

'97 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

DCPD법에 의한 316LN 스테인레스강의 고온 피로균열진전특성

맹완영, 남호윤, 강영환, 조만*, 김문환**, 권혁무**, 남태운***

*한국원자력연구소, **충남대학교, ***한양대학교

요 약

액체금속로는 고온 하중 효과(피로, 크립, 크립-피로)를 고려한 내열용력설계가 중요하다. 최근에는 액금로 후보재료로서 종래의 스테인레스강에 질소를 첨가하여 고온 강도를 개량한 316LN 스테인레스강이 개발되었다. 본 연구에서는 액체금속로 재료의 가장 지배적인 손상 기구로 인식되고 있는 피로-크립 파손에 대한 설계자료를 확보하기 위해 DCPD(Direct Current Potential Drop)법에 의한 고온피로균열 측정 시스템을 개발하고 316L 및 스테인레스강인 316LN 스테인레스강에 대한 고온 피로균열진전시험을 수행하였다. 본 연구에 의해 개발된 피로균열진전속도 측정 시스템에 의하면 $25\mu\text{m}$ 이하의 분해능으로 균열길이를 측정할 수 있다. 한편 316L 스테인레스강에 질소를 적당량 첨가하면 상온에서 600°C 사이의 온도에서 피로균열진전에 대한 저항성이 증가하는 것을 확인하였다.

1. 연구배경

액체금속로는 21세기 주요한 잠재적 에너지원의 하나로 인식되고 있다. 국내에서는 '94년도에 액체금속로 원형로인 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor)의 개발에 착수하여 21세기 초에 건설 및 초기 임계 달성을 목표로 연구개발에 전력하고 있다. 액체금속로는 냉각재로 Na를 사용하기 때문에 경수로보다 높은 온도에서 운전되는데 통상 운전온도는 550°C 정도이다. 따라서 액체금속로의 설계시에는 경수에서 고려되지 않는 사용 재료에 대한 고온 하중 효과(피로, 크립, 크립-피로)를 고려한 내열용력설계가 중요하게 된다[1].

액체금속로에서 발생하는 크립-피로 현상은 그림 1에 예시되었다[2]. 그림은 액체금속로가 가동 중지 상태에서부터 정상 운전 상태로 변할 때 시간에 따른 Na와 로용기의 온도변화 및 그에 따른 로용기에 걸리는 열용력의 변화를 보였다. 액체금속로가 가동이 시작되어 시간 t_2 일 때 열용력이 최대가 되고 정상운전시에는 일정한 정상운전 열용력이 유지된다. 액체금속로의 가동 및 정지시에는 이와 같은 반복용력이 작용하게 되어 구조재료에 피로하중이 걸리게 된다.

액체금속로의 구조재료로는 일본의 몬슈로의 경우에는 304 스테인레스강이 주로 사용

되었고, 프랑스의 슈퍼 피닉스로는 316L 스테인레스강이 주로 사용되었다. 그러나 액체금속로의 실용화를 위한 경제성향상의 관점에서 보면 액체금속로의 고온화 및 기기의 구조 간소화가 필요하여 기존의 304 및 316 스테인레스강의 고유 특성을 유지하면서 우수한 고온강도를 갖는 재료의 개량하는 것이 요구된다. 최근에는 액금로 후보재료로서 종래의 스테인레스강에 질소를 첨가하여 고온 강도를 개량한 316LN 스테인레스강이 개발되었다[3-5]. 본 연구에서는 기존의 316L 스테인레스강 및 개량 스테인레스강인 316LN에 대한 고온 피로균열진전시험을 수행하여 피로-크립 파손에 대한 특성 자료를 확보하여 앞으로 KALIMER 설계의 자료의 활용될 예정이다.

