. 통상의 인장시편을 이용하여 Alloy 600의 IGSCC에 미치는 첨가제의 영향을 파악하는 것은 순수(pure water)분위기에서는 균열이 생성되어 성장하는 속도가 느리기 때문에 오랜 시간이 소요된다. 그래서 재료에 다축 잔류 응력이 작용하면 PWSCC의 균열 생성이 용이해지고 및 균열진전속도가 증가한다는 점에 착안하여 Totsuka 등[5]은 통상의 인장시편에 굴곡부를 형성시킨 험프시편을 사용하여 PWSCC시험을 수행 한 결과 시험시간을 단축하는 효과를 얻을 수 있었다. 그러나 응력부식거동은 험프 시편의 잔류응력분포에 따라 민감하게 변화하므로 실험의 재현성을 얻기 위해서는 험프 시편의 곡률 및 가공량을 정밀하게 조절하여야한다. 본 연구에서는 험프 시편에 의한 응력부식 시간 단축효과를 확인하고 온도, 환경 및 험프시편의 곡률 변화에 따른 변위-하중 곡선 거동을 분석하여 각 환경에서의 응력부식민감성을 상호 비교, 평가하고자 하였다. 그리고 일정한 변형에서 일정연신률 시험을 중단 한 후 단면 조직을 관찰하여 균열의 생성여부를 확인하여 균열 생성 시점을 분석하고 시편의 변형 및 균열 형성과정을 파악하고자 하였다.

2. 시험방법

시험은 스테핑 모터 방식으로 작동하는 고온고압 CERT(constant elongation rate test)시험장치를 이용하여 그림 1에 보인 바와 같은 Alloy 600 hump 시편에 대해 연신률 2.5 x 10^{-7}/sec를 부과하여 수행하였다. 시험에 사용된 시편의 기계적 특성은 표 1에 보였다. 곡률이 다른 합금 A, B에 대해 1)탈산소된 수중, 2) 360℃, 산소포화 수중, 3) 250℃, 탈산소된 순환 수중, 4) 25℃ 공기 중에서 응력부식 시험을 수행하였다. hptest-1에서 hptest-9까지의 각 시험 조건 및 시험 결과를 표 2에 보였다. CERT 시험후, SEM으로 파면관찰하여 파단모드를 파악하였고 변위-하중 곡선 형상, 파단까지 걸리는 시간 및 최대 연신률을 비교하여 각 환경에서의 응력부식민감성을 상호 비교, 평가하였다. 한편 균열의 생성 시점을 알기 위해 일정한 변형에서 일정연신률 시험을 중단 한 후 단면 조직을 관찰하여 균열의 생성여부를 확인하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

시험번호 hptest-1에서 hptest-9까지 Alloy 600 시편을 2.5x10-7/sec의 변형 속도로 일정연신률 시험을 수행한 결과를 표 2에 요약하여 보였다. 표 2에 의하면 모든 시편이 파단까지 걸린 시간은 100시간에서 150시간 사이였다. 상온 및 250℃에서 수행한 시험에서 파단은 모두 연성 파괴에 의해 진행되었다. 360℃에서 시험한 경우 모든 시험에서 입계응력부식 균열이 관찰되었지만 험프 시편의 곡률에 따라 상이한 파면을 형성하였다.

그림 2에 hptest-1에서 hptest-4에 대한 하중-변형 곡선을 보였다. 360℃ 수중에서 시험된 hptest-1 및 hptest-3의 하중-변형 곡선과 상온 및 250℃에서 시험된 hptest-2 및 hptest-4

의 하중-변형 곡선과는 현저한 차이를 보였다. hptest-1 및 hptest-3의 경우 변형이 증가함에 따라 하중이 최대값 근처에서 일정한 값을 유지한 반면 hptest-2 및 hptest-4의 경우는 하중이 최대값까지 계속 증가한 후 바로 파단이 일어나는 경향을 보였다. hptest-1 및 hptest-3의 경우 파면은 그림 3에 보인 바와 같이 입계 파괴 형태를 띠고 취성파괴 거동을 보이는 반면 hptest-2 및 hptest-4의 경우는 전형적인 연성파괴거동을 보였다. 재료의 파괴거동 차이는 그림 4를 관찰하면 명확히 구별된다. 취성 파괴 거동을 보이는 hptest-1 및 hptest-3의 경우 험프 시편의 굴곡부가 거의 변형없이 균열이 진전되어 초기 굽힘각이 유지되는 반면 연성 파괴 거동을 보이는 hptest-2 및 hptest-4의 경우는 굴곡부가 심하게 변형되어 초기 굽힘각이 상당히 벌어져서 커진 것을 관찰할 수 있다. 취성파괴거동을 보이는 경우는 시편에 거시적 변형이 증가함에 따라 굴곡부 내측 노치부근에 응력부식 균열이 생성되어 균열 입구의 크기가 확대되면서 굴곡부 노치 부근의 미시적 변형을 감소시키는 것으로 판단된다. 반면에 연성 파괴를 일으키는 경우는 시편에 거시적 변형의 증가에 따른 굴곡부 내측 노치 부근에 응력부식 균열이 생성되지 못하고 대신에 심한 변형이 유발되는 것으로 보인다.

