

Si-Cr강 밸브스프링의 피로수명 향상에 관한 연구

임철록*, 김태호, 박상언, 김기전 (대원강업(주)), 정태훈(중부대학교)

A Study for the Improvement on a Fatigue Life for Cr-Si Alloyed Valve Springs

Chulrok Lim*, Taeho Kim, Sangeon Park, Kijeon Kim (Daewonkangup Co. Ltd.),
Taehoon Chung(Joongbu Univ.)

ABSTRACT

Valve springs with high fatigue strength corresponding to the incresement of working stresses, are required for the higher generating power and the better fuel economy of automobile engines. For this purpose, high strength oil tempered wires are being used. By a method of the high strength for the valve spring, modification of manufacturing processes is being applied. In this case, the cause and effect for the improvement of the fatigue strength has not yet been explained obviously. Therefore, in this report, comparison of fatigue life between valve springs of conventional processes with oil tempered wires and new manufacturing processes was made. As a result of the fatigue test, the fatigue life of the latter was attained maximum 7 times than that of the former. It was cleared that the improvement of the fatigue life was caused by difference of compressive residual stresses at depth of 0.2mm below the inner side surface of both valve springs.

Key Words : Valve springs(밸브스프링), Compressive residual stresses(압축잔류응력), High fatigue strength(고피로강도)

1. 서론

최근 자동차 엔진의 저 연비화, 고출력화에 수반하여 엔진용 밸브 스프링에 있어서는 고응력의 설계가 진행되고 있고, 부하응력 증가에 대응할 수 있는 우수한 피로강도를 갖는 밸브스프링이 요구되고 있다. 이러한 밸브 스프링에는 주로 합금 설계 조정에 의해 고강도화한 오일템퍼선이 사용되고 있고, 또한 밸브 스프링의 기존 제조공정을 변화시켜 재료의 강도를 변화시키고, 잔류 응력 분포를 개선시키는 방법을 사용하고 있다는 보고가 있다^{1),2)}. 그러나 후자의 방법을 사용하여 밸브스프링을 제작할 경우, 그 성능 향상의 효과 및 향상 원인에 대한 연구는 거의 발표된 적이 없다. 따라서 본 연구에서는, 제조공정을 변화시켜 제작한 밸브스프링과 기존의 오일템퍼선을 사용하여 제작한 밸브스프링의 피로 수명을 비교 검토하였다. 그리고 제조 공정을 변화시켜서 제작한 밸브스프링의 피로수명 향상 원인을 명확히 했다.

2. 실험방법

2.1 시험재

본 시험에 사용한 시험품의 재질은 일본 S사의 Si-Cr계 강선이며, 그 화학성분은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of Si-Cr alloyed wire (mass %)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr
SWOSC-V	0.56	1.32	0.72	0.017	0.01	0.73

2.2 시험 조건

Table 2에 본 연구에서 사용한 시험품 및 시험조건을 명시한다. 피로시험은 1800 rpm의 일정한 속도로 실시하였고, 1억회 이하에 절손이 발생하여

수명의 상대적인 비교가 용이하도록 응력의 크기를 벨브스프링의 상용적인 응력수준보다 높게 설정하고 시험을 진행하였다.

Table 2. Test pieces and test conditions

Dimensions of test pieces	Diameter of wire : 4.32× 3.45mm Mean diameter of coil : 25.65mm Free height : 46.9mm Number of active turns : 4.2, Number of total turns : 6.2
Marquenching	850°C× 10min heating → 320°C× 1.5min in salt → Air cooling
Tempering	350°C, 400°C, 450°C × 30min
Shot peening conditions	Shot size : ø 0.6mm cut wire Arc height : 0.35mmA
Conditions of fatigue test	Speed of test : 1800rpm Cycles of test : 50million cycles Temperature of test : 100°C Stress conditions of test : 602.7 ± 511.5 MPa Testing machine : Coil fatigue test machine of cam type (TOKAI Company)

제조 공정을 변화시켜 제작한 벨브스프링과 기존의 오일 템퍼션을 사용하여 제작한 벨브스프링에 대한 두 공정에 있어서 기존의 오일템퍼션을 사용하는 경우는, 열처리한 강선을 코일링한 후 응력을 제거하기 위한 풀림을 하였다. 또 제조 공정을 변화시킨 경우는, 신선한 강선을 코일링한 후 마르켄칭, 뜨임을 행하였다. 마르켄칭은 가열후 냉각시 벨브 스프링의 탈탄 및 변형을 방지하기 위하여 사용되었다.

