

회전접촉에 의해 발생하는 Subsurface Zone의 잔류응력에 관한 해석

강 계 명 · 김 선 진

한양대학교 공과대학 재료공학과

An Analysis on the Residual Stress of Subsurface Zone due to Rolling Contact

K. M. Kang and S. J. Kim

Department of Materials Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

초 록 고탄소 Cr-Ti합금강의 회전접촉 피로마모실험에서 실험조건에 따라 다르게 변화하는 subsurface zone의 가공경화의 정도를 잔류응력의 분포로서 조사하였다. 시험전 표면잔류응력은 마모 특성에 영향을 주지 못하였고, 접촉응력과 회전속도가 증가할수록 표면잔류응력은 감소하여 갔으나 subsurface zone내의 최대압축잔류응력은 증가하였고, 그의 포화깊이는 깊었다. 이들 실험결과와 이론적 전단응력의 분포와의 관계에 관하여 검토하였다.

Abstract The degree of work hardening in the subsurface zones varied with the experimental conditions under the rolling contact fatigue wear test of high carbon Cr-Ti alloy steel was evaluated by the distribution of residual stresses. Surface residual stresses before the test did not affect the wear property. Surface residual stresses after the test decreased by the increase of contact stress and running velocity, but the maximum compressive residual stress and its depth of saturation in the subsurface zone increased. The relationship between these experimental results and the distribution of the theoretical shear stress was also discussed.

1. 서 론

고하중, 고속회전접촉에 의해 발생하는 피로마모의 거동은 마모표면하 subsurface zone과 밀접한 관계를 가지고 있다. 즉 subsurface zone은 가하여 주는 하중과 속도에 따라 크기와 형상이 변화하므로, 이의 해석은 재료의 마모거동을 설명할 수 있는 좋은 지표로 생각된다. 저자들은 피로마모거동 및 subsurface zone의 금속유동에 따른 가공경화 현상을 조직학적 연구로서 보고^{1,2)}한 바 있다.

한편 subsurface zone의 가공경화는 재료자체의 내부응력과 가하여 주는 하중 및 속도 등 실험조건에 의하여 발생하는 마모표면층의 잔류응력의 발생 및 소멸과도 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러나 아직 이들에 관한 연구는 단편적이고 명확하게 정립되지 못한 상태이며, ball bearing 등 한정된 재료에서 보고³⁻

⁵⁾되고 있다.

본 연구에서는 보고한 바 있는 고탄소 Cr-Ti 합금강의 회전접촉피로마모실험에서 관찰된 마모표면층의 subsurface zone을 잔류응력의 분포로서 설명하고자 하였다. 즉 가하여 주는 하중, 회전속도의 변화에 따라 다르게 변화하는 subsurface zone에 X-선을 이용하여 이들의 잔류응력을 조사⁶⁾ 하여 subsurface zone의 가공경화현상을 잔류응력으로 평가하여 보았으며, 이를 Hertz의 최대접촉응력⁷⁾에 따른 접촉표면하의 이론적 전단응력의 분포와 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2-1. 마모시험편의 준비

앞서 보고한 바 있듯이, 고속전철용 레일재로 연구중인 고탄소 Cr-Ti합금강을 시료강으로 하였고, 자체제작한 고속 고하중 마모실험

장치를 이용하여 마모실험하였다. 본 연구에서는 90kg/mm²의 동일한 최대접촉응력하에서 회전속도의 변화에 따라 마모시험된 각 시험편과 18.5m/sec의 동일한 회전속도하에서 최대접촉응력의 변화에 따라 마모시험한 각 시험편을 마모표면하 subsurface zone의 잔류응력 측정용 시험편으로 사용하였다.

2-2. 전해연마

마모시험편의 마모표면하 잔류응력의 측정을 위하여 마모표면층 즉 subsurface zone에 기계적 및 열적 영향의 손상을 주지 않는 표면층의 제거로 전해연마법을 고려하였다. 더우기 본 실험의 경우 마모시험편의 형상이 둥근 ring형이고 시험편의 크기 또한 작으므로 전해연마법⁸⁾에서도 계단부식법(step electro-polishing method)이 표면깊이에 따른 잔류응력의 측정에 적합하여, 이를 본 실험의 전해연마법으로 택하였다.

