

열처리에 의한 잔류응력의 분포

이 상 윤

동아대학교 공과대학 금속공학과

1. 서 론

보통 열처리(thermal treatment)에 의해서 발생하는 응력으로는 고온에서 냉각할 때의 열팽창 수축에 의한 열응력(thermal stress)과 상변태에 의해 생기는 변태응력(transformation stress)의 두종류가 있다. 열응력은 냉각 속도가 빠를수록 커지며, 변태응력은 변태구간, 즉 M_s - M_f 사이의 냉각속도가 빠를수록 크게된다. 열응력에 의해 부품의 표면층은 압축잔류응력(compressive residual stress)이 생기고, 변태응력은 인장잔류응력(tensile residual stress)이 생긴다. 켈칭시 균열은 급냉하였을 때 변태응력이 열응력보다 클때 생기며, 강도상으로는 열응력 즉 압축잔류응력을 활용하여야 한다.

그리고, 화학 열처리(thermochemical treatment)에서도 표면경화법에서와 같이 예를 들면 오스테나이트화 온도의 침탄분위기에서 켈칭 및 템퍼링 처리를 하면 시료 표면에는 압축잔류응력이 형성되며 이 응력의 형성범위는 경화층의 깊이, 시편의 크기와 형상 등에 따라 다르다. 이 압축잔류응력은 내부에 형성된 인장잔류응력에 의하여 평형을 이룬다. 침탄된 표면층은 내부보다 탄화물의 체적분율이 더 크고 잔류 오스테나이트량도 많으며 경도치도 더 높다. 따라서 침탄처리된 표면부분에 형성된 압축 잔류응력에 의하여 피로강도를 향상시킨다.

켈칭과 템퍼링된 고탄소 저합금강은 표면연마와 표면탈탄에 의해 많은 양의 잔류응력이 발생하게 된다. 표면연마시에 $100\mu m$ 정도의 얇은 표면층에 항복점의 절반정도인 압축잔류응력이 발생하게 된다. 연마 중 발생한 열로 인해서 표면에 국부적 템퍼링이 일어나는 경우 표면 압축응력은 감소하며 인장잔류응력이 현저하게 압축응력 층 아래에 형성된다. 심한 탈탄은 표면에서 큰 인장잔류응력을 유발케 하

여 켈칭시 균열을 발생케 한다. 일반적으로 심한 탈탄은 일어나지 않고 미소 탈탄이 형성되는 경우가 많으므로 열처리 후 다듬질 연마를 하는 것이다.

2. 탈탄에 의한 잔류응력 측정 실험

직경 12.7 mm인 구상화처리된 베어링강(AISI 52100)의 봉재를 냉연하여 5 mm 두께의 판재로 한 다음 잔류응력제거 처리하였다. 표 1에서 시료 1-5는 76.2×2.3 mm 로, 시료 6과 7은 $80 \times 20 \times 1.8$ mm로 가공한 뒤 표면연마하였다. 흡열형 가스와 메탄가스의 분위기속에서 표 1과 같은 조건으로 침탄처리를 한 뒤 55 °C 의 오일에 켈칭하였으며, 잔류 오스테나이트 양을 줄이기 위해 액체질소에 켈칭한 다음 템퍼링하였다. 이때 침탄에 의한 영향을 관찰하기 위해 동일 시료에 대해 구리로 도금한 것과 하지 않은 것을 동시에 장입하여 처리하였다.

잔류응력의 분포를 측정하기 위하여 박판시편의 한쪽 면만을 화학적으로 얇게 제거하여 정반위에 놓고 박판의 힘을 다이알 게이지로써 측정하여 제거된 금속량의 함수로서 표시하였다.

잔류 응력은 시료표면이 평면상태에서 금속층이 제거될 때 야기되는 평면의 곡률변화로 평면에서 균형을 이루는 2축 잔류응력에 대해 공식을 유도한 Treution-Read 법으로 계산하였다.

