

고장력강 SNCM8재의 표면처리에 따른 피로강도 변화

A Study on Fatigue Strength Influence of Surface Treatment
on High Strength Steel SNCM8

강 신 현*(기아중공업), 차 경 환(창원대 대학원), 배 성 인(창원대 공대)

S. H. Kang(Kia Heavy Industries), J. H. Cha(Changwon Univ.), S. I. Bae(Changwon Univ.)

Key word : High strength steel(고장력강), Surface treatment(표면처리), Residual Stress(잔류응력)
Shot peening(쇼트피닝), Fatigue Strength(피로강도).

Abstract : Fatigue strength of high strength steels are variable with many different surface treatment. It is well known that residual compressive stress retard fatigue crack growth rate(or arrest crack).

High strength steels are manufactured by following process. Heat treatment, shot peening and chromium plating process. High strength steel(HRC40 or above) which are subjected to fatigue load and dynamic load, chromium plated parts shall be peened in accordance with requirements and baked after plating. The purpose of this paper is to compare and discuss the influence of surface treatment and hydrogen embrittlement on fatigue strength of high strength steel. Therefore, fatigue test was performed to investigate influence of surface treatment. The results shows that shot peening is very effect method in creasing fatigue life and after plating, baking process is essential to prevent hydrogen failure. In this paper, the experimental investigation is made to clarify the influence of shot peening conditions and baking process on fatigue strength of high strength steel.

1. 서 론

항공기 강착장치(landing gear), 기계 부품의 축, 치차, 볼트 및 너트 등의 고강도, 고인성 및 피로강도가 요구되는 곳에 구조용 합금강이 다양하게 사용되고 있다. 특히 사용 조건에 따라 내모마성, 내식성, 부식저항 및 피로강도를 증가시키기 위해 여러 가지의 표면처리(surface treatment : plating, coating, shot peening etc)를 실시하게 된다. 이러한 구조용 합금강은 많은 경우에 있어 사용 용도가 극한적인 환경 및 하중 상태에서 사용하게 되어 취성파괴사례가 많이 발생되고 있다. 재료 전체의 성질이 변하면 피로성질이 영향을 받지만 시편 및 부품 표면이 국부적으로 변하여도 피로성질이 크게 달라지게 된다^(1,2). 실질적으로 피로균열의 많은 부분은 표면에서 시작한다. 굽힘이나 비틀림 값이 보통의 부하의 경우 최대 응력이 표면에서 일어나기 때문에, 파괴가 표면에서 시작되는 것은 당연하다. 그러나 축방향의 하중에서도 피로균열은 거의 항상 표면에서 시작한다. 그러므로 피로성질은 표면에 매우 민감하며, 금속표면처리(metal surface treatment)는 부품의 피로강도에 주요한 인자가

된다. 특히 항공기 강착장치는 이 착륙시의 큰 반복 충격하중에 대한 인성이 요구되기 때문에 고장력강이 가장 많이 사용되며, 피로강도 및 내마모성을 증가시키기 위하여 기계가공후 쇼트피닝(shot peening), 크롬도금을 실시하게 된다^(3,5). 따라서 본 연구에서는 국산소재인 고장력강(HRC40 이상) SNCM8재에 쇼트피닝, 크롬도금을 실시하여 표면처리에 따른 피로강도의 영향과, 고장력강의 도금시 발생하는 수소취성의 영향을 고찰하고자 한다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 SNCM8재와 AISI 4340으로 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of testpieces (Wt, %).

구분	기 호	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
M1	SNCM8	0.370	0.215	0.773	0.0126	0.0180	1.80	0.611	0.205	0.194
M2	AISI 4340	0.36	0.20	0.6	0.35	0.004	2.0	0.75	0.25	-

SNCM8재는 직경16mm의 환봉소재, AISI 4340은 직경30mm 환봉소재를 황삭가공후 Fig.1과 같이 열처리 실시후 Fig.2와 같이 피로시험편을 제작하였다. 열처리후 정삭한 시험편의 표면조도는 $11.2\mu\text{m}$ 이고 M1-H로 표기하였다. 각 시험편에 대한 표면처리는 Table 2와 같이 실시하였으며, 피로강도증가를 위한 쇼트피닝은 MIL-S-13165 C에⁽⁶⁾ 따라 Table 3과 같이 실시하였고, 열처리 및 쇼트피닝한 시편을 내마모성을 증가를 위해 크롬도금은 QQ-C-320 B에 따라 $30\mu\text{m}$ 두께로 Table 4와 같이 실시하였다⁽⁷⁾.