2. 시험 방법

피로균열진전속도에 미치는 질소첨가의 영향을 평가하고자 316L 스테인레스강(0.04% N) 및 316LN 스테인레스강(0.14% N)의 피로균열진전속도를 측정하였다. 시험에 사용된 시편의 조성은 표 1에 보인바와 같다. 고온에서 피로균열의 길이를 측정하기 위해서 DCPD(Direct Current Potential Drop)법을 개발하였다. 피로균열 진전시험은 316L 및 316LN 두종류 재료를 CT시편 형태로 가공하여 상온, 300C, 600C의 온도에서 ASTM E647[6]의 절차에 의해 수행하였다. 한편 316LN의 고온 인장특성을 파악하기위해서 상온에서 600C 사이에서 인장시험을 수행하였다.

재료

표 1. 316L 및 316LN 스테인레스강 시편의 조성

Element (%)	C	Ni	Cr	Mn	P	S	Si	Mo	N
316L	0.020	11.21	17.38	1.86	0.027	0.0054	0.51	2.36	0.038
316LN	0.018	11.23	17.58	1.67	0.021	0.0008	0.46	2.79	0.14

시편은 표 1의 조성과 같은 316L 및 316LN 스테인레스강을 판재로 고온가공 후 어닐링된 상태의 재료를 사용하여 제작되었다. 시험편은 ASTM E647에 규정된 폭이 25mm 이고 두께 5mm인 CT시편을 사용하였다.

피로균열진전 시험 방법 및 장비

피로균열진전시험은 Instron사의 만능시험기를 사용하여 반복피로하중을 부과하였다. CT시편에 Precrack을 a값이 6.5mm 정도가 되도록 낸 다음, 80Kg~ 400Kg의 반복하중을 1Hz의 주파수로 부과하여 피로균열진전시험을 수행하였다. 본 연구에서는 피로균열진전 길이를 모니터링하는 기술로서 DCPD(Direct Current Potential Drop) 방법을 개발하여 활용하였다. DCPD에 의한 방법은 그림 2 및 그림 3에 보였다. 이 방법은 균열의 진전에 따른 시편의 단면적 감소와 그에 따른 시편의 저항증가 및 포텐셜 분포 변화를 감지하여 균열의 길이로 환산하는 것이다. 그림 2에 보인 바와 같이 직류전원공급장치를 사용하여 시편에 일정한 량의 전류(10A)가 흐르도록 조절하면서 균

열이 진전함에 따른 전압 변화를 고분해능($0.1\mu V$)의 전압측정장치를 사용하여 측정하고 이 전압변화를 균열길이로 환산하는 방법이다. 직류전원공급장치로 Keithley사의 228A Power Supply를 사용하고 전압측정장치로는 Keithley사의 2001A multimeter를 사용하였다. Data Acquisition S/W는 National Instrument사의 Labwindow/CVI Language를 이용하여 작성하였으며 그림 3에 보였다. 한편 하중 부과용 핀은 프라즈마 용사에 의해 알루미늄을 두께 $100\mu m$ 정도로 코팅하여 사용하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

피로균열길이 Calibration

피로균열진전시험 중 균열성장의 길이는 본 연구에 의해 개발된 방법에 의해 정밀하게 측정하는 것이 가능하였다. 실측 균열길이와 측정전압과의 관계를 그림 4에 보였다. 실선은 실측 균열길이 및 실측 전압을 근거로 균열길이와 전압사이의 관계를 회귀분석한 선이다. 이 선은 그림에서 보듯이 ASTM에 의해 제시된 균열길이 보정선과 정확히 일치한다. 이 그림의 데이터를 근거로하면 $25\mu m$ 정도의 오차범위에서 균열길이를 측정하는 것이 가능한 것으로 판단된다. 측정 전압 값은 시험편의 측정위치에 상당히 민감하므로 이 전압측정위치를 정확하게 제어하도록 유의하면 $10\mu m$ 이내의 오차 범위에서도 균열길이를 측정하는 것이 가능할 것으로 보인다. 이 방법은 성장균열비에 대한 전압상승비(즉 a/W 에 대한 V/V_0)의 비율이므로, 한번 보정곡선을 얻으면 시험편의 형태 및 전압측정위치가 동일할 때는 시험 온도, 시험 환경 및 시험 재질에 무관하게 사용할 수 있으므로 광범위하게 응용할 수 있다.