일정 연신률 시험 과정 중 균열이 생성되는 시점을 알기 위해서 일정 시점에서 시험을 중단하고 굴곡부의 단면을 관찰하여 균열의 생성 여부를 확인하기 위한 시험을 hptest-int1과 hptest-int2에서 수행하였다. hptest-int1은 곡률 반경이 0.22mm인 재료 A시편에 대해 변형이 1.8mm정도 진행되고 응력이 16.9 kg/mm^{2}정도 되었을 때 시험을 중단하고 굴곡부의 단면을 관찰하여 균열의 생성 여부를 확인한 시험이다. 그림 5에 보인 바와 같이 최종 파면을 형성하는 현저한 균열은 관찰되지 않고 노치를 중심으로 미세한 입계 균열이 상하로 관찰된다. hptest-int2는 곡률 반경이 0.48mm인 재료 B시편에 대해 그림 6에 보인 바와 같이 변형이 2.5mm정도 진행되고 응력이 23.1 kg/mm^{2}정도 되었을 때 시험을 중단하고 균열 여부를 관찰한 시험이다. 그림 6의 단면 조직에서 볼 수 있는 바와 같이 노치부가 심하게 변형되어 결정립이 하중방향으로 길게 늘어서는 경향을 보이지만 균열은 형성되지 않은 것을 관찰할 수 있다. 이 경우에는 노치 상하로 미세한 입계균열도 관찰되지 않는다. 이와 같은 시험 결과로 판단 할 때, 균열은 하중-변형 곡선상의 하중 값이 최대가 되는 부근에서 생성되는 것으로 보인다.

그림 7에는 시험에 사용된 곡률 반경이 0.22mm, 0.42mm, 0.48mm인 3 종류의 험프 시편을 보였다. 곡률 반경이 작은 a)의 경우 노치부가 b)와 c)에 비해 노치부가 상대적으로 예리한 각을 가짐을 관찰할 수 있다. 험프 시편 노치부의 단면 조직을 그림 8에 보였다. 곡률 반경이 작은 a)의 경우은 노치 부근의 결정립이 가공 방향으로 상당히 길게 늘어난 반면 곡률이 큰 b)의 경우는 결정립이 거의 변형되지 않은 것을 볼 수 있다.

그림 9는 360℃에서 곡률 반경이 다른 A, B재료에 대해 일정연신률 시험을 수행한 결과이다. 이 그림을 보면 굴곡부의 곡률 반경이 하중-변형 곡선의 형태에 미치는 영향을 관찰할 수 있다. 동일한 재료이지만 곡률 반경이 다른 hptest-1과 hptest-9, hptest-7의 하중-변형 곡선을 비교하면 상당한 차이를 관찰할 수 있다. 곡률 반경이 작은 hptest-1은 앞에서 언급한 바와 같이 하중이 최대 값에 도달한 뒤 이 값 근처에서 일정하게 유지되는 반면 곡률 반경이 상대적으로 큰 hptest-9와 hptest-7은 하중이 최대 값이 도달할 때까지 계속 증가한 후 바로 파단에 이르는 경향을 보인다.

험프 시편의 곡률 반경 차이는 파면의 형태에 큰 영향을 주었다. 굴곡부의 곡률 반경이 작

은 hptest-1 및 hptest-3의 경우 파면은 시험의 최종단계에 형성되는 극히 일부의 연성 파면을 제외하고는 모두 입계응력부식균열에 의해 형성되었다. 반면에 곡률이 큰 hptest-5에서는 그림 10에 보인 바와 같은 입계응력부식 파면과 연성 파면이 비슷한 비율로 혼재되었다. hptest-5의 경우 이와 같이 입계부식파면과 연성 파면이 비슷한 비율로 혼재하는 이유는 균열이 하중-변형 곡선의 최종 단계에서 생성되어 균열이 노치 단면의 절반쯤까지 성장하다가 재료의 인장 응력에 도달하여 최종적으로 연성 파단이 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 반면에 hptest-1인 경우 하중-변형 곡선의 초기 단계에 입계 응력부식 조건에 도달하여 응력 부식 균열이 생성되고 균열이 진전함에 따라 하중 값이 일정하게 유지되면서 노치 단면의 마지막까지 입계응력부식균열이 계속 진전한 후 파단에 이르는 것으로 사료된다.