두께 0.064 mm 인 1008 강이 박판을 로속에 장입시킨 후 30 분간 등온유지 시킨 다음 급속냉각시켜 중량증가로 침탄속도를 결정하였다. 이때 박판의 탄소함량이 적어도 0.9 wt% 이 되도록 혼합가스를 사전에 조정하였다. 시편을 장입할 때마다 침탄속도 측정용 박판을 장비하여 침탄속도를 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 열처리에 의한 잔류응력

그림 1은 침탄분위기에서 오스테나이트화 후에 퀴칭하였을 때 시편표면에서 형성된 잔류응력 분포를 나타내며 그림 2는 퀴칭된 시료를 템퍼링 처리했을 때 형성된 잔류응력의 분포를 나타낸 것이다. 침탄 분위기 가스로 부터 탄소의 침투를 막기위해, 시편 1A 및 2A는 구리 도금하였다. 그림 1에서 침탄된 시편 1B의 표면부에서는 최대 9.5 kg/mm² 정도의 높은 압축잔류응력을 나타내며 침탄깊이까지 압축 잔류응력이 발생되고 그 내부에서는 인장잔류응력의 발생을 볼 수 있고, 반면에 구리도금으로 인해 침탄되지 않은 시편 1A의 표면부에서는 8 kg/mm² 이상의 높은 인장응력을 나타내지만 내부로 갈수록 압축잔류응력을 나타내는 경향을 볼 수 있다. 그림 2는 템퍼링으로 인해 표면부에서 잔류응력

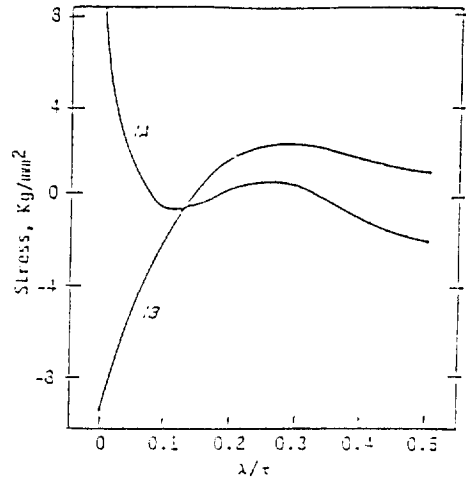


그림 1 표면으로부터 깊이(λ)와 시편두께(τ)의 비로 나타낸 표준화된 거리(λ/τ)에 따른 잔류응력 분포곡선.

표 1 침탄에 의한 잔류응력 측정실험 내용

시 료	침 탄 처 리 조 건		냉 각 방 법	침 탄 처 리 조 건		비 고
	온도(°C)	시간(분)		온도(°C)	시간(분)	
1 A	850	60	OQ	—	—	표면구리도금
1 B	850	60	OQ	—	—	—
2 A	875	60	OQ-LNQ	150	90	표면구리도금
2 B	875	60	OQ-LNQ	150	90	—
3 A	850	30	OQ-LNQ	150	90	표면구리도금
3 B	850	30	OQ-LNQ	150	90	—
4 A	850	60	OQ	150	90	
4 B	850	60	OQ-LNQ	150	90	
5 A	850	120	OQ	150	90	
5 B	850	120	OQ-LNQ	150	90	
6 A	800	60	OQ	—	—	
6 B	800	120	OQ	—	—	
7 A	815	55	OQ	150	60	표면구리도금
7 B	815	55	OQ	150	60	
7 C	815	55	OQ	150	60	

OQ : 55°C 의 기름에 퀴칭

LNQ : 액체 질소에 퀴칭

7A, 7B : 980°C 에서 35분간 가열 유지 후 공냉하여 퍼얼라이트 (pearlite) 조직으로 한 뒤 오스테나이트화 처리함.

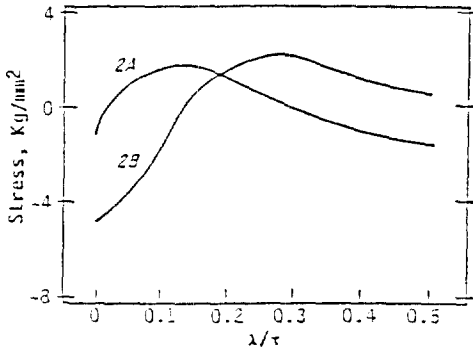


그림 2 2(A) 및 2(B) 시편에 대한 표준화된 거리에 따른 잔류응력 분포곡선.