Table 2 Surface treatment of testpieces .

no	Items	Process & Treatment	Notes
1	M1-H	Heat treatment (SNCM 8)	M1 : SNCM8
2	M1-HP	Heat treatment → Cr Plating(SNCM 8)	M2 : AISI 4340
3	M1-HPB1	Heat treatment → Cr Plating → Baking (SNCM 8)	H:Heat treatment
4	M1-HS1	Heat treatment → shot peening (SNCM 8)	P : Cr plating (30μ)
5	M1-HS1PB1	Heat treatment → shot peening → Cr plating → baking(SNCM 8)	S1: shot peening (S 330, 300%)
6	M1-HS2PB2	Heat treatment → shot peening → Cr plating → baking(SNCM 8)	S2: shot peening (S 280, 200%)
7	M2-HS2PB2	Heat treatment → shot peening → Cr plating → baking(AISI 4340)	B1 : baking (8hr)
			B2 : baking (3hr)

Table 3 Condition for shot peening.

Shot ball	Intensity (arc height : A)	Coverage (%)	Hardness of shot ball
S 330	0.4(0.015 inch)	300	HRC 45-48
S 280	0.34(0.0135 inch)	200	HRC 61-63

Table 4 Plating process of testpieces.

Process	Time	Notes
증기탈지(Vapor Degrease)	5분	Temp. : 80℃
세척(Rinse)	2분	
크롬도금(Cr Plating)	2.5hr	900A, 5V, 55℃
용액건거, 취성제거(Baking)	8hr, 3hr	190℃

또한 크롬도금시 발생하는 수소취성의 영향을 고찰하기 위하여 크롬도금후 시편의 베이킹 시간을 8hr, 3hr로 각각 달리하였다.

2.2 시험방법

실험에 사용된 피로시험기는 MTS사의 전기유압식 서보 피로시험기로서 최대용량 100kN의 것으로 사용하여 시험하였다. 응력비(stress ratio, R : minimum stress / maximum stress)

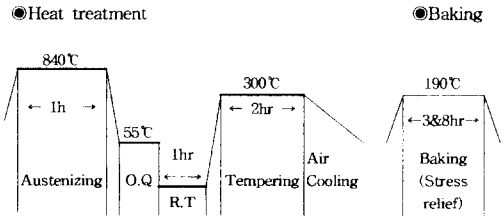
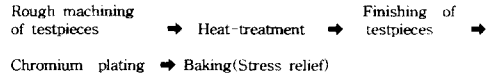


Fig.1 Machining and heat treatment process.

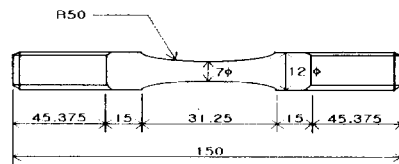


Fig.2 Configuration of testpiece.(Unit : mm)

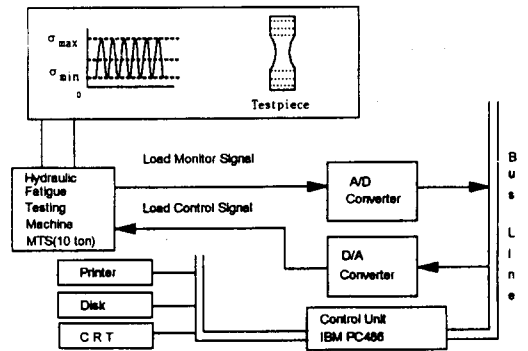


Fig.3 System of fatigue testing system.

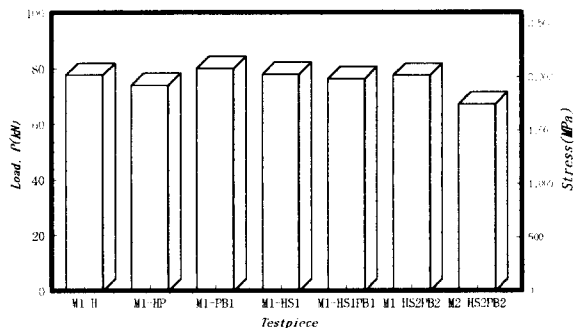


Fig.4 Comparison of mechanical properties of high strength steels by surface treatment

를 0.1, 하중 반복 주파수 5Hz로 실온에서, 일정진폭 하중의 동일한 조건(constant - amplitude loading)의 sine파형의 인장-인장(tension - tension) 하중제어 방식으로 실험을 수행하였다.