5. 결론

1) 험프 시편을 이용한 일정연신률 시험은 단기간에 입계응력부식 민감성을 상호 비교 평가하는 효과적인 방법이다. .

2) 험프 시편의 곡률 및 그에 따른 험프시편 굴곡부의 결정립 변형 거동은 재료의 응력부식 거동에 현저한 영향을 준다.

3). 균열은 하중-변형 곡선의 최대 값 근처에서 생성된다.

참고문헌

1. P. L. Andresen and T. P. Diaz, "The Effect of Zinc Additions on the Crack Growth Rate of Fe and Ni-Base Alloys in 288℃ Water," CORROSION/93, paper no. 184, Houston, TX, NACE, (1993).

2. J. N. Esposito, G. Economy, W. A. Byers, J. B. Esposito, F. W. Pement, R. J. Jacko, C. A. Bergmann, "The Addition of Zn to The Primary Reactor Coolant for Enhanced PWSCC Resistance," Proceedings of Fifth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, p.495, American Nuclear society, La Grange Park, IL(1992)

3. T. M. Angeliu and P. L. Andresen, "Effect of Zinc Additions on Oxide Rupture Strain and Repassivation Kinetics of Iron Based Alloys in 288℃," Corrosion Science, 52, p. 29, (1996).

4. R. S. Pathania et al., "Evaluation of Zinc Addition to the Primary Coolant of Farley-2 Reactor," Proceedings of the Seventh International Symposium on Environmental Degradation Of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Breckenridge, Colorado, August 1995, p.163. NACE International.

5. N. totsuka, Corrosion, Vol. 43, No. 8, August 1987 p.505.

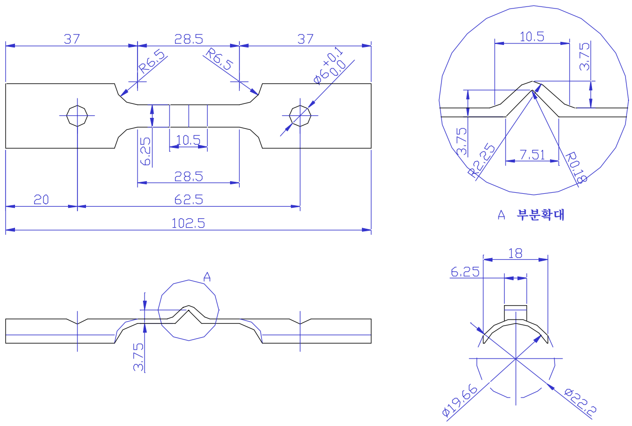


Fig. 1 Geometry of hump specimen

Table 1. Mechanical properties of tested materials

Materials (ASTM B-167)	Heat No.	Tensile Strength (Kg/mm^2)	Yield Strength	Elong. (%)	Heat Treatment	Grain Size (ASTM No.)
A	6028 x 0.04 PAL	64.00	34	45	not known	
B	906007	66.20	29.58	46.00	960C x10min	6.89

Table 2. Hump test condition and results

Test No.	Mat.	Temp. (C)	En	time to Fracture (hours)	elong.at Fracture (mm)	Elong. (%)	Frac. mode	Max. stress (kg/mm^2)	Test Stop	Radius of curvature (mm)
hptest-1	A	360	water(DO: sat.)	103	2.79	9.3	IG+TG	12.23	non stop	0.22
hptest-2	A	25	air		3.75	12.5	ductile	37.69	non stop	0.22
hptest-3	A	360	water(DO<10ppb)	119	3.2	10.7	IG+TG	13.56	non stop	0.22
hptest-4	A	250	water(DO<10ppb)	143	3.85	12.8	ductile	32.27	non stop	0.22
hptest-in	A	360	water(DO;sat.)					16.95	Interrupt	0.22
hptest-5	B	360	water(DO;sat.)	144	3.75	12.5	IG+duct.	23.50	stop once	0.48
hptest-6	B	360	water(DO;sat.)	148	3.6	12.0	IG+duct.	28.35	stop once	0.48
hptest-7	B	360	water(DO;sat.)	120	3.24	10.8	IG+duct.	24.25	non stop	0.48
hptest-int2	B	360	water(DO;sat.)					23.13	Interrupt	0.48
hptest-9	A	360	water(DO;sat.)	146	3.93	13.1		35.25	non stop	0.42

