

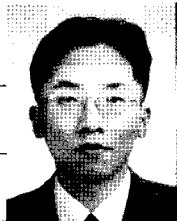
잔류응력 완화기구 및 이의 정량적 평가



강성보

(KIMM 구조시스템연구부)

- '94. 2 대전산업대 기계공학과(학사)
- '97. 2 충남대학교 기계공학과(석사)
- '00. 8 충남대학교 기계공학과(박사)
- '00 - 현재 한국기계연구원 위촉연구원



한승호

(KIMM 구조시스템연구부)

- '89. 2 한양대학교 기계설계(학사)
- '91. 2 한양대학교 기계설계(석사)
- '96. 9 독)아헨공대 기계공학(박사)
- '96 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



신병천

(KIMM 구조시스템연구부)

- '77. 2 부산대학교 조선공학(학사)
- '82. 2 부산대학교 조선·해양(석사)
- '90. 2 부산대학교 조선·해양(박사)
- '82 - 현재 한국기계연구원 책임연구원(부장)

1. 서론

잔류응력은 용접, 기계가공, 소성가공 등의 제조과정뿐만 아니라 부품의 사용과정에서도 발생하며 정하중 또는 피로하중과 같은 외부하중과 중첩되어 부품의 변형과 파괴에 영향을 미친다. 이러한 이유로 잔류응력 완화의 필요성이 점차 대두되었으며, 금속뿐만 아니라 세라믹, 유리, 복합재료, 반도체, 박막구조에 이르기까지 그 대상은 다양하다.^[1] 잔류응력을 완화시키는 방법으로 풀림 또는 뜨임과 같은 열처리와 기계적인 하중을 가하는 방법 등이 있다.

잔류응력은 부품의 수명 동안에 지속적으로 완화될 수도 있고, 전혀 다른 형태로 변화되기도 한다. 예를 들어 피로나 크립하중을 받는 경우 초기의 탄성 잔류응력을 재분포시키며, 부품의 수명동안 잔류응력이 점진적으로 완화된다.^[2] 특히, 용접부에 분포하는 잔류응력은 실제적으로 부재의 강도와 수명에 지대한 영향을 미친다. 따라서 용접구조물에 외부하중이 가해질 때 잔류응력의 안정성, 부분적 완화 및 재분포 현상을 파악하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

본고에서는 잔류응력 완화에 미치는 여러 요소의 복잡한 상호작용과 응력상태, 하중조건, 재료와 사용환경 등의 영향인자에 대한 연구내용과 기계적하중을 받는 부재의 잔류응력 완화를 정량적으로 평가하는 기법에 대해 설명하고자 한다.

2. 잔류응력 완화의 원리 및 연구동향

2.1 열처리에 의한 응력완화

열처리에 의한 응력완화는 풀림, 뜨임과 같은 공정을 통하는 것이 일반적이다. 이 공정은 재료를 가열한 다음, 일정시간 동안 적당한 온도로 유지하면서 부품을 균일하게 가열하고 서냉을 시키는 순서를 따른다. 이와 같은 열처리는 용접부에 분포하는 높은 인장잔류응력을 완화시킬 수 있고, 용접금속 및 열영향부의 야금학적 특성을 변화시켜 파괴인성을 개선시킬 수 있다. 열처리가 수행되는 온도 범위는 재료의 재결정 온도역을 기준으로 정할 수 있으며, 이보다 훨씬 낮은 온도 범위에서도 열처리가 실시된다. 또한 극저온 영역에서도 잔류응력의 완화가 가능하다.

2.1.1 재결정 온도 범위

재료의 재결정온도 근처에서 수시간 가열한 다음 실온까지 서냉시키면 기계가공으로 인한 소성부 또는 용접작업으로 발생하는 거시적 잔류응력을 거의 모두 완화시킬 수 있다. 그러나 전위(dislocation) 또는 상(phase) 간의 서로 다른 열팽창계수에 의해 새로운 미소 잔류응력이 형성되기 때문에 이들까지 완전히 제거하기는 어렵다.^[1]

재결정 온도 영역에서 잔류응력 완화 현상은 사용 재료의 항복강도가 잔류응력 수준까지 감소되기 때문이다. 항복응력의 감소로 인한 소성유동은 전위의 열활성화를 통해 탄성스트레인 형태로 재료 내부에 존재하는 잔류응력을 해방시킨다. 재결정 온도 영역에서는 거시적 또는 미시적 잔류응력을 상당히 감소시킬 수 있지만, 재료의 고용풀림 온도를 초과하게 되어 항복 또는 인장응력과 같은 기계적성질을 감소시키는 단점을 갖고 있다.

재결정 온도 영역에서 열처리시 가열 및 냉각에 있어 열적구배를 주는 경우 잔류응력 완화는

변화된다. Throop 등^[3]은 일정 가열냉각보다는 열구배 풀림 조건에서 응력완화가 빨라진다는 것을 보여주고 있다. 그리고 Thompson 등^[4]은 사출성형 플라스틱의 인장잔류응력 완화에서 열구배 풀림이 표면에 인장잔류응력을 남긴다는 것을 발견하였다.

