

# 자동차 클러치용 다이아프램 스프링 강(50CrV4)의 열처리 조건에 따른 내구특성에 관한 연구

남옥희\* · 이춘열\*\* · 채영석\*\* · 권재도\*\* · 배용탁\*\*\* · 우승완\*\*\*

## A Study on Durability Characteristics of Automobile Clutch Diaphragm Spring Steel According to Heat-Treatment Condition

Wook-Hee Nam\*, Choon-Yeol Lee\*\*, Young S. Chai\*\*, Jae-Do Kwon\*\*,  
Yong-Tak Bae\*\*\* and Seung-Wan Woo\*\*\*

### ABSTRACT

An automobile clutch diaphragm spring is operating in a closed clutch housing under high temperature and subject to high stress concentration in driving condition, which frequently causes cracks and fracture. The material of spring is required to possess sufficient fatigue strength and tenacity, which depend largely on the condition of tempering heat treatment. In this paper, specimens are made under a number of different tempering temperatures and tested to find the optimal tempering heat treatment condition. The experiments include the verification of microscopic structure, hardness, tensile strength, fatigue crack growth rate, stress intensity factor range and residual stress. Also, decarbonization, which occurs in actual heat treatment process, is measured and allowable decarbonization depth is studied by durability test.

**Key Words :** Clutch(클러치), Diaphragm Spring(다이아프램 스프링), Fatigue(피로), Tempering(템퍼링), Durability Characteristics(내구특성), Stress Intensity Factor(응력 확대 계수)

### 1. 서론

국내 자동차산업의 급속한 성장과 품질고급화 및 신뢰성 향상 등의 요구에 대응하기 위하여, 재료특성, 내구성 및 내피로성이 우수한 자동차 클러치용 다이아프램 스프링(automobile clutch diaphragm spring)강재의 수요가 급증하고 있다.<sup>(1-3)</sup>

현재까지 특수 스프링강인 자동차 클러치용 다

이아프램 스프링강은 주로 유럽 및 일본으로부터 수입하여 사용하였는데, 수입가격의 상승과 소재 구입의 어려움이 상존하고 있다. 따라서 원가 절감과 국산화라는 취지하에 스프링강의 원소재를 포항종합제철(POSCO)에서 만들고 있으며, 이것을 제강업체가 압연하여 클러치 제조회사에 공급하고 있다. 그리고 클러치 제조업체에서는 압연된 소재를 고 강도와 내구성 및 내피로성을 지니도록

\* 평화 발레오(주) 연구개발부

\*\* 영남대학교 기계공학부

\*\*\* 영남대학교 대학원 기계공학부

퀀칭(quenching) 및 템퍼링(tempering) 열처리 작업을 행하고 있다.<sup>(4, 5)</sup> 그러나 템퍼링 온도에 따라 요구 특성을 만족하지 못하고 피로 파괴되는 현상이 발생되고 있다.

실제로 클러치용 다이어프램 스프링은 고온의 밀폐된 클러치 하우징(housing)안에서 클러치 페달을 밟을 때마다 릴리스 베어링에 의해 반복적으로 작동되므로, 그 재질은 충분한 피로강도 및 인성이 요구된다.<sup>(6~9)</sup> 국내에서 사용되는 다이어프램 스프링용 소재는 탄화물을 구상화시킨 50CrV4강을 사용하여 열처리를 실시하는데, 열처리의 조건에 따라 표면의 경도, 인장강도 및 피로특성이 달라진다.<sup>(10-12)</sup> 이러한 다이어프램 스프링은 가공방법, 열처리조건에 따라 내구성, 내피로성 등을 만족하기 위한 기술적인 문제로 인하여 제조가 쉽지 않는 부품이다.