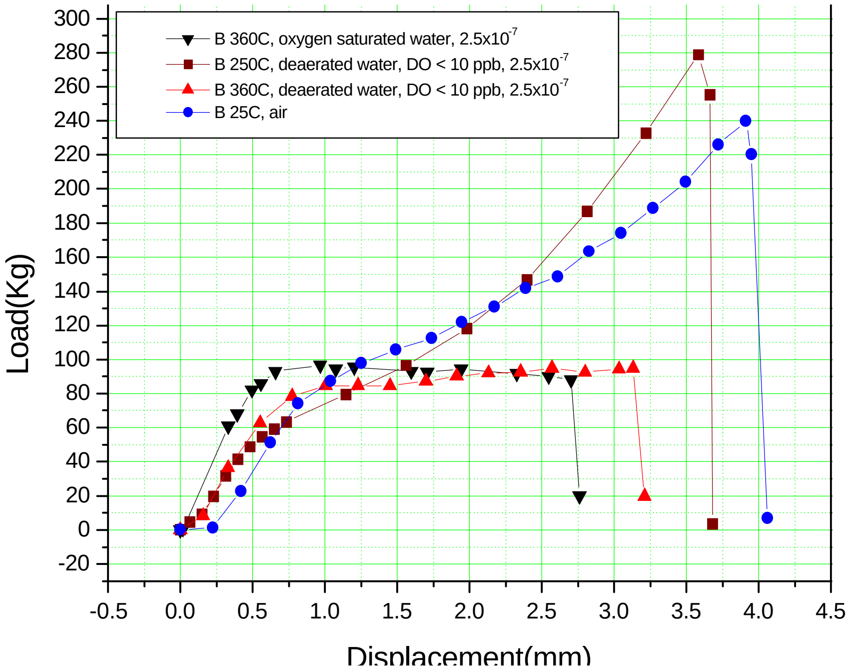
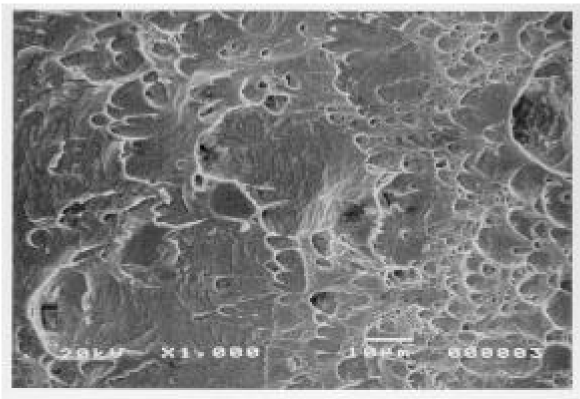
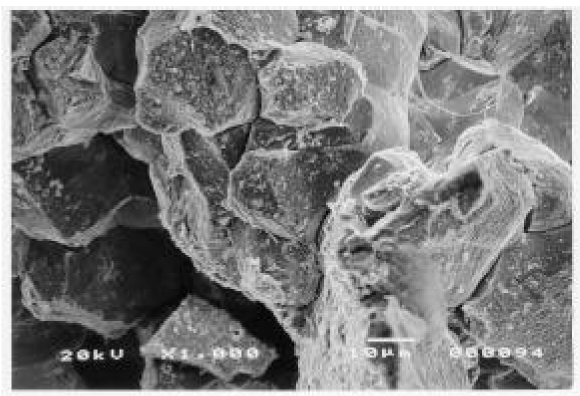


Fig. 2 Load-displacement curves of Hump tests(hptest1~hptest4)

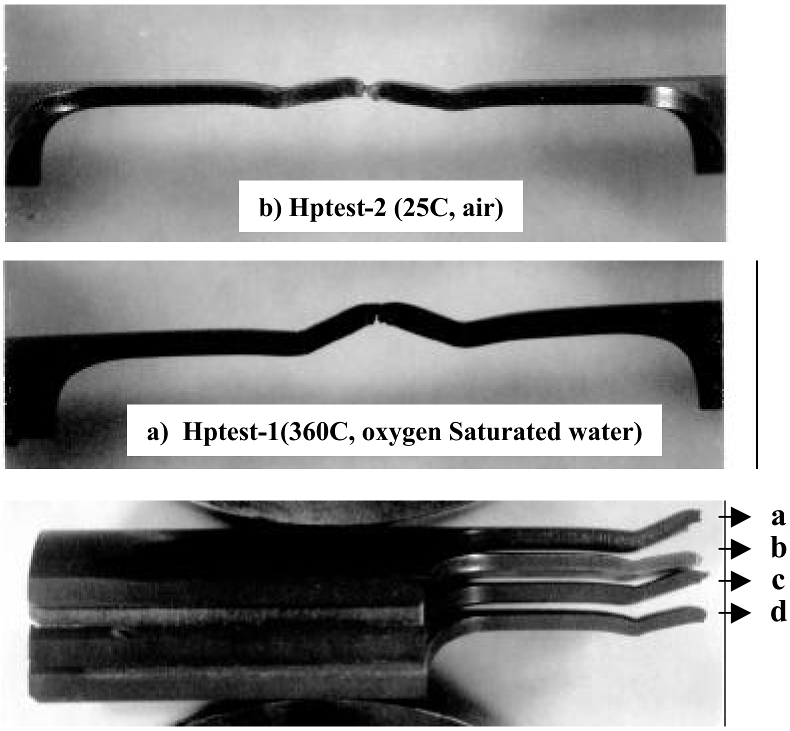


a) Tensile test, 25C, air



b) CERT test, 360C, oxygen saturated water, 2.5 x10^{-7}

Fig.3 Comparison of fracture surfaces of hptest-1 and hptest-2



a) Hptest-1(360C, oxygen Saturated water) b) Hptest-2 (25C, air)
c) Hptest-3(360C, deaerated water) d) Hptest-4 (250C, deaerated water, DO<10ppb)