이와같이 피로시험을 실시하기 위하여 D/A변환기를 사용하여 피로시험기에 하중을 보냄과 동시에, A/D변환기를 사용하여 시험기의 하중을 모니터 하고, 일정하중이 되도록 하중 제어를 행하였다. 그후에 얻어진 측정 데이터를 프린터, 모니터, 디스크 등에 출력하였다. 본 피로시험의 시스템구성도는 Fig.3 같이 표현하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과

각 시편에 대하여 인장시험을 실시한, 파단강도 결과는 Table 5와 같으며, 파단강도를 기준으로한 각 시편간의 정적특성을 Fig.4에 나타내었다.

Table 5 Tensile test results for high-strength steel.

no	Testpieces	Ultimate load P(KN)	Diameter (ϕ : mm)	σ_u (MPa)	Notes
1	M1-H	77.7	7.00	2020	Testpieces Diameter 7.00mm
2	M1-HP	74.1	7.03	1910	
3	M1-PB1	80.0	7.01	2070	
4	M1-HS1	77.9	6.99	2030	
5	M1-HS1PB1	76.3	7.02	1970	
6	M1-HS2PB2	77.6	7.02	2004	
7	M2-HS2PB2	67.3	7.02	1740	

인장시험결과는 평균값을 나타낸 것이며 M2-HS2PB2 (AISI 4340)를 제외한 각 특성치간의 차이는 수%(최대 3.5%) 이내였다. 따라서 본 시험에서 쇼트피닝 및 크롬도금에 의한 정적특성은 거의 인정될 수 없었다. 즉 재료의 표면처리에 따른 표면경도, 잔류응력 및 표면거칠기 등은 재료의 인장강도에의 영향은 거의 없다고 할 수 있다.

그러나 크롬도금 후 베이킹을 실시하지 않은 것은 (M1-HP시편) 약간의 인장강도가 저하되는데 이것은 수소취성에 기인하는 것으로 추정된다.

3.2 표면경도

각 시편을 마운팅하여 표면으로부터 0.025mm 간격으로 심부까지 경도를 측정하였고, 각 시편의 표면경도 분포를 Fig.5에

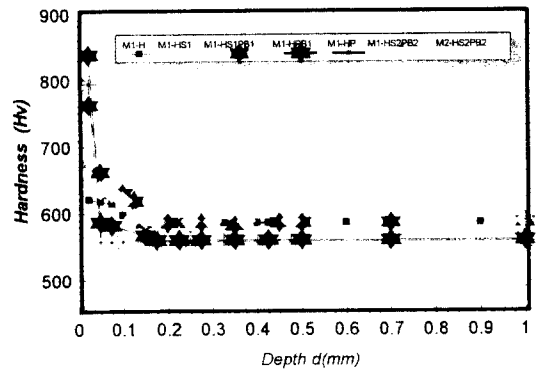


Fig.5 Hardness distribution of testpieces

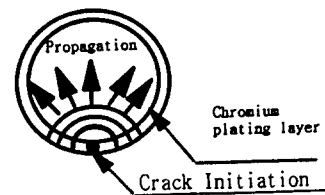


Fig.6 A schematic of crack initiation and propagation in base metal of chromium plated testpieces.

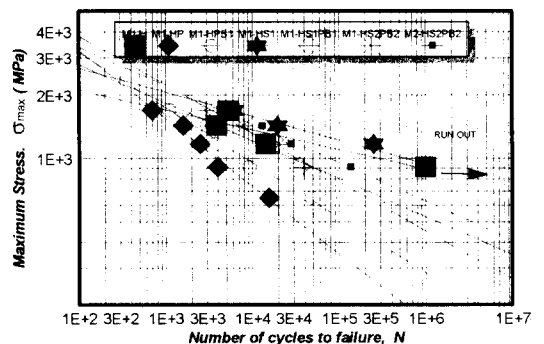


Fig.7 Effects of serral surface treatment on high strength steel(R = 0.1).

나타내었다.