전해연마에 앞서 양호한 부식전류밀도의 설정을 위한 시료강의 분극곡선(I-E curve)⁹⁾으로부터 200mA/cm²의 전류밀도를 실험의 부식전류의 조건으로 설정하였고, 시료강의 I-E 곡선은 Fig.1과 같다. Fig.2는 실험에 사용한 전해연마장치의 개략도로서 전해연마할 각 시험편의 표면을 acetone으로 깨끗이 세척한 후 anodic 지지대에 부착하고 시험편의 표면이 연마액에 접한 순간을 기준으로 transmeter를 사용하여 미리 계산된 방법(깊이:5μm, 폭:6-3mm)에 따라 부식액내로 일정 깊이씩 침적시키

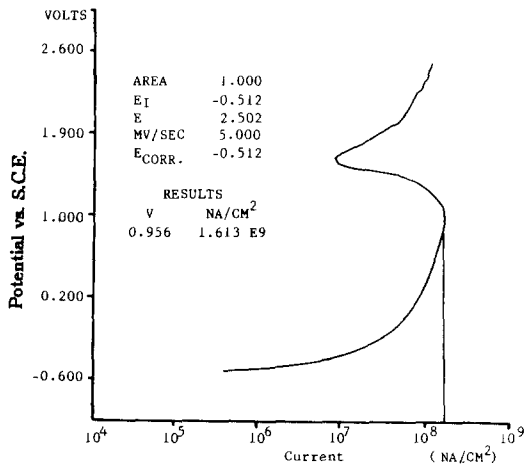


Fig.1. I-E curve of high carbon Cr-Ti alloy steel.

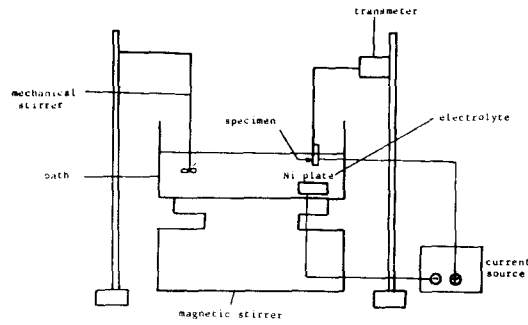


Fig.2. Schematic diagram of the electro-polishing apparatus for etching wear specimens worn by rolling contact.

Table.1. Experimental condition of X-ray stress measurement.

method	sin ² φ method
characteristic radiation	Cr-Kα
diffraction plane	αFe (211)
tube voltage and current	30KV, 10mA
solar slit	0.34deg.
size of irradiation mask	2mm × 4mm
determination of peak angle	half-value width method 0, 15, 30, 45deg.
X-ray incident beam(φ)	scintillation counter
detector	

면서 전해연마하여 최종적으로 마모표면이 계단형상이 되도록 하였다. 실험에 사용된 전해연마액(electrolyte)은 황산 10%; O-인산 75%, 글리세린 5%와 증류수 5%를 혼합시킨 것이었고, 전해연마도중 전해액의 균일한 농도구배를 위하여 기계적, 자기적 교반을 병행하였고, 전해연마의 상대전극(counter electrode)은 Ni plate이었다.

2-3. 잔류응력의 측정

계단부식시켜 얻은 잔류응력 측정용 마모시험편은 잔류응력측정전에 부식된 표면을 알코올로 깨끗이 세척하여 실험에 사용하였고, X-선 실험장치는 Rigaku사 Strainflex MSF-2형 X-선 발생기를 이용하였다. 잔류응력의 측정은 5μm씩 계단지어 부식되어 있는 각 부식표면을 Cr-target과 V-filter로 부터 얻어진 Cr-Kα선을 이용하여, αFe(211)를 회절면으로

30KV의 관전압과 10mA의 관전류를 사용하였고, $\sin^2\phi$ 법에 의해 ϕ 값을 0° , 15° , 30° , 45° 변화시키면서 잔류응력값을 측정하였다. 이때 X-선이 조사된 면적은 $20\text{mm} \times 4\text{mm}$ 이었고, 실험에 적용된 잔류응력의 측정조건은 Table.1과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마모시험편의 표면잔류응력

Fig.3은 앞서 실험한 일정속도에서의 하중변화(Fig.3-(a))와 일정하중에서의 속도변화(Fig.3-(b))에 따른 각 시험편의 마모율(wear rate)의 변화를 나타낸 그림이다. 이전의 sub-surface zone에 관한 금속조직학적 연구에서도 저자들이 언급하였듯이, 하중의 변화가 속도의 변화보다는 마모율에 보다 큰 영향을 주는 인자임을 알 수 있다.

