

|||||||
 論 文
 |||||

X선회절에 의한 구상흑연주철의 구름접촉 피로손상도 평가

이 한 영

Evaluation of Rolling Contact Fatigue Damage of DCI by X-ray Diffraction

Han-Young Lee

ABSTRACT

Evaluation of rolling contact fatigue damage as well as material development for roll of rolling mill is being studied until quite recently. In this paper, a focus has been imposed on evaluating the rolling contact fatigue damage. In order for this, the accumulating process of rolling contact damage using the ferritic, pearlitic and bainitic DCI has been analyzed by X-ray diffraction technique. The main finds are; 1) The graphite in DCI is considered to be a cause of interfering in the redistribution of stress. Eventually, it results in the branching of crack. 2) The evaluation of rolling contact fatigue damage can be estimated in terms of the change of residual stress and/or a half-value breadth on surface during rolling contact.

(Received October 9, 1997)

1. 서 론

현재 압연기술에 있어 압연량의 증대와 제품의 품질향상, 압연재료의 다변화 등의 경향에 대응하기 위하여 압연롤의 소재개발과 압연롤의 수명평가기술에 대한 연구가 다방면에서 행해지고 있다.

압연롤의 소재개발과 관련된 연구는 주로 화학성분 조절과 열처리방법의 개선에서 이루어지고 있으나 압연롤의 특성상 표면의 제강도가 그 성능에 많은 영향을 미치므로 최근은 표면층의 조직개량에 국한하는 측면에서도 검토되어 지고 있다[1-5]. 저자도 이러한 압연롤의 소재개발이 베이나이트조직을 중심으로 이루어지고 있는 것에 착목하여 오스템퍼처리한 구상흑연주철(ADI)의 적용을 검토해 그 유효성을 이미 확인한 바 있다[6].

압연롤의 수명평가기술은 설비의 안정조업, 효율적 운용 및 보전, 코스트저감 등의 과제를 해결하기 위해 구름마찰에 의한 손상을 비파괴적으로 사전에 검지할 수 있는 방법을 모색하는 것으로 현재 소재개발과

아울러 이에 관한 연구도 많이 행해지고 있다[7-10]. 이러한 연구는 현재 대부분 압연후 압연롤 표면을 X선회절하여 얻어진 회절선의 반가폭이 증가 또는 감소하는 현상에 주목하여 검토하고 있으나 아직 실제 실용화 측면에서 사용 중에 압연롤을 정기 점검하여 수명을 평가하는 의미에서는 아직 미흡한 상태라 할 수 있다.

저자는 그간 구름베어링을 대상으로 구조용 탄소강을 사용해 이미 구름마찰에 의한 손상해석 및 수명평가를 X선에 의해 정량적으로 해석할 수 있음[11]을 밝혔으나 압연롤도 소재만 틀릴 뿐 같은 운동형태의 기계요소이므로 그 적용성이 기대되어 진다 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 구상흑연주철을 냉연 back-up롤용으로 적용할 경우 구름마찰에 대한 특성규명과 수명평가의 가능성을 조사하기 위하여 기저조직이 페라이트, 퍼얼라이트, 베이나이트인 구상흑연주철을 사용해 각각 구름마찰과정에 따른 손상축적과정을 X선회절기술로 조사, 해석하였다.

2. 실험방법

2.1 시편

원소재는 연속주조한 직경 50 mm의 페라이트기지의 구상흑연주철(C 3.67wt%, Si 3.13wt%, Mn 0.19wt%, P 0.045wt%, S 0.004wt%, val.)의 환봉을 사용하였다.

시편은 환봉을 선삭가공한 그대로의 페라이트기지와 질소가스로 버블링시킨 알루미늄입자의 유동상열 처리로에서 900°C에서 1시간 오스테나이트화 한 후 공랭한 퍼얼라이트기지 그리고 오스테나이트화후 400°C의 염욕(BaCl₂: KCl를 몰비 2:3으로 배합)속에서 1시간 및 3시간 항온변태시킨 후 공냉(오스텨퍼처리)한 베이나이트기지의 구상흑연주철을 제작하였다.

2.2 구름마찰시험 및 X선회절시험

구름마찰시험은 Armsler형 구름마찰시험기를 사용해 윤활상태에서 행했다. 시편의 크기 및 접촉상태를 Fig. 1에 나타내었다. 이때 상대재로는 켄칭후 템퍼링한 베어링강 STB2(SAE 52100에 상응)을 사용하였고, 미끄럼비는 10%(회전수: 시편-200 rpm, 상대재-220 rpm), 그리고 하중은 헤르쯔의 최대접촉압력(이후 접촉압력)이 1300MPa(페라이트재의 경우는 1300 MPa 및 900 MPa)로 되는 조건을 택하였다.

구름마찰시험은 최대 2×10⁶회전까지로 하고 시험도중 수명에 달한 경우는 그 회전수에서 시험을 중단하였다.(페라이트재의 경우 접촉압력 1300 MPa에서

Table 1. Conditions for stress measurement by X-ray diffraction

Tube of X-ray	CrKα	
Current and voltage	20 mA, 40 kV	
Irradiation area	2×2 mm ²	
Diffraction plane	α-Fe(211)	γ-Fe (220)
Time constant	2 sec	4 sec
Scan speed	1° 2θ/min	0.5° 2θ/min
Angle of φ* and ψ** (degree)	φ=0, 180 ψ=0, 12, 27, 42	φ=0, 180 ψ=0, 25, 37, 48

*angle between the incident angle of x-ray and the Folly direction

**angle between the specimen normal and the normal of the diffracting plane.

5×10⁴회전, 900 MPa에서 2×10⁵회전에서 피팅발생으로 수명도달)

X선회절시험은 각 시편이 소정의 회전수에 도달할 때마다 시험을 중단하고 구름마찰면의 잔류오스테나이트체적율, 페라이트 및 오스테나이트상의 잔류응력 그리고 각 회절선의 반가폭 등을 측정, 계산하였다.

잔류오스테나이트의 체적율계산은 CoKα선률 이용해 앞의 보고[6]와 같은 측정계산방법을 취했다. 또한 잔류응력은 CrKα선을 이용해 페라이트상에 대해서는 (211)면, 오스테나이트상에 대해서는 (220)면을 ψ일정법으로 측정하여 sin²ψ법으로 계산하였다. 이때의 X선회절시험조건을 Table 1에 나타내었다.