쇼트피닝 실시한 시편의 표면근방의 경도는 약 Hv30정도 상승하였다. 이것은 쇼트피닝에 의한 가공경화에 기인하는 것으로 추정되며⁽⁶⁾, 가공경화층의 깊이는 표면에서 약0.45mm이고, 쇼트피닝에 의한 arc height 0.4mm와 거의 일치함을 알 수 있다. 특히 크롬도금으로 인하여 표면경도가 급격히 높음을 알 수 있다. 이것은 크롬 도금층이 취성으로 표면에서 표면경도가 높음을 알 수 있다. 그러나 Fig.5의 경도분포에서 보는 바와 같이 크롬도금 후 베이킹처리를 실시하지 않은 시편은 표면 및 심부에서도 경도가 저하되는데, 이것은 수소취성에 기인하는 것으로 추정된다.

3.3 피로시험

본 실험에서 실시한 규칙적인 반복하중을 가하여 파괴가 생기기까지의 반복수로 나타낸 실험 데이터를 종축에 최대응력 $\log \sigma_{max}$, 횡축에 $\log N$ 을 취해서 Fig.7과 같이 S-N 곡선으로 나타내었고, 표면처리에 따른 피로강도의 변화 및 효과를 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Effects of surface treatment on high strength steel.

Test	Surface treatment (Condition)	Fatigue strength for 10^5 cycle (σ_{max} , MPa)	Fatigue strength ratio(%)	
			Compare to M1-HPB1	Compare to M1-HS1PB2
Axial tension (R=0.1)	M1-H	1120	115	40
	M1-HP	350	-32.7	-56.3
	M1-HPB1	520	100	-35
	M1-HS1	1220	134	52.5
	M1-HS1PB1	800	53.8	100
	M1-HS2PB2	790	51.2	-1.2
	M2-HS2PB2	950	82.7	18.8

Table 6에서 고장력강의 표면처리에 따른 피로강도 변화를 고찰하면 다음과 같다.

- (1) 고장력강에 크롬도금을 실시한 것은 피로강도가 약53% 감소(M1-H, M1-HPB1 비교) 되고, 또한 크롬도금후 베이킹을 실시하지 않은 것은 피로강도가 현저하게 감소된다.
- (2) 크롬도금전 쇼트피닝을 실시한 것은 피로강도를 약53.8% 향상시켰다.
- (3) 10^5 사이클에서 쇼트피닝 작업조건 변화에 따른 피로강도의 변화는 미세하다.

3.4 금속현미경에 의한 표면관찰

Photo.1, 2, 3, 4는 각 시편을 600배율로 표면을 관찰한 것이다. Photo.2는 표면에서 압연방향 조직을 나타내고 있는데 이것은 쇼트피닝으로 인하여 가공경화 되었음을 나타내고 있다.

Photo.3은 크롬도금층에서 크랙이 발생하였지만 쇼트피닝에 의해 압축잔류응력층 형성으로 미소크랙이 모재(base metal)로 진전하지 못함을 알 수 있다. 또한 크롬도금한 시편의 피로크랙 기점은 모두 크롬도금 표면에서 시작됨을 알 수 있다.

Photo.4는 크롬도금한 시편의 표면에 존재하는 미소크랙(그물망:fissure network)을 보여주고 있다. 이 미소크랙에서 내부 응력, 수소작용등으로 인하여 크랙을 형성하여 성장한다.

3.5 SEM에 의한 표면관찰

Macroscopic 조사

Photo.5는 파면의 macroscopic(x20)을 나타내고 있다. macroscopic 파면을 관찰하면 파괴의 기점과 크랙성장 방향을 알 수 있다.

Microscopic 관찰

Photo.6은 크롬도금층에서 크랙이 발생하여 내부로 성장하고 있음을 보여주고 있다.

Photo.7은 크롬도금후 베이킹 공정을 수행하지 않아 수소취성이 크롬도금층 내부로 크랙이 성장되었고, 수소취성으로 인하여 임계면에 크랙이 발생하였다.

크롬도금한 시편은 파괴기점이 모두 크롬도금층에서 시작하여 내부로 진전하고 있으며, Fig.6은 크롬도금한 시편의 크랙발생 및 진전에 대한 상세내용을 설명하고 있다. 그러나 쇼트피닝만 실시한 시편(photo, 8)의 파괴 기점은 관찰이 어려우나, 압축 잔류응력 때문에 피로파괴 기점이 표면직하가 되는 것으로 추정된다.

4. 표면처리에 따른 피로수명 고찰

Table 6에 나타낸 피로시험 데이터를 사용하여 각 하중하에서 표면처리에 따른 피로수명을 비교하여 Fig. 8, 9, 10, 11에 나타내었다.

