

발전설비용 2.25Cr-1Mo강의 열응력과 열피로현상

우병철*, 김봉서, 변우봉, 이희용

한국전기연구소 전기재료연구부 도전재료연구팀

Thermal fatigue & stress of 2.25Cr-1Mo steel for power plants

B.C. Woo*, H.W. Lee, W.B. Byun, B.S. Kim

Div. of electric materials, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

The objective of this study is to provide a life prediction of isothermal fatigue using strain partitioning of high temp. steel for power plants. The experimental system was composed of Instron 8501, induction heating system, extensometer and pyrometer with hydraulic power system

1. 서 론

일반적으로 상온에서 온도가 증가하면 재료는 그 크기가 변하며, 몇가지 예외가 있기는 하나 거의 모든 재료에서 크기가 증가한다. 이러한 것을 열팽창이라 하며, 재료마다 각각 크기 변화의 정도가 다르며, 이것은 각각의 열팽창계수가 다르기 때문이다.

그러나 온도에 따라 재료의 치수가 변하는 이러한 특성은 대부분의 경우 좋지 않게 작용한다. 즉 정밀기계장치의 정밀도를 떨어뜨리거나 또는 구조물의 붕괴를 초래할 수도 있다.

재료가 어떠한 영향에 의해 온도가 변하게 되는 것을 '열응력(thermal stress)'을 받는다고 말하기도 한다. 이에 반하여 외부로부터 인장 또는 압축등의 힘을 받는 것에 의해서도 재료의 치수가 변화되며 이러한 것을 '기계적응력(mechanical stress)'에 의한 변화라고 한다.

한편 이러한 응력들이 정적인 상태에서 가해지는 경우도 있으나 동적인 혹은 반복적인 응력이 가해지는 경우도 상당히 많다. 응력이 반복적으로 가해질때 이것을 '피로(fatigue)' 라 하며 이러한 반복적 응력에 의해 재료가 파괴가 되었을 때 '피로파괴'가 일어났다고 한다. 또는 열응력에 의한 경우에 '열피로에 의한 파괴'라고 한다.

이렇듯 재료가 응력에 의해 열화되거나 또는, 파괴가 일어나게 되므로 구조물의 설계, 제작시에 이러한 점을 충분히 고려하여 재료를 선정하여야 할 것이다.

발전 플랜트의 효율 향상을 위하여 초임계압은 물론 초초임계압(ultra super critical pressure) 발전 플랜트의 상업화가 가시화 되고 있어 사용 증기의 최고온도도 현재의 538℃에서 593℃까지 올려 사용할 예정이다. 이러한 초고온 상태에서 신뢰성을 유지할 수 있는 대형 터빈 로터의 재료로서는 593℃용의 12Cr의 단조강을 개발하고 있다. 터빈 로터에 발생하는 열응력은 기동, 정지 및 부하변도시 응력집중부에 열응력이 작용한다. 이와같은 열응력에 의하여 재료내에 피로손상과 크리프 손상 뿐만아니라 피로-크리프의 상호작용에 의한 손상을 축적시켜 재료의 수명을 저하시키므로

수명예측이 필요하게 되었다.

2. 발전설비용 고온재료의 특성

가. 터빈 로타

터빈 로타 표면에서는 운전과 정지에 의한 열응력에 의해 고압 1단부의 heat groove부분에서 열피로 균열이 빈번히 발생되며 보아부분에서는 표면과 달리 이 부분에 결함이 많이 존재할 확율이 높고 응력 또한 열응력 이외에 원심 응력등이 추가로 가해지므로 손상이 심하게 발생된다. 보아부분에서 손상이 가장 심한 부위는 고압일단의 고온부위라고 알려져 있다.

고온에서의 파괴인성치는 실온에서의 파괴인성치에 비해 상당히 높은 값을 나타내므로 동일 응력이 가해질 경우 임계균열의 한계치는 온도가 증가할수록 더 높아진다. 한편 정상운전중에 로타내의 미소균열이 성장하여 냉기동시의 임계균열의 크기를 초과한 상태로 존재하여도 정상운전시의 임계균열의 크기는 냉기동시의 임계균열에 비해 상당히 크므로 급속파괴가 발생되지 않는다. 그리고 운용과 정지로 터빈이 냉각되는 동안에도 로타의 온도는 상당히 높아 임계균열 역시 상당히 크며 또한 터빈의 냉각시 보아부분에는 압축응력이 발생하므로 급속파괴의 위험성이 없다. 그러나 이러한 균열을 내포하고 있는 터빈이 장시간 정지되었다가 재기동 될 때 매우 위험한 상황이 발생된다. 즉 냉기동시 로타 내부의 온도 및 응력분포를 살펴보면 로타 표면은 온도가 높고 압축응력의 상태가 된다. 반대로 로타내부는 온도가 표면보다 현저하게 낮은 반면 높은 인장응력이 발생된다. 따라서 이미 로타내부에 냉기동시의 임계균열 이상 크기의 균열이 존재하는 경우 보아 부분에 발생한 인장응력에 의해 급격한 파괴가 발생할 가능성이 대단히 높아진다.