응력계산시 페라이트상의 X선응력상수로는 일반적으로 채택되는 -293.2 MPa/deg.를 사용하였고 오스테나이트상의 X선응력상수로는 후쿠라의 결과[12]에 의한 -132 MPa/deg. (X선적탄성정수:1/2S₂=6.32×10⁻⁵ mm²/kg)를 사용하였다. 이들 X선응력상수는 철강재료에 대한 값이나 주철의 경우는 철강재료에 비해 탄성계수가 적어 실제로는 다소 큰 값임이 예상되나 응력의 종류 및 상대적인 평가에는 큰 영향이 없을 것으로 판단되어 이들 값을 채용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 구름마찰에 따른 잔류오스테나이트체적율의 변화

오스텨퍼재를 X선회절에 의해 측정된 잔류오스테나이트의 체적율은 1시간 처리재가 약 21%, 3시간 처리재가 약 13%로 이 량은 지난 연구결과[6]에서 동일한

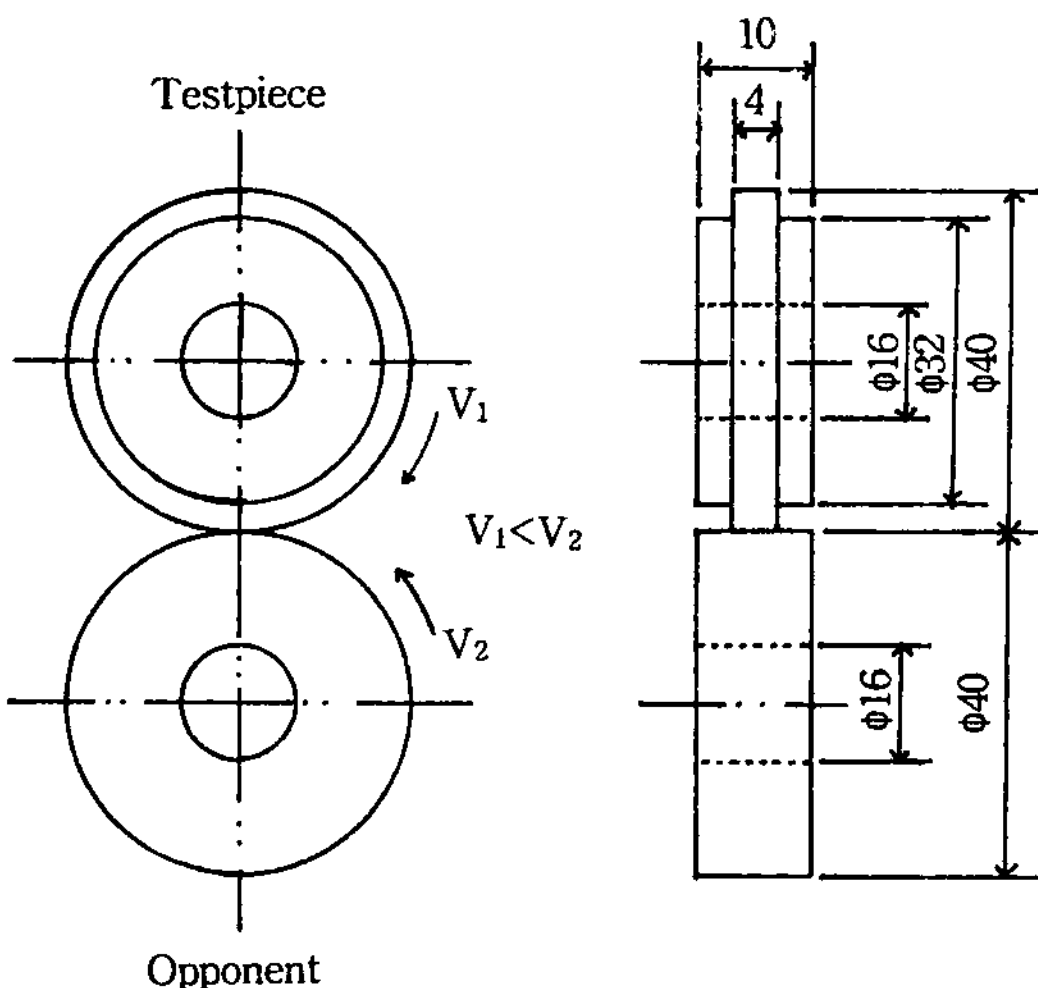


Fig. 1. Configuration of testpiece and opponent.

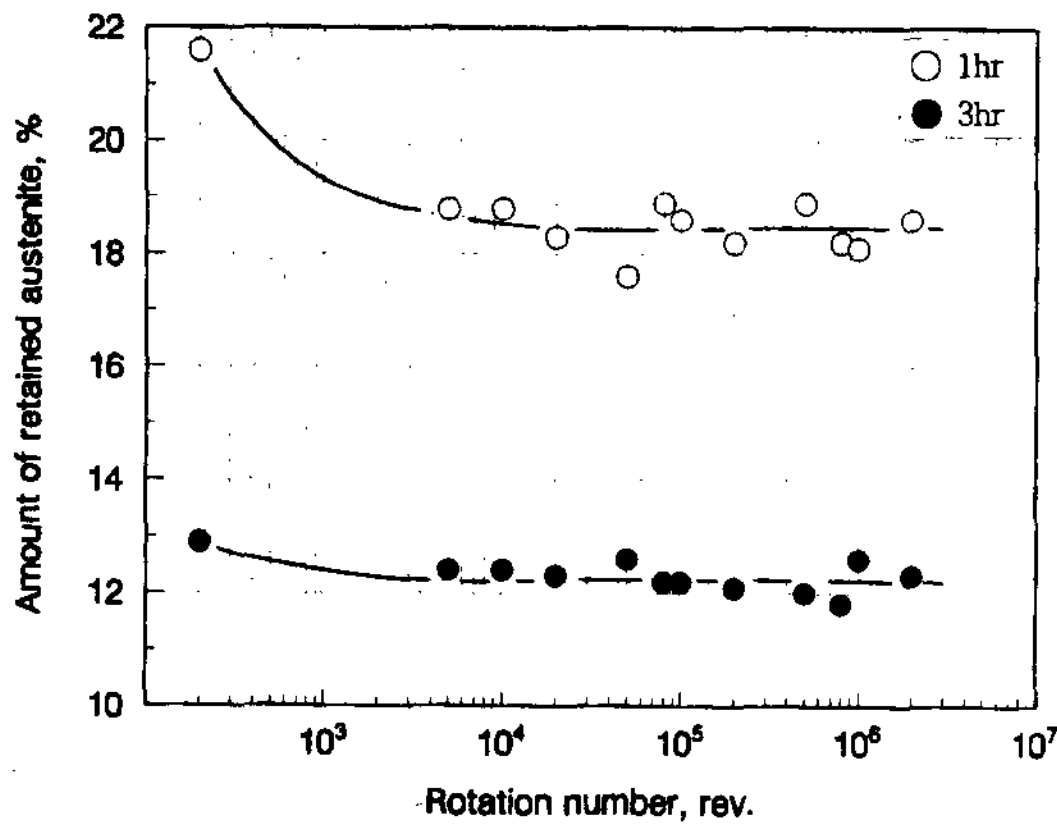


Fig. 2. Variation of amount of retained austenite with rotation number.