4.1 높은 하중(고 응력)에서의 피로수명

Fig.8의 최대응력 $\sigma_{max} = 1690$ MPa에서는 쇼트피닝으로 인한 피로수명이 크게 향상되지 않음을 알 수 있다. Fig.8, 9에서 크롬도금후 베이킹 처리를 하지않은 시편(M1-HP)은 수소취성으로 인하여 피로수명이 급격히 저하됨을 알 수 있다.

Fig.9에서 크롬도금전 쇼트피닝을 실시한 것은 쇼트피닝을 하

지 않은것 보다 피로수명이 향상되었다. 이것은 쇼트피닝으로
 인하여 크롬도금층에서 발생한 크랙이 모재로 진전하는데 억제
 하는 효과에 기인하는 것이다.



Photo.1 Heat treatment(M1-H, x600).

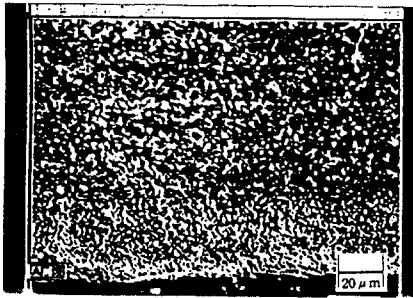


Photo.2 Showing material surface layer to be hardened by shot peening.(M-1HS1, x600).

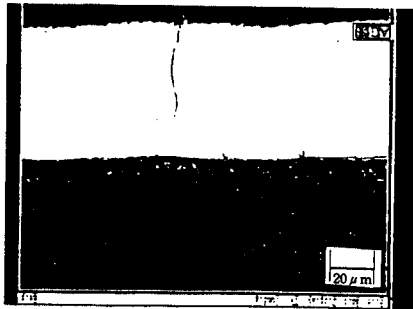


Photo.3 Cracking initiating at Cr plating surface layer but not propagate base metal.(M1-HS1PB1, x600).

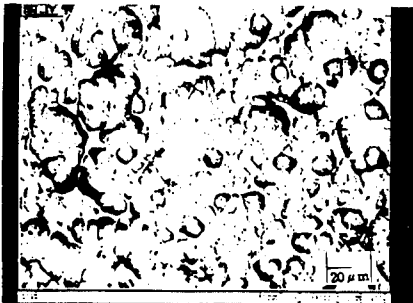


Photo.4 Crack network on the surface of chromium plating layer.(x 150)

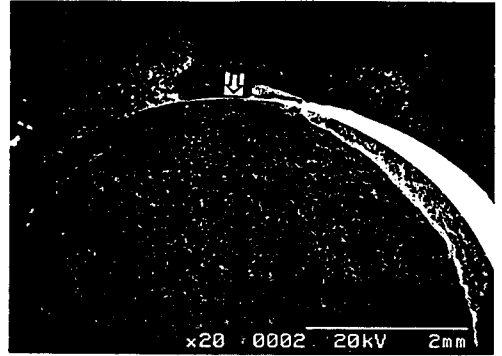


Photo.5 Showing fracture origin and propagation in the below.(M1-HS1).



Photo.6 Fatigue cracks began at chromium plating layer. (M1-HS2PB2).

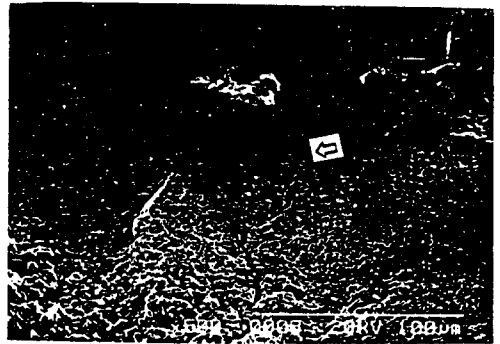


Photo.7 Hydrogen embrittlement propagate through chromium plate layer.(M1-HP).



Photo.8 Fracture crack began below shot peening layer.(M1-HS1)

4.2 낮은 하중(저 응력)에서의 피로수명

Fig.10, 11의 낮은하중에서는 쇼트피닝으로 인한 피로수명이 현저하게 향상됨을 알 수 있다. 즉 쇼트피닝은 낮은 하중에서 피로수명 향상에 보다 더 효과적이다, 이것은 쇼트피닝으로 인하여 시편표면에 형성된 압축잔류응력이 크랙 발생 및 진전을 억제하여, 피로수명이 향상되는 것이다. 그러나 크롬도금전 쇼트피닝 및 크롬도금후 베이킹 공정을 하지 않은 것은 낮은하중에서도 피로수명이 현저하게 감소하고 있다. 따라서 고장력강 크롬도금시는 필수적으로 쇼트피닝 및 베이킹 공정이 수반되어야 한다.

