

## 고주파 표면경화된 중탄소강의 비틀림 피로강도에 미치는 초기조직의 영향

金興執, 鄭湧相\*

경북대학교 산업대학원, (현)대우기전공업주식회사

\*경북대학교 공과대학 금속공학과

### Effect of Prior Structure on Torsional Fatigue Strength of Induction Surface Hardened Medium Carbon Steel

Heung-Jip Kim and In-Sang Chung\*

Daewoo Automotive Components, Ltd., 580 Buk-Dong, Dalseong-Gun, Taegu, 711-712

\*Dept. of Metall. Eng., College of Eng. Kyungpook National University, Taegu, 702-701

#### ABSTRACT

In order to evaluate the relation between prior structure and fatigue strength on a induction surface hardened medium carbon steel(SAE1050M) for automotive drive shafts, torsional fatigue test were conducted with various cases of different hardened depths and applied loads. Prior structures of the steel such as pearlite, fine pearlite and spheroidal pearlite were prepared by conventional normalizing, tempering after quenching and spheroidized annealing, respectively. Maximum torsional fatigue strength can be obtained when the case depth is 18~25% diameter of the bar in each prior structure. The effect of case depth on the torsional fatigue strength was different depending on applied load to specimen, but the most good fatigue life was shown in the case of pearlitic structure when the case depth was 4.0~5.5mm(18~25% of bar diameter). Among three different prior structures, energy consumption, to obtain high strength or to get the same case depth, was the most saved in the case of pearlitic structure.

Key word : Induction hardening, medium carbon steel, Microstructure, Torsional fatigue strength

#### 1. 서 론

고주파경화는 금속재료의 표면경화법의 하나로 서 급힘부하를 받거나 토오크를 전달하는 부품의 피로강도를 향상시키는 유효한 수단으로 널리 이용되고 있다. 고주파 경화된 소재의 피로강도에 관한 많은 연구결과는 주로 급힘응력에 대한 것으로 피로강도, 미세조직, 경도, 경화깊이<sup>1,2</sup>, 잔류응력<sup>3,4</sup>, 노치<sup>5</sup> 등과의 관계가 명확히 규명되어 있다. 한편 실용적으로는 비틀림 부하를 받는 부

품에 고주파 경화를 적용하는 것이 많고 부하형식의 차이로부터 급힘피로와는 다른 피로거동을 보일 가능성이 있지만 이에 관한 연구는 그다지 많지 않은 실정이다. 특히 자동차 구동축으로 사용되는 부품의 경우, 효과적인 고주파경화처리를 통해 차체의 중량을 감소시킬 수 있음 뿐만 아니라 생산원가도 줄일 수 있다. 1996년에 발효된 미국의 CAFE (Corporate Average of Fuel Economy)의 요구에 부응하는 한가지 방법으로 자동차용 구동축의 각 사이즈별 크기를 한

사이즈만 줄이면 전체 중량은 약 10%를 줄일 수 있다. 그러나 사이즈를 줄이기 위해서는 각 부품의 강도와 사용수명이 한 사이즈가 큰 부품의 그것과 같은 수준으로 향상되어야만 한다<sup>9)</sup>.

구동축의 강도와 수명을 향상시키는 방법으로 경화깊이를 적당히 조절하거나 소재의 성분을 조절하는 방법 등이 연구되어, 실용화되어 있다<sup>10)</sup>. 그러나 동일성분, 동일경화깊이 및 동일한 표면경도로 고주파 열처리된 자동차용 구동축에서 열처리전 소재의 미세조직의 차이에 따라 강도가 달라지며, 특히 피로수명에 큰 차이가 발생하는 일이 생산 현장에서 자주 발견되고 있다. 이와 같은 결과는 자동차의 성능을 저하시키거나 생산원가를 높이는 원인을 제공하므로 해결하지 않으면 안 된다.

본 연구는 실용되고 있는 자동차 구동축 소재를 고주파경화처리 전에 열처리하여, 노말라이징 처리된 펄라이트 조직과 퀴칭 및 템퍼링된 미세 펄라이트(솔바이트) 조직, 구상화 어닐링된 구상화 펄라이트 조직을 각각 준비한 다음, 실제 자동차 구동축과 동일하게 가공하여 여러 가지 경화깊이로 고주파경화처리를 한 후, 경화전 조직과

비불림 피로강도와와의 관계를 분석 검토하고 동일한 강도와 경화층 깊이를 갖는 구동축의 열처리 가공 비용을 경제적인 면에서 상대적으로 비교 검토하였다.

## 2. 시료 및 실험방법

### 2.1 시료

실험에 사용된 부품과 소재는 Fig.1에서 보여 주고 있는 것과 같이 승용차에 사용하고 있는 구동축으로서 증탄소강에 속하는 SAE 1050M이고 Table 1에 그 화학조성을 나타내었다. 고주파처리 전 소재의 미세조직을 변경하기 위하여 다음과 같은 열처리를 시행하였다.

