

疲勞強度에 대한 表面微小 缺陷의 影響

The Effect of the Surface Defect from Micro-Hole for Fatigue Strength

오 환 섭*
Oh Hwan-Sup

ABSTRACT

This study was performed to investigate the effect of defect on fatigue strength under the stress of rotary bending. The specimens were made of low carbon steel having artificial micro-holes, namely, single micro-hole and two adjacent micro-holes as natural defects, and the effects of the diameter of hole and the distance between the holes on fatigue strength have been investigated.

The obtained result can be summarized as follows:

1. The critical defect means the largest size of defect that does not affect fatigue limit, and correspondes to the size of defect leading to final fracture under fatigue limit of smooth specimen. The size of defect which has an effect on fatigue limit is larger than that of critical defect.
2. The defect larger than the critical defect affects fatigue strength for as a kind of size effect, and the physical meaning of size effect of defect is considered same as the one of notch effect.

Key word : Fatigue Limit (疲勞限度), Micro-hole (微小圓孔), Critical Defect (限界缺陷), Size Effect (치수效果)

1. 序 論

지금까지 金屬材料의 疲勞強度에 관한 研究는 平滑材의 疲勞強度를 위시하여 노치효과나 다른 影響 因子에 관한 研究가 대부분이고 최근에는 크랙전파에 관한 研究가 活潑히 進行되고 있다. 따라서 機械設計와 더불어 使用上 有效한 資料가 얻어지고 있으나 아직까지 材

料自體에 대한 信賴度는 充分하지 않은 狀態이다. 缺陷이 存在하면 疲勞強度가 低下한다는 것은 지금까지의 疲勞強度에 대한 研究 結果들에 비추어 당연할 것으로 생각된다. 그러나 炭素鋼에서의 疲勞限度에 대한 정의는 크랙이 발생하지 않는 限界應力이 아니라 크랙이 전파를 정지하는 限界應力이라는 것^{1,2)}이다. 이와 같은 점에서 볼 때 거의 모든 材料

* 正회원, 경희대학교 기계공학과

는 破壞의 기점이 되는 缺陷을 가진 材料라고 정의되어야 할 것이다. 이와 같은 缺陷과 관련된 研究의 대부분은 缺陷의 모양^{3,4)}, 種類⁵⁾, 크기^{6,7)} 등으로 대별할 수 있다. 그러나 실제로 材料內部에 포함되어 있는 각종 결함의 모양, 位置, 方向 등에 대하여 해석하는 것이 불가능하고, 缺陷의 모양 크기가 같더라도 種類에 따라서 疲勞強度에 미치는 影響이 다르고, 결함이 상사형인 경우 疲勞限度는 그것이 큰 쪽이 낮다는 등의 견해를 얻을 수 있다. 따라서 서로 모순되는 연구결과들을 가지면서도 결함은 疲勞破壞舉動에 중요한 역할을 하고 있다는 것을 알 수 있다. 이상과 같은 관점에서 材料가 갖는 缺陷이나 개재물의 크기가 疲勞強度의 크기를 左右할 것으로 예상되지만 그것을 야금학적으로 試驗片을 製作하고 그것의 影響을 정량적으로 평가하는 것은 불가능하다.

따라서 본 研究에서는 이상과 같은 점에서 缺陷으로서 인공미소원공($d = 50 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$: 이하 미소결함이라 한다)을 選擇하고, 이것을 研究의 대상으로 하여 疲勞強度에 대한 缺陷의 影響을 缺陷의 크기 및 分布形態 등에 대하여 檢討하고자 한다.

2. 實驗材料 및 試驗方法

實驗에 사용한 材料는 S15C 압연 환봉재이고 화학성분은 Table 1과 같다. S15C재의 소재는 압연 그대로의 것과 플림 열처리한 것을 準備하였고, 열처리 條件과 機械的 性質을 Table 2, 試驗片의 種類를 Table 3에 각각 表示하였다. 試驗片의 모양 및 치수는 지름 19 mm의 소재를 Fig.1과 같이 가공하였고, 표면결함의 크기는 $50 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$ 이고, 4種類의 드릴을 사용하여 지름과 깊이를 같게 하여 곡률최저부에 가공하였

Table 1. Chemical composition of material (wt %)