따라서, 제품특성을 만족하기 위한 최적의 템퍼링 열처리조건을 선정하기 위하여 880℃에서 15분간 퀀칭처리를 수행하고 템퍼링 열처리 조건을 12단계로 다양하게 변화시켰다. 그리고 각 단계별로 템퍼링 열처리된 다이어프램 스프링 강에 대하여 조직관찰, 경도, 인장 및 피로균열진전시험을 수행하였고, 피로파면을 전자현미경으로 관찰함과 동시에 잔류응력의 분포특성, 탈탄층 깊이 등을 평가하여 스프링강으로서 최적의 템퍼링 열처리조건을 규명하고자 하였다.

## 2. 시험편의 열처리

본 연구에 사용된 50CrV4강의 화학성분을 Table 1에 나타내었으며, 적용한 열처리방법은 Fig. 1과 같이 하였다. 제품의 특성상 고 강도와 인성이 동시에 요구되므로, 퀀칭 효과가 잘 나타나는 825℃에서 925℃ 사이, 즉 POSCO의 권장 온도인 880℃로 15분 동안 유지시킨 후 냉각하였다. 이때 시험편의 변형을 방지하기 위하여 상하 지그(jig)를 제

Table 1 Chemical composition of automobile clutch diaphragm spring

	Composition, wt. %								
	C	V	Cr	Si	Mn	P	S	Cu	Al
POSCO (98.1)	0.51	0.11	1.03	0.28	0.79	0.011	0.003	0.02	-

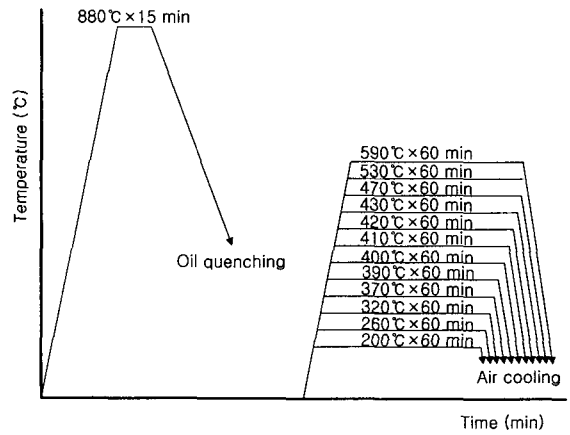


Fig. 1 Method of heat treatment for automobile clutch diaphragm spring

작하여 그 사이에 시편을 삽입하고 이를 유냉시켰다. 그 후 200℃, 260℃, 320℃, 370℃, 390℃, 400℃, 410℃, 420℃, 430℃, 470℃, 530℃ 및 590℃에서 각각 1시간 동안 유지시킨 후 공냉하는 방법으로 템퍼링 열처리를 하였다.

## 3. 조직, 경도 및 인장특성

### 3-1 조직관찰

템퍼링 열처리 후 온도에 따른 금속조직변화를 비교하기 위하여 2%의 나이탈(nital)을 사용하여

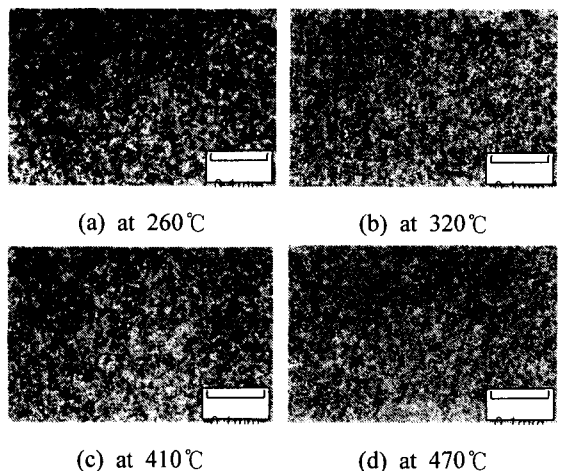


Fig. 2 Optical micrographs of tempered automobile clutch diaphragm spring at various temperature

10초(sec) 동안 에칭(etching)을 하였다. 그리고 각각의 시험편에 대해 200배의 광학 현미경으로 조직을 관찰하였으며, 대표적인 예로 260℃, 320℃, 410℃ 및 470℃에서 템퍼링 열처리한 사진을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 템퍼링 열처리온도에 따른 금속조직의 차이는 미세하여 구별하기가 어려웠다.