2.1.2 재결정 온도 이하

재결정 온도보다 훨씬 낮은 영역에서의 응력완화는 주로 확산크립, 시효와 석출 등에 의한 결정립의 체적변화 및 전위의 열적 미끄러짐(thermal glide)에 기인한다.

확산크립은 결정립의 수축 및 팽창으로 인장 및 압축 잔류응력의 상쇄 영역(counterbalancing regions)을 만들어 이들을 재분포시킨다. 시효와 석출도 체적변화를 유발하며 탄성응력 형태의 잔류응력을 완화시킬 수 있다. Brown 등^[5]에 의하면, 텀퍼링에 의한 경화강의 응력완화는 마르텐사이트 기지에서 탄화물 입자의 석출 동안 국부 체적 변화로 기인된다고 하였다.

전위의 열적 미끄러짐에 의한 잔류응력 완화 기구는 미소 소성변형으로, 시간과 온도에 따라 잔류응력이 크게 완화되나 완전한 응력완화는 기대하기 힘들다.

재결정 온도 이하에서는 항복강도와 같은 기계적 성질의 큰 변화 없이 잔류응력의 완화가 가능한 장점을 갖고 있다. 잔류응력의 완화 정도는 온도와 시간에 크게 의존하므로 적절한 온도와 시간을 선택해야 한다. 이 영역의 온도에서는 고온에 비해 잔류응력 완화정도가 작기 때문에 상대적으로 풀림시간의 증가가 필수적이다. 온도 유지시간은 크립과 항복강도에 미치는 온도의 영향으로 평가할 수 있다.

그림 1^[6]은 연강의 잔류응력 완화에 미치는 풀림시간의 영향을 나타낸다. 500°C 영역에서는 잔류응력 완화가 짧은 시간 동안 모두 일어나는데 비하여 이보다 낮은 온도역에서는 풀림시간이 길어질수록 잔류응력 완화가 점진적으로 이루어

진다. Potter 등^[7]에 의하면 A7075-T6의 슛피닝에 의한 표면 압축응력 완화시 107°C의 낮은 온도에서 20시간 열처리하여 표면 압축 잔류응력이 감소한다고 한다.

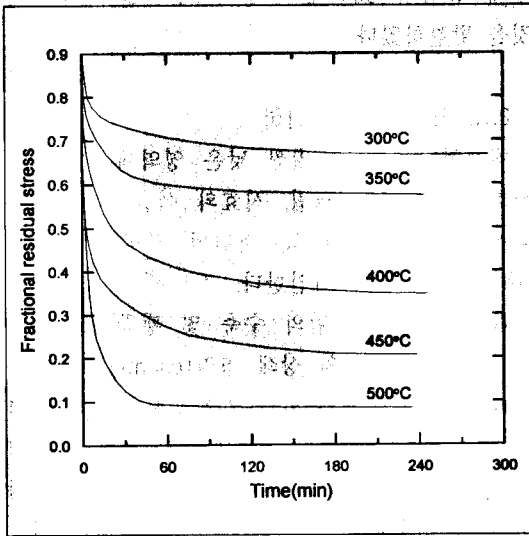


그림 1. Effect of annealing time on the fractional residual stress of mild steel^[6]

열처리에 의한 응력완화는 재료상태와 응력발생 요인에 따라 크게 달라진다. 그림 2^[8]는 다양한 잔류응력 상태를 갖는 탄소강을 1시간 동안 풀림한 후 남아있는 표면잔류응력을 측정할 일례이다. 여기서 $T(K)/T_m(K)$ 는 용융점 절대온도 대비 풀림온도, $\sigma_m(T)/\sigma_m(293K)$ 는 상대 잔류응력비(초기잔류응력 대비 풀림 후의 잔류응력)를 나타낸다. 풀림온도가 용융점 절대온도의 50%인 경우, 응력발생 요인에 관계 없이 잔류응력은 크게 혹은 거의 완화된다. 그러나 이보다 훨씬 낮은 온도 범위에서 인장변형된(normalized and tensile strained) 강재에 비해 연삭가공된(normalized and ground) 것의 잔류응력 완화율이 크고, 이 보다는 경화된(hardened) 강재의 잔류응력 완화율이 상대적으로 크다. 또한 상대잔류응력비 50%를 달성하기 위해서는 인장 변형된 것과 경화된 강재 사이에 150°C 이상의 온도차가 존재한다.