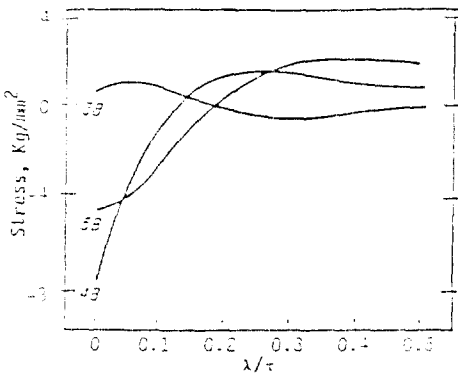


그림 3 템퍼링하기 전 액체질소에 켈칭한 3(B), 4(B) 및 5(B) 시편에 대한 표준화된 거리에 따른 잔류응력 분포곡선.

이 값이 감소되었으며 잔류인장응력이 발생했던 시편 2A의 표면부에서는 액체질소에서 심냉처리의 영향을 받아 압축 잔류응력이 형성되어 있음을 알 수 있다.

3.2 잔류응력에 미치는 잔류 오스테나이트의 영향

오일 켈칭후 잔류오스테나이트의 양을 줄이기 위하여 액체질소에 켈칭한 시편 3B, 4B 및 5B를 템퍼링 처리했을 때 형성된 잔류응력의 분포의 그림 3에 나타내었으며 시편 3B는 잔류응력이 거의 형성되지 않았으나, 반면에 구리도금한 시편 3A는 표면에 더 많은 인장응력이 형성되었다. 침탄처리시간이 길어짐에 따라 분명히 표면에 압축 잔류응력이 형성됨을 알 수 있고 따라서 응력분포는 탄소확산 깊이와 관계된다. $D=10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 일 경우 850°C 에서 1시간 동안 침투된 깊이는 $(Dt)^{1/2} = 0.2 \text{mm}$ 이고 2시간 동안 침투된

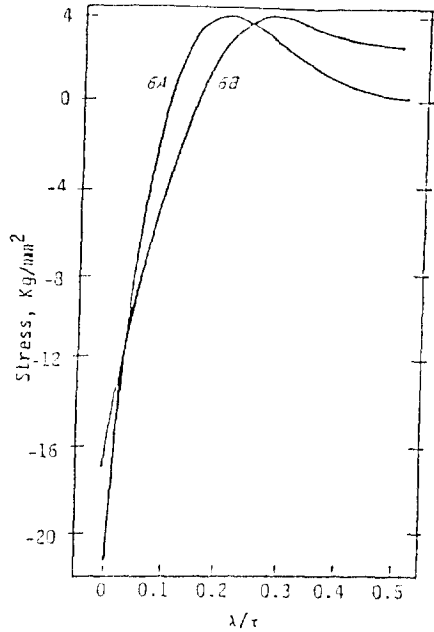


그림 4 6(A) 및 6(B) 시편에 대한 표준화된 거리에 따른 잔류응력 분포곡선.

깊이는 0.27mm 이며 이 값은 잔류응력의 부호가 바뀌는 깊이와 같은 크기이다. 더욱이 5B에서 응력의 부호가 바뀌는 깊이와 4B에서의 깊이의 비가 1.48이며 이 값은 침탄시 탄소 확산 깊이에 따라 압축응력의 깊이가 결정됨을 나타낸다.

기름에 켈칭만 실시한 4A 및 5A는 4B 및 5B시편의 경우와 비교해서 표면의 압축잔류응력 및 내부의 인장응력이 더 작은 값을 나타내었으며 4B 및 5B시편에서는 표면의 잔류오스테나이트가 변태하여 압축 잔류응력을 증가시키기 때문이라고 생각된다.

3.3 침탄시 잔류응력의 형성에 미치는 오스테나이트화 처리시간 및 온도의 영향

그림 4는 800°C 에서 1시간 및 2시간 열처리 후에 얻은 응력분포를 나타내며, 이때 표면 압축응력은 850°C 에서 형성된 것의 약 두배가 되며 침탄처리시 오스테나이트화 온도가 낮아짐에 따라 켈칭할 때 잔류 오스테나이트량이 적으므로 표면 압축 응력의 값이 증가한다.