### 3-2 경도특성

다이아프램 스프링강의 강도는 경도와 밀접한 관계가 있다. 즉 경도가 낮으면 강도특성은 나빠지고, 경도가 너무 높으면 취성파괴의 요인이 된다. 따라서 템퍼링 열처리 후의 경도특성을 알아보기 위하여, 로크웰 경도시험기(Rockwell hardness tester)를 이용하여 경도시험을 수행하였다. 템퍼링 온도에 따른 각각 20점의 평균 경도값의 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 ● 표시는 시험편에 있어서 경도치의 평균값을 나타낸 것이고 I 표시는 분포범위를 나타낸 것이다. 템퍼링 열처리 온도가 200℃에서 고온인 590℃로 갈수록 평균 경도치가 낮아지는 경향을 나타냈다

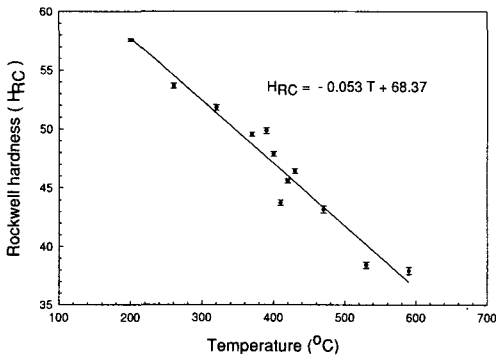


Fig. 3 Relation between tempering temperature and Rockwell hardness

### 3-3. 인장특성

다양한 온도별로 템퍼링 열처리한 다이아프램 스프링의 인장특성 변화를 관찰하기 위하여, ASTM E8M-95a의 규격에 준거하여 폭 20mm, 평행부거리 50mm, 모서리 반경 16mm, 두께 3mm인 인장 시험편을 제작하였다.

인장시험에 사용된 시험기는 Shimadzu사의 Autograph AG-25TG이고, 1mm/min의 속도로 50 mm 변위계(strain gage extensometer)를 부착하여 시험을 수행하였다.

인장시험의 결과로부터 얻은 응력-변위선도는 Fig. 4에 나타내었으며, Fig. 5는 인장강도 및 연신율과 템퍼링 열처리 온도사이의 관계를 나타낸 것이다. 자동차 클러치용 다이아프램 스프링 강재의 인장강도는 템퍼링 열처리 온도 200℃에서 고온인 590℃로 이동할수록 감소하는 경향이 있었다.

또한 연신율은 200℃에서 고온인 590℃로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다.

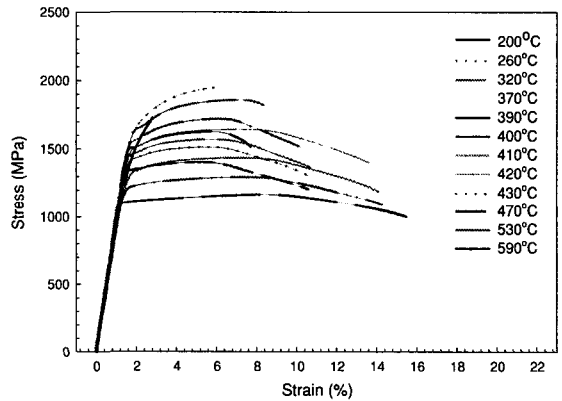


Fig. 4 The stress-strain behavior for tempered tensile specimens at various temperature