고온인장특성

고온 피로-크립 강도가 높으려면 재료의 크립파단강도 및 연성이 좋아야한다. 스테인레스강의 크립연성을 증가시키기 위해서는 탄소의 양을 줄여서 고온에서 입계 탄화물의 석출을 줄여야한다. 그러나 탄소의 양이 줄면 고용강화 효과가 감소하여 재료의 강도가 떨어지게된다. 그래서 종래에는 0.04%이상 정도의 탄소를 첨가하여 강도를 유지하였다. 그러나 최근에는 질소를 첨가하면 탄소를 첨가와 유사한 효과를 얻을 수 있음이 밝혀졌다. 그래서 탄소의 양을 되도록 줄이면서 질소를 적당량 첨가하여 연성을 떨어뜨리지 않으면서 고온강도를 향상시킨 316LN 스테인레스강이 개발되었다.

그림 5는 316LN 스테인레스강의 상온에서 $600^{\circ}C$ 까지의 응력-변형 관계 곡선이다. 이 응력-변형 곡선을 정리하여 그림 6 및 그림 7에 316L 및 316LN 스테인레스강의 온도에 따른 인장강도, 항복강도 및 연신률 변화를 비교하여 보였다. 그림 6을 보면 상온에서 $600^{\circ}C$ 사이의 온도에서 316LN 스테인레스강의 인장강도 및 항복강도가 316L에 비해 높다. 또한 그림 7을 보면 동일한 온도영역에서 연신률도 316LN 스테인레스강이 양호하며 특히 액체급속로 가동 온도영역인 $600^{\circ}C$ 영역에서는 큰 차이를 보인다. 이 시험 결과로 316LN 스테인레스강의 고온 연성 및 강도 증가를 확인할 수 있다.

고온 피로균열진전속도

그림 1에서 보인바와 같은 천이 상태의 열하중에 의한 피로하중이 재료에 작용하면 재료에 균열이 생성되어 성장하게 된다. 두꺼운 구조물의 경우 피로균열의 진전에 걸리는 시간은 피로 수명의 상당 부분을 차지하게 되므로 구조물의 건전성 확보에 필수적인 자료가 된다.

316LN 스테인레스강은 316L 스테인레스강에 비해 그림 7에 보인 바와 같이 모든 시험 온도에서 피로균열진전 속도가 작다. 그리고 상온에서는 316LN 스테인레스강의 피로균열진전에 대한 임계 응력확대계수(ΔK_{th})도 316L 스테인레스강에 비해 상당히 큰 것으로 보인다. 실제 시험시에도 ΔK 가 15Mpa(m)^{1/2}정도에서 316L의 경우는 1~2일 정도면 균열의 진전이 시작되나 316LN의 경우는 1주일 이상 관측할 수 있는 균열이 발생되지 않았다. 한편, 316L 및 316LN 스테인레스강의 피로균열진전속도는 온도가 증가함에 따라 모두 증가한다.

316LN 및 316L 스테인레스강의 피로균열진전 저항성 차이는 질소첨가에 의한 그림 6의 고온 강도의 향상 기구와 관련되는 것으로 보이나 추가 연구가 필요하다.

4. 결론

- 1) 고온에서 DCPD 방법에 의해 금속의 피로균열진전속도를 측정하는 시스템을 개발하였다. 이 시스템에 의하면 25 μ m이하의 분해능을 가지고 균열길이를 측정할 수 있다.
- 2) 상온 및 600℃에서 316LN 스테인레스강은 316L 스테인레스강에 비해 피로균열진전에 대한 저항성이 크다.

