

## SCM415강의 정적 및 동적 변형거동에 미치는 탄화물 구상화율 변화에 관한 연구

김현주<sup>†</sup> · 임종민\*

부경대학교 신소재공학부 금속시스템공학과

\*부경대학교 대학원 금속공학과

### A Study of Static and Dynamic Deformation Behaviors of SCM415 Steel on the Change in Spheroidization of Cementite

Heon-Joo Kim<sup>†</sup> and Jong-Min Lim

Dept. of Metallurgical System Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**Abstract** Effect of spheroidization of cementite on static and dynamic deformation behaviors of SCM415 steels was investigated in this study. Dynamic torsional test was conducted using torsional Kolsky bar with the strain rate of  $1.6 \times 10^3/s$ . Three types of specimens were used with different spheroidization degree of cementite. Dynamic test results were analyzed comparing with static tensile results and microstructural changes. The obtained results are as follows;

- 1) All the specimens of static and dynamic tests showed a ductile fracture mode of dimple. Specimens of the dynamic test showed adiabatic shear bands on the beneath of fracture surface.
- 2) In static tensile test, decreased tensile strength and increased uniform and non-uniform elongations appeared as spheroidization degree of cementite increased.
- 3) In dynamic torsional test, decreased shear strength and increased uniform elongation appeared as spheroidization degree of cementite increased.
- 4) Due to the largest uniform elongation, superior cold forgeability at high speed is expected on high spheroidization degree of cementite.

(Received 13 August 2004; accepted 13 September 2004)

**Key words:** SCM415 steel, Torsional Kolsky bar test, Spheroidization of cementite, Adiabatic shear bands

### 1. 서 론

냉간단조와 같은 고속 성형공정에서는 일반적인 정적 변형특성과 다른 재료의 동적변형 특성으로 인해 변형이 집중되는 부분에 균열이 발생하는 경우가 있다. 이 균열은 단열성 전단밴드(adiabatic shear band)의 형성과 관련이 있으며, 이로 인한 균열이 급격하게 전파되어 부품의 결함을 유발하게 된다[1-4].

단열성 전단밴드는 재료가 동적변형을 받아 소성변형이 국부적으로 집중되는 국부 소성변형 영역을 일컫는다. 이 전단밴드는 재료의 동적 변형시 열적-기계적 불안정과정(thermo-mechanical instability process)에 의해 생성된다[2, 5]. 변형도중 전단밴드가 형성되면 재료가 이 밴드영역에서 하중을 견딜

수 있는 능력이 급격히 저하되어 최종적인 파손의 원인이 된다[6]. 따라서 재료의 동적 변형거동 및 단열성 전단밴드의 형성에 대한 연구는 재료의 동적 물성향상을 위한 합금설계, 미세조직 개선, 고속가공 공정제어 등을 위해서 필수적이다. 그러나 냉간 단조 용강의 미세 조직학적 인자 즉, 탄화물 구상화율을 성형성과 연결하여 동적하중에서 균열의 발생현상을 체계적으로 설명한 연구는 거의 되어 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 열처리를 통해 탄화물 구상화율을 변화시킨 SCM415강을 torsional Kolsky bar를 이용하여  $1.6 \times 10^3/s$ 의 변형속도에서 동적비틀림실험을 실시한 후, 동일하게 탄화물 구상화율을 변화시킨 재료의 정적 인장시험 결과와 비교하여 단열성 전단밴

<sup>†</sup>E-mail : metjoo@pknu.ac.kr

드의 생성 및 동적 변형거동에 미치는 금속조직 인자의 영향을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편 및 열처리

본 연구에서 사용한 재료는 인발가공에 의해 생산된 SCM415강으로서 직경 18 mm의 봉재이며, 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다.

재료의 미세조직학적 인자 즉, 구상화율을 변화시키기 위하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 2단계 열처리를 실시하였다. 구상화율의 변화는 제2단계 열처리구간에서 유지온도를 720°C로 고정된 후 유지시간을 변화시켜 0%, 50%, 80%이상의 구상화율을 갖도록 열처리를 실시하였다. 구상화율의 차이에 따라 0(spherodization; 0%), 50(spherodization; 50%), 80(spherodization; 80%이상)의 기호를 조합하여 표기하였다.

열처리된 시편은 인발방향의 수직으로 시편을 채취하여 조연마, 폴리싱 및 3% 나이탈 용액으로 에칭한 후 광학현미경 및 주사전자현미경(이하 SEM)을 사용하여 탄화물의 구상화율을 관찰하였다. 펄라이트 부피분율, 구상화율 측정은 Image-Pro Plus 4.1 프로그램을 이용한 영상분석기를 사용하였다.

Table 1. Chemical composition of the specimen

								(wt%)
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe	
0.15	0.19	0.72	0.01	0.01	1.02	0.21	bal.	