이제 이들 일정속도에서의 하중변화와 일정하중에서의 속도변화에 따르는 각 시험편의 마

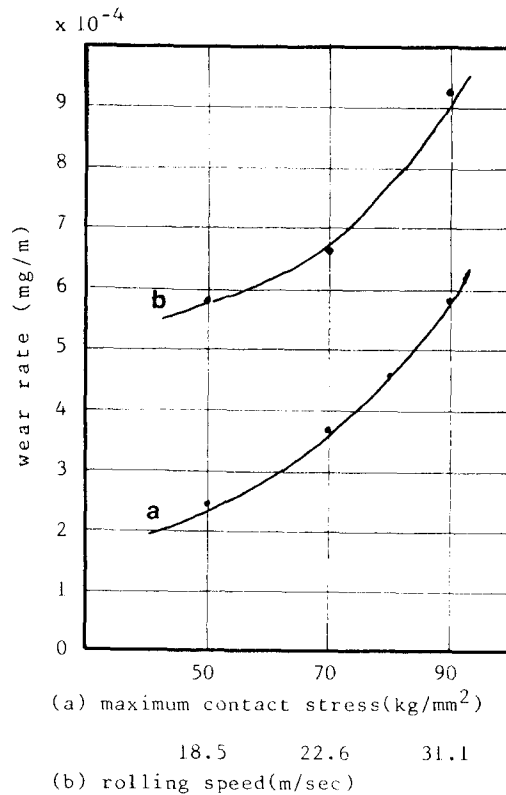


Fig.3. Variation of wear rate with rolling contact conditions.

- (a) at constant rolling speed: 18.5 m/sec
 (b) at constant maximum contact stress: 90 kg/mm²

모표면에서 측정된 표면잔류응력을 마모거리에 대하여 Fig.4와 Fig.5에 각각 나타내었다. 각각의 그림에서 볼 수 있듯이 실험전 측정된 마모 시험편의 표면잔류응력(-10 kg/mm²)이 마모 실험 조건의 변화에 따라 새로운 표면잔류응력으로 변화하는 것을 알 수 있다. 본 실험의 결과는 일반적인 소성가공의 경우 가공표면에서 관찰되는 압축잔류응력이 재료의 강화에 미치는 현상과는 다른 것임을 알 수 있다. 이와같은 차이점은 마모는 slip을 수반하는 현상³⁾으로서, 이들 slip에 의해 표면층에 소성변형이 발생하고 국부적 발열도 일어난다. 따라서 이들의 복합적인 영향으로 시험전 남아 있던 마모 시험편의 표면 잔류응력은 새로운 응력구배에 대한 영향으로 새로운 표면잔류응력으로 변화한다는 것으로 설명할 수 있다.^{4,5)}

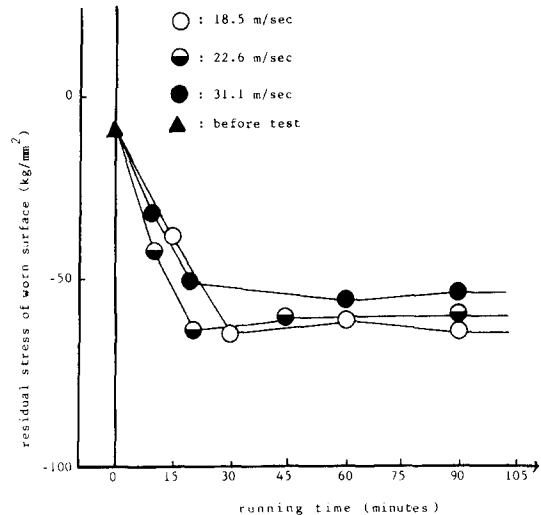


Fig.4. Variation of surface residual stress with running time(at constant maximum contact stress 90 kg/mm²)