Table 1 Chemical composition of specimen. (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.51	0.20	0.97	0.01	0.01	0.02	0.32	0.01

#### (1) 노말라이징(펄라이트 조직)

노말라이징 조작용 900°C로 승온하여 1.5hrs 유지 후 공랭 했으며 처리 후 얻은 조직은 펄라이트

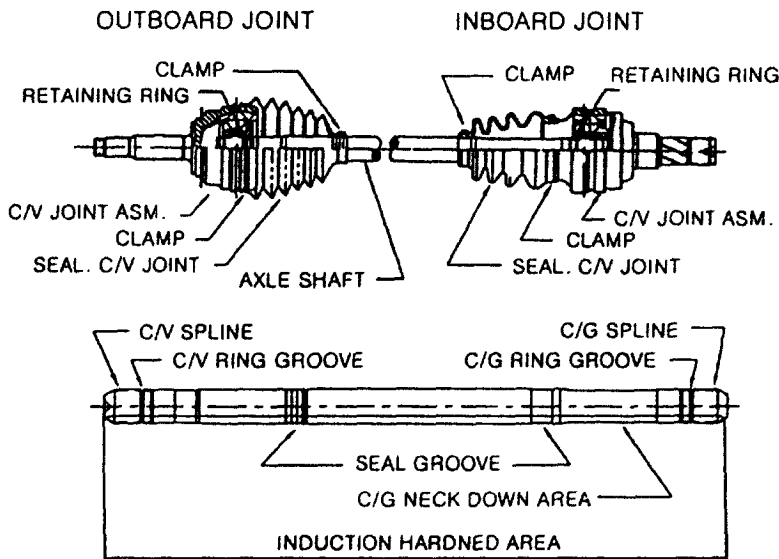


Fig. 1 Axle shaft for automobile.

트이다. 열처리작업 중 표면의 탈탄 및 산화물 방지하기 위하여 흡열형 환원분위기 가스인 RX-GAS(23.6% CO, 13.5% H<sub>2</sub>, 44.9% N<sub>2</sub>)와 프로판 가스(98% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)를 이용하여 노내 분위기를 0.5% C 상태로 조절하면서 작업했으며, 냉각시는 400°C까지 무산화 분위기에서 냉각 후 공랭 시켰다.

### (2) 퀴칭 및 템퍼링(미세 펄라이트 조직)

퀴칭 및 템퍼링 조작은 835°C로 승온 후 1hr 유지한 뒤 70°C의 기름에 급랭하고, 600°C에서 1.5hrs 동안 템퍼링하여 냉각시켰으며 처리 후 얻은 조직은 미세 펄라이트[sorbite라고도 한다]이다. 표면의 탈탄 및 산화방지는 노말라이징 조작과 같다.

### (3) 구상화 어닐링(구상 펄라이트 조직)

구상화 어닐링 조작은 700°C로 승온 후 15min 간 예열한 후, 750°C까지 승온하여 15min 간 유지하고 700°C까지 서냉(냉각속도 1°C/min)하여 30min 간 유지한 조작을 3회 반복한 후에 냉각시켰으며 처리 후 얻은 조직은 구상 펄라이트(spheroidite라고도 한다. 페라이트 + 구상 시멘타이트)이다. 열처리 작업중 표면의 산화방지를 위하여 노내에 질소가스를 투입하며 처리하였다.

열처리후, 각 조직별 경도는 Table 2와 같으며, 열처리후 미세조직은 Fig. 2에 나타내었다.

## 2.2 시편제작

시험편은 Fig. 1과 같이 실제 사용하는 구동축의 치수대로 기계가공한 후 고주파 표면경화처리를 하였다. 고주파 표면경화처리 후 표면경도는 HRc 60 이상이며 경화층 깊이는 HRc 50되는 지점까지의 깊이 정의하며 2.5mm, 4.0mm, 5.5mm, 7.0mm가 각각 되도록 하였다.

예비실험을 통하여 소재의 조직별 고주파 표면경화 조건을 정하였다. 고주파경화장치는 출력주파수가 8.5Hz의 사이리스터(thyristor) 발전방식이며, 고주파 가열코일의 이동속도를 11.6~18.3mm/sec로 변화시키고 투입전력을 120~185kW로 변화시켜 경화깊이를 조절하였다.

Fig. 2 Prior microstructures of the specimens. (a)pearlite by normalizing, (b)fine pearlite by quenching and tempering, and (c)spheroidite by spheroidizing annealing

Table 2 Hardness of specimen. (SAE 1050M)

Heat treatment	Normalizing	Quenching and Tempering	Spheroidizing Annealing
Microstructure	Pearlite	Fine Pearlite	Spheroidal Pearlite
Hardness	HB 240	HB 280	HB 165

Table 3 Conditions of induction hardening (Case depth 5.5mm)

Description	Microstructure		
	Pearlite	Fine Pearlite	Spheroidal Pearlite
Progressive speed	13.3mm/sec	18.3mm/sec	11.6mm/sec
Input power	165kW	165kW	165kW
EM Value	668	566	758

냉각재로는 수용성 냉각재(UCON-A)를 8% 희석한 물을 사용했다. 각 시편을 고주파경화 후에 170°C로 승온후 1.5hrs 동안 템퍼링을 시행하고 교정기로 열처리시 발생한 휨을 교정하였다.