4.3 공정 및 재질 변화에 대한 고찰

쇼트피닝 작업조건의 변화는 미세하나 쇼트피닝 작업시 제품경도 보다 높은 불을 사용하는 것이 압축잔류응력층 형성에 효율적이다.

크롬도금후 베이킹 시간의 변화(3hr, 8 hr)는 피로수명의 변화에 관찰되지 않았다.

M1-HS2PB2(SNCM 8), M2-HS2PB2(AISI 4340) 시편에 대한 피로수명을 비교하면 동 종류의 국산재료보다 AISI 4340의 피로수명이 낮은하중에서는 향상되었다.

4.4 수소취성

고장력강의 피로수명에서 수소취성은 매우 중요한 사항이다. 크롬도금후 베이킹 공정을 수행하지 않으면 피로수명이 현저하게 저하된다. M1-HP와 M1-HPB1 시편의 피로수명을 비교하면 높은 하중 및 낮은 하중에서 모두 100%이상 차이가 있다. 이것은 크롬도금시 발생한 수소가 금속내부에 침투하여 제거되지 않으면 피로강도 손실에 결정적인 요인이 된다.

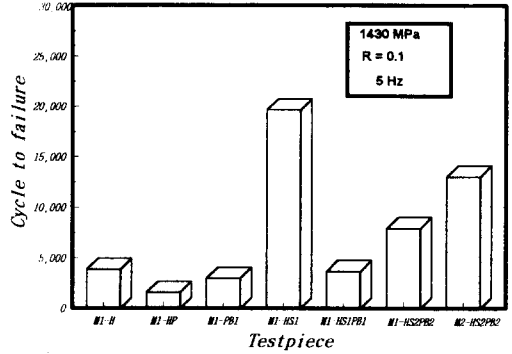


Fig.9 Fatigue test results of high strength steel ($\sigma_{max} = 1430MPa$).

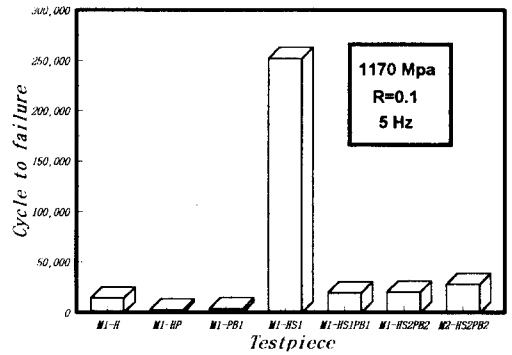


Fig.10 Fatigue test results of high strength steel ($\sigma_{max} = 1170MPa$).

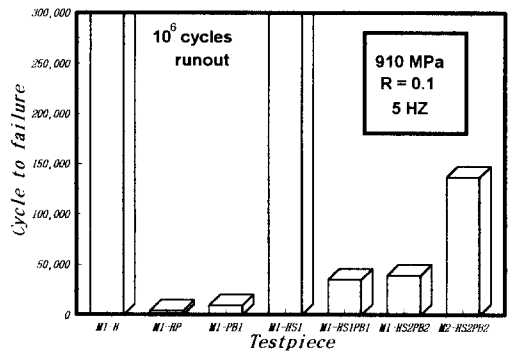


Fig.11 Fatigue test results of high strength steel ($\sigma_{max} = 910MPa$).

4.5 쇼트피닝 및 크롬도금의 영향

S-N선도(Fig.7)에서 쇼트피닝 실시한 피로강도는 높은 하중보다는 낮은 하중에서 피로강도의 효과가 증대됨을 알 수 있다 (즉 낮은 하중이 효과적임). 즉 높은 부하영역에서는 쇼트피닝의 효과가 그다지 크지 않다. 이것은 소성범위의 큰 응력 반복으로 인해 잔류응력의 형상이 급격히 사라지기 때문이다⁽⁸⁾.