Fig. 4 Shape of deformation of hump test(hptest-1~hptest4)

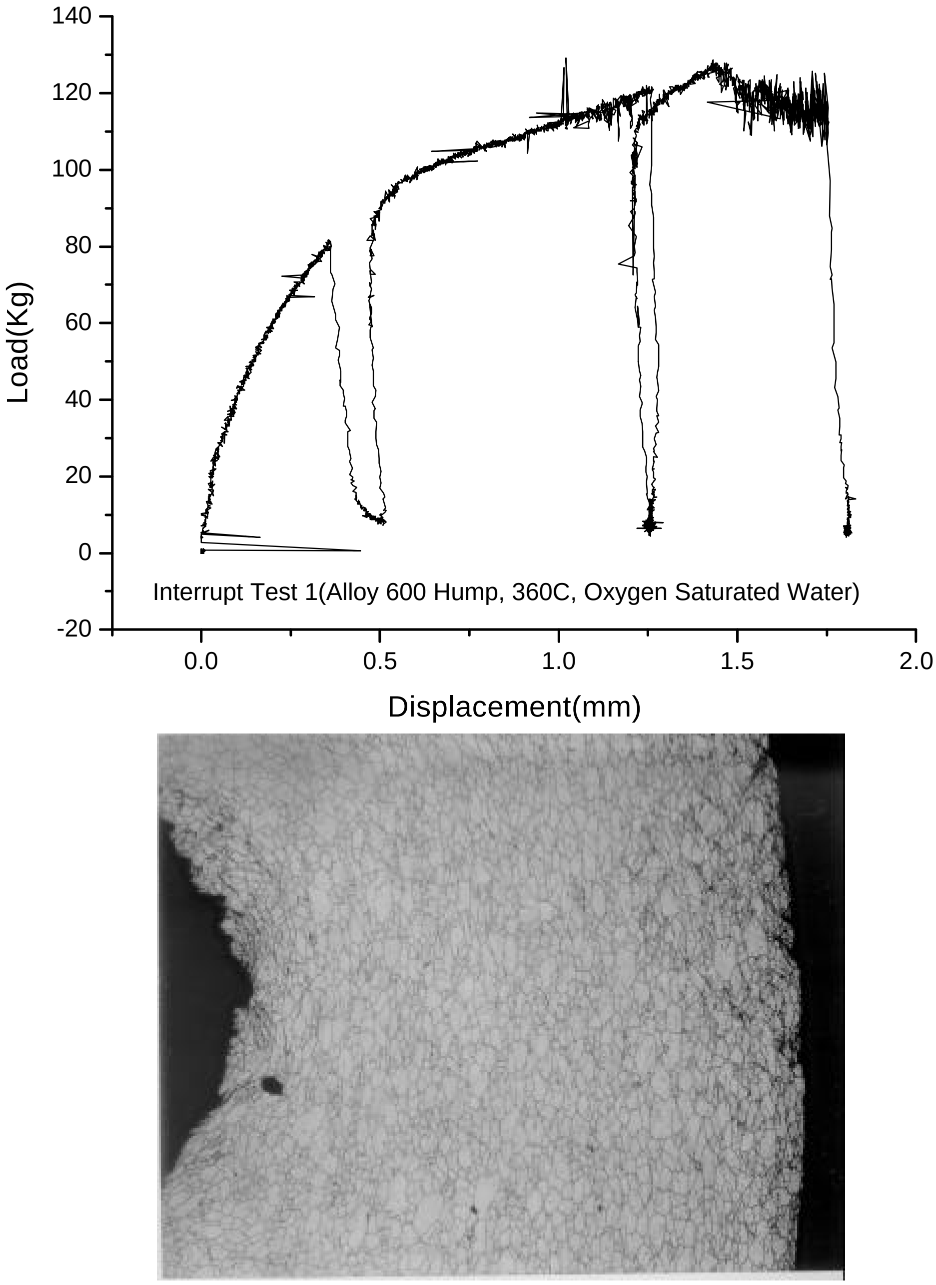
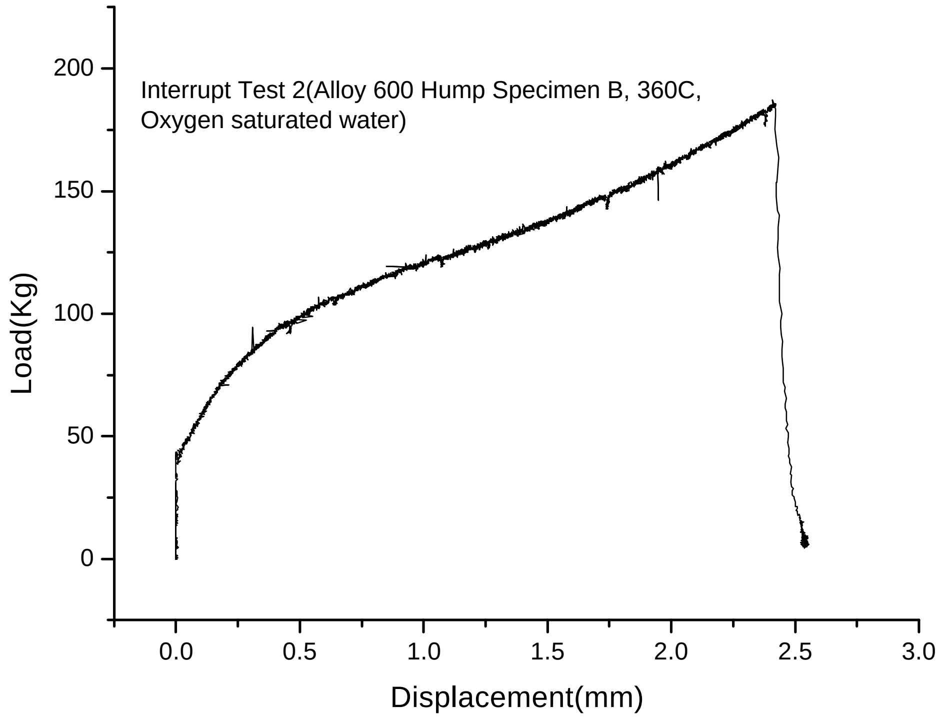