강에서 미소 잔류응력은 이보다 더 높은 온도 수준에서 효과적으로 완화되며, 인장변형된 강재의 미소 잔류응력을 50% 완화시키기 위해서는 거시적 잔류응력의 경우(그림 2)보다 100°C 정도 더 높은 온도가 요구되는 것으로 알려져 있다.^[8]

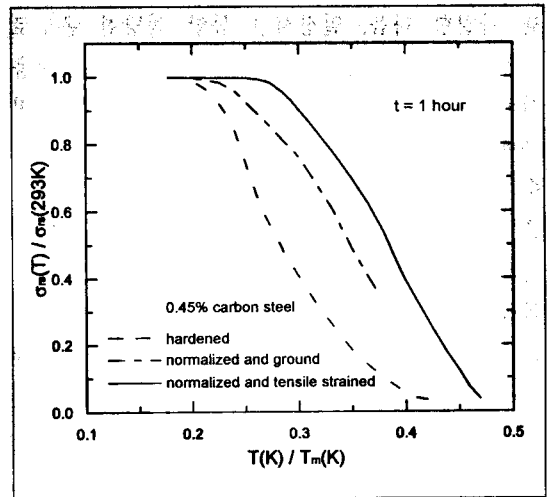


그림 2. Influence of homologous temperature on the residual stress ratio^[8]

2.1.3 극저온도 영역

열처리 과정에서 표면에 발생하는 잔류응력은 재료 두께방향으로 온도구배가 형성될 때 나타나는 열집중의 불균일로 발생하는 현상이다. 강재를 담금질하는 경우, 열처리 동안 상변화가 동반되지 않는다면 일반적으로 표면에는 압축, 내부에는 인장 잔류 응력이 발생한다.

Metal handbook^[9]에 의하면 주물 또는 가공된 부품에서 표면에 발생한 잔류응력 제거 및 안정화처리를 위해 cold treating을 추천한다. 특히 이 공정은 담금질 후의 불균일한 표면 압축 잔류응력의 안정화를 위해 필수적이다. Hill 등^[10]은 항복강도가 낮은 합금이나 시효가 일어나기 전의 부품에서, 담금질 동안에 형성된 잔류응력을 완화시키고 안정화시키기 위하여 Uphill 처리를 제안했다. 먼저 부품을 액화질소 온도까지 냉각시킨 다음, 고속으로 스팀을 분사하여 표면과 내부

에 아주 높은 열구배를 유도하므로써, 국부 소성 유동을 유발케 한다. 이를 통해 표면 잔류응력을 완화시킬 수 있다. Sevimli^[11]에 의하면, 이 방법은 담금질과 기계가공에 의한 잔류응력을 갖는 대형 알루미늄 구조물의 외측 셀과 같이 불규칙한 형상을 갖는 부품에 특히 잘 적용된다고 보고하였다. 낮은 온도 영역에서 공정이 진행되므로 조직과 강도 변화는 무시할만하여 불규칙한 형상을 갖는 구조물의 잔류응력 완화에 적용이 가능하다.

2.2 기계적 응력완화

잔류응력 완화를 위하여 열처리를 실시하는 경우, 고온에서 재료의 기계적 성질 저하와 야금학적 변화 등과 같은 현상이 발생한다. 이에 대하여 재료에 기계적 하중을 가하면 기계적 성질의 변화 없이 잔류응력장의 국부적인 소성유동으로 잔류응력을 완화할 수 있다.^[2] 본 절에서는 기계적 하중 방식을 정, 피로 및 진동하중으로 나누어 잔류응력을 완화하는 방법에 대하여 언급한다.

2.2.1 정하중

기계적 응력완화(MSR : Mechanical Stress Relaxation)는 잔류응력과 작용응력의 합이 재료의 항복응력에 도달하면 시작된다. 이 때 국부적인 소성변형은 결정립 내의 전위 슬립으로 발생하며, 탄성스트레인으로 남아있는 잔류응력을 소성스트레인으로 변환시키면서 잔류응력을 완화시킨다.

그림 3은 국부적인 인장잔류응력을 갖는 재료에서 잔류응력이 완화되는 원리를 설명한다. 여기서 σ_y 는 항복응력, σ_{rs} 는 잔류응력이다. 외부에서 항복응력 수준보다 낮은 인장하중을 가하게 되면, A점의 잔류응력은 외부에서 가해지는 응력과 중첩되어 항복응력까지 도달하고 지속적인 변형과 함께 B점에 도달한다. 이 때 제하하면

저장된 탄성스트레인을 방출하며 B점은 탄성적으로 감소한다. 잔류응력장을 둘러싼 주변영역에서 탄성스트레인이 방출되며 B점은 0 이하까지 감소하게 된다. 그러나 잔류응력이 광범위하게 존재하는 경우, 완화된 잔류응력은 0 근처 혹은 인장응력으로 남게 된다.