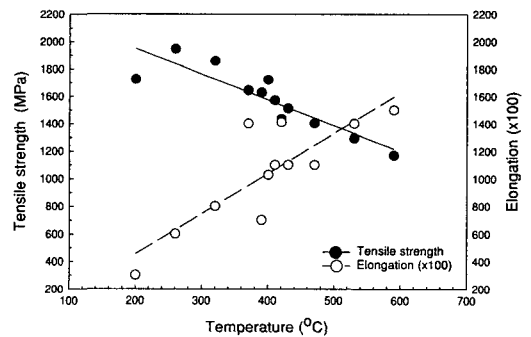


Fig. 5 Relationship tempering temperature and tensile strength or elongation

#### 4. 피로균열진전 특성

자동차 클러치용 다이아프램 스프링은 사용특성 상 고응력하에서 반복적으로 피로를 받게 되므로 고강도와 인성이 요구되고 있다. 아울러 가공시 다이아프램 스프링의 생산성도 요구되고 있기 때문에 이를 만족시키기 위하여, 다이아프램 스프링을 성형 후, 템퍼링 열처리를 통한 강의 마르텐사이트 강화기구가 이용되고 있다. 따라서 이러한 템퍼링 열처리 조건에 따른 피로특성 평가는 자동차 클러치용 다이아프램 스프링의 강성과 내구성 평가 및 안전성 향상을 위하여 중요하다.

##### 4-1. 시험편 및 시험조건

피로균열진전 시험에 사용된 시험편은 앞에서 언급한 것처럼 동일한 열처리 조건을 행한, 길이 200mm, 폭 40mm, 두께 3mm의 중앙균열(CCT; Center Crack Tension) 시험편을 사용하였다. 중앙노치는 피로균열발생 특성에 미치는 영향과 가공경화(work hardening)를 최소화하기 위해서 우선 센터 드릴로 시편 중앙에 홀(hole)을 뚫은 후, 와이어 가공으로 인공노치 길이,  $2a = 6.6 \text{ mm}$ , 곡률반경  $\rho = 0.2\text{mm}$ 로 일정하게 가공하였으며, 피로균열길이의 정확한 측정과 표면거칠기의 영향을 최소화하기 위하여 시험편의 표면을 #200에서 #2000까지의 에머리 페이퍼(emery paper)로 연마 후, 최종적으로 산화 알루미늄 연마제로 마무리하여 본 시험에 사용하였다.

본 시험에 사용된 피로 시험기는 Instron사의 유압 서보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine : model 8516)로서 최대 용량은 10톤(ton)이다. 시험조건은 응력비  $R = 0.05$ 의 정현파형(sine wave), 인장-인장 하중형태를 채택하였고, 주파수는 10Hz로 일정하게 하고 상온에서 습도  $50 \pm 5 \%$ , 응력레벨  $\Delta\sigma = 116\text{MPa}$ 를 기준으로 모든 시험편에 대해 동일조건하에서 피로균열진전 시험을 수행하였다.

균열길이의 측정은 피로균열진전시험 도중 일정한 하중반복회수 후 시험기를 정지하여 0.01 mm의 정밀도를 가지는 이동식 광학현미경(microscopic)에 CCD 카메라를 연결한 모니터로 관찰하였다.

##### 4-2. 피로균열진전속도( $da/dN$ )와 응력확대계수범위( $\Delta K$ )와의 관계

다양한 온도별로 템퍼링 열처리한 자동차 클러치용 다이아프램 강재에 대해 상온에서 피로균열진전시험을 수행하여, 하중반복회수(N)에 대한 피로균열진전길이(a)의 관계로부터 피로균열진전속도( $da/dN$ )를 시컨트법(Secant method)<sup>(13)</sup>으로 구하고, 응력확대계수범위( $\Delta K$ )는 H. Tada의 식<sup>(14)</sup>을 사용하여 구하였다.