한편 일정 마모거리로부터는 각 마모조건에 대하여 표면잔류응력의 변화가 거의 일정하였고, 하중의 증가와 속도의 증가에 따라 표면 압축잔류응력은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상에 관하여 Sasaki 등은 Schallmach¹⁰⁾ 등의 실험보고를 인용하여 표면층에 작용하는 응력의 집중에 의해 마모가 발생할 경우, 이 응력이 재료의 강도한계에 도달할 것인지, 어떤지는 재료의 변형능동에 의존

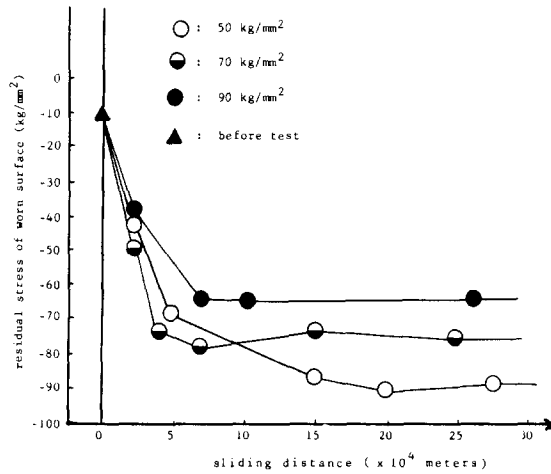


Fig.5. Variation of surface residual stress with sliding distance(at constant rolling speed 18.5 m/sec)

한다고 하였다. 따라서 본 실험의 경우, 고탄소 Cr-Ti 합금강은 고강도와 고경도를 겸비한 재료이나, 인성은 다소 열세임으로 가하여 준 하중과 반복접촉에 의해 마모표면하에서 발생하는 전단응력은 비교적 용이하게 재료의 한계치 즉 항복전단응력에 도달할 것이다. 그 결과 접촉면의 일부에서 파괴가 발생하여 마모분으로 생성됨과 동시에 큰 압축응력이 마모탈락면에 나타날 것을 예상할 수 있다. 따라서 가혹한 마모조건(하중의 증가, 속도의 증가)에서는 표면이 압축잔류응력은 초기에 곧 임계응력치에 도달하여 마모분을 발생시킬 것이고, 계속적인 회전접촉에 의해 내부는 보다 깊은 소성변형층을 가질 것이다. 다시 말하면, 마모조건이 세기가 약할수록 표면에서의 잔류응력은 큰 압축잔류응력을 가질 것은 명백하다. 이와같이 고속회전접촉마모에서 마모조건에 대한 표면잔류응력의 대소는 마모조건에 대한 재료의 저항성으로 평가할 수 있다고 생각된다. 즉 Manson¹¹⁾은 피로시험에서 균열의 발생과 성장의 초기단계를 지배하는 요인을 재료의 변형에 대한 저항성으로 평가하여 연성의 증가는 소성변형에 대한 capacity를 크게 하고, 강도의 증가는 탄성변형에 대한 capacity를 증가시킨다고 하였다. 이 결과를 본 마모실험에서 조사된 잔류응력의 결

과와 연관지어 볼 때, 마모조건이 세기가 약할수록 가하여준 응력은 탄성변형구역에서 작용하다가 반복적인 전단응력의 작용에 의해 소성역으로 천이되나 곧 마모분으로 탈락하리라 생각된다. 더욱이 가혹한 마모조건일수록 짧은 시간내에 마모표면층의 깊은 곳까지 소성변형은 발달할 것이고, 계속적인 반복응력으로 인하여 소성역은 어떤 임계치의 깊이까지 형성되었다고 생각할 수 있다.

한편 이들의 영향외에도 앞서 언급하였듯이 하중의 증가, 속도의 증가는 slip율의 증가로 나타나는 결과는 타연구에서도 보고^{12,13)}되고 있는 바와 같이, 이들 slip에 따른 마모표면의 발달도 마모표면의 응력구배에 영향을 미쳐 응력풀림(stress relieving) 작용에 어느 정도 관여하였다고 생각된다.