판상 형태에서 구형 형태로 변하는 세멘타이트에 대한 구상화 분율을 측정하기 위해서는 뚜렷한 측정 기준이 필요하다. 구상화 세멘타이트는 평면상의 타원형태를 갖고 있다. 본 연구에서는 Chojnwski와 Tegart[7]의 기준인 5 : 1 이하인 입자를 구상화된 것으로 간주하였으며, 구상화 분율은 다음과 같은 식을 적용하여 산출하였다.

$$\text{구상화분율(\%)} = \frac{V_s}{V_u + V_s} \times 100$$

여기에서  $V_u$ 는 구상화되지 않은 세멘타이트 입자의 면적분율을, 그리고  $V_s$ 는 구상화된 세멘타이트 입자의 면적분율을 나타낸다.

### 2.2 정적 인장시험

각각의 열처리 조건에 따라 얻은 시편을 인장 방향이 봉재의 인발방향과 평행하도록 인장시험시편을 만들었다. 인장시험편은 ASTM 표준규격에 속한 봉상의 subsize 규격으로 게이지길이 30.0±0.1 mm, 게이지부 지름 6.0±1 mm로 가공하였다. 인장시험은 만능재료시험기(Zwick-149471)를 이용하여 변형속도 10<sup>-4</sup>sec<sup>-1</sup>에서 시험하였으며, 시험후 파괴된 시편의 파면은 SEM으로 관찰하였다.

### 2.3 동적 비틀림시험

동적비틀림 시험에 사용된 시편은 Fig. 2에서와 같이 표점거리 2.5 mm, 두께 165 μm의 thin-walled tube 형태의 게이지부를 가지고 있으며, 봉재의 인발

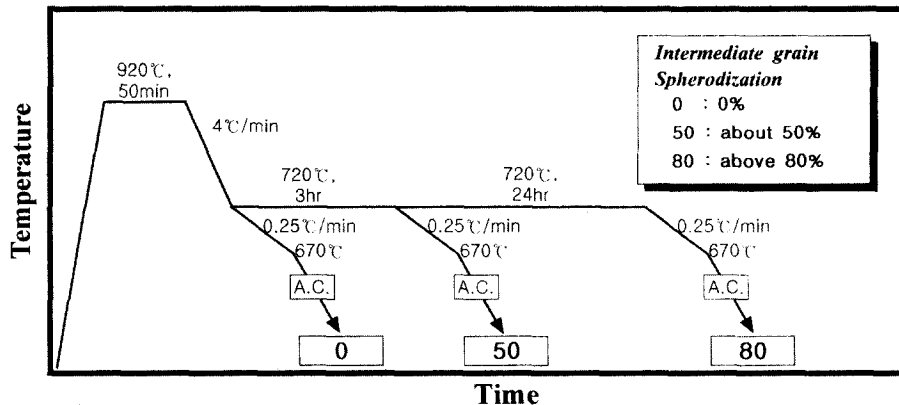


Fig. 1. Schematic diagrams of heat treatment cycles.

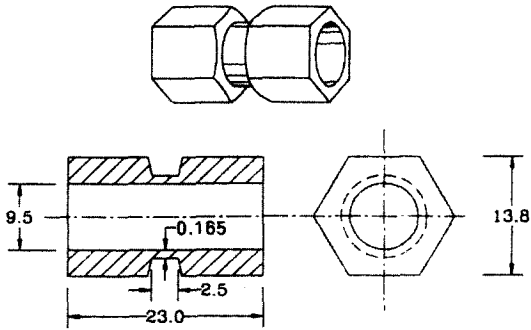


Fig. 2. Shape and dimensions of the thin tubular specimen with hexagonal flanges used in the torsional Kolsky bar. (unit : mm)

방향과 평행되게 가공하였다.

Fig. 3에 동적비틀림 시험 장치인 torsional Kolsky bar의 도식적인 그림을 나타내었다. 이 장치는 동적하중시스템부와 data acquisition system으로 나누어져 있으며, 지름이 25.4 mm이고 길이가 2 m인 한 쌍의  $T_6$  처리된 2024 알루미늄 봉으로 구성되어 있다. 동적비틀림 시험은 알루미늄 봉 사이에 시편을 장착하고 동적하중시스템부의 클램프로 알루미늄 봉을 고정한 후 dynamic loading pulley를 작동시켜 클램프와 dynamic loading pulley 사이에 유압을 이용해 일정한 양의 Torque를 축적시킨다. 그 후 클램프를 깨뜨리면, 순간적인 전단파(shear wave)가 발생하며, 이 전단파가 시편에 도달됨으로써 높은 변형속도로 시편을 변형시킨다. 이 과정에서 입

사파, 반사파, 투과파는 각각 시편으로부터 같은 거리에 부착되어 있는 변형계(strain gage)에 감지되고, 이들은 오실로스코프에 기록된다. 기록된 신호 중에서 반사파로부터 시간의 함수로 표시되는 평균전단 변형을  $\gamma(t)$ 를, 그리고 투과파로부터 전단응력  $\tau(t)$ 를 측정한다. 이  $\gamma(t)$ 와  $\tau(t)$ 로부터 시간을 소거하여 동적 전단응력-전단변형(dynamic shear stress-strain) 곡선을 구하였다. 본 연구의 시험과정에서의 전단변형 속도(shear strain rate)는  $1600\text{sec}^{-1}$ 이었으며, 상온에서 시험을 실시하였다. 시험 후 파괴된 시편의 파면과 게이지부의 변형된 영역은 SEM으로 관찰하였다.