Fig. 6은 각 템퍼링 열처리 온도별 피로균열진전속도와 응력확대계수의 관계( $\Delta K - da/dN$ )를 양대수(log-log) 그래프로 표현한 것으로 200°C와 400°C사이에서는 저온에서 템퍼링 열처리를 할수록 피로균열진전속도가 비교적 빠르게 진전하였다. 반면 410°C이상에서 피로균열진전속도는 템퍼링 열처리 온도가 상승할수록 다소 저하하는 경향이 있으나, 400°C이하의 템퍼링 열처리시에 비해

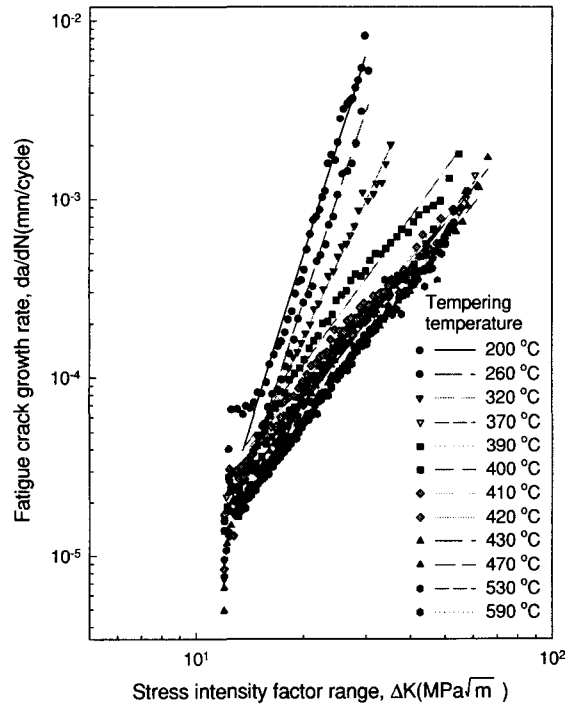


Fig. 6 Relationship between fatigue crack growth rate,  $da/dN$  and stress intensity factor range,  $\Delta K$

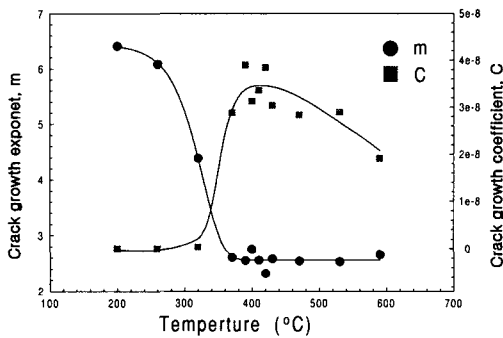


Fig. 7 Relationship between fatigue crack growth exponent, m and tempering temperature or crack growth coefficient, C

큰 차이를 찾아 볼 수 없었다. 그리고 50CrV4강에 대하여 템퍼링 열처리를 하여도 피로균열진전시 Paris의 법칙이 만족됨을 알 수 있다. 또한 이 결과로부터 Paris의 피로균열 안정성장영역에서 최소사승법(method of least)에 의해 구한 직선의 관계도 동일 선도상에 나타내었다.

모든 템퍼링처리 조건에서  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 관계가 성립하고, 여기서 구한 피로균열진전 지수 (m)와 피로균열진전 상수(C)의 값을 구하여 템퍼링 열처리 온도에 따라 plot한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 m은 370°C 정도의 온도까지는 급격히 저하하다가 이후 유사한 값을 가지며, C의 값도 390°C 정도까지 급격히 증가하다가 이후 미소하게 감소하는 경향이 있었다. 따라서, 이상의  $\Delta K - da/dN$  선도 및 C와 m값으로부터 템퍼링 열처리 조건은 적어도 410°C 이상은 되어야 할 것으로 사료된다. 이와 같이 템퍼링 열처리 온도가 높을수록 균열진전속도가 느려진다는 것은, 590°C의 고온으로 갈수록 경도는 저하하나 내피로성이 강해지는 것을 의미하고 있다.

#### 4-3. 피로균열진전 파면 관찰

피로균열진전시험 후 각 단계별로 템퍼링 열처리한 자동차 클러치용 다이아프램 스프링 강재에 대한 피로균열진전 파단면을 200배(왼쪽)와 1000배(오른쪽)의 SEM으로 관찰한 대표적인 예를 Fig. 9에 제시하였다.