나. 보일러 헤더

보일러의 헤더부분에서의 사고 유형을 알아보면 크리프에 의한 스티브 튜브와 헤더 사이의 용접부의 균열생성, 열피로에 의한 리가먼트 균열이 주요 손상 형태임을 나타내고 있다. 따라서 균열전파의 측면에서 보면 스티브 튜브의 구멍에서 생성된 균열이 리가먼트 균열로 성장하므로 이 두 형태의 손상은 동일 양상으로 취급될 수 있다. 그 이외에 노즐의 구성부에서의 균열생성도 빈번히 관찰되는 부위의 하나이다. 그리고 보일러의 헤더부분에서의 온도분포는 일반적으로 축방향으로 상당한 차이를 나타내며 특히 끝부분에서는 설계온도보다 약 20℃정도 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 온도상승에 의해 크리프 손상이 더 심하게 발생할 것이

예상된다.

다. 주 증기관

주 증기관에서의 손상은 곡고나부(Bend)와 Y-piece의 용접부에서 크리프에 의한 손상이 대부분이다. 주 증기관에서의 크리프는 다른 부위와 달리 두께 방향의 열응력보다는 파이프 축방향의 열구속 응력(Pipe system load)에 의해 주로 발생되며 열응력집중 부위인 곡관부, Y-piece 등에 발생된다.

3. 발전설비용 구조물의 수명 측정

가. 피로균열

균열은 현미경으로 관찰할 수 있는 미세균열로부터 우리 육안으로 관찰이 가능한 거시 균열에 이르기까지 그 크기가 다양하다. 따라서 공학적인 의미에서의 균열을 정의할 필요가 있다. 일반적으로 균열은 흔히 비파괴 시험에서 탐지할 수 있는 정도의 크기 즉 0.5mm 이상을 공학적인 의미에서 균열로 정의한다. 그러면 균로 취급되는 재료의 결함은 어떻게 생성되며 전파되는 그 과정에 대해서 살펴보고자 한다.

먼저 재료의 내부에 존재하는 비금속 개재물, 미세기공 등은 균열이 쉽게 생성되는 장소이므로 일종의 균열로 간주되며 소재 제조공정에서 이들의 생성은 거의 피할 수 없는 과정이다.

나. 균열측정법

균열의 측정 방법에는 여러 가지가 있다. 첫째 이동할 수 있는 광학현미경을 사용하여 표면에서의 균열의 전파속도를 측정하는 법이다. 둘째는 파면상에 나타난 striation의 간격과 개수를 측정하여 전파속도를 측정하는 방법이다. 셋째로 최근 많이 사용되고 있는 DC 또는 AC 전압의 강하를 사용하는 방법이다. 그리고 넷째로는 고온용 COD gage를 사용하여 균열의 전파속도를 측정하는 방법이 있다. 이들 방법중 이동 광학 현미경을 사용하는 방법이 가장 확실한 것 같지만 균열전파 초기에는 균열의 크기가 아주 작을 뿐만 아니라 균열전파에 앞서 소성 변형이 발생되기 때문에 균열의 길이를 정확히 측정한다는 것은 상당한 숙련을 필요로 한다. 특히 고온에서는 상온과 달리 표면의 산화로 균열의 관찰이 거의 불가능한 경우가 많다. 파면상의 striation의 측정 역시 상당한 시간과 노력이 필요하다. 이 방법에 의해 균열을 측정할 경우 표면 사화에 인한 striation의 관찰이 용이하지 않다. 고온 COD gage 법은 측정기기의 가격이 상당히 비싸며 설치상의 애로점이 많다. AC 전압 강하법은 AC가 표면으로 흐르므로 DV에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있으나 아직 충분히 실용화되지 않았으며 연구 개발이 진행되고 있는 단계라고 한다. 전압강하법은 1940년 독일에서 처음으로 대형 구조물의 결함을 찾는 데 사용된 이후 균열측정에 효과적인 방법의 하나로 인식되어 왔다. 재료의 파단에 관련하여 Barnett가 처음으로 이 방법을 사용하여 균열전파속도를 측정할 이래 여러 나라에서 연구 개발이 진행되어 피로, 크립, 파괴역학 등에 성공적으로 응용되고 있다.