3-2. Subsurface Zone의 잔류 응력

Fig.6, 7, 8은 일정속도에서의 하중의 변화에 대한 마모표면하(subsurface zone)의 잔류응력의 변화를, Fig.9, 10, 11은 일정하중에서의 속도의 변화에 대한 마모표면하의 잔류응력의 분포를 나타낸 그림이다. 하중 및 속도의 증가에 따라 마모표면하의 잔류응력은 큰 압축 잔류응력으로 변화하여 갔다. 또한 최대압축 잔류응력의 발생깊이(depth of threshold residual stress)와 그 최대압축잔류응력의 포화깊이(depth of saturated residual stress)는 마모조건이 세기에 따라 다르게 관찰되었다. 이 역시 앞서의 소성변형에 대한 마모표면층의 저항성과 같은 맥락에서 설명할 수 있다.

한편 Klousek^{12,14)} 등에 의하면, 마모표면하의 가공경화되어진 층과 경화되지 않은 층(회복된 층)에서 균열이 발생, 성장한다고 하였다. 이는 이 부근에 가장 큰 전단응력이 존재함을 의미하는 것으로서, 이로 미루어 생각할 때 가하여 준 하중 즉 최대접촉응력에 따라 마모표면하에 나타날 최대전단응력의 깊이를 이론적으로 구하여, 이를 마모실험후 표면하의 잔류응력의 결과와 비교하여 보면, subsurface zone의 가공경화의 정도를 평가할 수 있을 것으로 생각되었다.

따라서 Hertz⁷⁾의 두 탄성체의 접촉응력에 관한 이론식을 도입하여 이를 본 실험의 최대 압축잔류응력의 발생깊이와 그의 포화영역을 이론적 발생깊이와 비교하여 보았다. Table.2

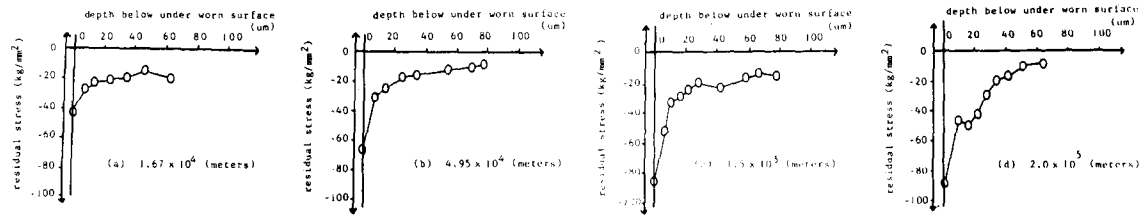


Fig.6. Residual stress distributions after rolling contact fatigue(50mg/mm^2 , 18.5m/sec)

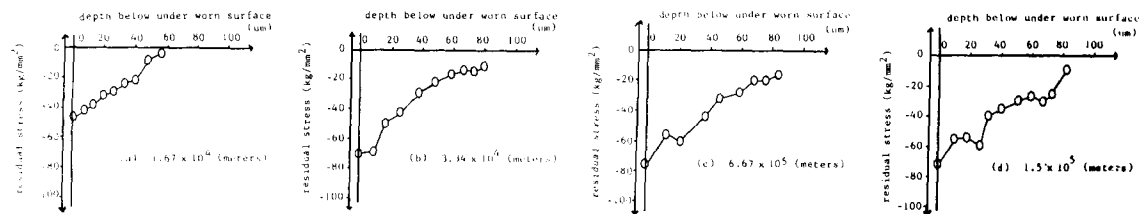


Fig.7. Residual stress distributions after rolling contact fatigue(70mg/mm^2 , 18.5m/sec)

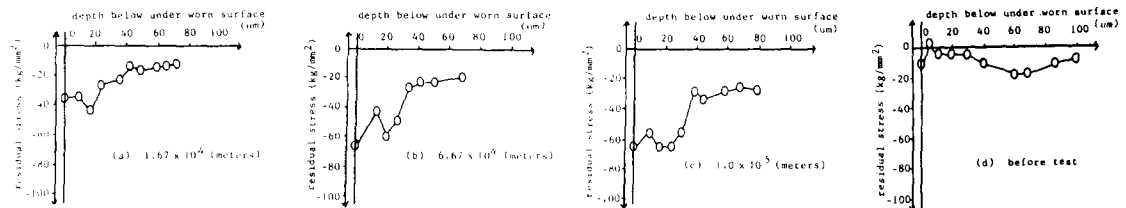


Fig.8. Residual stress distributions after rolling contact fatigue(90mg/mm^2 , 18.5m/sec)