Fig. 6에서 200°C로 템퍼링 열처리한 후의 균열진전속도가 다른 온도에서 수행한 피로균열진전시험

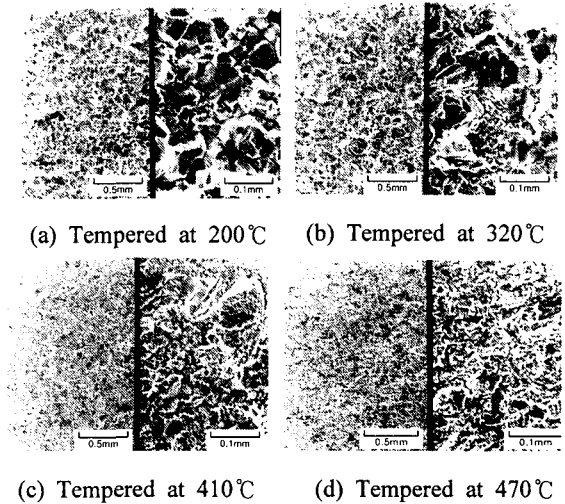


Fig. 8 SEM micrographs of the fatigue fracture surface

함에 비하여 가장 빠른 피로균열진전속도를 보인 것은 Fig. 8의 (a)에서 보듯이 피로균열진전이 입계를 따라 진전했기 때문으로 사료된다. 이러한 피로균열진전이 입계를 따라 진전하는 현상은 Fig. 8의 (a)경우와 같이 200°C로 템퍼링 열처리한 경우가 가장 심하게 나타나고, 다음은 260°C, 320°C, 370°C, 390°C의 순으로 나타났다. 그리고 (c)경우와 같이 400°C 근처에서부터 590°C까지 템퍼링 열처리한 경우는 입계를 따라 피로균열이 진전하는 현상은 발견할 수 없었다.

따라서 피로환경에서 사용되는 자동차 클러치용 다이아프램 스프링 강재의 열처리 온도는 경제적인 면과 신뢰성적인 측면을 고려할 때 410°C 이상에서 템퍼링 열처리한 경우가 적합하다고 할 수 있다.

#### 5. 잔류응력

다이아프램 스프링은 반복하중을 받기 때문에 인장 잔류응력 값이 낮을수록 내피로성이 우수하므로 이를 확인하기 위하여 잔류응력을 측정하였다.

50CrV4 스프링강 재료를 클러치용 다이아프램 스프링으로 사용하기 위해서는 여러 단계의 재료가공을 하며, 이때 재료 내에는 가공에 의한 잔류응력 및 미세적인 변형이 존재하게 된다.<sup>(15, 16)</sup> 재료의 임의의 결정면 간격이 외력에 의해 변화되면 Bragg법칙<sup>(17)</sup>에 의해 peak각이 변화하는데 이 현상

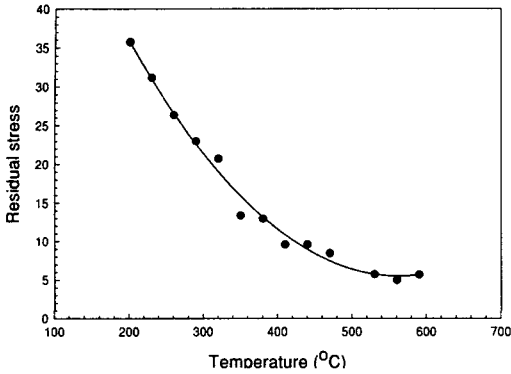


Fig. 9 Relationship residual stress and tempering temperature

을 이용한 X선 잔류응력 측정을 하였다. 측정은 범용 X선 회절장치(SHIMATZU사 XD-D1)를 사용하였으며, 각 시편마다 동일 부위를 연속 3회씩 측정하였다

각각의 응력은  $\sin^2\psi$ 법<sup>(18)</sup>을 이용하였으며, peak 각 산출방법은 반가폭법<sup>(18)</sup>을 이용하여 장비 제작 회사에서 제공되는 전용 프로그램을 사용하였다.