처리에서 얻은 체적율보다 감소된 것으로 밝혀졌다.

이것은 본 연구에 사용된 소재가 연속주조재이고 Si량이 지난번에 비해 많기 때문으로 생각되어 진다. 결국 냉각속도가 빨라 흑연의 입자수가 증가하게 되어 흑연간의 간격감소를 초래한다. 이로인해 베이나이트변태시 배출되는 탄소가 흑연부로의 확산이 용이해지므로 미변태오스테나이트중의 고용탄소량의 감소를 초래하고, 이것이 베이나이트변태를 촉진하므로 잔류오스테나이트량이 적어진 것으로 생각되어 진다.

Fig. 2에는 이들 오스템퍼처리재의 구름마찰회전수에 따른 구름마찰면의 잔류오스테나이트의 체적율의 변화를 나타내었다. 그 양의 변화는 구름마찰시험초기에만 감소하고 있으며 5×10^3 회전이후는 거의 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 그 감소량도 1시간처리재에서는 약 3%, 3시간처리재에서는 약 1%로 상당히 적다는 것을 알 수 있다. 이러한 잔류오스테나이트상의 감소는 표면의凸부가 소성변형하거나 초기마모에 의해 잔류오스테나이트의 일부가 가공유기마르텐사이트로 변태된 것으로 추측되어 진다. 따라서 실제로는 본 시험 하중하에서는 구름마찰에 의해 잔류오스테나이트는 거의 분해되지 않는다는 것을 알 수 있다.

구름마찰의 경우 재료에 작용하는 최대전단응력은 표면하부일정한 깊이에 작용하게 되나 시험조건이 미끄럼율이 10%인 점과 표면거칠기에 의한 표면층의 변형상승을 고려하면 접촉표면하부에서의 변태도 거의 없을 것이 분명하다.

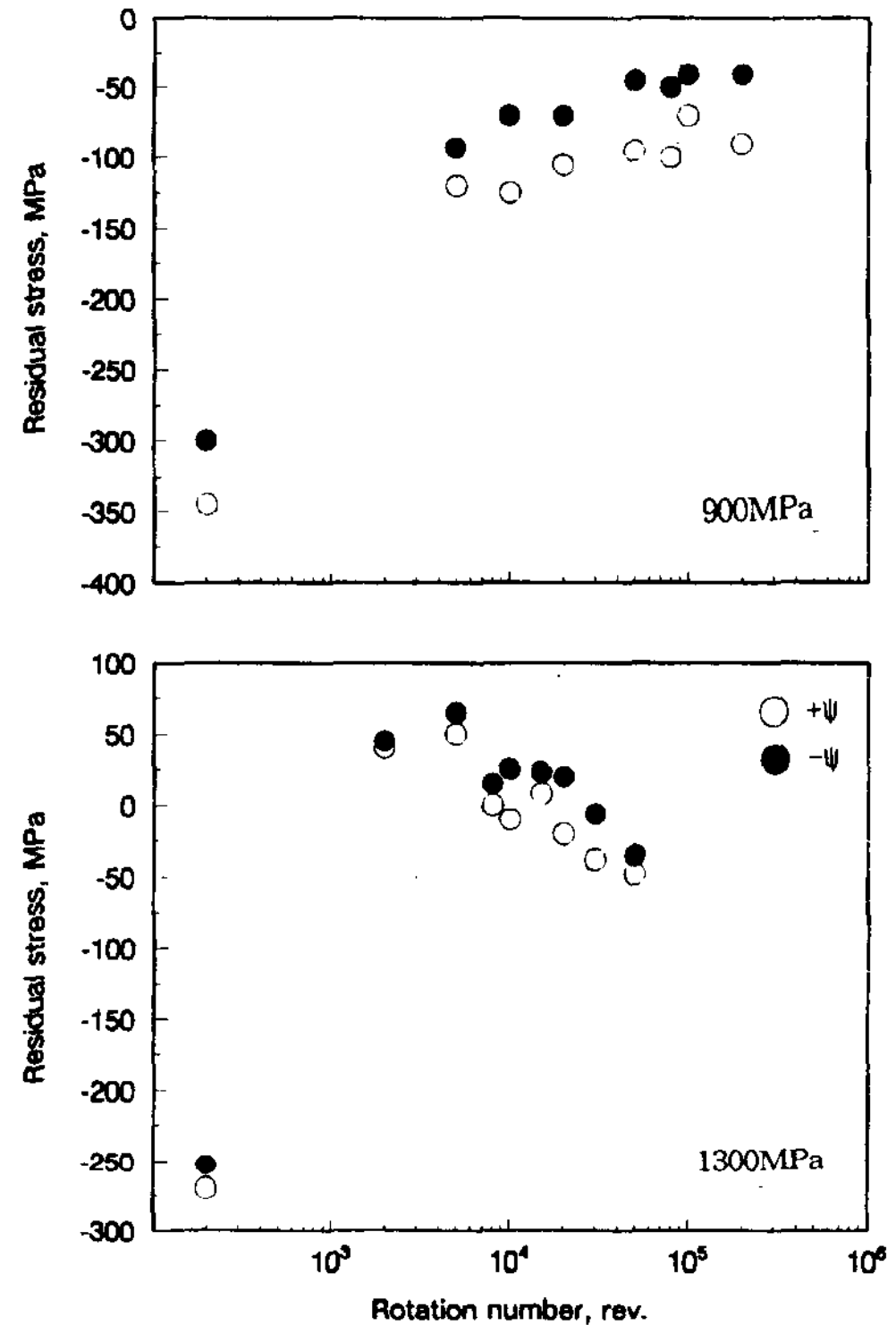


Fig. 3. Variation of residual stress with rotation number (Ferritic structure).

3.2 구름마찰면의 잔류응력변화

Fig. 3은 페라이트기지의 재료를 각 접촉압력하에서 구름마찰시험하여 회전수에 따른 잔류응력의 변화를 정리한 것이다. 그림 중에 $+\psi$ 방향은 입사 X선을 구름방향 ($\Phi=0^\circ$)으로 기울여 측정하였을 경우이고 $-\psi$ 방향은 반대방향($\Phi=180^\circ$)으로 기울여 측정한 경우이다.