10⁵ 사이클에서 크롬도금 전에 쇼트피닝 실시한 시편과 실시

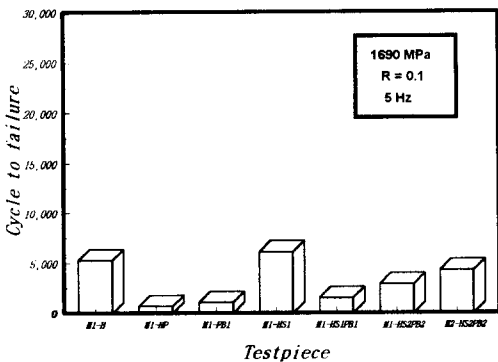
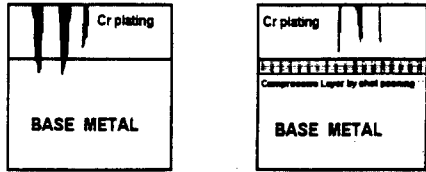


Fig.8 Fatigue test results of high strength steel ($\sigma_{max} = 1690MPa$).

하지 않은 시편의 피로강도를 비교하면, 쇼트피닝 실시한 시편이 약 53% 높은 하중(피로강도 증가)을 수행할 수 있다. 크롬도금 전 쇼트피닝을 실시하면 압축잔류응력층이 형성되어, 크롬도금층에서 발생한 크랙이 base metal로 전진하는 크랙을 억제하는 것으로 추정된다⁽⁹⁾. Fig. 12는 본 설명에 대한 설명을 표현하고 있다.



Crack which initiated Cr plating will propagate into base metal.

Crack which initiated Cr plating will not propagate into base metal.

Fig.12 Plating crack will not propagate into prestressed base metal.

5. 결론

본 연구에서는 고장력강(SNCM 8, AISI 4340)의 표면처리를 달리하여 일정폭 하중의 동일한 조건으로 피로시험을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) M1-HS2PB2(SNCM 8), M2-HS2PB2(AISI 4340) 시편에 대한 재료강도를 비교하면 낮은 응력에서는 국산재료의 피로수명/강도가 약간 저하되나 높은 응력에서는 근접하고, 특히 정적특성에서는 국산재료가 우수하다.

(2) 쇼트피닝 및 크롬도금에 의한 정적특성은 거의 인정될 수 없다. 즉 재료의 표면처리에 따른 표면경도, 잔류응력 및 표면거칠기 등은 재료의 정적특성에 영향이 거의 없다고 할 수 있다.

(3) 쇼트피닝은 높은 부하보다는, 저응력 수준의 피로수명을 갖는 부분에서 피로강도 증가가 매우 현저하였다. 이것은 높은 부하에서 소성범위의 큰 응력 반복으로 인해 잔류응력이 급격히 사라지는 것으로 볼 수 있다.

(4) 고장력강의 표면처리에 따른 피로강도의 변화를 정량적으로 고찰하였다. 고장력강에 크롬도금을 실시하면 피로강도가 감소(53%)된다. 이것은 크롬도금으로 인하여 표면층이 인장잔류응력으로 존재하여 피로강도를 저하시키고, 크롬도금시 수소가 재료

속으로 들어가게 되는데, 이것은 조기파손(수소취성)을 일으킨다. 특히 고장력강에 대하여 크롬도금후 베이킹(응력제거)을 실시하지 않으면 피로강도 저하에 결정적인 요인이 된다.

참 고 문 헌

- [1] 李東寧, 1994, "材料強度學," 문운당, pp. 378-380.
- [2] Jack A. Collins, 1993 "Failure of materials in mechanical design Analysis," Prediction, Prevention. Second edition. pp. 207-217.
- [3] Almen, J. o., 1951 "Fatigue loss and gain by electro-plating product engineering," 22 No. 6.
- [4] Madayag.A. F., 1961 "Metal fatigue, theory and design," John Wiley & Sons New york.
- [5] The shot peener, 1995, march, Vol. 0, issue 1, "Internal news letter for shot peening - surface finishing industry."
- [6] US Military specification, "Shot peening of metal parts," NO. MIL-S-13165 C.
- [7] Federal specification, Dec. 1963. "Chromium plating (electrodeposited)," QQ-C-320, Amendment No. 2.
- [8] Richard W.Hertzberg, 1989 "Deformation and fracture mechanics of engineering materials," Third edition, pp. 480-481.
- [9] Shot peening applications. Metal Improvement Company, Inc. "Subsidiary of curtiss Corporation Wright," Seventh Edition. pp. 17-18.