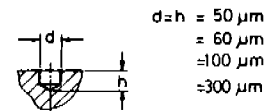
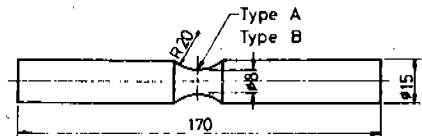
Test piece	Composition								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Mild steel	0.17	0.12	0.53	0.01	0.01	0.18	0.23	0.13	0.14

Table 2. Mechanical properties of specimens

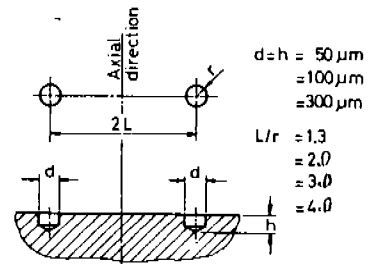
Test spec. symbol	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness of Hv for 100gr	Dia of average grain size (mm)	Heat treatment condition
HS series	69	12	46	248	0.014	Cold rolling
HN series	46.2	36.4	11.8	151	0.025	900°C 1hr air cooling
HA series	31.8	52.4	19.8	123	0.095	1150°C 6hr furnace cooling

Table 3. Fatigue specimen series

Test specimen symbol	Diameter of microhole d (μm)	Aspect ratio of microhole L/r (μm)	Heat treatment condition
HS series	HS ₅₀		Cold rolling
	HS ₆₀	50	
	HS ₆₀	60	
	HS ₁₀₀	100	
	HS ₃₀₀	300	
HN series	HN ₅₀		920 °C, 1 hr Air cooling
	HN ₅₀	50	
	HN ₆₀	60	
	HN ₁₀₀	100	
	HN ₃₀₀	300	
HA series	HA ₅₀		1150 °C, 1 hr Furnace cooling
	HA ₅₀	50	
	HA ₁₀₀	100	
	HA ₃₀₀	300	
HN series	HN _{50-b}	1.3, 2.0, 3.0, 4.0	920 °C, 1 hr Air cooling
	HN _{100-b}	1.3, 2.0, 3.0, 4.0	
	HN _{300-b}	1.3, 2.0, 3.0, 4.0	



Type A One hole drilled specimen



Type B Two hole drilled specimen

Fig.1 Geometries of fatigue test specimen

다. 그후 試驗片의 표면은 크랙의 발생과 觀察을 용이하게 할 目的으로 전해연마 하였다. 또한 試驗片 모양중 Type A는 疲勞強度에 대한 缺陷의 影響을 檢討하기 위한 것이고, Type B는 缺陷의 상호간 거리(L/r)를 1.3, 2.0, 3.0, 4.0으로 變化시켜서, 缺陷 주위의 應力場의 特性과 疲勞限度 問題를 檢討하기 위한 것이다. 疲勞限度의 결정은 0.5kgf/mm²의 應力레벨로 UP-Down method에 의하였고, 결함으로 인한 단면계수의 저하정도는 미소하므로 무시하고 공칭應力으로 표시하였다. 實驗에 사용한 試驗機는 오노형회전굽힘 疲勞試驗機(Ono's Type Rotary Bending Fatigue Tester)로서 최대용량 10 kg-m, 3,400 rpm이다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 微小缺陷材의 S-N曲線과 疲勞限度擧動

Fig.2~4는 缺陷材와 平滑材의 疲勞壽命을 함께 表示한 것으로서 공히 微小缺陷의 크기가 작아질수록 平滑材의 疲勞限度에 接近함을 알 수 있다. 微小缺陷材의 疲勞限度는 HS재의 경우 Fig.2에서 HS 50재가 $\sigma_{WN}=30$ kgf/mm², HS 60재가 $\sigma_{WN}=30$ kgf/mm², HS 100재가 $\sigma_{WN}=22$ kgf/mm², HS 300재가 $\sigma_{WN}=18$ kgf/mm²이고, HN재의 경우 Fig.3에서 HN 50재가 $\sigma_{WN}=24.5$ kgf/mm², HN 60재가 $\sigma_{WN}=24.5$ kgf/mm², HN 100재가 $\sigma_{WN}=22.5$ kgf/mm², HN 300재가 $\sigma_{WN}=17$ kgf/mm²이고, Fig.4의 HA재의 경우 HA100재가 $\sigma_{WN}=15$