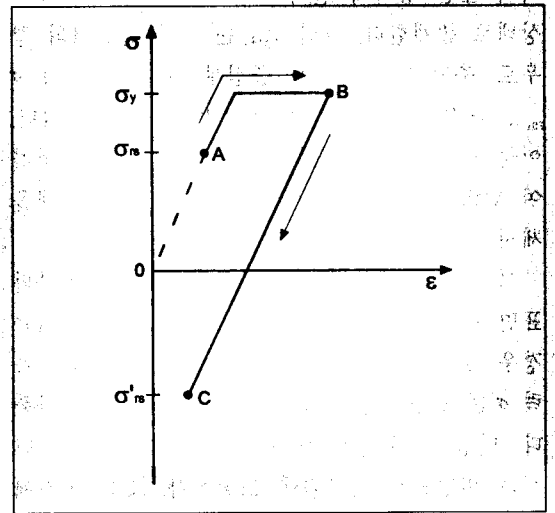


그림 3. Relaxation mechanism of residual stress by MSR

잔류응력의 완화는 외부에서 가하는 하중크기와 재료에 의해서 크게 영향을 받는다. 석출경화 Al-5Cu-2Mg 합금에서 표면가공에 의해 생긴 압축잔류응력은 외부에서 항복점에 가까운 하중을 주었을 때 인장에 의해 15% 수준까지, 압축에 의해 약 50% 수준까지 감소한다.^[12] Barker 등^[13]은 석출경화 합금 A2014-T6와 7075-T6 표면의 압축잔류응력이 변형율 0.5%의 인발가공과 함께 원래 값의 각각 20% 및 10% 수준까지 감소하며, 더 이상의 인발에 의해 잔류응력이 감소되지 않음을 발견하였다. Sautter^[14]는 다양한 재료들의 객관적인 비교를 위해 σ_a/σ_y (작용응력/항복응력)에 대한 상대 잔류응력비 $\sigma_{rs}/\sigma_{rs(0)}$ (완화 후의 잔류응력/초기 잔류응력) 관계를 연구하였는데, 서로 일정한 관계를 갖고 있음을 밝혀냈다. 결정구조에 의해서도 잔류응력 완화 정도가 서로 다르게 나타날 수 있다. 일반적으로 면심입방격자

금속의 경우, 응력완화가 빠르게 나타나고 잔류응력 완화도 크다. 그리고 탄소강의 경우, 탄소함량에 의해서 잔류응력의 완화 정도가 다른데, 탄소함량이 높은 경우(항복점이 높은 경우) 잔류응력 완화량이 적다.

주물 또는 용접으로 제작된 부재에는 잔류응력이 넓은 영역에 걸쳐 인장과 압축응력의 교차상태로 존재한다. 그림 4(a)는 주물 실린더의 경우로 축방향에 대하여 중심부에서 인장응력 $\sigma_{rs(i)}$, 표면에서 압축응력 $\sigma_{rs(s)}$ 가 작용하고 있다. 이들이 각각 균일하게 분포하는 것으로 가정하여 Vohringer^[1]는 외부하중에 의한 완화 모델을 제시하였다.

그림 4(b)에서 보여주는 바와 같이, 중심부와 표면의 항복응력이 같다면, 인장하중이 부가되는 경우 표면부 응력 σ_s , 중심부 응력 σ_i 및 합성응력 σ' 는 인장변형을 ϵ 와 함께 직선적으로 증가한다. 인장잔류응력을 갖는 중심부는 표면보다 더 적은 변형으로 항복점에 도달한다. 또한 초기에 0 값을 갖는 합성응력은 인장하중과 함께 증가하여, 중심부와 표면의 인장합성항복점 $\sigma_{y(t)}$ 에 도달하고, 계속되는 하중과 함께 소성 선도를 그린다. 따라서 합성항복점 이상의 인장응력이 부가되면 중심부와 표면에서의 응력완화를 기대할 수 있다. 압축하중을 가하는 경우도 인장하중을 가하는 경우와 동일한 거동을 보인다. 임계 변형을 $\epsilon_{(t)}$ 까지 하중을 가한 후 제하하면, 인장 및 압축잔류응력은 모두 0까지 완화된다. 따라서 기계적 하중에 의한 잔류응력 완화는 상하로 화살표된 부분의 영역 내에서 가능하다.

인장합성항복점과 압축합성항복점은 각각 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{y(t)} = \sigma_y - \sigma_{rs(i)} \quad (1)$$

$$\sigma_{y(c)} = \sigma_y - \sigma_{rs(s)} \quad (2)$$

또한, 인장하중과 압축하중 하의 임계변형율은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{(t)} = (\sigma_y + |\sigma_{rs(s)}|) / E \quad (3)$$