5. 참고문헌

- [1] 岩田耕司, “高速爐の高溫構造設計よび解析技術”, 原子力工業, 第30巻, 第8号, 1984, p. 17~27
- [2] 和田雄作, “高温 ナトリウム中の熱過度強度に優れた構造材料の開発-高速爐構造用 SUS316の開発の現状-”, 動研技報, No. 80, 1991. 12
- [3] M. Valsan, D. Sundararaman, K. Bhanu Sankara Rao, and S. L. Mannan, Metallurgical and Materials Transactions:A, Vol. 26A, May 1995, p.1207
- [4] J. O. Nilsson, Fatigue eng. Mater. Struct., 1984, Vol. 7 (1), p.55-64
- [5] J. O. Nilsson, Scripta Metall., 1983, Vol. 6 (4), p. 211-5
- [6] ASTM E 647 - 95, Annual Book of ASTM Standards

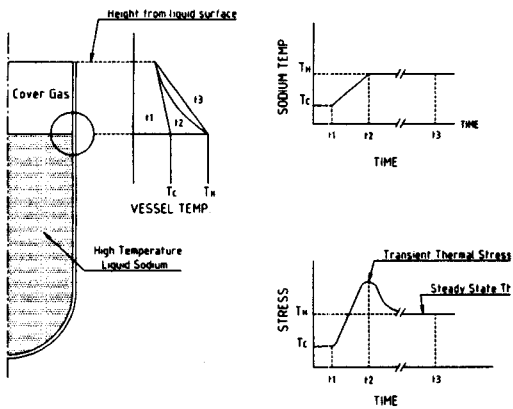