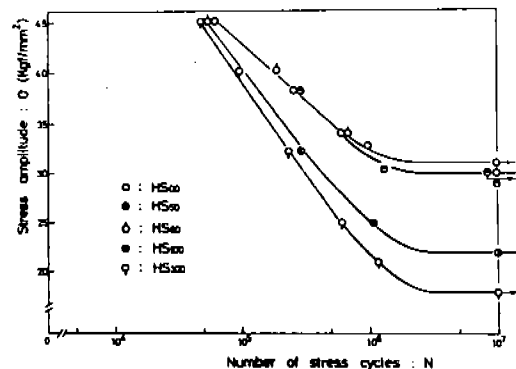


Fig.2 S-N Curve of HS series

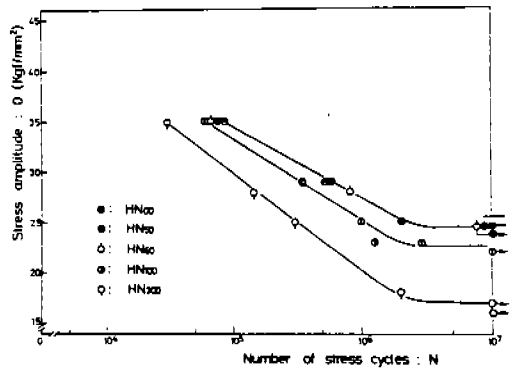


Fig.3 S-N Curve of HN series

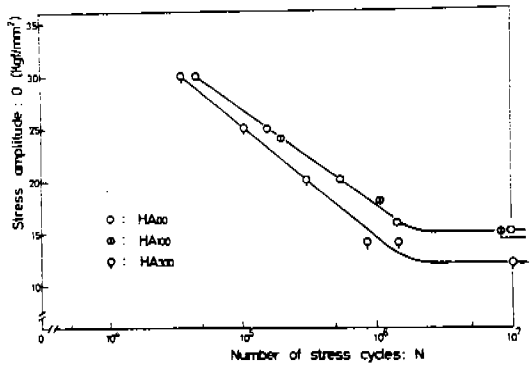


Fig.4 S-N Curve of HA series

kgf/mm², HA300재가 $\sigma_{WN}=12$ kgf/mm² 등이다. 이와 같은 결과에서 疲勞限度에 影響을 미치지 않는 결함의 크기가 存在함을 알 수 있다. 또한 S-N曲線에서 應力레벨이 높을수록 疲勞壽命에 대한 微小缺陷의 影響은 점차 작아지며 平滑材의 疲勞壽命에 接近하고, 應力이 疲勞限度 가까이 낮아질수록 曲線의 간격이 넓어지고 그 影響이 크게 나타남을 알았다. 平滑材와 微小缺陷材의 S-N曲線의 모양은 어느 것이나 $1.5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ 의 반복수에서 변곡부가 형성되는 동일한 모양임을 알 수 있다.

이상과 같은 결과에서 疲勞限度에 대한 缺陷의 影響을 분명히 하기 위하여 疲勞限度와 缺陷의 크기와의 관계를 표시한 것이 Fig.5이다. 여기서 알 수 있듯이 疲勞限度에 대한 缺陷의 影響은 疲勞限度에 影響을 미치는 缺陷의 크기와 이것에 영향을 미치지 않는 크기가 存在함을 알 수 있다. 이들의 구분은 疲

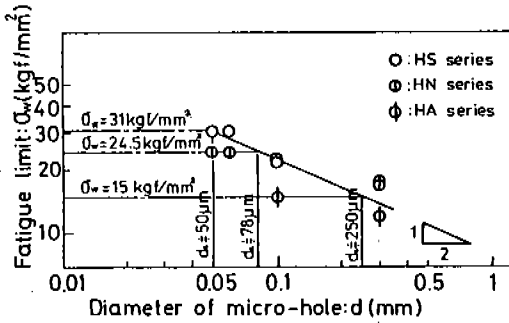


Fig. 5 Dependence of the fatigue limit by diameter of micro hole
 σ_{WN} : Fatigue limit of smooth specimen
 d_c : Critical defect