$$\epsilon_{(c)} = (\sigma_y + |\sigma_{rs(i)}|) / E \quad (4)$$

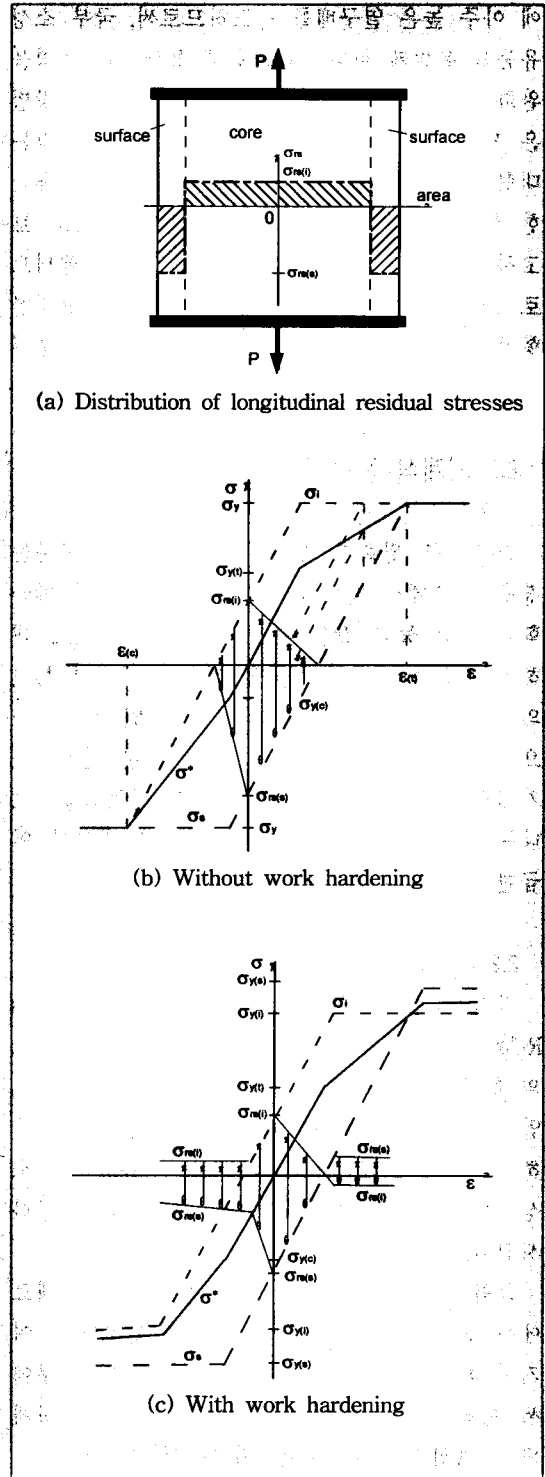


그림 4. Simple model for residual stress relaxation due to uniaxial loading

만약, 실린더 표면이 스폿피닝과 같은 표면가공에 의해 가공경화되었다면 표면의 항복응력은 중심부보다 높아져 잔류응력 완화 패턴이 복잡하게 된다. 이러한 경화모델은 그림 4(c)와 같다. 인장을 가하여 합성응력 σ' 가 중심부 항복응력 $\sigma_{y(i)}$ 에 도달될 때까지는 가공경화 현상이 없다고 가정 한 그림 4(b)와 유사하나, 그 이상의 변형 거동시 σ' 는 가공경화에 의하여 증가된 표면부의 항복응력 $\sigma_{y(s)}$ 까지 다시 선형적으로 증가한다. 이때 제하하면 표면에는 인장 그리고 중심부에는 압축잔류응력이 남게 된다. 압축하중을 가하는 경우, 합성응력 σ' 가 중심부 압축항복응력 $\sigma_{y(i)}$ 를 넘어서 제하하면 인장하중을 가하는 경우와 반대로 표면부에서는 압축, 중심부에서는 인장잔류응력이 남게 된다. 인장 및 압축응력이 $\sigma_{y(i)}$ 를 초과하는 경우, 표면과 중심부에 남게 되는 잔류응력의 크기는 σ' 를 기준으로 σ_s 와 σ_i 의 차이로 결정된다.

여기서 인장과 압축을 위한 합성항복점은 식 (1)과 (2)로부터 다음과 같이 수정된다.

$$\sigma_{y(t)} = \sigma_{y(i)} - \sigma_{rs(i)} \quad (5)$$

$$|\sigma_{y(c)}| = |\sigma_{y(s)}| - |\sigma_{rs(s)}| \quad (6)$$

2.2.2 피로하중

잔류응력을 갖고 있는 부재에 피로하중이 가해지는 경우 잔류응력은 점진적으로 감소하는데, 작용응력의 크기와 사이클 수가 이를 결정한다. 일반적으로 잔류응력이 가장 크게 완화되는 것은 부하 피로하중의 첫 번째 사이클이고, 또한 작용응력 값이 클수록 이 현상은 두드러진다.