### 2.4 단일성 전단밴드 관찰

동적비틀림시편에서 단일성 전단밴드의 생성여부를 확인하기 위해 광학현미경, SEM 및 미소경도측정을 하였다.

시편의 게이지부를 정밀저속절단기로 외부 응력 및 변형이 가해지지 않도록 조심스럽게 채취하여 냉간 마운팅한 후, 폴리싱 및 에칭(3%나이탈)하여 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였다. 또한 미소 비커스 경도기를 사용하여 전단밴드 영역에서 미소성부 영역으로 20  $\mu\text{m}$ 간격, 하중 25 g, 하중시간 15초의 조건으로 측정하여 단일성 전단밴드의 존재를 확인하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 미세조직

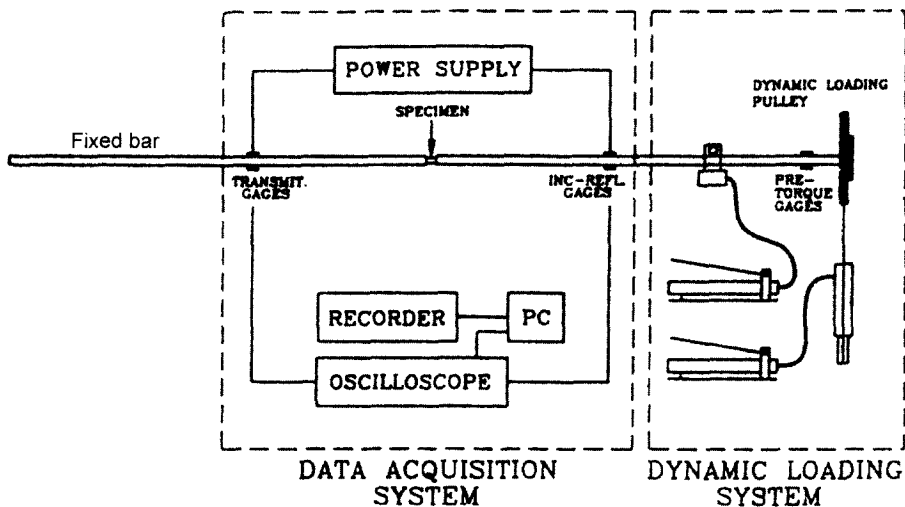


Fig. 3. Schematic diagram of the torsional Kolsky bar.

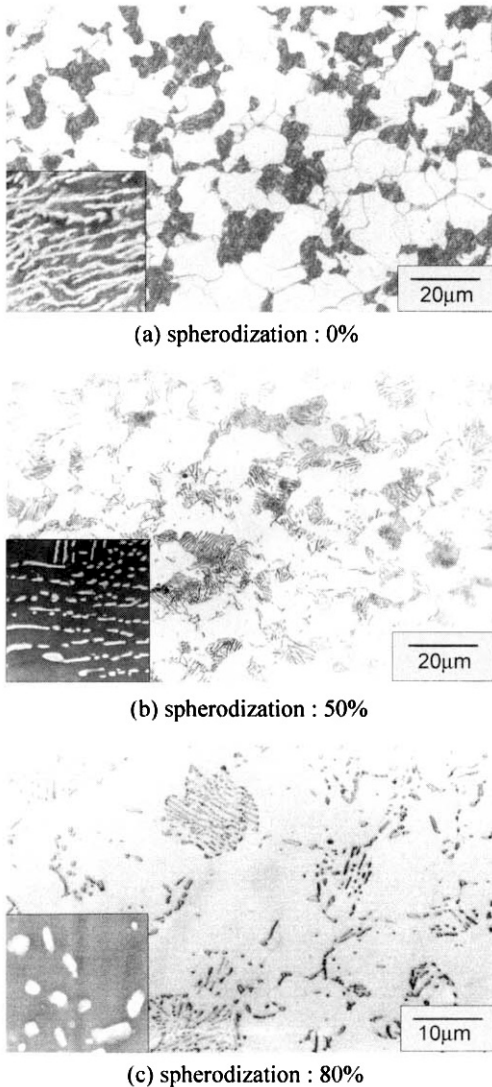


Fig. 4. Optical micrographs of the specimens.