경화층 깊이를 5.5mm에 맞출 때 미세조직에 따른 소재별 고주파 경화조건을 Table 3에 비교하였다. 여기서 EM value는 가열시간과 투입전력을 곱한 수치에 비례하는 에너지 모니터링(energy monitoring) 값이다.

고주파경화 처리시 발생한 표면의 얇은 산화스케일은 시험편에서 직경이 가장 작아 강도시험시 주로 파단점이 되는 홈 부위만 연마지(600, 1000cw)를 사용하여 제거하였다.

### 2.3 실험방법

#### (1) 비틀림 피로시험

실제 사용하는 자동차용 구동축과 동일한 시험편의 스플라인을 피로시험기의 양측에 고정된 허브(hub)의 스플라인에 끼워 고정시킨 후 회전토크를 4Hz의 속도로 정.역방향으로 번갈아 가면서 반복시험을 하였다. 피로시험기는 비틀림피로 전용시험기(SUM電子機械, Japan)를 사용했으며, 시험편과 동일크기로 사용되는 자동차 구동축의 경화층 깊이 규제범위 내에 포함되는 4.0mm, 5.5mm 및 7.0mm 시험편을  $\pm 900$ 에서  $\pm 2,260$ Nm까지의 토크를 적용하여 시험하였고, 경화층 깊이가 실제 사용되는 규제치 보다 작은 2.5mm 시험편은  $\pm 700$ Nm에서  $\pm 1,800$ Nm까지 적용하고  $\pm 2,260$ Nm일때의 시험은 생략하였다.

피로시험중 10°사이클 이상에 도달해도 파손이 되지 않은 경우는 피로시험을 중단할 때의 반복회수를 표기하였다. 파손되는 부위는 대부분 직경이 작은 부위에서 발생하였으나 시험기의 허브에

끼워 고정된 스플라인 이빨(spline teeth)이 파손되어 시험을 중단한 시편이 전체 60개 중 6개가 발생하였으며 그 값은 결과 분석에서 제외하였다.

#### (2) 경화층 깊이 및 경도측정과 미세조직 관찰 및 성분분석

경화층의 깊이는 하중이 1kg인 로크웰경도기를 사용하여 0.2mm 간격으로 표면에서부터 측정하여 경도가 HRc 50이 되는 지점까지의 깊이로 표시하고, 표면경도는 하중이 150kg인 로크웰경도기의 C스케일을 사용하여 측정했으며, 중심부 경도는 10mm 강구를 사용한 브린넬경도기를 사용하여 3ton의 하중을 가하여 측정하였다.

미세조직은 3% nital 용액으로 부식시킨 후 광학 현미경으로 관찰하였으며 소재의 성분에는 분광분석기(vacuum emission spectrometer, Shimadzu, Japan)를 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

미세조직(이하 초기조직이라 부른다)이 서로 다른 세 종류의 소재로부터 만들어진 시험편을 네 종류의 경화층 깊이로 고주파 경화처리하여 종류별로 다섯 가지의 토크로 비틀림 피로시험을 한 결과를 Table 4에 나타내었다.

스플라인 이빨이 파손된 경우는 낮은 토크이고 높은 사이클에서 발생했고, 10°사이클 이후로 파손되지 않은 시편은 고주파 경화열처리전 조직이 노말라이징된 펄라이트 조직이고 경화층 깊이가 2.5mm인 시편 한 개로서 1,169,660 사이클에서 시험을 중단하였다.

#### 3.1 경화층 깊이와 비틀림 피로강도

고주파 표면경화된 소재는 경화시 마르텐사이트 변태로 인한 체적팽창으로 경화층에 압축잔류

Table 4 Fracture cycles and points of torsional fatigue test.