Fig. 5 Microstructure of notch area and Load - displacemen curve after Interrupt test1 for observing the crack initiation in hump specimen



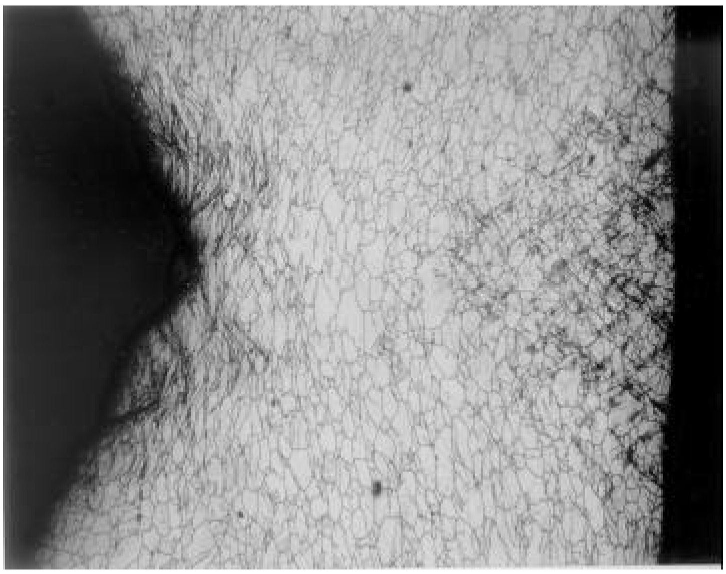


Fig. 6 Microstructure of notch area and Load - displacemen curve after Interrupt test2 for observing the crack initiation in hump specimen