Fig. 4는 본 실험에 사용된 재료로, 2단계 열처리를 실시하여 구상화율을 변화시킨 재료의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 80% 이상의 구상화율에 소요되는 시간은 24hr이었다.

영상분석기를 통해 구상화율의 측정결과를 Table 2에 나타내었다.

### 3.2 정적 인장시험

열처리를 통해 얻어진 각 시편에 대한 인장시험 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Table 2. Quantitative analysis data of the specimens

Specimen No.	Grain size ( $\mu\text{m}$ )	Pearlite Volume fraction (%)	Spheroidization (%)
0	11.0	34	0
50		-	55
80		-	91

정적인장 시험에서는 탄화물이 구상화될수록 강도는 감소하고 파단 연신율은 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 6은 인장시험 후 파괴된 시편의 파면을 SEM으로 관찰한 것이다. 파단면 관찰결과, 모든 시편에서 파면형태가 딴플로 이루어져 있어 파괴형태가 공동의 생성 및 성장, 그리고 합체 과정을 거치는 연성파괴 과정임을 알 수 있었다.

### 3.3 동적 비틀림시험

각 시편에 대한 동적 비틀림 시험결과를 Fig. 7에 나타내었다.

동적 비틀림시험에서는 탄화물이 구상화될수록 강도는 감소하였으며, 파단변형율은 증가하는 경향을 나타내어 인장 시험결과와 유사함을 알 수 있다.

동적 비틀림시험으로 파괴된 시편들의 파면을 관찰한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 모든 시편에서 파면이 전단방향으로 연신된 딴플로 이루어진 연성 파단면을 나타내었다.

동적비틀림 시편의 파면 하단부를 SEM으로 관찰

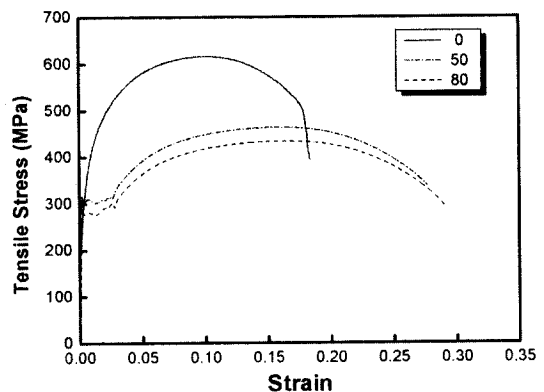
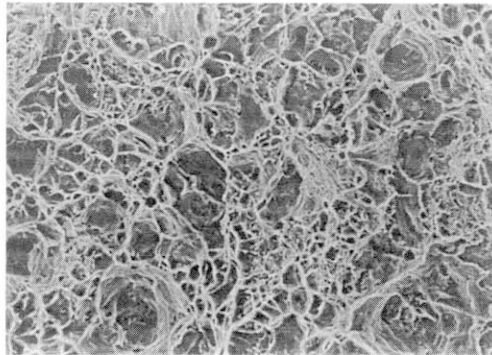
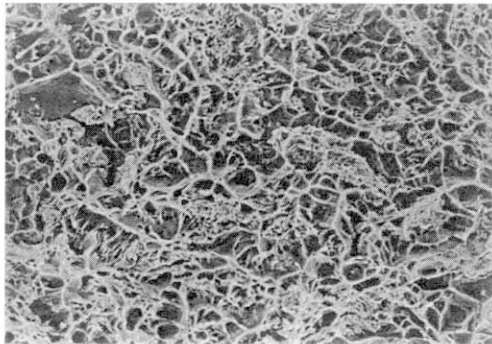


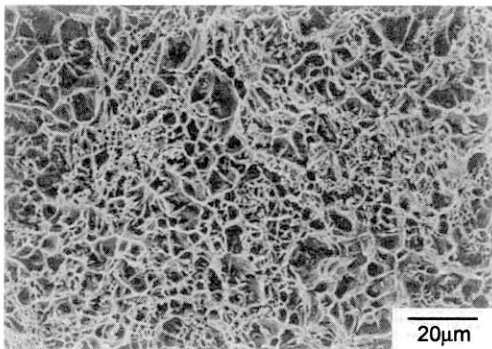
Fig. 5. Typical stress-strain curves obtained from static tensile tests.



(a) spheroidization : 0%



(b) spheroidization : 50%



(c) spheroidization : 80%

Fig. 6. SEM fractographs of the fractured specimens by tensile test.

한 결과, 전체 시험조건에서 열적연화에 의한 국부적인 변형집중영역 즉, 단열성 전단밴드가 형성된 것을 확인하였다.