이들 변화에서는 시험전에는 선삭가공에 의해 압축잔류응력이 존재하고 있으나 구름마찰과 동시에 (5×10^3 회전) 급속히 감소하고 있음을 알 수 있다. 1300MPa에서는 인장의 잔류응력상태를 보인 후 다시 압축상태로 변하고 있으나 900MPa에서는 인장의 응력상태로의 변화는 보이지 않으며 회전수에 따라 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이들의 수명시의 응력값은 하중에 관계없이 거의 같은 값(-50 MPa)을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 + 방향의 응력치와 - 방향의 응력치의 불일치를 나타내는 소위 split현상 [13]도 접촉압력이 큰 경우는 적으나 접촉압력이 적은 경우는 크게 나타나 주응력면이 다소 기울어져 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 이들의 표면손상이 나타

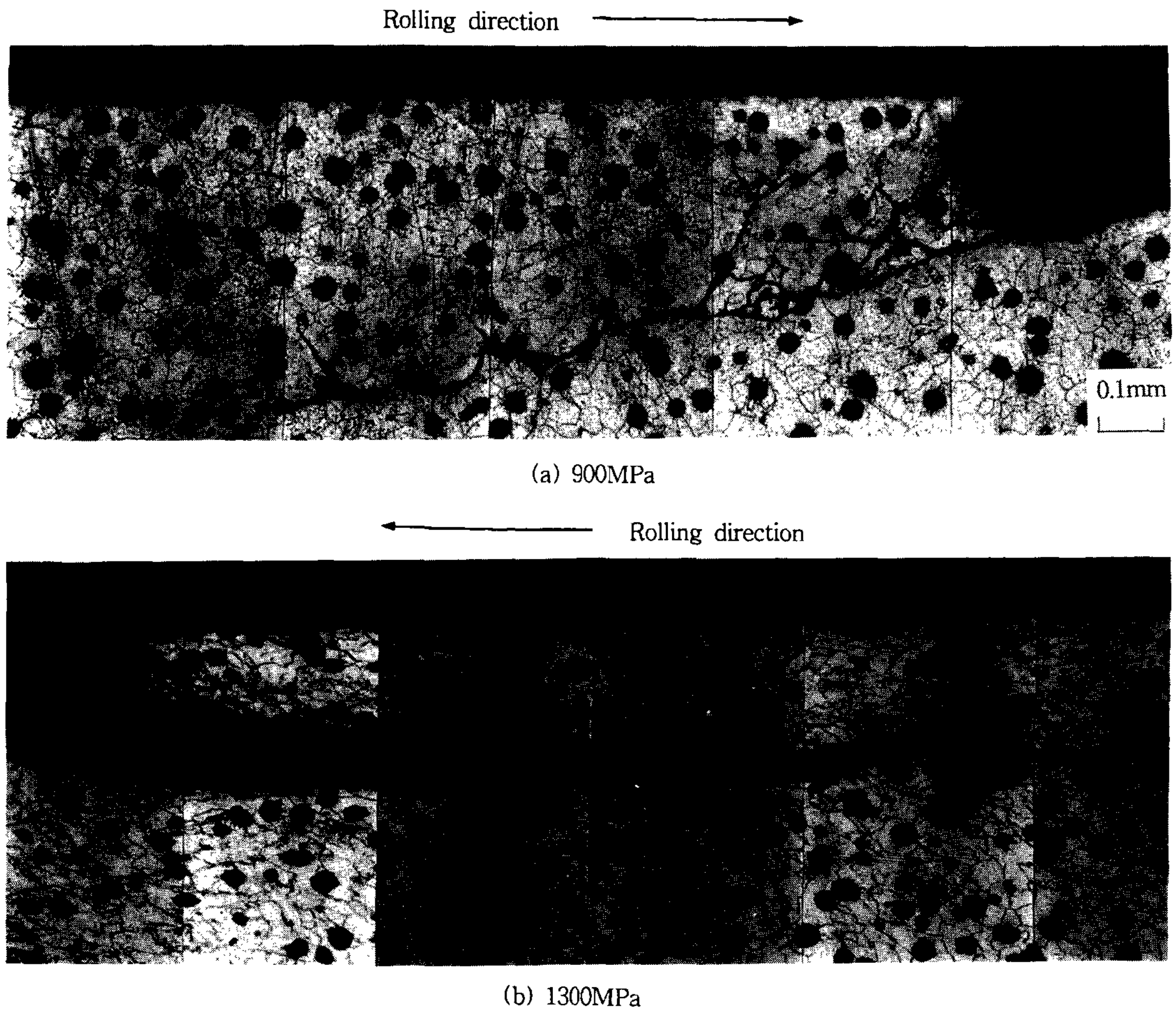


Fig. 4. optical micrographs of parallel section to the rolling direction after test.

난 부분의 구름방향으로 절단한 후 조직관찰한 결과이다. 접촉압력 900 MPa의 경우는 전혀 거시적인 소성유동이 안보이고 또한 균열은 분지하고 있으며 또한 이들은 앞의 보고[6]와 마찬가지로 대부분 흑연을 연결하여 흑연이 균열발생이나 전파와 관련이 깊음을 알 수 있다. 한편 1300 MPa의 경우는 최대전단응력이 작용하는 깊이부근에 거시적인 소성유동과 그것을 따라 균열이 전파하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 퍼얼라이트재의 회전수에 따른 잔류응력의 변화를 나타내고 있다. 시험전에는 약 25 MPa의 인장의 잔류응력을 나타내고 있으나 회전수증대에 따라 split현상이 극단적으로 크게 나타나 - 방향은 인장, + 방향은 압축의 잔류응력을 보이고 10⁵회전까지는 그들의 절대값이 거의 같음을 알 수 있다.