사용재료의 경도에 따라서 잔류응력 완화 정도가 다르게 나타난다. Morrow 등^[15]은 이에 관한 연구를 위하여 경도레벨 $H_R=30, 40, 50$ 으로 서로 다른 SAE4340강에 $1 \sim 10^7$ 사이클 범위의 피로시험을 실시하였다. 사이클 수가 10^6 혹은 그 이상까지 증가함에 따라 잔류응력은 로그선도 상에서 거의 직선적인 감소를 나타냈다. 경도가 낮은 재료는 매우 낮은 응력레벨일 때 10^6 사

이클 이후 잔류응력이 두드러지게 완화되었고, 경도가 높은 조건에서는 응력의 크기와 사이클 수의 증가에 따른 잔류응력 완화가 매우 적었고, 완화가 일어나기 전에 피로파괴되는 현상을 보였다.

피로하중의 종류에 따라서도 잔류응력 완화 정도가 다른데, 이는 Iida 등^[16, 17]의 연구로부터 알 수 있다. 전자빔 용접을 실시한 STS316 판재에 양진하중을 가하여($R=-1, 10\text{Hz}$) 단면 절단법으로 잔류응력 완화를 측정하였다. 용접부 주변의 높은 축방향 인장잔류응력은 1사이클 이후 초기 값의 61%까지 감소하며, 10^4 사이클 이후 초기 값의 46%까지 감소하였다. 또한 SM490A에 대하여 인장편진하중($R=0, 5\text{Hz}$)을 가한 결과 219MPa의 인장잔류응력이 1사이클 피로 이후 -70MPa의 압축응력으로 변화였고, 이후의 사이클에서 점진적인 잔류응력 완화가 있었다.

이상의 연구결과로부터 피로하중의 크기에 따라 서로 다른 메카니즘으로 잔류응력이 완화됨을 알 수 있다. 피로하중의 크기별로 그림 5와 같이 고응력, 시간강도 및 피로한도 역으로 나눌 수 있다.

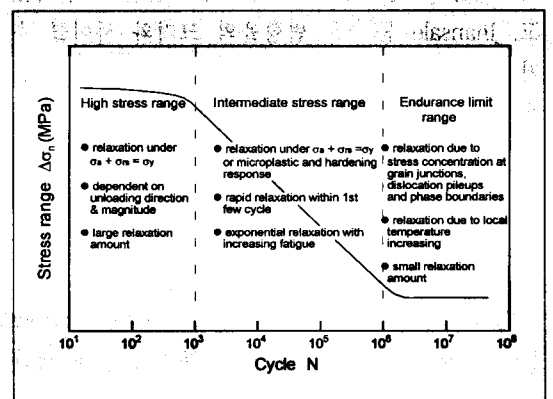


그림 5. The mechanism of residual stress relaxation according to amplitude of fatigue stress

고응력이 작용하는 경우, 정하중시 잔류응력 완화와 마찬가지로 작용응력과 잔류응력의 합이 재료의 항복응력을 초과할 때 잔류응력 완화가

발생한다. 이 영역에서 잔류응력 완화의 크기는 피로하중의 크기와 방향에 크게 좌우된다. Hirsch 등^[18]은 슛피닝에 의한 압축잔류응력을 갖는 부재에 양진 굽힘하중(R=-1)을 주었고, 최초 사이클 동안 잔류응력이 가장 많이 완화되며, 응력레벨이 높을수록 이 현상이 뚜렷함을 발견하였다. 또한 사이클 하중의 각각 반 사이클 후에 잔류응력 완화 정도는 다르게 나타났다. 최초 사이클 전반부에 시험편의 전면이 압축 상태에 놓일 때 전면의 압축잔류응력이 크게 완화되었고, 사이클 후반부에 시험편의 후면이 압축 상태에 놓일 때 후면의 압축잔류응력이 크게 감소하였다. 또한 이 영역에서는 잔류응력 완화량이 큰 것이 특징인데, Voskamp 등^[19]에 의하면 구름피로를 받는 볼베어링의 내측 링에서 초기 인장잔류응력이 피로와 함께 점차 감소하여 오히려 압축응력으로 변화된다고 하였다.

시간강도 영역에서 피로에 의한 잔류응력 완화를 다룬 연구는 많지만, 아직까지 잔류응력 완화 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 모델을 제시하지 못하고 있다. 지금까지 연구결과를 살펴보면, Taira^[20] 및 Potter 등^[8]은 잔류응력 완화량은 피로하중의 응력진폭 $\Delta\sigma$ 의 함수임을 발견하였고, Jhansale 등^[21]은 변형율의 크기와 사이클 수가 중요한 변수이며, 그 외 다른 변수들은 잔류응력 완화와 무관하다는 결과를 도출한 바 있다.