#### 4. 고찰

재료의 동적 물성향상에 영향을 미치는 인자로는

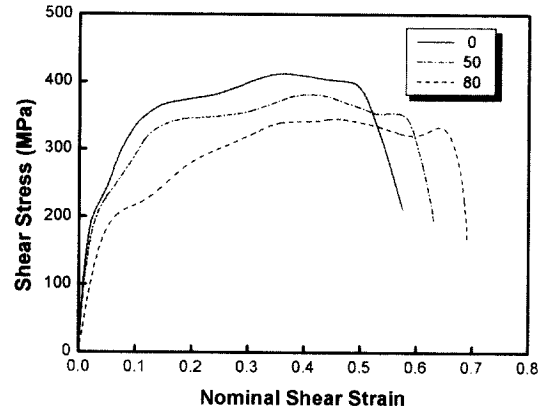


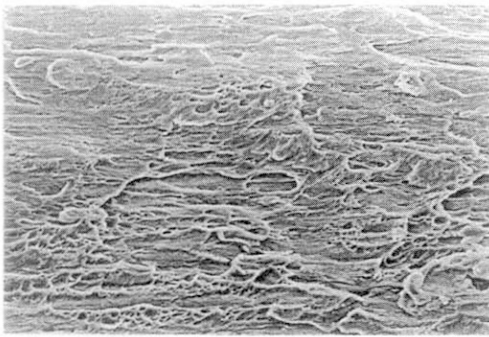
Fig. 7. Typical stress-strain curves obtained from dynamic torsion tests.

합금설계, 미세조직 개선, 고속가공 공정제어 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 이 중 냉간단조용강의 미세 조직학적인자, 즉 탄화물의 구상화율을 변화시킨 재료를 제작하여, 정적인장 및 동적비틀림 조건 하에서 재료의 기계적 성질 및 변형거동을 조사하였다.

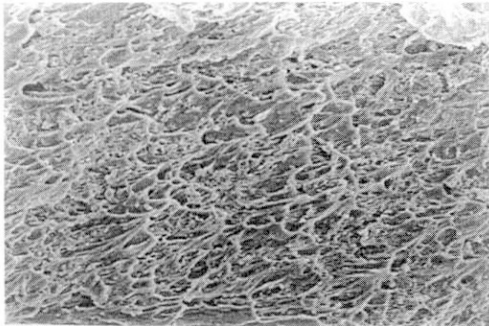
Fig. 9는 동적 비틀림시험에서 재료가 파단에 이르는 과정을 균일변형과 불균일 변형으로 구분하고, 각 단계에서 재료의 동적거동에 영향을 주는 인자를 나타낸 것이다. 이 그림에서의 첫 번째 구간은 최고 응력에 도달하기까지의 구간으로 정적인장과 동적 비틀림시험 모두 가공경화가 일어나는 과정이며 재료는 균일변형을 하게 된다. 불균일변형에서 정적인장과 동적비틀림 시험은 다른 변형거동을 나타낸다. 정적인장 시험은 국부적 불균일변형에 기인하는 necking으로 응력집중이 가속화되어 파단에 이르는 과정을 거친다. 그러나 동적 비틀림시험에서는 불균일변형을 두 구간으로 나뉘어변형초기부터 파괴시까지 총 3단계 구간을 거치게 된다.

동적 비틀림시험의 두 번째 구간은 최대하중에서 단열성 전단밴드가 형성되기 이전까지의 구간으로, 재료의 열적연화에 의한 국부적 변형집중과 이로 인한 단열성 전단밴드가 형성되는 구간이다.

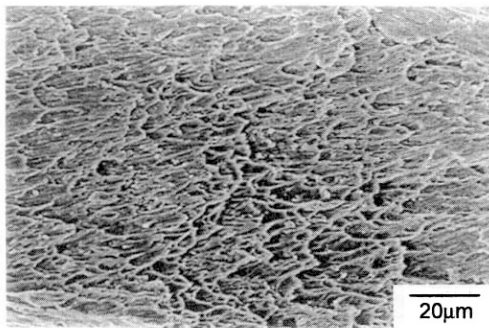
세 번째 구간은 단열성 전단밴드가 형성되고 파단에 이르는 구간으로, 단열성 전단밴드내의 국부적인 부분에 형성된 미소균열이 시편전체로 전파되면서 파단에 이르는 과정이다. 이와 같이 동적하중에서 각 구간별로 탄화물의 구상화율을 변화시킨 금속조직 인자의 변



(a) spheroidization : 0%



(b) spheroidization : 50%



(c) spheroidization : 80%

Fig. 8. SEM fractographs of the fractured specimens by dynamic torsional test.