그림1. 액체금속로의 천이상태에서 발생하는 열응력 피로

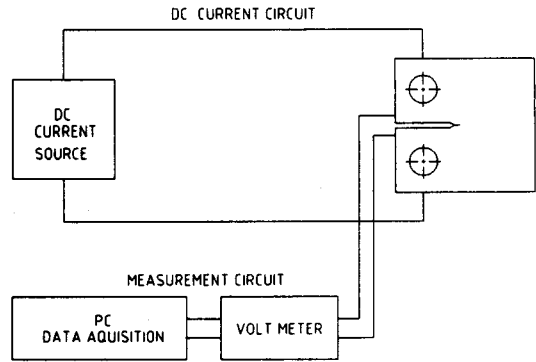


그림2. DCPD 에 의한 균열진전 측정장치

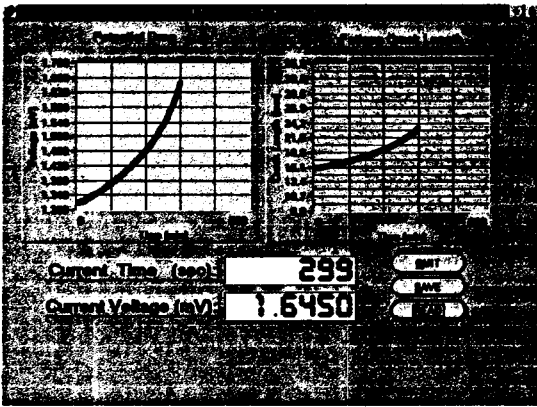


그림3. DCPD 에 의한 균열진전 모니터링 시스템 인터페이스

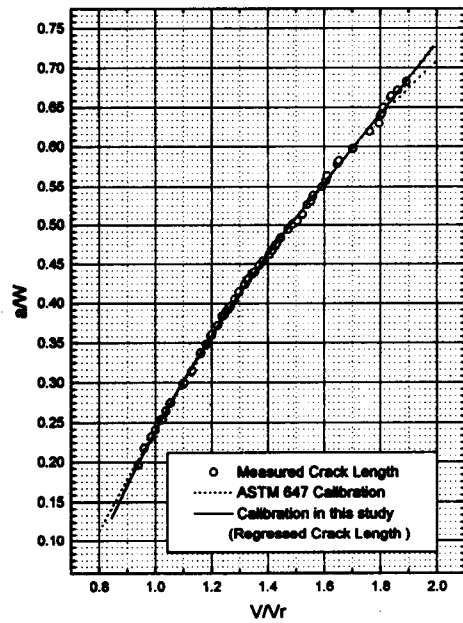


그림4. 실측 균열길이 및 보정선

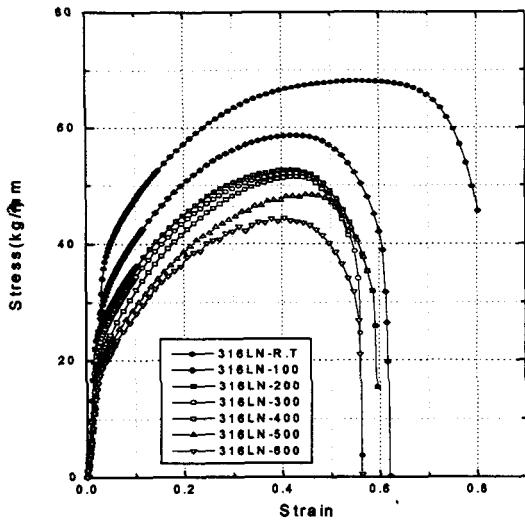


그림5. 316 LN 스테인레스강의
응력-변형 곡선

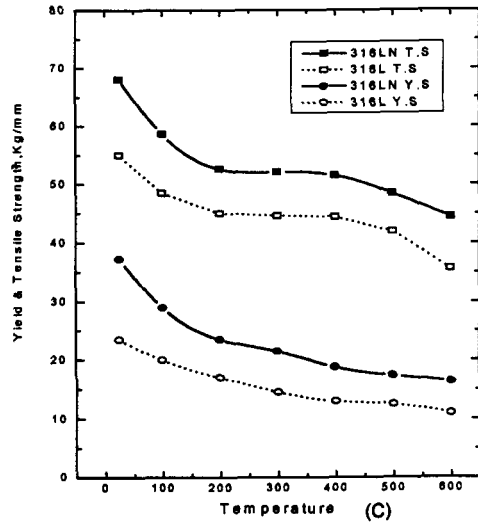


그림6. 316 LN 스테인레스강의
온도에 따른 인장, 항복 강도

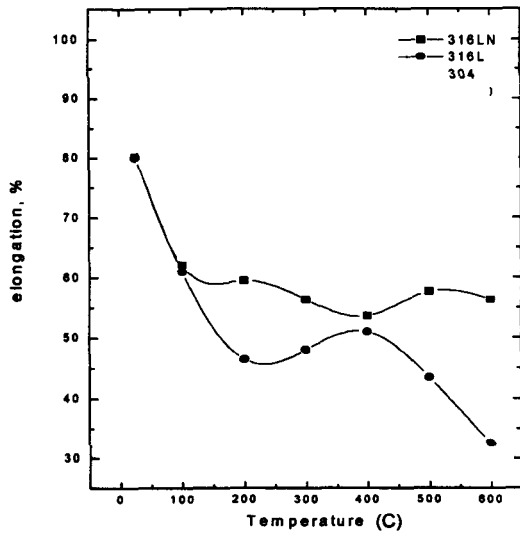


그림7. 316 LN 스테인레스강의
온도에 따른 연신율 변화

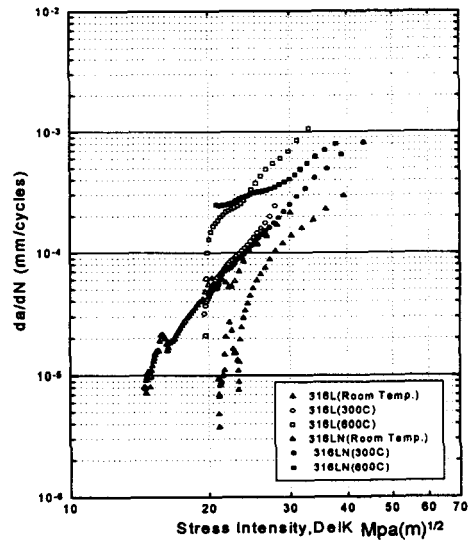


그림8. 316L 및 316LN 스테인레스강의
온도에 따른 피로균열진전속도