Fig. 6은 오스템퍼처리재의 회전수에 따른 페라이트

상의 잔류응력의 변화를 나타내고 있다. 이들 변화도 퍼얼라이트재의 경우와 마찬가지로 시험전에는 가공

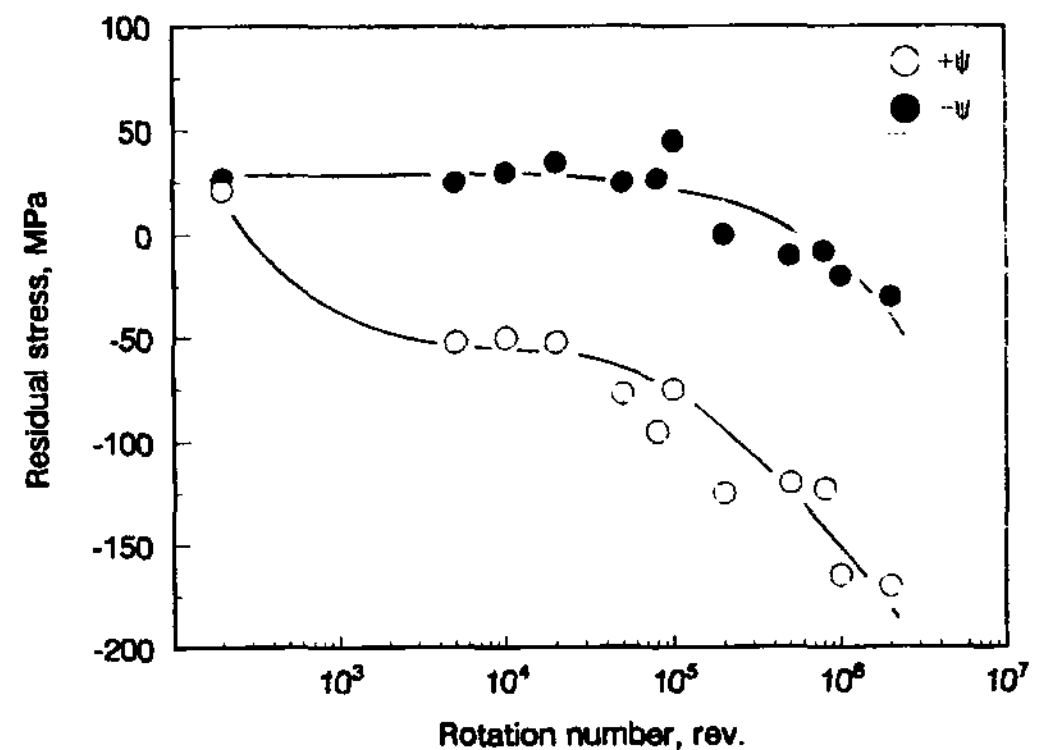


Fig. 5. Variation of residual stress with rotation number (Pearlitic structure).

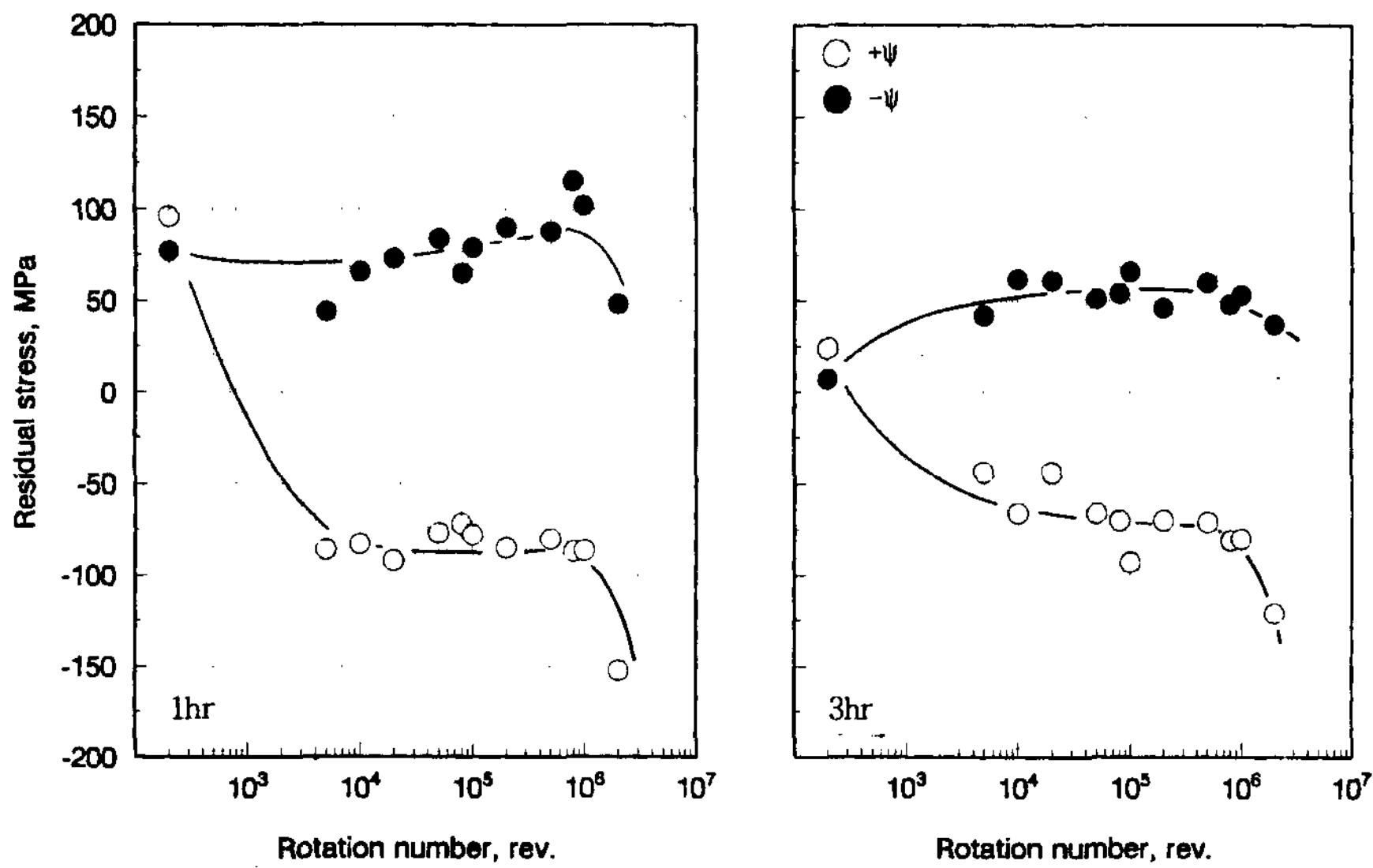


Fig. 6. variation of residual stress with rotation number (Bainitic structure).

에 의해 1시간처리의 경우는 약 100 MPa, 3시간처리의 경우는 30 MPa의 인장의 잔류응력이 존재하고 있고 회전수증대에 따라 방향은 인장, + 방향은 압축을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 퍼얼라이트재와 마찬가지로 그들의 절대값도 거의 같음을 알 수 있다.

본 연구에서 목표 회전수(2×10^6 회전)까지 페라이트재를 제외하고는 수명에 달하지 않았으나 Fig. 5~6의 변화에서 퍼얼라이트재의 경우 10^5 회전, 오스템퍼 1시간처리재의 경우는 10^6 회전, 3시간처리재의 경우는 5×10^5 회전후에 방향에 관계없이 전부 압축응력쪽으로 변화하는 현상이 관찰됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 그들의 변화 회전수가 퍼얼라이트재, 3시간처리재, 1시간처리재의 순으로 이것은 앞서 보고한 이들의 수명경향[6]과 일치한다는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 현상은 강의 경우[11]와 마찬가지로 압연 roll의 손상발생을 예측할 수 있는 현상으로 판단되어 진다.