Specimens		Applied load(Nm)					
Microstructure	Case depth	2,260	1,800	1,328	1,127	900	700
Pearlite	2.5mm	-	442 (a)	4,090 (c)	83,400 (c)	125,170 (a)	1,169,660 (e)
	4.0mm	269 (a)	3,523 (c)	52,230 (c)	166,080 (b)	672,630 (b)	-
	5.5mm	617 (a)	8,012 (c)	84,620 (a)	152,420 (b)	398,290 (d)	-
	7.0mm	644 (a)	6,181 (b)	50,450 (b)	79,290 (a)	185,590 (a)	-
Fine Pearlite	2.5mm	-	951 (a)	30,401 (c)	123,800 (c)	364,820 (a)	569,200 (d)
	4.0mm	321 (a)	6,927 (a)	127,120 (b)	235,510 (d)	271,070 (d)	-
	5.5mm	538 (a)	2,002 (c)	73,790 (b)	195,670 (b)	324,900 (b)	-
	7.0mm	564 (a)	1,865 (a)	36,350 (a)	59,760 (a)	119,630 (b)	-
Spheroidal Pearlite	2.5mm	-	176 (a)	2,650 (c)	9,730 (a)	39,900 (c)	302,610 (c)
	4.0mm	310 (a)	5,726 (a)	58,160 (b)	131,650 (d)	613,970 (d)	-
	5.5mm	432 (a)	2,957 (c)	55,740 (b)	165,240 (b)	374,270 (b)	-
	7.0mm	444 (a)	5,927 (b)	54,690 (a)	99,070 (b)	309,000 (b)	-

Fracture point : (a)C/V ring groove, (b)C/G ring groove (c)C/G neck down ared, (d)C/V spiniteeth and (e)nofracture.

응력이 생겨 피로강도가 향상된다. 경화층 깊이가 크게 되면 일정깊이까지는 피로강도가 비례하여 증가하나, 그 이상에서는 경화층에 존재하는 압축 잔류응력의 영향이 감소하여 피로강도가 감소한다고 보고되었다<sup>2)</sup>.

본 시험결과로부터 경화층 깊이별 파단 사이클 수를 Fig. 3에 나타내었다. 본 시험결과도 경화층 깊이에 따라 피로수명이 증가하다가 일정 경화층 깊이를 넘어서면 피로수명이 감소함을 그림을 통해 알 수 있다. 그 경향은 높은 토오크에서보다

낮은 토오크의 경우가 뚜렷하게 나타났다. 최대 토오크인  $\pm 2,260\text{Nm}$  경우는 완만하지만 피로수명이 오히려 증가했음을 보여주고 있다. 경화층 깊이가 작은 경우는 경화되지 않은 내부의 정도가 가장 높은 미세 펄라이트 조직을 가지고 있을 때 어떤 토오크가 걸리든 피로수명이 가장 크며, 경화층 깊이가 가장 깊은 7mm 경우는 낮은 토오크에서는 초기조직이 구상화조직일 때, 높은 토오크에서는 초기조직이 노말라이징된 펄라이트 조직인 경우가 가장 긴 피로수명을 나타냈다.

Table 5 Specification of torsional fatigue test.(Automotive FWD Shaft)

Test item		Applied load	Required cycle	Remark
High load torsional fatigue	CASE A	$\pm 2,100$ Nm	100 Cycles	1 Hz
	CASE B	$\pm 2,260$ Nm		
Low load torsional fatigue	CASE A	$\pm 900$ Nm	250,000 Cycles	4 Hz
	CASE B	$\pm 1,328$ Nm	20,000 Cycles	

CASE A to be applied to FWD shaft with JAEL load 2,100Nm.  
 CASE B to be applied to FWD shaft with JAEL load 2,260Nm.

시험편과 동일 치수를 사용하는 실제 자동차 구동축에서 요구되는 비틀림 피로강도는 Table 5와 같으며 요구강도를 맞추기 위해 규제된 고주파 표면경화 후 경화층 깊이는 4.0-5.3mm이다.

경화층 깊이가 6mm 이상일 경우 낮은 토크인  $\pm 900$ Nm에서 250,000 사이클을 만족하기 어려우며, 최대 토크인  $\pm 2,260$ Nm에서는 경화층 깊이가 7mm까지 피로수명이 증가함을 보여주고 있다.

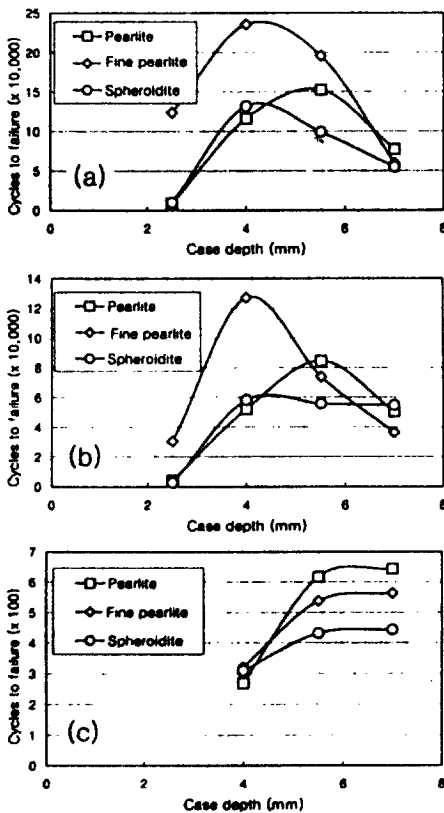


Fig. 3 Relation between case depth and cycles to failure after induction hardening of each prior structure. (a)load 1,127Nm, (b)load 1,328Nm and (c)load 2,260Nm