疲勞限度에 영향을 미치지 않는 最大缺陷의 크기를 限界缺陷(d_c)이라 하면, 이것을 基準으로 하여 評價가 가능하다. 즉 HS재, HN재 및 HA재에 대한 限界缺陷의 크기는 平滑材의 피로한도의 應力下에서 最終破壞를 가져오는 缺陷의 크기에 對應하는 것으로서 각각 $d_c \approx 50 \mu m$, $d_c \approx 78 \mu m$, $d_c \approx 250 \mu m$ 이고, 결정입도의 依存性이 있음을 알 수 있다(Table 2와 Fig. 5 參照). 따라서 平滑材의 疲勞限度는 이들 限界缺陷의 크기를 갖는 缺陷材의 疲

Table 4. Relation of $\sigma_{WN}/\sigma_w - d$

Test specimen symbols	Diameter of micro hole d (μm)	σ_w, σ_{WN} (Kgf/mm ²)	σ_{WN}/σ_w
HS series	HS00	31	1
	HS50	30	0.967
	HS60	30	0.967
	HS100	22	0.71
	HS300	18	0.581
HN series	HN00	24.5	1
	HN50	24.5	1
	HN60	24.5	1
	HN100	22.5	0.918
	HN300	17	0.694
HA series	HA00	15	1
	HA100	15	1
	HA300	12	0.8

σ_w : Fatigue limit of smooth specimen
 σ_{WN} : Fatigue limit of micro-hole drilled specimen

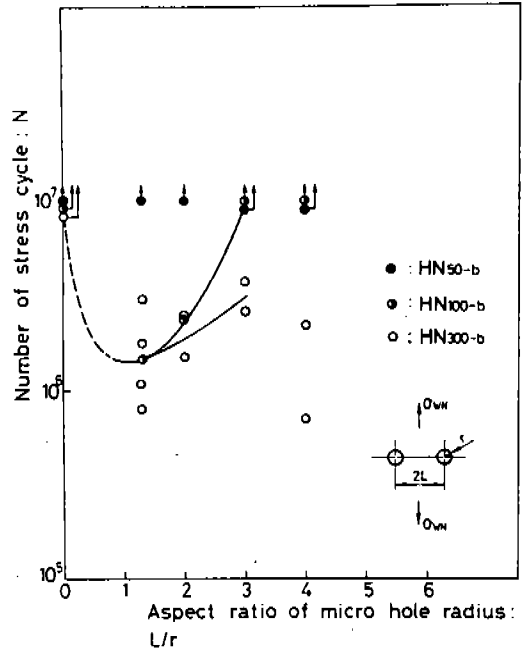


Fig. 6 Relation between ratio of micro hole radius and its fatigue life

勞限度를 의미하며, 疲勞限度에 影響을 미치는 缺陷의 크기는 限界缺陷보다 큰 것이다.

3.2 疲勞強度에 대한 微小缺陷의 隣接距離의 影響

試驗片의 斷面に 1개의 缺陷이 存在하는 경우에 비하여 크랙의 진행 방향으로 隣接되어 또 하나의 缺陷이 存在하는 경우 缺陷 주위의 應力場이 獨立性을 유지하는 경우에 비하여 이것의 중첩으로 인한 平均應力의 상승으로 인하여 疲勞強度는 달라질 것으로 생각되어진다.

Fig. 6은 疲勞強度에 대한 隣接缺陷의 影響을 1개의 표면결합재의 疲勞限度를 基準으로 隣接된 2개의 표면결합을 갖는 試驗片(Fig. 1의 Type B)에 대하여 實驗한 結果를 表示한 것으로서 缺陷의 크기가 $50 \mu m$ 인 경우 疲勞強度의 低下가 없다는 것을 알 수 있다. 특히 HN재의 限界缺陷의 크기는 $78 \mu m$ 인 것을 고려하면 Fig. 6의 $50 \mu m$ 의 缺陷은 이것보다 작은 것이고, $100 \mu m$ 이상의 缺陷은 이것보다 큰 缺陷이 存在하는 경우이다. 微小缺陷이 隣接되어 있는 경우 疲勞壽命은 $L/r = 1.0$ 에서