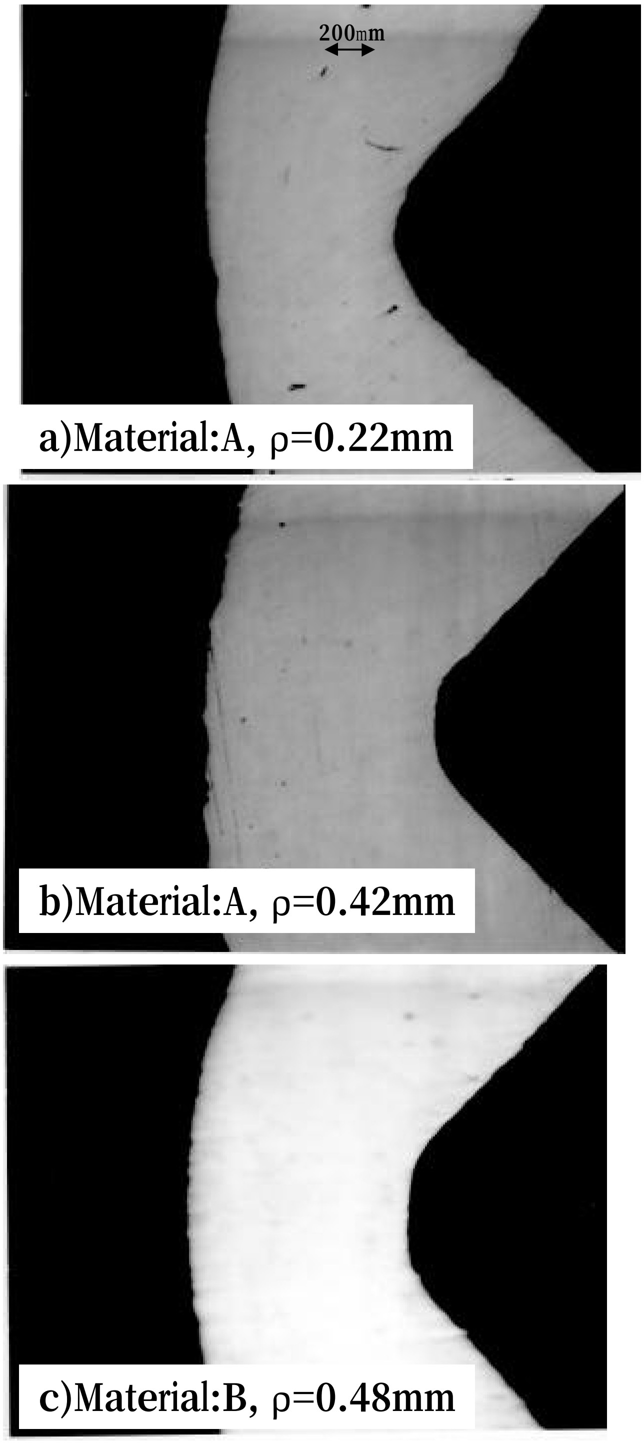


Fig. 7 Radius of curvature of hump test specimens

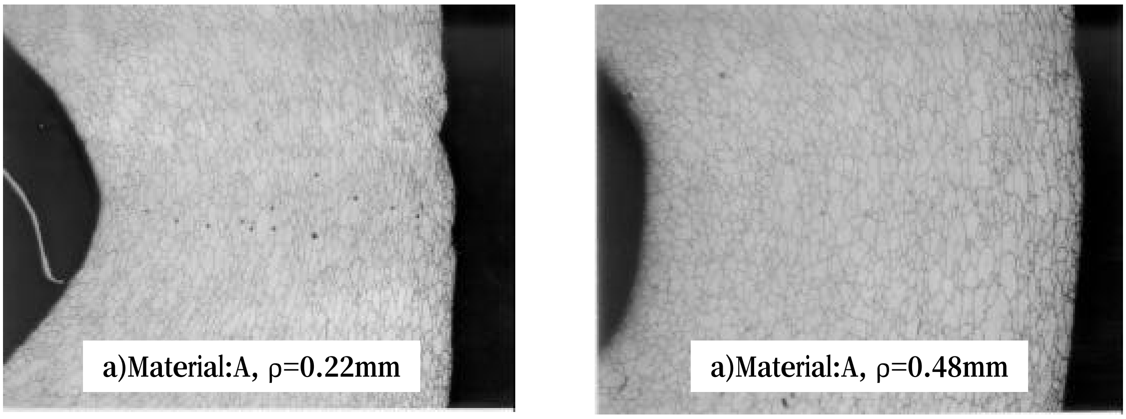


Fig. 8. Shape of deformation of grain after bending of hump specimen