3.2 초기조직과 경도구배

Fig. 4에는 경화층 깊이별로 시험편 중앙부 횡단면에서 반경방향으로의 경도분포를 각각 나타내었다. Fig. 4에서 보는바와 같이 경화층 깊이에 무관하게 초기조직에 따라 경화층 깊이에 따른 경도의 구배가 다르게 나타났다. 초기조직이 구상화조직일 경우 경도구배가 가장 완만하여 경화층과 미경화층과의 중간 경계구역이 가장 넓게 나타났다. 이것은 초기조직이 구상화조직일 때 불완전경화구역이 가장 많이 나타남을 보여준다. 또한 퀴칭열처리후 경화조직에 남게되는 압축잔류응력의 분포도 표면으로부터 미경화된 내부로 완만하게 변화함을 예측할 수 있다. 따라서 동일한 유효 경화층 깊이(effective case depth)를 얻은 시험편에서 구상화 조직을 가진 시험편은 전 경화층 깊이(total case depth)가 가장 깊게 되고 결국 깊은 유효경화층 깊이를 얻기가 어렵다. 깊은 유효 경화층 깊이를 얻기 위해서는 많은 에너지가 필요하게 되고 표면경화에 의한 경화층의 압축잔류응력을 얻기보다는 인장응력을 갖게되는 전체 경화(through hardening)가 되기 쉽다.

초기조직이 미세 펄라이트인 경우의 경도구배가 미경화된 균일한 내부경도에 도달하기 전 내부경도보다 약간 낮게 나타나는 것은 경화처리가 열된 열이 변태온도 이하로 유지되므로 미세 펄라이트를 오스테나이트화를 시키지 못하고 결정성장만을 시키므로 경도가 오히려 떨어진 것은

로, 그 영향이 클 경우 파단강도가 급격히 떨어지게 된다<sup>13)</sup>.

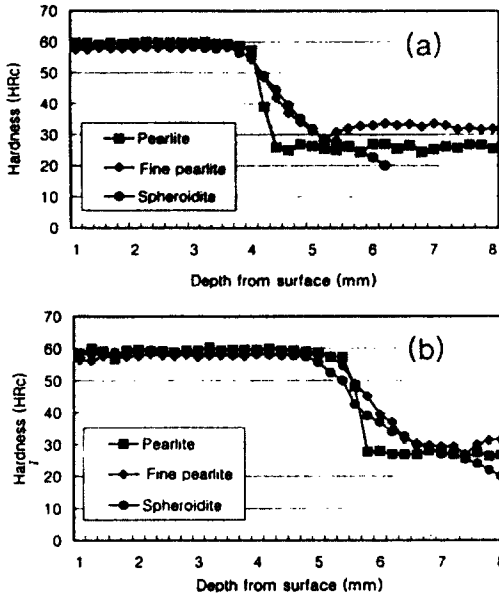


Fig. 4 Distribution of hardness after induction hardening of each prior structure. (a) in case depth 4.0mm and (b) in case depth 5.5mm

### 3.3 초기조직과 경화조직

강의 고주파 경화처리의 장점은 경화를 빨리 시킬 수 있다는 것이다. 그러나 어떤 강에서는 이 가열시간이 너무 짧아 충분한 오스테나이트화가 이루어지지 않는다. 이것은 특히 Cr과 Mo 성분을 가지고 있는 합금강에서 뚜렷하게 나타난다<sup>14)</sup>. 또한 초기조직이 다를 경우에도, Fig. 5에 보여주는 대로 경화층과 미경화층의 경계에 차이가 있다. 초기조직이 펄라이트일 때 경계층이 가장 좁고, 구상화조직일 때 경계층이 가장 넓다. 이것은 강의 평형상태도에서도 알 수 있는 바와 같이 페라이트의 오스테나이트화 온도가 펄라이트의 오스테나이트화 온도보다 높기 때문에 고주파 가열 시 전도열의 구배에 따라 완전한 오스테나이트화 온도에 미달되는 경계층의 크기가 다르게 나타난 것이다.

오스테나이트화의 미달현상은 화학성분에서 처

럼 초기조직의 차이로부터 온 결과이다. 따라서 고주파경화에서 표면경도만으로 요구되는 공학적 품질은 얻을 수 있겠지만, 강에서 중요한 많은 성질은 경도보다 미세조직이 더 민감하게 영향을 끼친다. 결국 오스테나이트화의 미달현상은 강의 최대경도를 떨어뜨리고 피로수명을 떨어뜨려, 열처리된 강에서는 치명적인 단점이 된다.<sup>15)</sup>

Fig. 6은 경화조직과 미경화조직의 경계층만을 확대한 것이다. 초기조직이 미세 펄라이트인 시편의 경계층 조직은 표면으로부터 마르텐사이트 → (마르텐사이트 + 미세 펄라이트) → 성장한 미세 펄라이트 → 미세 펄라이트(기지조직)이고, 초기조직이 구상화조직인 시편은 표면으로부터 마르텐사이트 → (마르텐사이트 + 페라이트 + 시멘타이트) → 기지조직으로 되어 있다. 반면에 초기조직이 펄라이트인 시편은 경화된 마르텐사이트조직과 기지조직 사이에 중간조직이 아주 좁게 나타났다.