경이 동적변형거동에 미치는 영향을 살펴보았다. 냉간단조성 향상을 위해서는 동적변형구간에서 최대응력에 도달하기까지의 변형량인 균일변형을 극대화하는 것이 바람직하다. 이런 관점에서, 정적인장과 동적 비틀림시험에서 구상화율 변화와 같은 금속조직 인자가 균일변형 변화거동에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. Fig. 10은 구상화율 변화에 따른 균일변형 변화거동을 나타낸 것이며, 정적인장과 동적 비틀림시험에서 탄화물의 구상화율이 클수록 균일변형율은 증가되었다. 균일변형구간에서의 이러한 현상은

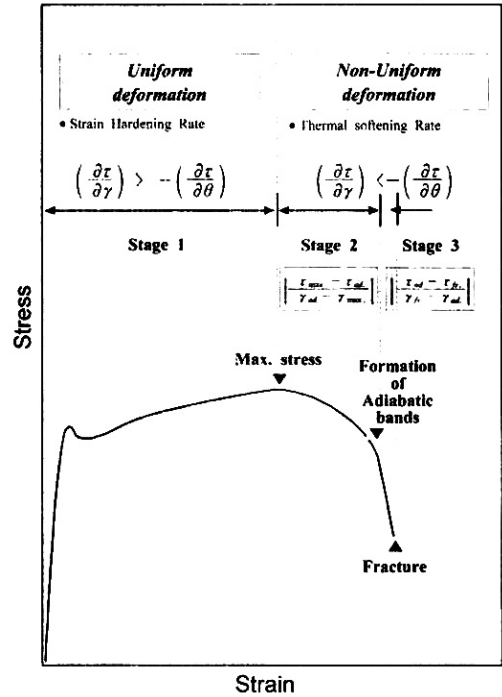


Fig. 9. Torsional stress-strain curve showing the 3 stages of dynamic deformation behavior.

전위의 움직임과 연관시켜 해석할 수 있다. 구상화율이 높을수록 탄화물의 균열은 매우 어렵게 되어 연성이 증가한다. 이와 같이 구상화탄화물의 균열이 어려운 이유는 페라이트 기지에서 전위가 판상의 탄화물에서 보다 더 쉽게 교차슬립하여, 전위 집적부에서 높은 응력의 상승을 피할 수 있기 때문이다. 또한, 구상화된 탄화물들과 기지 사이의 작은 접촉면적 때문에 구상탄화물에서 생기는 인장 또는 전단응력이 층상탄화물 보다 더 작기 때문이다[8].

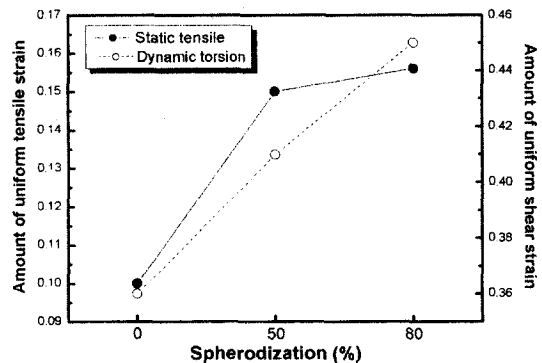


Fig. 10. Effect of spheroidization on uniform strain of static tensile and dynamic torsion tests.

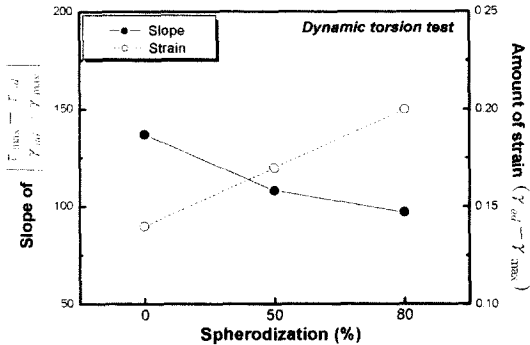


Fig. 11. Effect of spheroidization on the stage 2 non-uniform strain of dynamic torsion test.

가공경화 영향이 재료의 열적연화보다 크게 나타나는 동적비틀림 시험의 첫 번째 구간에서는 재료의 고속 성형공정시 성형성 향상을 위한 금속조직 인자 영향이 정적인장 시험에서의 경향과 일치함을 보여준다. 탄화물 구상화율이 높을수록, 동적 비틀림시험 결과가 정적인장 시험결과와 같이 가공경화속도를 낮추어 균일변형을 증가시키는 경향을 나타내었다. 따라서 재료의 정적인장 시험 결과로부터 동적 성형공정의 균일변형 경향을 추정할 수 있다.

동적 비틀림시험의 두 번째 구간은 가공경화의 영향보다 동적변형에 의해 발생하는 열로 재료의 열적연화 영향이 더 큰 구간이다. 재료의 동적변형거동에서 최대응력점을 통과한 후 열적 연화된 재료의 일부분에서 소성변형이 집중되고 이로 인해 단열성 전단밴드가 형성된다.