Fig. 9에서는 각 템퍼링 열처리 온도별로 제작된 시편에 대해 잔류응력을 측정하였으며 오차를 고려할 경우 400°C부근에서 590°C까지의 시편에서는 잔류응력이 거의 안정적인 하한치를 보여주고 있다. 따라서, 조직, 경도 및 인장특성과 피로균열진전특성 그리고 잔류응력등 여러 가지 실험의 결과에서 볼 때, 자동차 클러치용 다이아프램 스프링에 대한 템퍼링 열처리 온도는 피로강도가 가장 중요하므로 410°C이상에서 하는 것이 가장 적합하다고 사료된다.

## 6. 탈탄층

경도가 높고 내마모성이 있는 표면을 생성시키기 위하여 침탄을 하지만 전기로내의 압력과 외부의 압력차이, 내화벽돌의 노후 등 여러 가지 요인으로 탈탄이 발생된다. 이러한 탈탄현상은 내구수명을 단축시키는 요인이 된다. 따라서 탈탄층의 두께의 변화에 대하여 내구수명을 확인하기 위하여 각 템퍼링 열처리 온도별 시험편에 대한 결과를 볼 때, 이상에서 언급된 템퍼링 열처리 온도 중 가장 적합하다고 판단되는 410°C에서 제품을

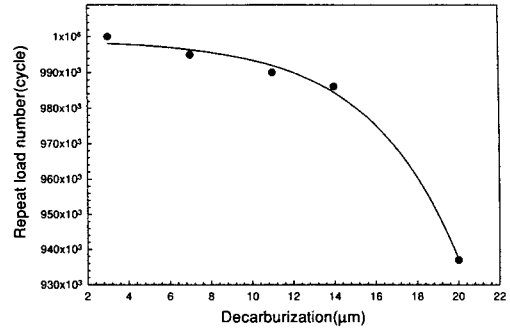


Fig. 10 Relationship between repeat load number and decarburization thickness for 410°C tempered specimen

만들어 시험을 하였다. 탈탄층에 대한 내구시험 평가를 하기 위하여, 탈탄층의 두께를 임의로 변화시키기 위해서는 다수의 방법이 제안되고 있다.

본 연구에서는 전기로 내부의 CO농도를 변화시켜 탈탄층의 두께를 임의로 변화시키고 이를 자동차용 클러치로 제품화하여 상온에서 전용 내구성 시험기로 시험하였으며, 그 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

3 μm에서 탈탄층은 자동차업체에서 요구되는 시험기준인 100만 사이클을 만족하였으며, 14 μm 일때는 약 98만 사이클, 20 μm일때는 약 94만 사이클에서 파단되었다. 또한 14 μm까지는 내구 수명이 완만하게 감소하지만, 그 이후에서는 급격히 감소하는 경향을 볼 수 있다.

따라서, 자동차 클러치용 다이아프램 스프링의 최대 허용 탈탄층은 열처리 제조 설비의 환경 및 내구시험의 결과를 볼 때, 피로 강도에 큰 영향을 미치지 못하는 15 μm이내로 하는 것이 적합하다고 사료된다.

## 7. 결론

자동차 클러치용 다이아프램 스프링 강재에 대하여 경도시험, 인장시험, 피로균열진전시험, 잔류응력시험, 탈탄층에 대한 내구시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 각 단계별로 템퍼링 열처리한 자동차 클러치용 다이아프램 스프링 강재의 템퍼링 열처리 온도

에 따른 금속조직의 차이는 미세하여 구별하기가 어려웠다. 정도치는 템퍼링 열처리 온도가 200℃에서 고온인 590℃로 갈수록 낮아지는 경향을 나타냈다. 인장강도는 200℃에서 590℃로 온도가 높을수록 각 단계별 인장강도는 다소 감소하였다. 연신율은 200℃에서 고온인 590℃로 갈수록 증가하는 경향이 나타났다.