Fig. 5 Microstructures after induction hardening of each prior structure. (a) In case of pearlite, (b) In case of fine pearlite and (c) In case of spheroidite

본 연구에서 사용한 시험편의 기지부 경도는 Hv 175~290(H<sub>B</sub> 165~240)으로 비교적 낮기 때문에 평균응력이 피로한도에 주는 영향이 적으므로 이것을 무시하면 피로한도에서의 전단응력범위는 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$\tau_w = 0.0806 Hv + 15.7 \quad (3)$$

식(3)을 사용하여 경도분포를 전단응력범위로 계산하고 시험에 걸리는 부하응력의 분포와의 교점을 구함으로써 파손의 발생위치와 비틀림 피로한도를 추정할 수 있다<sup>2)</sup>.

파손위치는 초기조직과 무관하게 경화층 깊이에 영향을 받았으며, 경화층 깊이가 7.0mm인 시험편을 제외하고 모든 시험편이 경화부와 기지부의 경계면에서부터 파단되었다.

Fig. 6 Microstructures of transition area in Fig. 5. (a) In case of pearlite, (b) In case of fine pearlite and (c) In case of spheroidite

### 3.4 초기조직과 파단형태

Fig. 7(a)는 경화층 깊이가 4.0mm인 시험편의 거시적 파손형태를 보여 주고 있으며, 피로파괴의 기점은 경화부와 기지부의 경계에 있고 파괴기점의 경화부측과 기지부측에는 축에 직각인 최대 전단응력 방향에 따른 파면이 관찰되었다. 최종적으로는 축에 대하여 45°방향의 인장 주응력에 직각인 방향으로 균열이 전파하여 파단되었다. 경화층 깊이가 2.5mm, 5.5mm 시험편의 경우에도 이와 마찬가지로 파손형태를 보였다.<sup>16)</sup>

Fig. 7(b)는 경화층 깊이가 7.0mm인 시험편의 거시적 파손형태를 보여주고 있으며 피로파괴의 기점은 표면이고, 축에 대하여 45°의 인장 주응력에 직각인 방향으로 파단되었다.

「피로강도의 설계자료(I)」<sup>17)</sup>에 따르면 노말라이징된 기계구조용 탄소강의 양쪽 비틀림피로한도  $\tau_w$ 와 인장강도  $\sigma_B$ 의 관계를 다음 식으로 표시하였다.

$$\tau_w = 0.121\sigma_B + 7.86 \quad (1)$$

또, 경도 Hv와 인장강도  $\sigma_B$ 의 사이에는 다음 식이 근사적으로 성립한다.<sup>18)</sup>

$$\sigma_B = Hv / 3 \quad (2)$$

### 3.5 초기조직과 비틀림 피로강도

Fig. 8은 경화층 깊이별 S-N 선도를 초기조직별로 나타낸 것이다. 펄라이트 조직과 구상화조직으로부터 경화된 시험편은 공업적으로 규제하고 있는 4.0, 5.5mm 경화층 깊이의 시험편과 7.0mm 시험편에서는 비슷한 경향을 보이고, 2.5mm 경화층 깊이의 시험편은 동일 사이클에 대응하는 파단토크가 규제내 경화층깊이의 시험편보다 25% ~ 30% 낮은 값을 보이는 반면, 미세 펄라이트 조직으로부터 경화된 시험편은 시험한 경화층 깊이 전 구역에서 비슷하게 나타났다. 이는 미세 펄라이트 조직의 내부경도가 상대적으로 높아서 비틀림강도에 경화층 뿐만 아니라 내부 미경화층의 영향이 작용하였다고 판단된다. 그러나 낮은 토크가 걸리는 경우에는 미세 펄라이트 조직의 피로수명이 짧게 분포하고, 특히 경화층 깊이가 가장 깊은 7.0mm 경우 전 부하구역에서 피로수명이 가장 짧게 나타났다. 이는 경화되지 않은 미세조직간 피로강도 비교에서 층상구조의 조대한 펄라이트 공석강이 구상화조직의 스페로이드이트강에 비해 피로한도를 훨씬 감소하게 하는 노치의 영향보다 경화층 깊이가 깊어짐에 따른 압축잔류응력의 감소가 크게 영향을 미친 결과로 보인다.