페라이트재의 고접촉압력시험에서 초기에 인장의 잔류응력발생은 일반적인 고압하울하의 압연에서 표면층에 인장의 잔류응력이 발생[14]에 상응하는 현상이나 그 이후의 변화는 그 부위의 가공경화에 따라 shake-down limit도 커져 변형은 더 이상 진행하지 않고 정상적인 구름접촉피로과정에 의해 손상축적, 미세균열의 발생 및 전과과정을 거치므로 다시 압축쪽으로 선회하는 것으로 추측되어 진다[11].

강과 같은 연속조직의 재료에서는 일반적으로 재료

의 정도와 관계없이 구름마찰에 의해 표면층은 압축 잔류응력이 존재하게 되고 방향에 따른 응력차도 크지 않아 주응력면이 거의 구름방향에 일치하게 된다. 이것은 구름접촉에 따른 소성변형이 재료의 입내 또는 입계를 따라 근접한 다른조직에 균일한 영향을 미쳐 응력의 재분포가 일어 남을 말해 주는 것이다.

구상흑연주철과 같이 조직내에 존재하는 구상흑연은 거의 외력에 대해 힘의 분담을 못하므로 연속조직으로 생각할 수 없다. 따라서 퍼얼라이트조직, 베이나이트조직, 저접촉압력의 페라이트조직과 같이 흑연의 변형이 없고 기지조직에 미세적인 소성변형이 일어나면 흑연의 최대전단응력방향 좌우부위와 상하의 평행한 부위간의 변형정도가 상이하므로 하중이 제거된 뒤의 흑연주위의 응력분포는 균일하지 않을 것으로 생각된다. 이것이 이들의 주응력면을 경사지게 하는 원인으로 생각된다. 그러나 고접촉압력의 페라이트와 같이 흑연이 최대전단응력방향으로 변형되고 기지조직도 동일방향으로 변형되므로 하중이 제거된 후에 흑연주위의 응력분포는 거의 균일해 질 것으로 추측되어 진다. 이러한 흑연 주위의 응력분포의 균일성여부의 차이가 Fig. 3, 5, 6의 경향으로 나타난 것으로 추측된다.

그러나 페라이트기지의 저접촉압력에서는 고접촉압력에 비해 split현상은 현저하나 퍼얼라이트 및 베이나이트기지의 결과처럼 주응력면이 극단적으로 구름

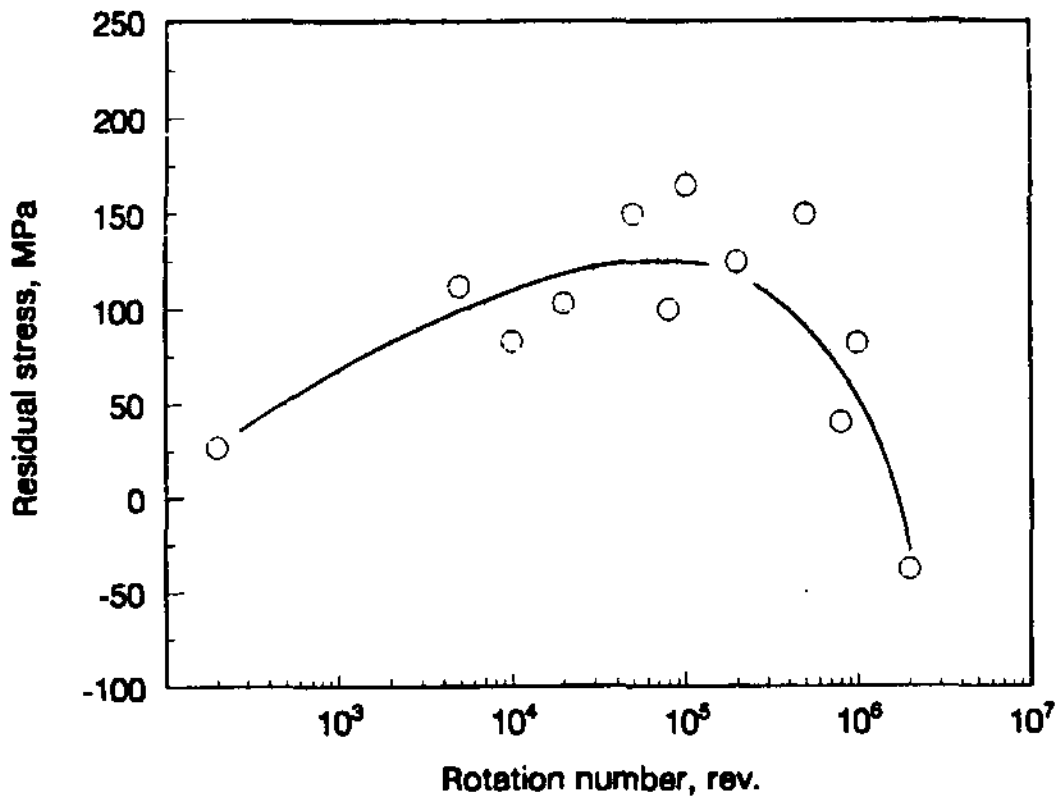


Fig. 7. Variation of residual stress in retained austenite with rotation number (at 1300 MPa, 1 hr).

방향과 45° 기울어져 있을 정도의 인장과 압축의 잔류응력의 공존이 관찰되지 않은 원인에 대해서는 불명확하나 퍼얼라이트 및 베이나이트상에 존재하는 세멘타이트도 응력분포의 균일성에 영향을 미친다는 것을 추측할 수 있다.

이와같은 응력분포의 균일성유무에 따른 강도적인 측면에서의 영향은 명확하지 않으나 일반적인 구름마찰에 의한 균열생성방향이 구름방향과 반대방향이므로 (이것은 표면균열발생의 경우 소성유동방향과 일치) 인장의 잔류응력은 구름마찰방향이 역전되지 않는 한 큰 영향이 적을 것으로 추측되나 전파시에는 영향을 미칠 것으로 사료된다.

Fig. 7은 1시간 오스템퍼처리한 재료의 잔류오스테

나이트상의 응력을 측정된 결과이다. 사실 이 결과는 잔류오스테나이트함유량이 적어 회절강도가 낮고 또한 회절각도가 저각도인 관계로 절대적인 값에 대한 신뢰성은 없으나 시험전후에도 인장의 잔류응력을 가지고 있음은 분명하다(방향에 무관). 이러한 결과는 베어링강(SAE52100)을 구름마찰시험한 경우 잔류오스테나이트상에 압축응력이 존재한다는 결과[15]와는 상반되나 결국 이러한 현상도 흑연의 존재에 따른 응력분포의 균일성여부와 밀접한 관계가 있을 것으로 추측되나 명확하지 않다. 이와같이 잔류오스테나이트상이 인장의 잔류응력을 가지나 오스테나이트상은 페라이트에 비해 고인성이므로 양이 적으면 그 영향을 무시할 수 있으나 그 양이 많아지면 악영향도 배재할 수 없을 것으로 추측되어 진다.