4. 2.25Cr-1Mo강의 Isothermal 특성

가. 고온 인장특성

2.25Cr-1Mo 강은 보일러의 튜브재료, 배관용, 터빈 로터용 재료 등에서 많이 사용되는 재료로서 널리 알려져 있다. 본 시험에서 사용된 재료는 터빈 로터용으로 제작된 재료 일부를 절취한 다음 로터의 길이방향으로 시험편을 가공하여 각종 시험에서 이용하였으며 인장시험 및 열분석에서는 가장 중심에서 가까운 재료를 이용하여 시험하였다.

다음 그림은 시험편의 형상과 인장특성을 나타내었다.

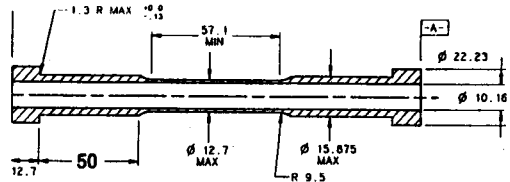


그림 1 인장 및 TMF특성 분석용 시험편의 형상

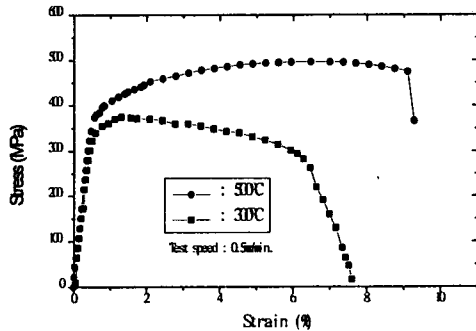


그림 2 2.25Cr1Mo강의 고온 인장특성

나. Isothermal fatigue 특성

상온에서와 달리 500°C에서는 온도의 변화에 따른 strain 변화가 굉장히 크게 나타나 정확한 온도 control이 필요함을 알 수 있었다. 이는 그림부위의 냉각수의 흐름과도 영향이 있었으며 TMF장비 주의의 차단부의 형상에 따라서도 영향이 있었다.

또한 온도 조절부의 PID값의 조정에 따라 영향이 있었으며 이러한 값에 따라 on/off에 의한 미세한 온도의 영향에 따라 유도 가열되는 부위의 편차에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이러한 온도의 편차에 따라서 같은 온도에서 같은 strain 상태에서도 하중의 변화가 발생하여 시험시의 주위여건이 중요하다는 것을 알았다.

다음은 이러한 온도변화에서 측정된 내용중 급격한 차이를 보이는 요소를 제외한 Isothermal 특성을 나타내었다.

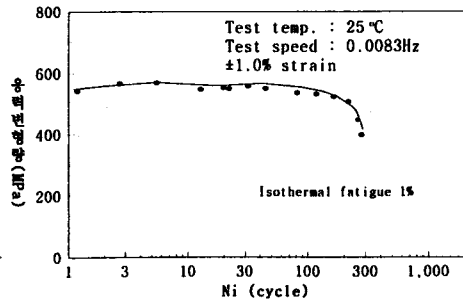


그림 3 2.25Cr-1Mo의 Isothermal 특성 (500°C)

본 시험은 500°C에서 10분간 유지한 후 strain control조건에서 2분에 한사이클조건이고 ±1%의 변형을 조건에서 시험하였다.

본 시험은 500°C에서 10분간 유지한 다음 strain control조건에서 2분에 한사이클조건이고 ±1%의 변형을 조건에서 시험하였다.

본 그림에서 알수 있듯이 응력변형량은 변형률반복수에 따라 다소 scatter band를 형성하였으나 fitting한 결과 거의 평행선을 유지하다가 급격히 응력변형량이 떨어지는 특성을 나타내고 있다. 이러한 성질은 연질용 재료에서 많이 나타나며 전형적인 strain softing현상이다.

이러한 현상은 다른 연구자의 연구 결과에 따르면 변형을 변형량이 ±0.1-±2%까지의 연구에서도 마찬가지로의 결과를 가져왔으며 이러한 특성으로부터 탄성과 소성간의 변형율은 분석하여 수명예측을 하고 있지만 Paris식과 같은 완전한 직성식으로는 정리되지 않은 상태이다.