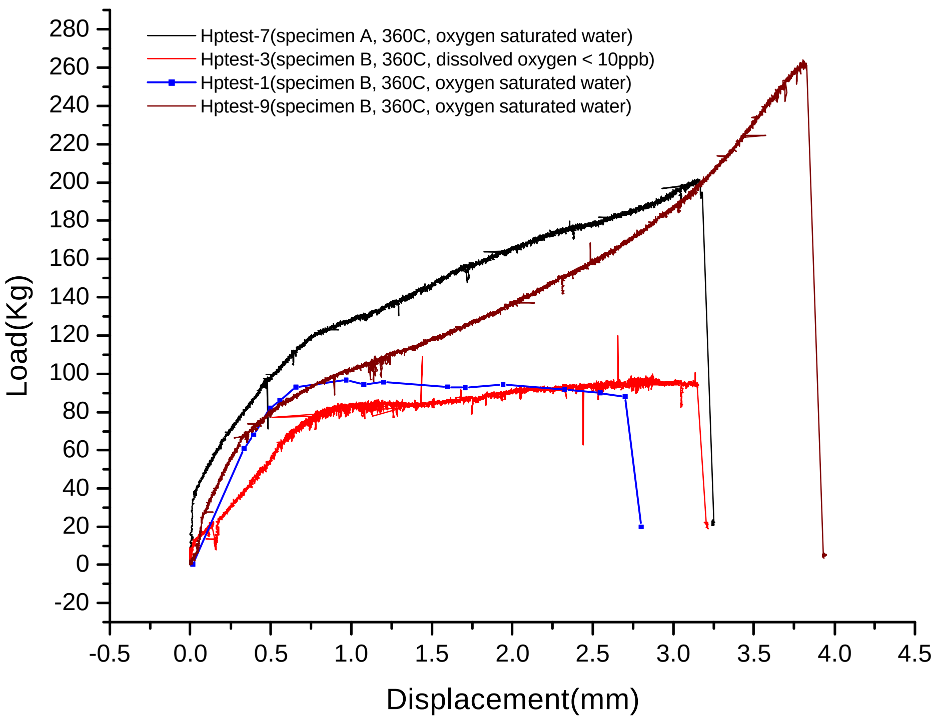


Fig. 9. Load-deformation curve of hump tests(hptest-1, 3, 7, 9)

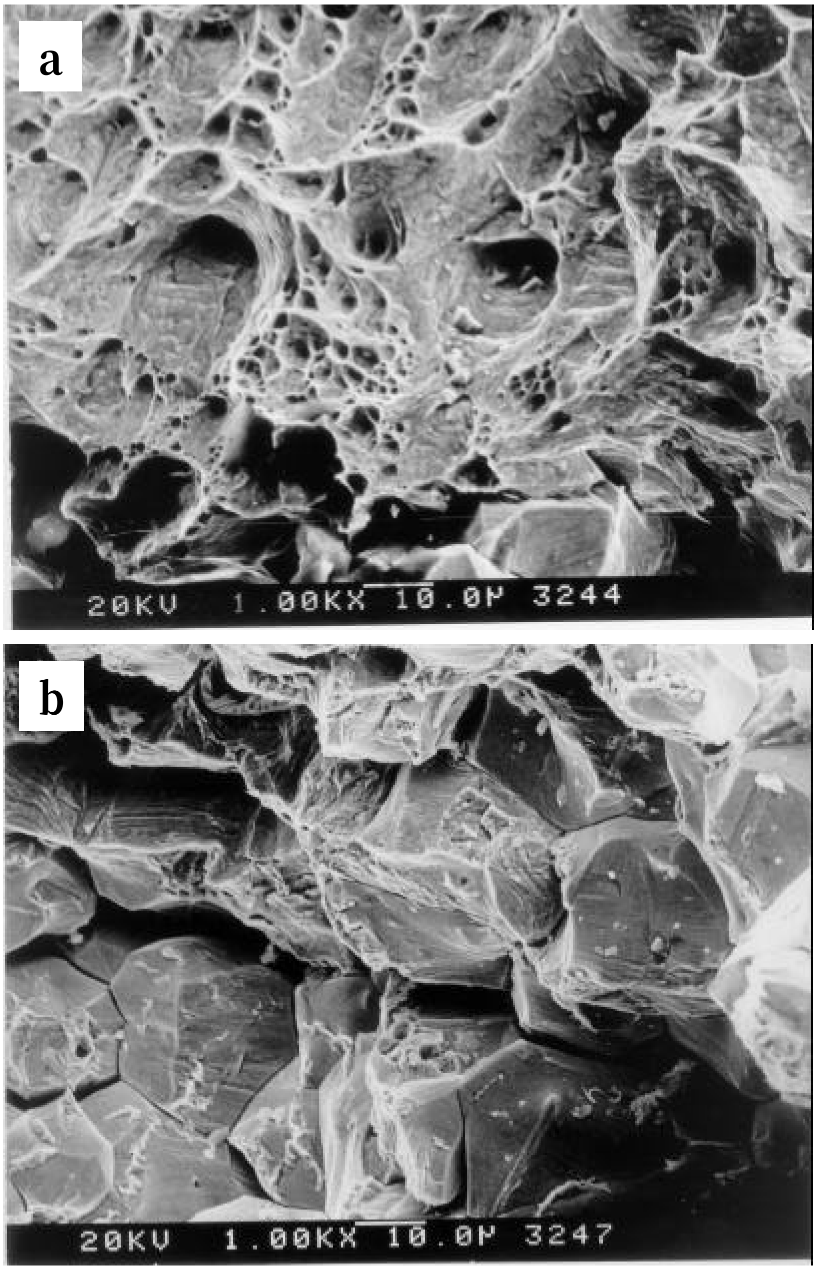


Fig. 10. Fracture surface of hptest-7 which show mixed mode of fracture (a)ductile and b)brittle)