기존 연구결과에서 시간강도 영역에서 잔류응력의 완화는 공통적으로 첫 번째 또는 수 번째 피로 사이클에서 크게 발생하며, 사이클 수의 증가와 함께 지수적 혹은 대수적 완화를 가져오고 응력의 크기에 따라 완화율이 결정된다. Morrow 등^[15]은 이러한 잔류응력 완화 특성을 아래 식과 같이 나타내었다.

$$\frac{\sigma_{rs(N)}}{\sigma_{rs(0)}} = \frac{\sigma_{rs(1)}}{\sigma_{rs(0)}} - \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_y}\right)^b \log N \quad (7)$$

여기서, $\sigma_{rs(N)}$ 은 N 사이클 이후의 잔류응력, $\sigma_{rs(1)}$ 은 1 사이클 이후의 잔류응력, $\sigma_{rs(0)}$ 은 초기 잔류응

력, σ_a 는 피로응력, σ_y 는 항복응력, b는 사이클 응력-변형 특성에 의존하는 재료상수이다.

피로하중이 매우 낮은 피로한도역 혹은 그 이하에서도 잔류응력이 완화되는 것으로 알려져 왔다.^[22] 주요 완화 메카니즘은 고응력 및 시간강도역과는 다르게 피로에 의한 국부적인 온도상승, 결정립경 교차점, 전위 집적부 그리고 상계 등에 발생하는 응력집중으로 국부적으로 소성유동이 발생하여 잔류응력 완화가 진행된다. 이 응력 수준에서 잔류응력의 완화는 시간 의존성이 크며, 국부적인 미소 소성유동에 의해 잔류응력 완화가 이루어지므로 완화량이 매우 적다.

피로하중을 받는 다양한 재료에 대하여 항복응력에 대한 작용응력비 σ_a/σ_y 를 피로파괴 후의 상대 잔류응력비 $\sigma_{rs(Nf)}/\sigma_{rs(0)}$ 로 나타낸 결과는 그림 6^[1]과 같다. 피로한도 이하의 응력으로 피로하중을 준 경우, 피로파괴 후에 남아 있는 상대 잔류응력비는 매우 크다. 그러나 σ_a/σ_y 가 1에 가까워지면서 피로파괴 후의 상대 잔류응력비는 점점 0에 가까워지고, 대부분의 잔류응력이 완화된다. 이 그림으로부터 피로파괴 후의 상대 잔류응력비는 σ_a/σ_y 의 함수로 표현 가능하고, 재료에 상관없이 동일선상에 놓인다.

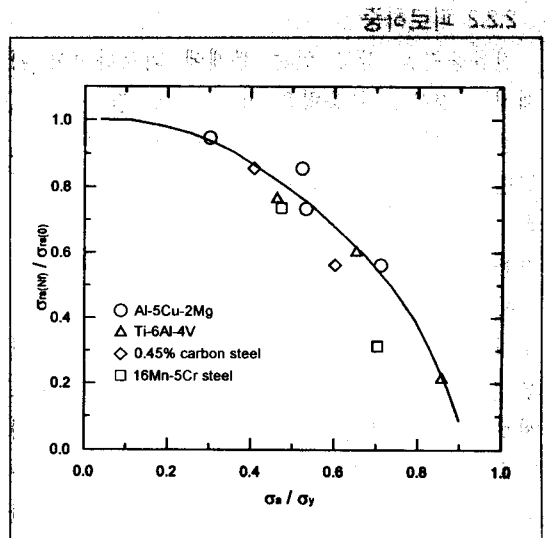


그림 6. Surface residual stresses after fatigue fracture as a function of stress amplitude of different materials

2.2.3 진동하중

진동응력완화(VSR : Vibatory Stress Relaxation) 기구는 피로하중에 의한 응력완화와 동일하며, 주어진 응력과 변형을 크기는 피로한도 이상이고 주된 응력완화는 미소 소성변형에 의해 발생한다. 응력완화는 사이클 수에 의존하여 대부분 $10^3 \sim 10^4$ 사이클 범위에서 이루어진다.

실제 적용법을 살펴보면, 대상물에 편심질량을 갖는 전기모터를 클램핑하고, 15분의 시간 범위 내에서 10~100Hz의 주파수로 진동시킨다.^[23] 대상물의 크기는 작은 것으로부터 무게가 수톤인 주물제품에 이르기까지 VSR이 가능하다.

VSR법의 적용동안 피로손상누적이 발생할 수 있다. 그러나 Cooper 등^[24]에 의하면 손상누적율은 잔류응력 완화를보다 상당히 낮다고 하였고, James 등^[25]은 A2219 합금에서 응력완화의 대부분은 표면에서 미소크랙이 발생하기 전에 일어난다는 연구결과를 발표하였다. Wahi 등^[26]은 적당한 열처리와 부수적인 VSR은 재료특성의 변화 없이 용접구조물 응력완화에 매우 효과적임을 보여주었다.