열처리되지 않은 Si-Cr 강선을 사용하여 가열, 냉각후 as-quenched상태, 250°C, 350°C, 400°C, 450°C에서 30분간 템퍼링하여 온도별로 특성을 조사하였다. 이를 토대로 새로운 제조 공정을 사용하여 350°C, 400°C, 450°C의 템퍼링 온도에 따른 벨브 스프링 시험품을 제작하였다. 또한 기존 오일 템퍼션을 사용하여 새로운 공정 시험품과 동일한 형상의 벨브 스프링 시험품을 제작하였으며, 이들 시험품들의 크리프 변형량 및 피로 특성을 비교 조사하였다.

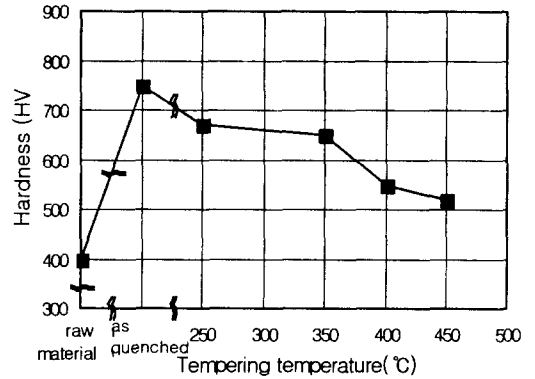


Fig. 1 Variation of hardness by temperature

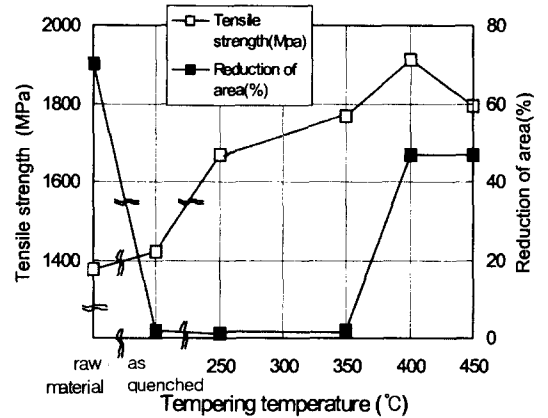


Fig. 2 Variations of tensile strength tempering and reduction of area by tempering temperature

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 Si-Cr강선의 코일링, 담금질, 뜨임후 인장 특성에 미치는 뜨임 온도의 영향.

As-quenched 상태, 담금질후 250, 350°C에서 뜨임을 실시한 시험편의 인장시험에 의한 파단면에서는 모두 입계취성 파면이 관찰되었으며, 단면 수축율은 거의 0에 가까웠다. 400, 450°C에서 뜨임한 시험편의 인장 시험 파단면에서는 입계파면이 전혀 관찰되지 않았고 연성파면만 관찰되었다. Fig. 1은 뜨임 온도에 따른 경도 변화를 나타내며, Fig. 2는 인장강도 및 단면 수축율을 나타낸다. 경도는 뜨임 온도의 증가에 따라 감소하나, 인장강도는 400°C에서 뜨임할 때 최대치를 나타냈다. 이것은 상기의 인장시험편 파단면 관찰에서 알 수 있듯이 400°C이하의 온도에서는 재료가 취약해진 것에 기인한다.

Fig. 1, 2의 경도, 인장강도, 단면수축율로부터

400℃에서 템퍼링한 시험편의 특성이 가장 우수하게 조사되었다.

3. 2 제조공정에 따른 자유고 변화량

제조 공정을 변화시킨 시험품이 기존 오일템퍼션을 이용한 시험품보다 크리프 변형량이 다소 우수하게 나타났으며, 제조 공정을 변화시킨 시험품중에서는 350℃에서 템퍼링한 시험품의 크리프 변형량이 우수하게 나타났다.(Table 3)

Table 3. Variations of free height after creep test (Stress condition:1084MPa, Test time: 65h Test temperature: 100℃,)