최대응력점을 경과하면서 단열성밴드를 형성하기까지 소요되는 불균일변형량에 대하여 고찰하였다. 이 구간에서는 곡선의 기울기와 변형량에 따라 불균일 변형정도를 나타낼 수 있다. Fig. 11은 이 구간에서 구상화율의 변화에 따른 기울기와 변형량을 나타낸 것이다. 구상화율이 커질수록 기울기 값은 적어지고 변형량이 커져 이 구간의 변형정도가 커짐을 알 수 있다. 이는 동적상태에서 재료의 강도가 높아 열적연화가 느린 조건에서 단열성 전단밴드 형성이 어려워 불균일변형이 커지는 것으로 사료된다. 또한 단열성 밴드형성까지의 불균일변형량은 탄화물 구상화율을 높임으로써 이 구간의 불균일변형량을 증대시킬 수 있다. 그러나 이 값은 균일변형량에 비하여 적은 량이다.

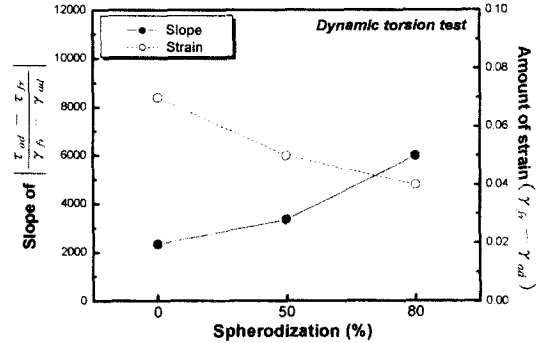


Fig. 12. Effect of spheroidization on the stage 3 non-uniform strain of dynamic torsion test.

동적 비틀림시험의 세 번째 구간은 단열성 전단밴드가 형성된 상태에서 파단에 이르는 과정이다. 이 과정의 변형량은 전체변형량 중 상대적으로 작은 비율을 차지하나, Fig. 12에 나타난 바와 같이 구상화율 변화에 따라 뚜렷한 경향을 나타내고 있다. 즉, 구상화율이 높을수록 기울기는 높아지고 변형량은 작아져 이 구간의 변형정도가 작아지게 된다. 동적 변형거동에서 재료의 강도가 클수록 이 변형량은 작아지며 소성변형이 어려워 결국 급작스러운 파단에 이르는 경향으로 변화한다.

Fig. 13에 나타난 것과 같이 본 동적비틀림 전체 시험조건에서의 파단은 단열성 전단밴드와 지지 금속의 경계부에서 발생, 전파되는 것으로 추정된다. 파단면은 전단방향으로 연신된 덩플로 이루어진 연성과 단면을 나타내었으며, 전체 시험조건에 걸쳐 단열성 전단밴드가 형성된 것을 확인하였다.

단열성 전단밴드는 빠른 전단변형속도로 인해 재료가 열적 연화되면서 변형이 집중되는 부분이다. 단열성 전단밴드내의 조직은 심한 변형을 받아 전위 밀도가 높고, 전단방향으로 변형된 작은 결정으로 이루어져 있으며, Fig. 14와 같이 단열성 전단밴드를 경계로 미소경도값의 변화가 뚜렷이 나타났다.

Fig. 15는 탄화물 구상화율을 변화시킨 동적 비틀림시험에서 균일, 불균일변형의 각 구간에서 재료의 동적변형거동에 미치는 금속조직인자의 영향을 정리한 것이다. 탄화물 구상화율을 높이면 균일변형과 불균일변형을 증대시키는 복합적 효과를 나타내었다.