이러한 측면에서 대부분 구름마찰시의 구상흑연주철의 균열은 흑연을 관통하므로 흑연이 균열발생과 밀접한 관계를 가지는 것은 명백한 사실이나 전파시는 흑연의 변형유무에 따라(즉 주응력면의 기울어지는 것) 균열의 분지에 영향을 미치는 것으로 추측되어 진다.

3.3 구름마찰에 의한 반가폭의 변화

현재 압연roll의 수명평가기술에 가장 널리 사용되고 있는 변수로는 회절선의 반가폭를 들 수 있다. 이 경우는 표면하부의 반가폭분포를 측정하여 그 분포형태를 해석하는 방법을 취하고 있다[7-10]. 그러나 이

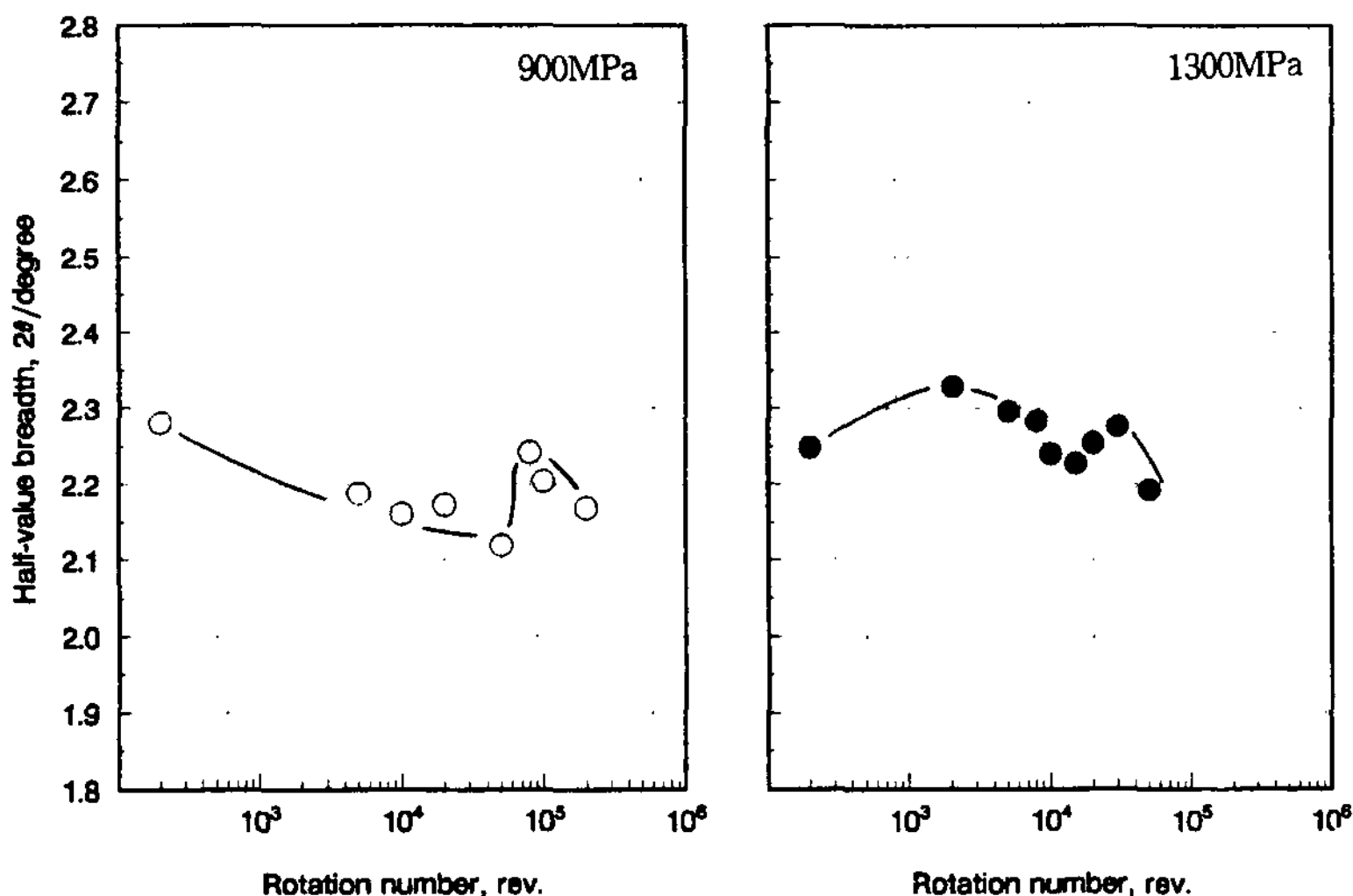


Fig. 8. Variation of half-value breadth of diffraction profile with rotation number (Ferritic structure, $\psi=0^\circ$).