	Conditions of tempering	Free height before creep test	Free height after creep test	Variations of free height
Samples of conventional process with oil tempered wire	420℃× 35min (Stress relief annealing)	46.90mm	44.39mm	2.51mm
Samples of modified manufacturing process	350℃× 30min	46.91mm	44.64mm	2.27mm
	400℃× 30min	46.90mm	44.49mm	2.41mm
	450℃× 30min	46.92mm	44.43mm	2.48mm

Table 4. Results of fatigue test between samples of conventional process with oil tempered wires and modified manufacturing process.(Stress condition : 602.7 ± 511.5MPa, Test temperature : 100℃)

	Conditions of tempering	Fatigue life (average cycles)	Endurance magnification
Sample of conventional process with oil tempered wire	420℃× 35min (Stress relief annealing)	7.4× 10 ⁶ broken	1
Samples of modified manufacturing process	350℃× 30min	20× 10 ⁶ broken	2.7
	400℃× 30min	56× 10 ⁶ broken	7.6
	450℃× 30min	51× 10 ⁶ broken	6.9

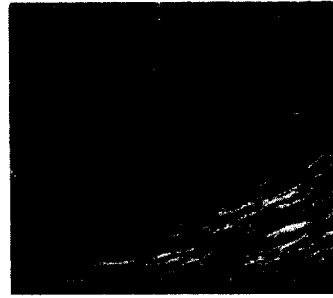


Fig. 3 Fractography for samples of modified manufacturing process after fatigue test

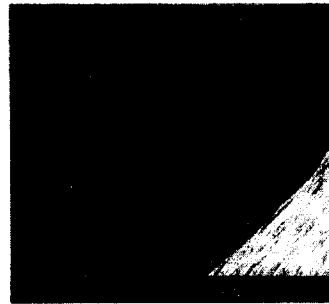


Fig. 4 Fractography for samples of conventional process with oil tempered wires after fatigue test

3. 3 제조 공정을 변화시킨 시험품과 기존 공정 시험품의 피로 수명

Table 4는 각 뜨임 조건에서 각기 시험품 4개씩을 피로 시험한 결과를 나타낸다. 뜨임 조건에 따라서도 달라지지만, 제조 공정을 변화시킨 밸브 스프링은 기존의 오일템퍼션을 사용한 밸브스프링보다 피로수명이 월등히 향상되었으며, 400℃에서 템퍼링한 시험품의 경우는 7배 이상 피로수명이 향상되었다.

3. 4 피로 시험에 따른 절손품 파단면

제조 공정을 변화시킨 시험품 및 기존의 오일템퍼션을 이용한 시험품의 피로 시험에 따른 절손기점부는 모두 코일 단면의 내측부에 있고, 절손기점부의 위치는 스프링 표면에서 0.2mm 정도 깊이의 지점에 있다. 이 내부 기점에서는 비금속 개재물 등의 결함은 관찰되지 않았다. Fig. 3은 제조 공정 변화 시험품의 피로시험에 따른 절손기점부를 나타내며, Fig. 4는 기존 오일템퍼션 사용 시험품의 피로시험에 따른 절손기점부를 나타낸다. 제조공정을 변화시켜 제작한 시험품 중에서 350℃에서 뜨임한 시험품이 400℃ 및 450℃에서 뜨임한 시험품에 비해 조기에 절손된 원인은 경도가 HV650 정도로 다

른 시험품 보다 경도가 높아 취약해진 것에 기인하며, 이로 인하여 350℃에서 뜨임한 시험품의 경우, 표면에서 0.2mm 깊이에 존재하는 결손기점부를 제외하고 거의가 입계파면을 나타내었다. 제조공정을 변화시킨 시험품 중 400℃에서 뜨임한 시험품의 경우, 경도는 HV530~580정도로써 기존의 오일템퍼션을 이용한 시험품과 유사하였다. 450℃에서 뜨임한 시험품의 경도는 HV510~560 정도로 400℃에서 뜨임한 시험품의 경도보다 다소 낮았으며, 400℃에서 뜨임한 시험품보다 피로수명이 다소 낮은 원인은 이러한 경도차에 의한 것으로 사료된다.