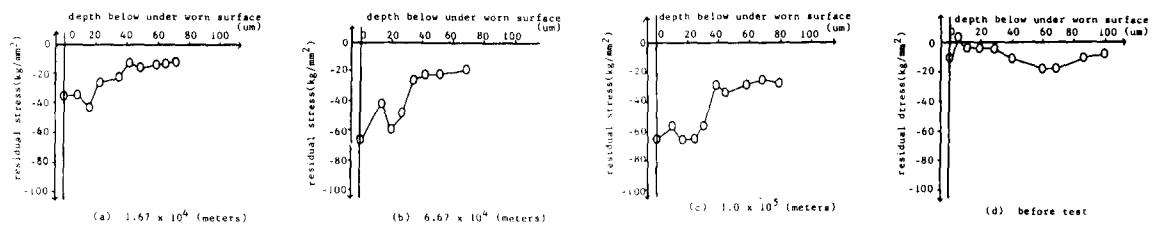


Fig.9. Residual stress distributions after rolling contact fatigue(90mg/mm^2 , 18.5m/sec)

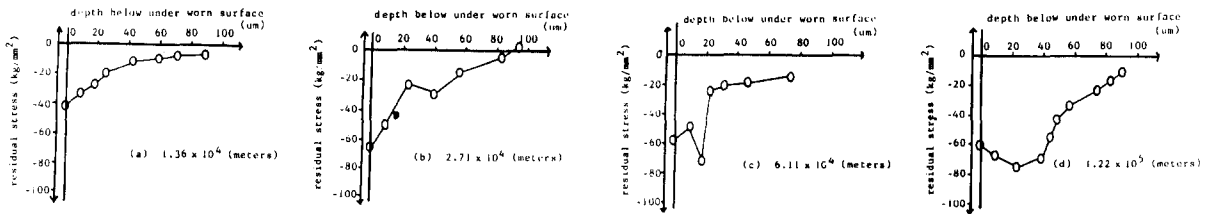


Fig.10. Residual stress distributions after rolling contact fatigue(90kg/mm², 22.6m/sec)

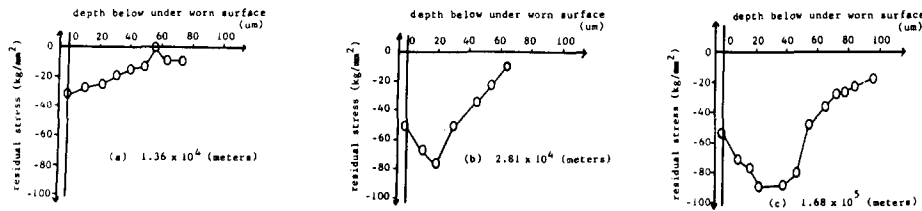


Fig.11. Residual stress distributions after rolling contact fatigue(90kg/mm², 31.1m/sec)

와 Fig.12는 이론적 값과 실험적 값을 나타낸 표와 그림이다. 먼저 표에서 볼 수 있듯이 최대전단응력($\tau_{45^\circ \max}$ or $\tau_{0^\circ \max}$)이 존재하는 이론적 깊이는 50kg/mm²의 경우 39 μ m($\tau_{45^\circ \max}$)와 25 μ m($\tau_{0^\circ \max}$)이고, 90kg/mm²의 경우 각각 70.2 μ m와 45 μ m이었다. 한편 마모실험 후 측정된 최대압축잔류응력의 실험적 깊이는 각각 10~20 μ m와 20~35 μ m의 깊이로 관찰되었다. 이들을 함께 나타낸 것이 Fig.12로서, 그림에서 볼 수 있듯이 실험치가 이론치의 최대잔류응력 발생깊이와 일치하는 경향임을 알 수 있다. 이와같은 현상은 마모표면하의 잔류응력의 측정으로도 마모실험에 따른 subsurface zone의 가공경화의 정도를 평가할 수 있음을 나타내는 지표로 생각되며, 본 실험의 결과는 Muro¹⁵⁾등의 연구결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다. 여기서 이론치와 실험적 결과와의 다소의 차이는 이론치의 경우는 정적상태에서 존재하는 최대전단응력의 발생깊이이나, 본 실험의 경우는 동적상태 즉 마모후 발생한 소성변형에 의한 최대잔류응력의 발생깊이의 차이점과 slip을 기인한 접선력(tangential force)의 발생 및 이들의 수직력(normal