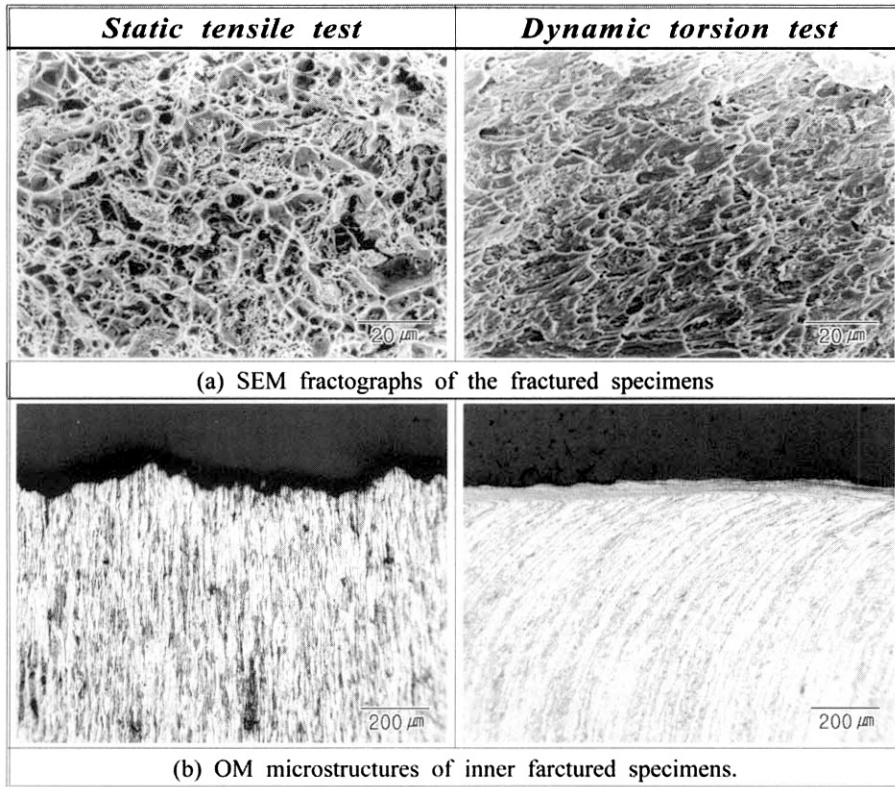


Fig. 13. Micrographs of the deformed area in fractured tensile and torsion specimens of 50% spheroidized specimen.

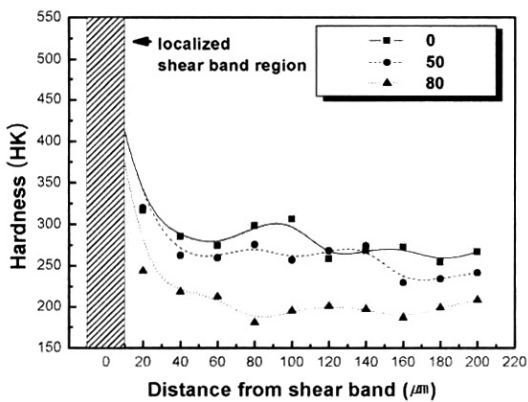


Fig. 14. Microhardness data on the near shear band region.

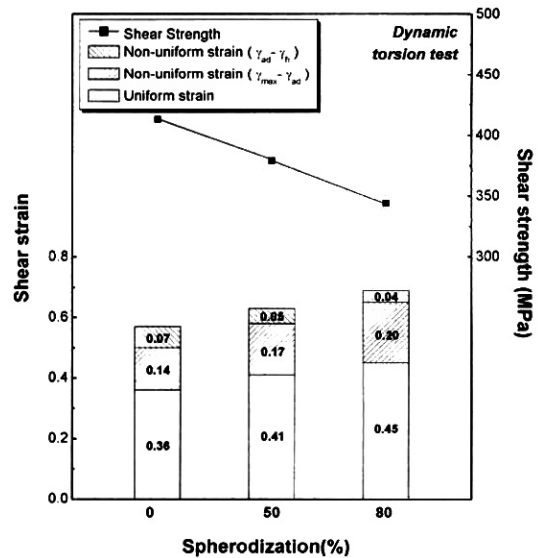


Fig. 15. Characteristics of stress-strain data obtain from dynamic torsion test.



## 5. 결 론

열처리를 통해 탄화물 구상화율을 변화시킨 SCM415강에 대해 정적인장시험 및 동적 비틀림시험을 실시하고, 정적 및 동적변형거동에 미치는 금속조직 인자의 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정적 및 동적시험결과 모든 시편에서 하중속도에 상관없이 덩플현상의 연성과파괴를 나타내었다. 정적하중인 경우 공동의 생성 및 성장, 합체에 의해 연성과파괴가 일어났으며, 동적하중인 경우 소성변형이 국부적으로 집중된 영역인 단열성 전단밴드가 생성되어 최종적으로 파괴가 일어났다.

2. 정적인장시험에 따른 재료의 변형거동은 탄화물 구상화율이 커질수록 인장강도는 낮아지고 균일변형을 및 불균일변형율이 커졌다.

3. 동적하중하에 따른 재료의 변형거동은 탄화물 구상화율이 커질수록 전단강도는 낮아지고 균일변형율이 커져 정적하중과 동일한 경향을 나타내었다.

4. 구상화율을 증가시킬수록 극심한 동적하중하에 서도 균일변형량이 커지면서 냉간가공성을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2002학년도 부경대학교 기성회 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. A. Marchand and J. Duffy : J. Mech. Phys. Solids, 36 (1988), 251.
2. K. A. Harley, J. Duffy, and R. H. Hawley : J. Mech. Phys. Solids, 35 (1987), 283.
3. R. G. O donnell and R. L. Woodward : J. Mat. Sci., 23 (1988), 3578.
4. S. L. Semiatin and G. D. Lahoti : Metall. Trans. A, 14A (1983), 105.
5. A. L. Wingrove : Metall. Trans., 4 (1973), 1829.
6. K. Cho, S. Lee, and I. M. Park : J. Kor. Inst. Met. & Mater., 29 (1991), 73.
7. E. A. Chojnowski and W. J. Tegart : J. Met. Sci., 2 (1968), 14
8. G. E. Dieter : Mechanical Metallurgy, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, (1976), 280.