경화층 깊이가 가장 작은 2.5mm인 경우 초기조직에 따른 영향의 차이가 가장 크게 나타나는데 미세 펄라이트 조직, 펄라이트 조직, 구상화조직



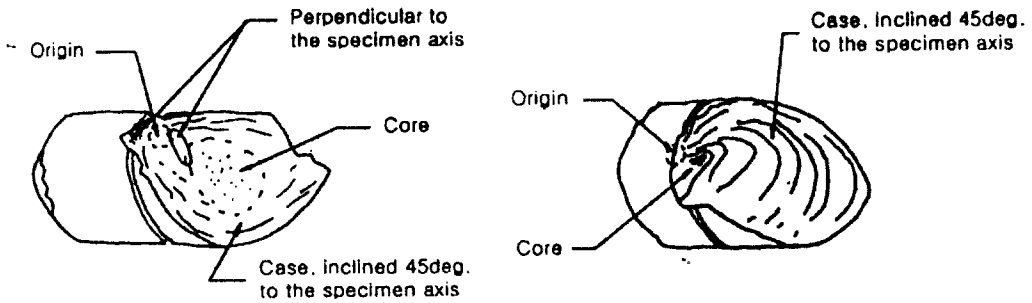


Fig. 7 Macroscopic view of fractured specimen by torsional fatigue test. (a) in case depth 4mm and (b) in case depth 7mm

순으로 피로수명이 감소하고 동일한 피로수명에서의 파단토크는 미세 펄라이트 조직에 비해 구상화조직이 15% ~ 30% 낮게 나타났다. 그러나 7.0mm 경화층 깊이에서는 미세 펄라이트 조직의 시편이 다른 두 조직의 시편보다 최고 20% 까지 낮았다. 경화층 깊이가 공업적 규제범위인 4.0, 5.5mm인 경우에 펄라이트 조직의 시편이 높은 토크 경우 5.5mm에서, 낮은 토크 경우 4.0mm에서 피로수명이 가장 길었다.

### 3.6 초기조직과 경화효율

Fig. 9는 구상화조직과 펄라이트 조직의 시편을 고주파경화시 동일한 시간동안 동일한 전력을 투입했을 때에 형성된 경화층을 보여주고 있다.

Fig. 10은 동일한 경화층 깊이를 얻기 위해 투입된 에너지를 상대적으로 비교하여 나타낸 값이다. 여기서의 수치는 가열시 투입된 전력(kW)과 가열시간을 곱한 값에 비례하는 값으로 고주파경화 장비의 에너지 모니터 상에 나타나는 값을 취한 것이다.

동일한 에너지에 의해 얻은 펄라이트 조직과 구상화조직 시편의 경화층 면적비는 1.23 : 1.00 (349mm<sup>2</sup> : 283mm<sup>2</sup>)으로서 펄라이트 조직의 경우가 동일한 에너지를 투입할 때 23%의 더 많은 면적을 경화시킬 수 있음을 알 수 있다. 2.5, 4.0 및 5.5mm 경화층을 얻는 경우에도 펄라이트 조직의 경우가 가장 적은 에너지가 사용되었고 구상화조직의 경우가 가장 많은 에너지가 소비된 것을 확

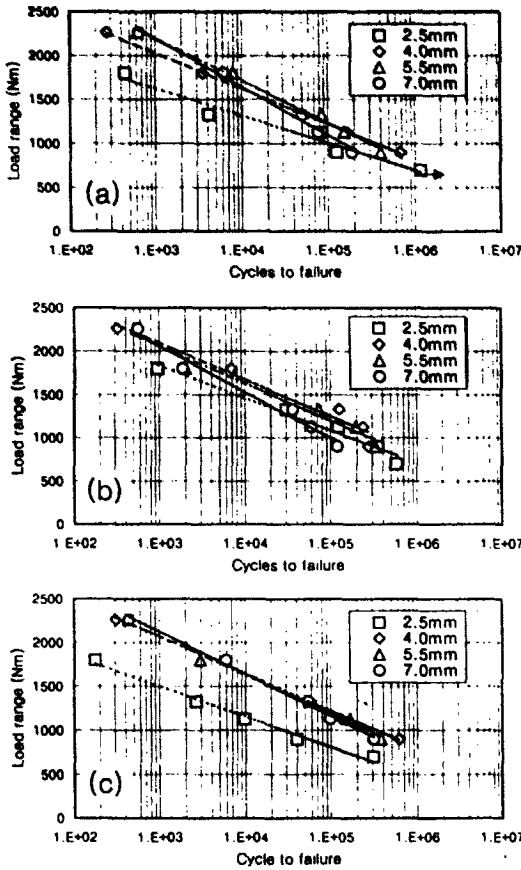


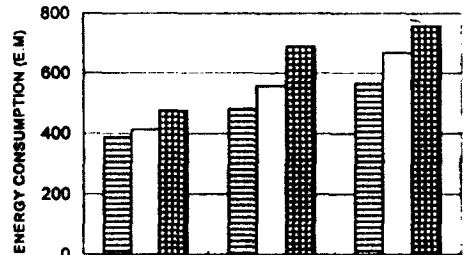
Fig. 8 S-N diagram of each case depth after induction hardening of (a) normalized, (b) quenched and tempered, and (c) spheroidizing annealed specimens.