2) 잔류응력은 200℃로 템퍼링 열처리한 경우가 높은 값을 나타내고, 400℃까지 급격히 감소하다가 그 보다 높은 온도 영역에서는 유사한 값을 나타내었다.

3) 각 단계별로 템퍼링 열처리한 경우의 피로균열진전지수는 200℃에서 370℃까지는 점차 감소하다가 그 이상의 온도에서는 유사하게 나타났다. 반대로 피로균열진전상수는 200℃에서 370℃까지 점차 증가하다가 그 이상의 온도부터는 유사한 경향을 보였다.

4) 200℃로 템퍼링 열처리한 경우의 피로균열진전속도가 다른 템퍼링 열처리 온도에서 수행한 피로균열진전속도에 비해 빠르게 나타난 것은 파면 사진에 나타난 바와 같이 피로균열이 입계를 따라 진전했기 때문으로 사료된다. 이러한 피로균열이 입계를 따라 진전하는 현상은 200℃로 열처리한 경우가 가장 심하게 나타나고, 410℃이상에서는 거의 발견할 수 없었다. 탈탄층의 내구시험 결과 허용 탈탄층은 최대 15 μm로 하는 것이 적합하다고 사료된다.

5) 피로환경에서 사용되는 자동차 클러치용 다이아프램 스프링 강재의 템퍼링 열처리 온도는 경제적인 면과 클러치 특성적인 측면을 고려할 때 410℃이상에서 템퍼링 열처리를 하는 것이 적합하다는 결론을 얻었다.

### 참고문헌

1. H.G.Steinlagen, "The Plate Clutch" SAE 800978, 1980.
2. F.Zimmermann and H.Oetting, "An Automatic Dry Friction Clutch for Passenger Cars and Light Duty Trucks," SAE 860383, 1986.
3. J.J.Willyard, "Heavy duty, Large Single Plate Diaphragm spring, Dry Clutches," SAE 892476, 1989.

4. U.H.Gomman, "Gas nitriding : choosing metals for success," Heat treating(march), pp. 19-23, 1991.
5. R.Riedl, "The Determination of Austenite Grain size in Ferrous Metals," Metallography 14, pp. 119-128, 1981.
6. J.O.Almen and A.Laszlo, "The Uniform Section Disk Spring," ASME, Vol. 58, pp. 305-314, 1936.
7. G.Schremmer and Braunschweig, "Dynamische Festigkeit von Tellerfedern," KONSTRUKTION 17, pp. 473-479, 1965.
8. W.A.Brecht and A.M.Wahl, "The Radially Tapered Disk Spring," Trans. ASME Vol. 52 part 1, pp. 45-55, 1930.
9. I.C.Maycock, "Improvements in Agricultural Tractor Clutch Performance," SAE 831348, 1983.
10. D.Holland and W.Dahl, "Influence of tempering conditions on the toughness of high strength spring steels," Wire 43, pp. 72-76, 1993.
11. H.Berns and A.Fischer, "Tribological stability of metallic materials at elevated temperatures," Wear 162-164, pp. 441-449, 1993.
12. J.M.Bello and B.J.Fernandez, "Internal stresses induced by laser surface hardening of 50CrV4 steel-Effects on fatigue behaviour," Welding International 1993 Vol. 7(2), pp. 106-114, 1993.
13. Y. Murakami, "Stress Intensity Factors Handbook," Vol. I, pp. 3
14. "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM E647-88a, 1991.
15. J.Lu and J.F.Flavenot, "Applications of the incremental hole-drilling method for measurement of residual-stress distribution," Experimental Techniques, pp. 18-24, 1989.
16. J.M.Bello and B.J.Fernandez, "Fatigue performance and residual stresses in laser treated 50CrV4 steel," Journal of materials science 29, pp. 5213-5218, 1994.
17. A.Taylor, "An Introductions to X-Ray Metallography," John Wiley & Sons, Inc. pp. 664, 1945.
18. H.P.Klug and L.E.Alexander, "X-ray diffraction procedures," John Wiley & Sons, Inc. pp. 531-562, 1973.