3. 맺음말

잔류응력을 함유하고 있는 부재에 하중이 가해지는 경우, 재료의 특성 및 하중조건의 상호작용으로 잔류응력이 부분적으로 완화되거나 또는 전혀 다른 형태로 변화된다. 특히, 용접구조의 경우 잔류응력은 부재의 강도와 수명에 지대한 영향을 미치게 된다. 실제 용접구조물 파손사고의 70~80%를 차지하는 피로손상은 용접연결부의 불연속성에 의한 응력집중계수의 증가와 더불어 용접부에 상존하는 잔류응력에 기인한다. 따라서 잔류응력을 갖고 있는 부재에 외부하중이 가해질 때, 잔류응력의 안정성, 부분적 완화 및 재분포 현상을 파악하기 위한 기술은 구조물의 안전도 제고를 위한 기술인 피로수명예측기술의 핵심이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] O. Vohringer, "Relaxation of Residual Stress by Annealing or Mechanical Treatment", *Advances in Surface Treatment : Technology-Applications-Effects*, Vol. 4, 1987, pp.367-396.
- [2] M. R. James, "Relaxation of Residual Stress an Overview", *Advances in Surface Treatment : Technology-Applications-Effects*, pp.349-365.
- [3] Throop et al, "Residual Stress and Stress Relaxation", ed. E. Kula and V. Weiss, Plenum Press, 1982, pp.205-226.
- [4] M. Thompson, J. R. White, *Polymer Eng. and Sci.* 24, 1971, pp.227-241.
- [5] R. L. Brown, H. J. Rack, M. Cohen, *Mater. Sci. and Eng.* 21, 1975, pp.25-34.
- [6] M. B. Adeyemi, R. A. Stark, G. F. Modlen, "Heat Treatment 79", *Metal Society*, 1980, pp.122-125.
- [7] J. M Potter, R. A. Millard, "Advance in X-Ray Analysis," V20, ed., H. G. McMurdie, Plenum Press, 1977, pp.309-319.
- [8] O. Voringe, H. Wohlfahrt, "Eigenspannungen und Lastspannungen", *Beiheft der Harterei-Tech. Mitt.*(ed. by V. Hauk and E. Macherauch), Hanser-Verlag, Munchen, 1983, pp.144-156.
- [9] *Metals Handbook*, Ninth Edition, Vol. 4, B. P. Bardes, ed., American Society for Metals, 1971, pp.3-5.
- [10] H. N. Hill, R. S. Barker, L. A. Wiley, *American Society for Metals* 52, Preprint No. 132, 1959.
- [11] E. Sevimli, "Removal of Residual Stresses by Cold Stabilization," Submitted to *Metal Progress*, 1985.

- [12] T. Hirsch, O. Voring, E. Macherauch, "Bending Fatigue Behavior of Differently Heat Treated and Shot Peened AlCu5Mg2", Proc. 2nd Int. Conf. Shot Peening. Am. Shot Peen. Soc., Paramas, New York, 1984, pp.90-101.
- [13] R. S. Barker, J. G. Sutton, "Stress Relieving and Stress Control", Aluminium, Vol. III, ASM, Metals Park, Ohio, 1967.
- [14] R. Sautter, "Gitterdehnungen in Verformten und Abgeschreckten Metallen", Diploma Thesis, TH Stuttgart, 1965.
- [15] JoDean Morrow, A. S. Ross, G. M. Sinclair, "Relaxation of Residual Stress due to Fatigue Loading", SAE Transactions, Vol. 68, 1960, pp.40-48.
- [16] K. Iida, S. Yamamoto, M. Takenashi, "Residual Stress Relaxation by Reversed Loading", Welding in the World/Le Soudage dans le Monde, Vol. 39, No. 3, 1997, pp.138-144.
- [17] K. Iida, M. Takenashi, "Relaxation of Welding Residual Stress by Cyclic Zero-to-Tension Loading", IIW-Document XIII-1685-97, 1997.
- [18] T. Hirsch, "Zum Einfluß des Kugelstrahlens auf die Biegeschwingfestigkeit von Titan- und Aluminiumbasislegierungen", Dr.-Ing. thesis, Universität Karlsruhe, 1983.
- [19] A. P. Voskamp, R. Osterlund, P. C. Becker, D. Vingsbo, Metals Tech. 7, 1980, pp.14-21.
- [20] S. Taira, T. Abe, T. Ehiro, Bull. JSME 12, 1969, pp.947-957.
- [21] H. R. Jhansale, T. H. Topper, "In Cyclic Stress-Strain Behavior - Analysis", Experimentation and Failure Prediction, ASTM STP 519, Am. Soc. Testing and Materials, 1973, pp.246-270.
- [22] E. J. Pattinson, D. S. Dugdale, Metallurgia 66, 1982, pp.228-230.
- [23] R. A. Claxon, "Heat Treatment of Metals 1", 1974, pp.131-137.
- [24] C. V. Cooper, M. C. Fine, Scripta Met. 18, 1984, pp.593-596.
- [25] M. R. James, W. L. Morris, "In Residual Stress for Designers and Metallurgists", ed., L. J. Vande Walle, Am. soc. Metals, 1981, pp.169-188.
- [26] K. K. Wahi, D. E. Maxwell, Trans. 5th int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. L, Rep. 13/3, 1979.