오스테나이트화 온도에서 유지시간이 길어짐에 따라 초기 탄화물의 분해와 침탄에 의해 표면의 탄소농도는 증가할 것이며, 따라서 켈칭시에 잔류응력의 깊이가 깊어질 것이다. 이와같은 관계를 그림 4에서 6A와 6B를 비교함으로써 알

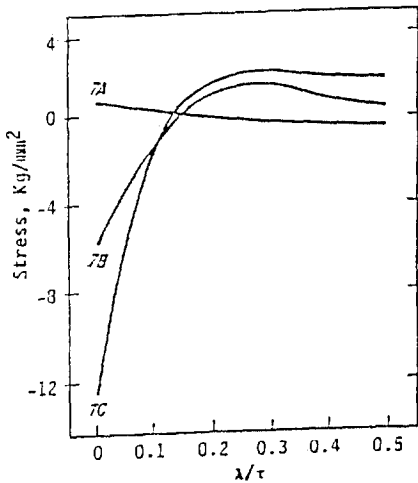


그림 5 7(A), 7(B) 및 7(C) 시편에 대한 표준화된 거리에 따른 잔류응력 분포곡선.

수 있다. 따라서 오스테나이트화 온도가 낮아질수록, 오스테나이트화 처리시간이 길어짐에 따라 압축 잔류응력이 많이 형성됨을 알 수 있다.

3.4 탄소구배에 의한 잔류응력 분포

초기 탄화물을 거의 모두 고용시키기 위하여 7A 및 7B 시편을 980℃로 가열한 다음 침탄로 내 장입실에서 냉각하여 주로 미세한 퍼일라이트 조직을 형성시켰으며 이 처리를 위하여 두 시편 모두 구리 도금하였다. 7B 시편의 구리도금을 제거한 다음 7A 및 7B 시편과 구상탄화물 조직으로 된 7C 시편을 함께 815℃에서 침탄한 다음 템퍼링하였다. 이 처리 결과 얻어진 잔류응력분포를 그림 5에 나타낸 것이다.

시편 7A는 잔류응력이 거의 형성되지 않았으며 시편 7B에서는 내부의 분해탄소량보다 표면층의 분해된 탄소함량이 크기때문에 압축잔류응력이 형성되었다. 초기 탄화물의 분해가 느리면 표면과 심부의 탄소구배는 더 크게 됨으로 시편 7C의 표면압축응력의 크기가 7B의 약 2배가 되었다. 표면과 심부에서 분해 탄소량의 구배는 침탄 시 오스테나이트화 시간과는 밀접한 함수관계이며 표면층 깊이가 얇을 때 더 큰 값을 나타내고 있다.

7B와 7C를 X-선 법으로 잔류 오스테나이트를 측정된 결과 두 시편 표면의 평균 잔류 오스테나이트는 24-26%였으며, 중심선에서는 7B가 15%, 7C가 9%로 측정되었다. 이러한 잔류 오스테나이트의 차이는 분해된 탄소량으로

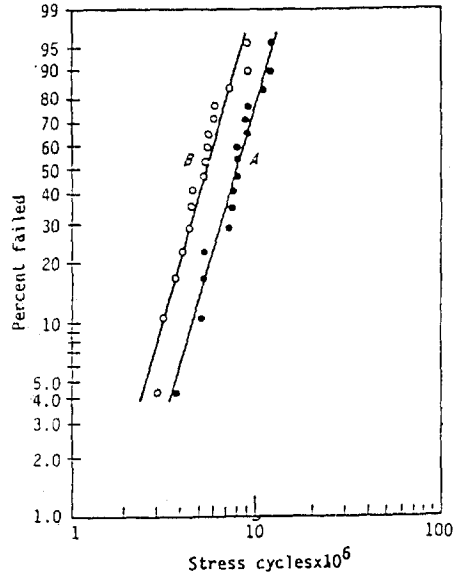


그림 6 침탄된 시편(A)과 침탄되지 않은 시편(B)에 대한 피로수명의 비교.

부터 예상했던 차이와 일치하며 또 잔류 오스테나이트를 감소시키기 위해 액체질소에 췌칭하여 잔류응력을 증가시키는 경향과 일치한다.