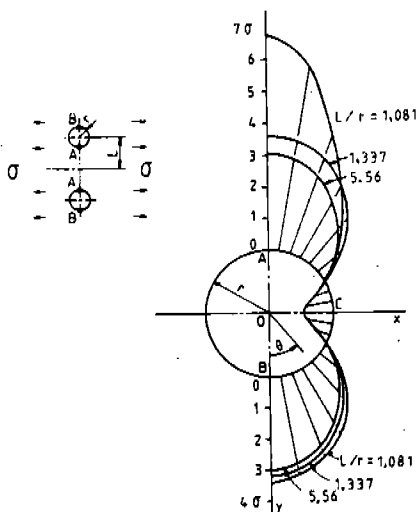


Fig.7 Stress concentration of two equal hole

가장 현저히 低下됨을 알 수 있다. 또한 점차 微小缺陷의 중심간 거리가 크게 됨에 따라서 $L/r=0$ 인 1개의 微小缺陷材의 疲勞壽命에 接近함을 알 수 있다. $L/r > 3.0$ 이면 疲勞壽命의 低下에 대한 微小缺陷의 크기와 이들의 중심간 거리의 影響은 무시할 수 있고, 微小缺陷의 각각은 應力場의 獨立性을 유지한다고 생각된다.

이와 같은 結果는 Fig.7에서 알 수 있듯이 L/r 이 1.0에 가까워질수록 A점의 應力은 應力場의 중첩으로 인하여 最大應力이 증가하여 $L/r=1.0$ 일 때 缺陷 선단에서 최대가 되지만 B점의 應力은 A점에 비하여 거의 변화가 없다. 따라서 疲勞強度에 대한 隣接缺陷의 影響은 破壞의 기점이 되는 最大缺陷과 缺陷선단의 微小缺陷에 의하여 應力場의 中첩으로 인한 平均應力 등이 요인이라고 생각된다.

3.3 疲勞強度에 대한 微小缺陷의 치수 効果

3.1절 (Fig.5 參照)에서 기술한 바와 같이 微小缺陷의 크기에 따라서 疲勞限度가 다르다는 것을 알 수 있다. 결국 微小缺陷의 크기가 클수록 疲勞限度의 低下가 크다는 것이다. 실제로 微小缺陷이 存在하므로써 생기는 단면계

수의 低下는 고려하지 않아도 지장이 없는 정도이다. 예를 들면 微小缺陷의 치름이 $300\mu\text{m}$ 인 경우 단면계수의 低下率은 0.8%인데 비하여 $300\mu\text{m}$ 의 微小缺陷이 있는 HS재, HN재 및 HA재의 疲勞限度의 低下率은 각각 42%, 31%, 20%이다.

이상과 같이 實應力 面積의 減少率은 疲勞限度의 低下를 설명하는 요인으로 부적합함을 알 수 있다. 그러나 단면계수의 低下는 微小하므로 무시하면 應力集中係數는 기하학적인 형상에만 의존하는 값이므로 무한판중에 있는 원공의 경우와 같이 구멍의 크기에 무관하게 3이고, 결함주위의 應力分布도 일정하게 된다. 따라서 본 實驗에서 採擇한 微小缺陷은 상사형이라 볼 수 있고, 應力集中係數는 결함의 크기가 $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ 및 $300\mu\text{m}$ 인 경우 모두 같기 때문에 疲勞限度에 대한 缺陷의 影響을 생각하는 문제는 無限板의 그것과 等價로 볼 수 있다.

이상과 같은 관점에서 微小缺陷材의 疲勞限度에 현저한 缺陷치수의 影響이 나타나는 것은 흥미있는 結果라고 생각된다. 그 이유중의 하나로서 (A) 疲勞限度가 最大應力에 지배되는가, (B) 平均應力(抗伏應力의 上昇限界)에 지배되는가 하는 관점에서 생각할 수 있다. 여기서 缺陷은 試驗片의 치수에 비하여 微小하므로 무한판중의 圓孔缺陷으로 간주할 수 있고, Fig.8과 같은 모델을 생각할 수 있다. (A)의 경우 缺陷선단에서의 最大應力은 彈性論의 입장에서 공칭應力(σ)의 3배이므로 缺陷의 대소에 따른 疲勞限度의 低下를 설명할 수 없다. (B)의 경우에 대하여 檢討하여 보면 缺陷이 큰 쪽이 缺陷이 작은 쪽에 비하여