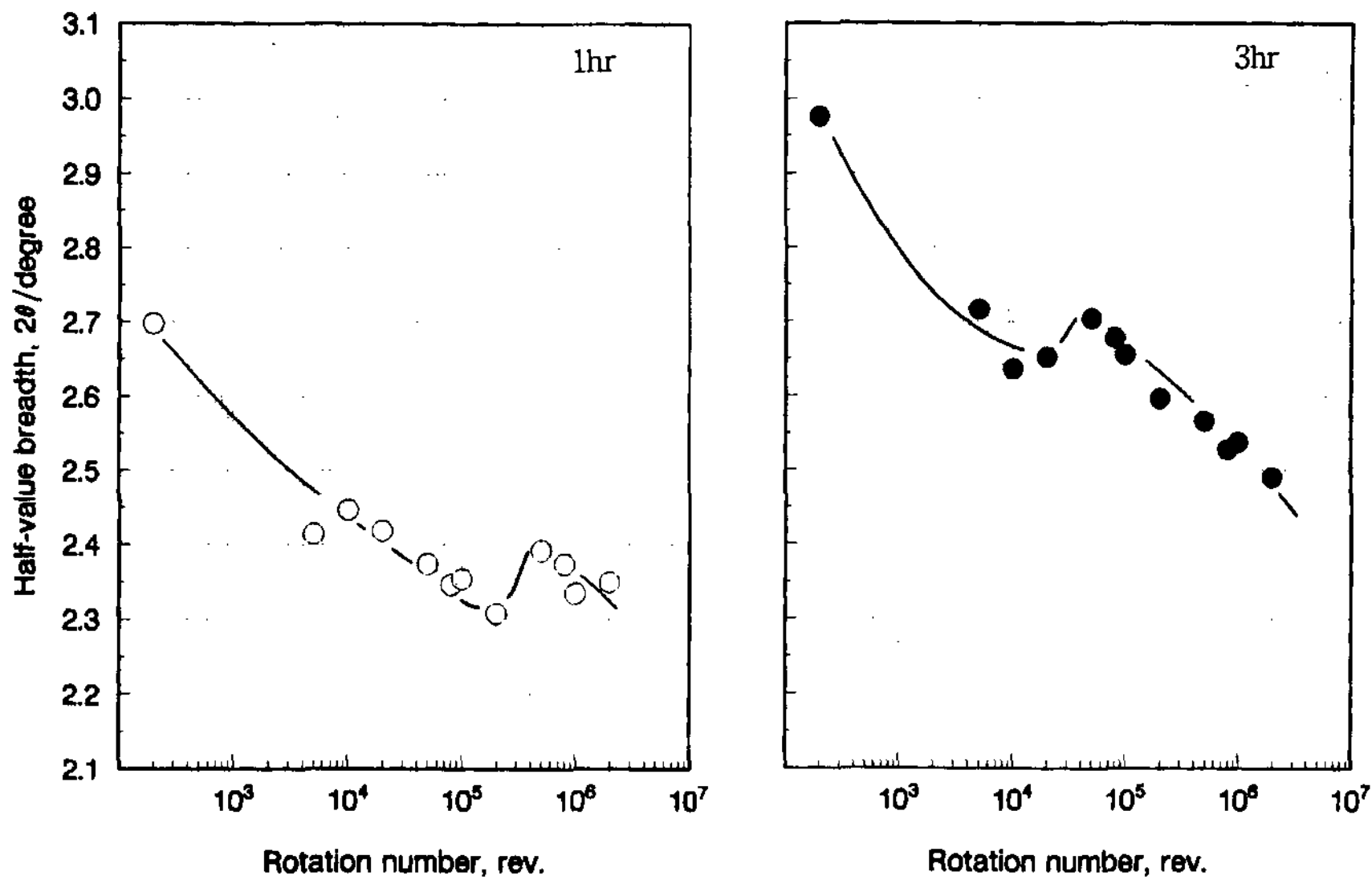


Fig. 9. Variation of half-value breadth of diffraction profile with rotation number (Bainitic structure, $\psi=0^\circ$).

방법은 재료경도에 따라 분포형태가 바뀔 뿐만 아니라 내부분포를 측정을 하여야 하므로 비현실적이라 할 수 있다.

저자는 일반구조용 탄소강을 이용해 구름마찰에 의한 손상발생까지 표면의 반가폭변화가 극대극소를 나타내며 수명시 일정한 값을 가진다는 사실[11]을 밝힌 바 있다.

Fig. 8은 페라이트재를 900 MPa 및 1300 MPa에서 시험하면서 측정한 구름마찰면의 $\Psi=0^\circ$ 시의 반가폭의 변화를 나타내고 있다. 초기의 반가폭은 가공의 영향으로 상당히 큰 값을 나타내고 있으나 그 이후의 변화는 일반탄소강의 경우와 마찬가지로 회전수증대에 따라 극대극소의 변화를 나타내고 변화하고 있으며 수명시에는 접촉압력과 무관하게 거의 동일한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 구름마찰에 의한 미세조직의 변화는 흑연의 존재유무에 관계 없이 동일하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 오스템퍼재의 반가폭의 변화를 나타내고 있으나 Fig. 8과 마찬가지로 극대극소현상이 관찰되고 있음을 알 수 있다. 이들은 수명에 도달하지 않았으나 1시간처리재의 경우는 5×10^5 회전, 3시간처리재의 경우는 5×10^4 회전부근에서 극대를 나타낸 후 감소하는 것으로 보아 강의 경우와 마찬가지로 이후는 반가폭이 소정의 값에 도달하면 곧 손상발생이 일어날 상황 [11]임을 알 수 있다.

따라서 구상흑연주철의 구름마찰에 의한 손상측정도 평가는 표면의 잔류응력 및 반가폭을 정기적으로 측정하여 이들 경향을 분석하므로써 충분히 정량화 가능하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

3가지 기지조직의 구상흑연주철을 구름마찰시험하면서 그 손상축적과정을 X선회절을 통해 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 페라이트재의 회전수에 따른 잔류응력의 변화는 흑연조직의 변형유무에 따라 상이하며 흑연변형이 없으면 주응력면이 기울어진다.
- 2) 퍼얼라이트재와 베이나이트재의 경우는 측정방향에 따라 인장과 압축의 잔류응력이 공존하여 주응력면이 극단적으로 구름방향과 45° 를 이루고 있음이 밝혀졌다.
- 3) 구상흑연주철의 구름마찰에 의한 잔류응력의 변화는 수명부근에서 급변하고 미세조직의 변화를 반영하는 반가폭의 변화는 탄소강과 동일한 변화과정(극대극소변화)을 나타내어 구름접촉에 의한 피로손상의 평가가 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 구상흑연주철내의 흑연은 균열의 발생과 전파에 큰 영향을 미치고 균열의 분지는 흑연의 변형유무에 의존하는 것으로 밝혀졌다.

참 고 문 헌

- [1] 山岡義典 : 金屬(臨時增刊號), 8 (1980) 88.
- [2] 橋本隆 外 : クボタ技報, 7, 1 (1982) 21.
- [3] A.W. Durman and D.W.J. Elwell : The British Foundryman, 9 (1985) 371.
- [4] F. Maratray and R. Usseglio-Nanot : "Factors affecting of strucyure of Cr and Cr-Mo White Irons", Climax Molybdenum S.A.
- [5] 橋本隆 外 : クボタ鐵工(株)資料.
- [6] 李漢瑛 : 鑄造 14, 3 (1994) 267.
- [7] 武智弘 外 : 日本鐵鋼協會講演誌 (1976) 355.
- [8] 武智弘 外 : 日本鐵鋼協會講演誌 (1977) 300.
- [9] X材料強度部門委員會[塑性と破壊]分科會 : 材料 28, 312 (1979) 847.
- [10] 武智弘 外 : 鐵と鋼 14 (1979) 2067.
- [11] 李漢瑛, 川本信 : トライボロジスト 34, 11 (1989) 815.
- [12] 福良二郎 : 第6回 X線材料強度に對する討論會 (1969) 18.
- [13] 室博 : 潤滑 23, 11 (1978) 828.
- [14] 米谷茂 : "殘留應力の發生と對策" 養賢堂 (1987) 189.
- [15] 李漢瑛 : 大韓金屬學會 32, 2 (1996) 150.