3.5 침탄에 의한 피로수명 개선

그림 6은 침탄을 방지하기 위해 구리도금한 시편을 B와 구리도금하지 않은 A를 침탄 분위기속에서 1.5시간 동안 템퍼링한 후에 피로시험한 결과를 나타낸 것이다. 침탄된 시편이 침탄되지 않은 시편에 비해 피로수명이 약 50%정도 증가됨을 볼 수 있다. 시편 A는 탄소농도가 증가하게 되고, 췌칭시에는 표면 압축잔류응력의 발생과 잔류 오스테나이트 양의 증가로 피로강도가 증가하게 되고, 피로수명이 증가한다. 이때 구리로 도금하지 않은 시편의 표면은 최대 압축응력이 6 kg/mm²이었으며 압축 응력의 깊이는 0.31 mm이었다.

3.6 침탄에 의한 잔류응력 형성

췌칭과 템퍼링한 베어링강에서 잔류응력 분포는 오스테나이트화 열처리동안 로내 분위기 가스의 탄소 포텐셜을 제어 함으로써 조절할 수 있다.

815℃와 850℃에서 1-2시간 동안 침탄 처리를 하면 최대 압축응력이 7-13.5 kg/mm² 정도가 되는 표면으로부터 깊이가 0.20-0.40 mm되는 층에 압축 잔류응력이 형성된다. 침

탄의 온도가 낮고 처리시간이 짧아도 피로수명이 향상되며 이는 단지 잔류응력에 의한 것이 아니다. 왜냐하면 침탄은 또한 표면층에 잔류 오스테나이트와 초기 탄화물의 양을 증가시키기 때문이다. 오스테나이트의 증가는 피로수명을 증가시킨다. 그러나 초기 탄화물의 양이 많은 경우 내마모성은 증가할 수 있으나 피로수명은 감소하는 경향이 있으므로 오스테나이트화 처리 중에 탄화물의 고용이 바람직하다.

REFERENCES

1. Bearing Steels : The Rating of Nonmetallic Inclusions, by K.Bohmet al : SATM, Philadelphia, 1975, pp96-113.
2. "The Distribution of Residual Stresses in Carburized Cases and Their Origin", by D.P.Koistinen : Trans. ASM, 1958, Vol.50, pp.227-241.
3. Achivement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys, by T.L.Gerber and H.O.Fuchs : ASTM, Philadephia, 1969, pp.276-295.
4. "Residual Grinding Stresses in Hardened Steel", by H.R.Letner. ASME Trans., 1955, Vol.77, pp.1089-1098.
5. "The Generation of Residual Compressive Stresses in the Surface Layers of Through-Hardened Steel Components by Heat Treatment", by D.P. Koistinen : Trans. ASM, 1964, Vol.57, pp.581-588.
6. "Carbide Refining Heat Treatmntnts for 52100 Bearing Steel", by C.A.Stickels : Met. Trans., 1964, Vol.5, pp.865-874.
7. Metals Handbook, Eighth Edition, 1973, Vol.8 ASM, 1973, p.403.
8. "Thermodynamics of The Carbides in the system Fe -Cr-C", by R.Benz, J.F.Elliot, and J.Chipman : Met. Trans., 1974, Vol.5, pp.2235-2240.
9. "The Volume Expansion Accompanying the Martensite Transformation in Fe-C Alloys", by J. M.Moyer and G.S.Ansell : Met. Trans. A, 1975. Vol.6 A., pp.1785-1719.
10. "Calculation of Internal Stress of Steel Induced During Quenching", by Y.Toshioka. M.Fukagawa, and Y.Saiga : Iron Steel Inst. Japan, 1972, Vol.12, pp.6-15.
11. "A Mechanical Determination of Biaxial Residual Stress in Sheet Materials", by R.G.Treuting and W.T.Read Jr. : J.Appl. Phys., 1951, Vol.22, pp.130-134.
12. "The Diffusivity of Carbon in Iron by the Steady -State Method", by R.P.Smith : Acta Met., 1953, Vol.1, pp.578-587.
13. "The Influence of Microstructure on the properties of Case Carburized Components", by G.Parrish : Heat Treat Met., 1976, Vol.3, pp.6-12.
14. R.A.Baughman : Mech. Eng. 1959, Vol.81, p94.
15. "The Effect of Carbide Particle Size and the Amount of Undissolved Carbides on the Fatigue Life and Other Properties of Bearing Steels", by Monma et al : Japanese Inst. Metall. J., 1968, Vol.32, pp.1189-1204.