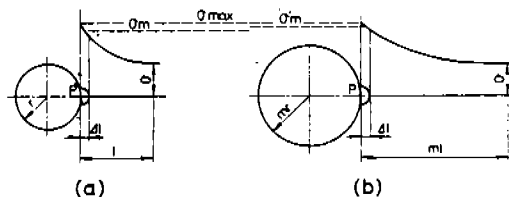


Fig.8 Similar stress distribution in the neighborhood of hemispherical cavity

最大應力은 같더라도 應力구배가 작고 缺陷의 가장자리에서 임의의 유한 거리까지의 平均應力은 높기 때문에 疲勞被害는 크고 疲勞限度가 低下된다고 생각된다. 전보^{2,6)}에서 알 수 있듯이 疲勞限度에서 크랙은 어떤 특정범위에서 발생되어 있고, 이 영역은 缺陷의 크기와 密接한 관계가 있다는 점을 고려하면 疲勞限度는 應力集中에 의한 最大應力에 지배되는 것이 아니라 應力集中部の 어떤 특정범위의 平均應力에 지배된다고 생각된다.

4. 結 論

炭素鋼材의 疲勞強度에 대한 缺陷의 影響을 분명히 하기 위하여 缺陷으로서 人工微小圓孔을 選擇하고, 표면에 1개의 缺陷을 갖는 試驗片과 2개의 隣接된 缺陷을 갖는 試驗片에 대하여 그 크기와 隣接距離가 疲勞強度에 미치는 影響을 檢討한 結果 얻어진 중요한 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 한계결합은 疲勞限度에 영향을 미치지 않는 최대크기를 의미하며, 平滑材의 疲勞限度의 應力下에서 最終破壞를 가져오는 크기에 對應한다. 疲勞限度에 영향을 미치는 결합의 크기는 결정입도의 依存性이 있으며, 그것은 限界缺陷보다 큰 것이다.

2) 2개의 크기가 같은 缺陷이 隣接되어 있을 때 疲勞壽命에 미치는 影響은 결합의 중심간 거리(L)과 결합의 반지름(r)의 비가 $L/r = 1.0$ 일 때 가장 크고 $L/r > 1.0$ 이면 점차 감소하여 $L/r = 3.1$ 일 때 1개의 缺陷材이 疲勞限度와 일치한다. 缺陷의 應力場의 獨立性은 疲勞壽命을 基準으로 $L/r > 3.0$ 인 범위에서 유지된다.

3) 限界缺陷 보다 큰 缺陷은 疲勞限度에 치수효과의 의미로써 기여하고, 치수효과의 물리적 의미는 노치효과의 그것과 같다.

후 기

본 연구는 경희대학교의 1987년도 연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

參 考 文 獻

1. 村上外 2人, 疲勞強度におよぼす微小缺陷影響, 日本機械學會論文集, 第44卷 第388號, pp.4003~4013. 1978.
2. 宋禁弘, 吳煥燮, 表面缺陷에서 發生하는 疲勞크랙 舉動, 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第2號, pp.150~157. 1985.
3. G. G. Trantina and M. Barishpolsky, Elastic-Plastic Analysis of Small Defects-Void and Inclusions, Engng. Fracture Mech., Vol.20, No.1, pp.1~10. 1984.
4. Y. Z. Chen, Solutions of Multiple Crack Problems of a Circular Plate of an Infinite Plate Containing a Circular Hole by using Fredholm Integral Equation Approach, Int. J. of Fracture, Vol.25, pp.155~168. 1984.
5. D. Brooksank, K. W. Andrews, Stress Fields Around Inclusions and Their Relation to Mechanical Properties, Journal Iron & Steel Inst., 210-4 Series, pp.246~255. 1972.
6. 宋禁弘, 吳煥燮, 微小圓孔材의 疲勞크랙 舉動과 Ferrite 結晶粒度, 大韓機械學會論文集, 第9卷 第4號, pp.421~429. 1985.
7. 村上, 遠藤, S 45C 燒なまし材のねじり疲勞におよぼす人工微小缺陷の影響, 日本機械學會論文集, 第47卷 第415號, pp.249~256. 1981.