다. 열분석결과 및 EDX 분석

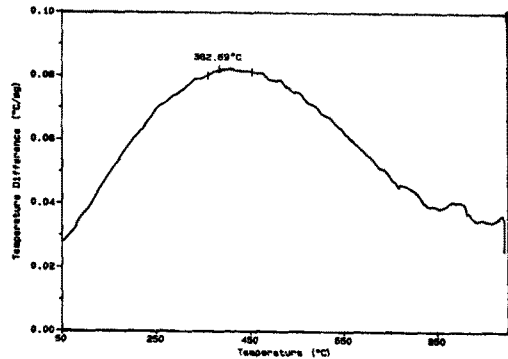


그림 4 2.25Cr-1Mo강의 DTA분석 결과

일반적으로 많이 사용되고 있는 500-600°C부근에서의 특성을 알기 위해서 DTA(Differential temperature analysis)분석을 하였으며 사용온도를 약 900°C로 설정할 경우 큰 물리적인 변화가 없음을 확인하였다.

또한 물리적인 조성을 알아보기 위해 EDX분석을하여 그 조성을 확인하였으며 개략적인 조성만 확인하였다.

5. 304 Stainless steel의 Isothermal 특성

고속증식형 원자로나 일반적인 화력발전소의 고온기기중 고열과 직접적으로 연결된 부위는 고온특성이 우수한 304 stainless강이 널리사용되고 있으며 이에 대한 인장특성과 Isothermal 특성을 분석하였다.

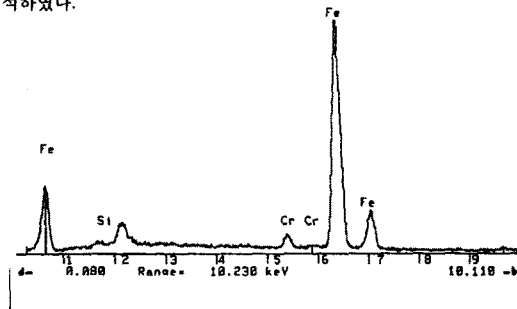


그림 5 2.25Cr-1Mo강의 EDX분석 결과

다음 그림은 상온에서의 인장특성을 나타내고 있으며 상온에서의 Isothermal fatigue시험 결과를 그 다음 그림에 나타내었다.

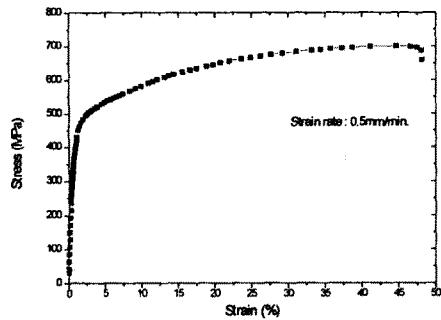


그림 6 304 stainless steel의 상온 인장특성

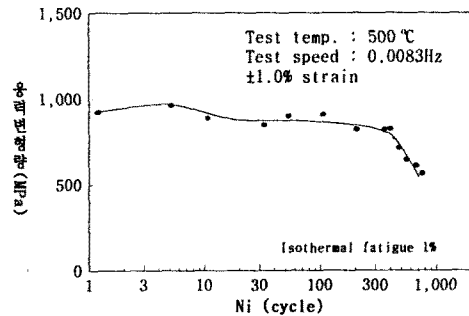


그림 7 304 stainless steel의 Isothermal특성

6. 결론

발전설비용 고온재인 2.25Cr-1Mo강 및 고온용 재료에 대한 특성 분석과 Isothermal 피로시험에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 2.25Cr-1Mo강의 인장시험결과 300°C, 500°C에서 최대강도 500MPa, 370MPa이며 연신율은 7.6, 9.3%의 결과를 얻었다.
2. 2.25Cr-1Mo강에 대하여 500°C에서 Isothermal fatigue시험에서 ±1%의 시험조건에서 응력변화량은 약 900-1000MPa이며 수명은 약 750회이었다.

참고문헌

1. Constraint effect in thermo-mechanical thermal fatigue by isothermal fatigue testing, Sehitoglu, H., Symp. on Mechanical behavior of materials, p.257, 1985
2. 1Cr-0.5Mo 관강의 열피로 거동에 관한 연구, 하정수, 용장우, 고승기의, 1992 기계학회 춘계학술대회 논문집, p.29, 1992