인할 수 있다. 동일한 경화층을 얻기 위해 구상화 조직의 시편은 펄라이트 조직의 시편보다 22~43%나 많은 에너지를 사용하였다.

4. 결 론

자동차용 구동축으로 사용되는 중탄소강 소재 (SAE1050)를 이용하여 초기조직을 여러 가지로 변화시킨 후 고주파 경화처리된 시편으로 비틀림 피로강도에 미치는 초기조직의 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

Fig. 9 Evaluation of induction hardened layer after induction hardening by same hardening conditions. (a) In case of fine pearlite and (b) In case of pearlite



Case depth	2.5mm	4.0mm	5.5mm	REMARK
Pearlite	388	481	566	
Fine Pearlite	413	558	668	
Spherulite	478	689	758	

Fig. 10 Evaluations of energy consumption for induction hardening.

1. 초기조직이 미세 펄라이트일 때는 경화층 깊이에 따른 S-N 선도의 변화가 적으며, 경화층 깊이가 얇을 때 피로수명이 우수하고 직경의 25% (5.5mm) 이상일 때 급격히 감소했다.
2. 초기조직이 구상 펄라이트일 때는 경화층 깊이에 따른 S-N 선도의 변화가 크며, 경화층 깊이가 깊을 때 피로수명이 우수하고 직경의 18% (4.0mm) 이하일 때 급격히 감소했다.
3. 초기조직이 펄라이트일 때는 경화층 깊이에 따른 S-N 선도의 변화가 중간이며, 경화층 깊이가 직경의 25% (5.5mm) 일 때와 작은 토오크일 때에 세 가지 초기조직 중 가장 우수하였다.
4. 최대 피로강도는 모든 초기조직에서 경화층 깊이를 직경의 18%~25%로 할 때 얻을 수 있었다.
5. 피로수명은 2,260Nm인 토오크(요구항복강도)에서 경화층 깊이가 7mm(직경의 32%)까지 증가함에 따라 증가하고, 이하의 토오크에서는 5.5mm(직경의 25%)까지 증가하다 감소하였다.
6. 동일한 경화층 깊이를 얻기 위해 소요되는 에너지는 펄라이트의 경우가 가장 적었으며, 구상 펄라이트 조직보다 22~43%가 절약되었다.
7. 따라서, 여러 가지 토오크를 받는 자동차용 구동축을 고주파 경화처리할 때 가장 경제적으로 고강도를 얻을 수 있는 초기조직은 노말라이징 처리된 펄라이트 조직이다.

## 참 고 문 헌

1. G. A. Fett : Met. Prog., 127(1985)49
2. T. Naito, K. Hanai, H. Ueda and M. Kikuchi : J. Soc. Mater. Sci., Jpn., 32(1983)1132
3. K. H. Kloos, P. Braisch and M. Koch : Conf. Residual Stresses in Science and Technology, vol.2 Garmisch-Partenkirchen, DGM Information gesellschaft mbH, FRG, (1986) 767
4. S. Yonetani and S. Isoda : Tetsu-to-Hagane (J. Iron Steel Inst. Jpn.), 75(1989)1362
5. Zayac and Stephen Adam : Diss. Abstr. Int., 40(1980)150
6. N. Skalli and J. F. Flavenot : Conf. Advances in Fracture Research (Fracture 84), Vol.3, Pergamon Press Ltd., UK, (1984)1959
7. T. Furakawa, S. Konuma, K. Suzuki and Y. Wakabayashi : J. Soc. Mater. Sci., Jpn., 37(1988)178
8. P.K.Braisch : Conf. ASM Heats Treatment and Surface Engineering, Materials Science Forum 102-104, 1(1992)319
9. T. Kato, S. Yokouchi and K. Yoshida : NTN Technical Review No.61, (1992)16
10. M. Ishijima : Denki Seiko (Electric Furnace Steel), 61(1990)41
11. K. Z. Shepelakovsky : Ind. Heat., 50(1983)14
12. Y. Matsubara, M. Kumagawa and Y. Watanabe : Netsu Shori (J. Jpn. Soc. Heat Treat.), 29(1989)92
13. P. K. Braisch : Conf. Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. II Scheffield, Mechanical Engineering Publications, UK, (1986)459
14. S. L. Semiatin and D. E. Stutz : Induction Heat Treatment of Steel, ASM, Metal Park, OH, (1986)13
15. R. F. Kern : Heat Treating, 23(1991)20
16. 李億燮, 疲勞強度設計, 仁荷大學校出版部, 서울, (1990)38.
17. 日本機械學會編, 疲勞強さの設計資料(1), 東京, (1972)53.
18. 吉澤武男, 硬さ試驗法とその應用, 裳華房, 東京, (1967)287.
19. 李東寧, 材料強度學, 文運堂, 서울, (1992)370