force)과 결합하여 보다 큰 응력(resultant force)으로 작용하여 소성변형을 급속히 진행시켰기 때문이라 생각한다. 이는 Jonhson¹⁶⁾이 보고한 접촉마모에서의 탄성, 소성변형의 천이곡선에서도 slip율에 따른 접선력(tangential force)의 발생은 소성변형으로의 resultant force를 낮추는 것이라는 연구결과와도 잘 일치하고 있다. 결과적으로 마모실험 후 마모표면과 표면하의 subsurface zone의 잔류응력을 측정하는 것이 마모의 상태 즉 마모의 조건이나, 마모량 등을 평가할 수 있는 지표로 설명할 수 있다고 사려된다.

Table.2. Calculated value of depth of $\tau_{45^\circ \max}$ and $\tau_{0^\circ \max}$ under various contact stress.

P_{\max} (kg/mm ²)	90	80	70	60	50
Z1 (μ m)	70.2	62.4	54.6	46.8	39
Z 2 (μ m)	45	40	35	30	25

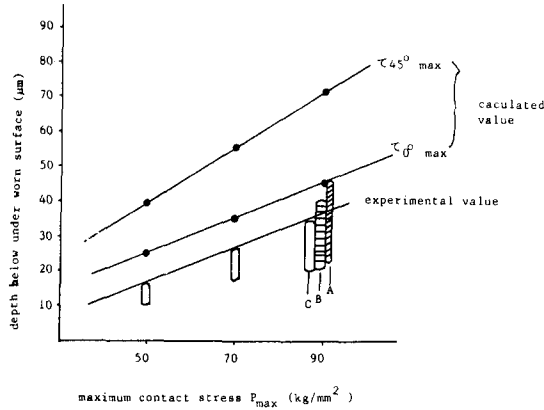


Fig.12. Relation between the location of residual stress peak and calculated depth of $\tau_{45^\circ \max}$ and $\tau_{0^\circ \max}$.

(A:31.4 m/sec, B:22.6 m/sec, C:18.5 m/sec)

4. 결 론

마모표면과 표면하 subsurface zone의 잔류응력측정에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 실험전 표면잔류응력은 실험후 마모특성에 아무런 영향이 없었다.

2) 접촉응력 및 회전속도가 증가할수록 표면잔류응력은 감소하여 갔으나 subsurface zone에서의 최대압축잔류응력은 증가하였다.

3) 최대압축잔류응력이 포화되는 깊이는 속도와 하중의 증가에 비례적인 관계로 나타났다.

4) 최대압축잔류응력의 발생깊이는 이론적 최대전단응력의 표면하의 깊이와 비슷한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. K. M. Kang, S. S. Ko and J. T. Song:J. Korean Inst. Met., 26(1988) 1164
2. K. M. Kang and J. T. Song:Wear, 140 (1990) 119
3. S-ichi Nagashima, N.Tanaka, T. Ohtsubo and K. Akimoto:材料, 32, No. 363 (1983) 22
4. 佐佐木敏美, 山田 俊, 波多野和好:日本金屬學會, 38(1974) 599
5. 山田 俊 佐佐木敏美:ibid., 39(1975) 1199
6. E. Macherauch:Exp. Mech., March,(1966) 140
7. K. L. Johnson, Cambridge Unive., Press, (1985)
8. Metal Finishing 52nd Guide book-Directo-ry Issue,(1984) 425
9. 金屬表面技術便覽, 月刊工業,(1973) 127
10. A. Schallmach:Wear, 1(1957/58) 384
11. S. S. Manson:Exp. Mech., 5(1965) 193
12. J. Kalousek and A. E. Bethune:ASTM. STP. 644, (1976) 63
13. H. Masumoto, K. Sugino, S. Nishida, R. Kurihara and S. Matsuhama:ibid., (1976) 233
14. W. A. Galeser:Wear of Materials, K. C. Ludema(Ed.), ASME, (1983) 434
15. H. Muro and N. Tsushima:Wear, 15 (1970) 309
16. K. L. Johnson:ibid., 9(1966) 4