3. 5 쇼트피닝을 실시한 시험품의 코일 내측부 깊이별 잔류응력 분포

기존의 오일템퍼션을 이용해 제작한 밸브스프링 시험품은 코일링후에 스프링내측에 존재하는 인장 잔류응력을 제거하기 위해 풀림을 실시하지만 이 응력 제거 풀림으로는 코일 내측부에 형성된 인장 잔류응력은 완전히는 제거되지 않고 남아 있다. 응력 제거 풀림 온도를 높이면 스프링 내측의 인장 잔류응력을 제거시킬 수 있으나, 이럴 경우 경도가 낮아지기 때문에 응력 제거 풀림 온도는 한정이 되어 있다. 기존 오일템퍼션을 사용하여 제작한 시험품의 코일링후 응력제거 풀림 온도는 420℃× 35분이다. 이후 공정에서 쇼트피닝을 실시하면 표면부는 쇼트피닝의 효과로 압축잔류응력층이 형성되지만, 쇼트피닝의 영향을 받지 않는 0.2mm 정도 깊이 이상에서는 +49MPa 이상의 인장잔류응력이 그대로 남아 있다.

제조공정을 변화시켜 제작한 밸브 스프링 시험품에서도 코일링후 코일의 내측부에 인장 잔류응력이 존재하지만 이후의 열처리 공정에서 인장 잔류응력이 완전히 제거되고 뜨임후 냉각에 의해 코일내부에 압축 잔류응력이 조금 형성된다. 이때 형성된 내부의 잔류응력은 -49MPa 정도로 쇼트피닝을 실시한 후에도 쇼트피닝의 영향을 받지 않는 0.2mm 정도 깊이 이상의 지점에서 그대로 존재한다.

Fig. 5는 제조공정을 변화시킨 밸브스프링의 시험품과 기존의 오일템퍼션을 사용한 밸브스프링의 내측부 잔류응력분포를 나타낸다. 내측 표면에서는 두 시험품의 잔류응력이 같지만 내측 표면에서 0.2mm정도 깊이에서는 종래의 공정품과 공정변경 시험품의 잔류응력차이는 98MPa 이상이 됨을 알 수 있다. 이러한 잔류응력의 차에 의해 피로수명이 향상되었다고 생각된다. 즉 기존 공정의 시험품에서 스프링 내측 표면으로부터 0.2mm 깊이 이상의 지점에 형성되어 있는 인장 잔류응력은 스프링 피로시

험시 작용 응력에 합산되는 반면, 새로운 제조공정 시험품에서는 표면으로부터 0.2mm 깊이 이상의 지점에 형성되어 있는 압축 잔류응력이 작용응력을 그만큼 상쇄시켜 주기 때문이다.

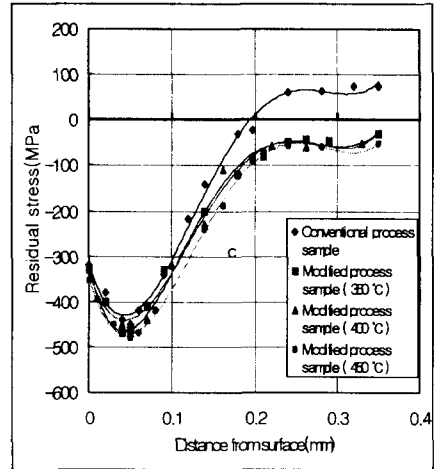


Fig.5 A comparison of residual stresses between samples of conventional process and modified manufacturing process

4. 결론

기존의 오일템퍼션을 이용해 제작한 밸브스프링과 제조공정을 변화시켜 제작한 밸브스프링의 뜨임 온도별 피로수명을 비교 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제조공정을 변화시켜 제작한 밸브스프링은, 602.7± 511.56MPa의 피로시험 응력하에서, 기존의 오일 템퍼션을 이용해 제작한 밸브스프링의 피로수명보다 7배정도 수명이 향상되었다.
- 2) 피로수명 향상 원인은 쇼트피닝을 실시한 코일 내측 표면에서 깊이 0.2mm이상의 지점에 형성된 압축잔류응력에 의한 것으로 사료된다.
- 3) 제조공정을 변화시켜 제작한 밸브스프링 중에서 400℃에서 뜨임한 경우에 피로수명이 가장 우수하였다.

참고문헌

- 1) T.Shibata, S.Yamamoto and Y.Hashimoto, "Valve Spring with High Fatigue Resistance for Automotive Engine", SAE Technical paper series 880417(1988).
- 2) T.H.Muhr, "New Technologies for Engine Valve Springs", 199-208.