

# 디젤 엔진용 캠축 소재의 금속적 특성 및 선삭가공 특성에 관한 연구

채 왕 석\*, 김 경 우\*\*, 김 등 현\*\*\*

## Turning and Metallic Characterization for CAM Shaft Materials of Diessel Engine

W. S. Chae\*, K. W. Kim\*\*, D. H. Kim\*\*\*

### ABSTRACT

In this paper, We have studied internal quality including chemical compositions, microscopic structure and nonmetallic inclusion of test material. We have analyzed dynamic characteristics of cutting resistance and compared chip treatment of the test material.

In analyzing internal quality, all of the test material have typical ferrite+pearlite structure. But, non-metallic inclusion has oxide and sulfide inclusion in medium carbon steel, mainly sulfide inclusion is existed in S-free cutting steel. In Ca+S-free cutting steel, calcium aluminate and sulfide complex inclusion, had low-melting point, as deformation of sulfide and oxide inclusion is existed.

Machining characteristics, cutting resistance is maximum in Ca+S-free cutting steel, minimum in medium carbon steel. Chip treatment are excellent in S-free cutting steel, similar to the Ca+S free cutting steel and medium carbon steel.

**Key Words** : Internal quality (내부품질), Chip treatment (칩처리성), External inclusion (외생적 개재물), Internal inclusion(내생적 개재물)

### 1. 서 론

최근에 산업의 발전이 다양한 부분으로 발전함에 따라 여러 분야에서 다양하고 새로운 소재가 개발되어 사용되어지고 있다.

일반적으로 재료의 피삭성에는 피삭재의 기계적 성질, 성분 및 조직 등이 크게 영향을 미친다. 높은(高)경도의 피삭재는 절삭 저항이 크고 절삭 온도가 높으므로 공구

마멸이 심하여 피삭성이 떨어지고 순 금속은 절삭공구의 작용면에 응착하기 때문에 높은(高) 마찰에 의한 공구 마멸이 심하다. 따라서 재료의 피삭성을 개선하고 생산능률을 향상하기 위하여 쾌삭 첨가물(free machining additives)을 미량 첨가하여 금속 재료의 기계적 성질을 저하시키지 않는 범위에서 피삭성을 개선해 보고자 하는 연구<sup>(1)</sup>가 진행되고 있다.

강재(鋼材)에는 소량 혹은 다량의 기지 조직과 조성이

\* 기아 특수강(주) (종신 회원)  
 \*\* 원광대학교 대학원 기계공학과(정회원)  
 \*\*\* 원광대학교 기계공학과 (종신 회원)

다른 물질을 함유하고 있는 비금속 개재물(Nonmetallic Inclusion)이 존재하고 있으며 이 개재물이 강재에 대해서 나쁜 영향을 미치고 있으면 가능한 그 수를 감소시키기도 하며 S, Ca과 같은 폐삭 원소 첨가의 경우 개재물의 양을 증가시킴으로써 피삭성을 향상시키고 있다.<sup>(2)</sup>

최근에 폐삭강의 요구가 생산성 향상과 공구 수명의 향상을 주 목적으로 하는 것과 병행하여 기계 설비의 자동 생산 시스템(FA, FMS, CIM, IMS)의 보급, 절삭 가공과 냉간 가공을 조합한 신 공법의 조합 등 부품 제조 기술이 현저히 발전하여 칩 처리성, 냉간성 등의 양호한 폐삭강이 요구되고 있다. 따라서 높은 경도화, 경량화, 성(省)에너지화 등에 대응할 수 있는 폐삭강의 개발이 이루어질 필요가 있다.

본 연구에서는 폐삭 원소의 첨가에 따른 내부 품질 특성에 따른 피삭성을 연구하기 위하여 중탄소강, S폐삭강, Ca+S 폐삭강을 시험재료 하여 화학 성분 분석, 현미경 조직 분석, 비금속 개재물 측정 및 정성 분석 등 내부 품질 실험을 통하여 폐삭 원소의 첨가에 따른 제반 금속학적 특성을 고찰하며 동적 특성 분석과 칩처리성을 비교 검증 자료로서 제안, 제시하고자 한다.

## 2. 관 계 이 론

강재에는 소량 혹은 다량으로 기지 조직과 조성이 다른 물질 즉, 개재물이 함유되어 있다. 개재물은 외부에서 강(鋼) 내로 혼입된 외생적 개재물(外生的 介在物)과 강(鋼) 중에서 탈산 생성물로 생성된 경우는 내생적 개재물(內生的 介在物)<sup>(3)</sup>이 있다. 개재물 중 강재에 대해서 나쁜 영향을 가지고 있으면 형상에 지장을 초래하지 않는 범위에서 가능한 한 그 수를 감소시키기도 하고 역으로 개재물의 양을 증가시켜 강재의 피삭성을 개선하기도 한다. 실제로 S를 첨가하여 비금속 개재물(MnS)량을 증가시키거나 Pb를 첨가하여 금속 개재물을 증가시키는 경우가 있다.<sup>(4)</sup> 일반적으로 알려진 폐삭강은 1920년 제1차 세계 대전 중 연강을 제조하는 과정 중에 정련 불순 원소가 우연히 발견되어<sup>(4)</sup> 피삭성이 상당히 개선됨을 인식하게 되었고 그 후 절삭이 쉬운 강을 폐삭강이라 명명(命名)하고 의도적으로 S를 첨가한 강을 상품화하였으며 고탄소의 진정강(鎮靜鋼), 고급 탄소강에도 적용하고 실용화하게 되었다.

일반적으로 강재의 피삭성에 영향을 미치는 성분 원소 및 폐삭 원소의 영향과 강재에 존재하는 비금속 개재물이

피삭성에 미치는 영향은 Table 1과 같이 요약할 수 있다.<sup>(5)</sup>

Table 1 Effect of nonmetallic inclusions on the machinability

Good		Bad	
Type	Hardness(H <sub>v</sub> )	Type	Hardness(H <sub>v</sub> )
MnS Mn(S, Se) Mn(S, Te) (Ca, Mn) S Pb Bi CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub> 2CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · SiO <sub>2</sub> 3MnO · 2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3SiO <sub>2</sub>	170~200      550 780	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub> CaO · 6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NbC Nb(C, N) Zr(C, N)	2,000~3,500 1,300~1,500

여기서 강재의 피삭성을 향상시키는 개재물은 MnS, (Ca, Mn) S, Pb, Bi 등 경도가 낮은 연질(軟質)의 개재물이고, 반면에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiN과 같은 경질(硬質)의 개재물은 경도가 높고 취성(brittle)이 클 뿐 아니라 비연성이므로 절삭시 공구와 접촉하여 공구를 마멸시킴으로써 수명을 단축시키며 특히 그 크기가 크고 양이 많을수록 그만큼 수명을 저하시킨다.<sup>(6)(7)</sup> 결과적으로 폐삭강에 있어서 피삭성에 유해한 개재물을 제거 또는 Ca첨가에 의해 무해한 형상으로 적합한 폐삭 원소를 첨가하여 피삭성에 좋은 개재물을 형성하는 것이 매우 중요하다.

절삭 저항은 주분력(절삭 방향의 분력, F<sub>p</sub>), 이송 분력(이송 방향의 분력, F<sub>f</sub>) 및 그것과 직각 방향인 배분력(F<sub>r</sub>)으로 나눈다.<sup>(8)</sup> 주분력(F<sub>p</sub>)은 주축에 가해지는 회전 토크, 주축의 구동력 및 발생하는 절삭열과 비례한다. 이송 분력(F<sub>f</sub>)은 이송 기구에 가해지는 동력(F<sub>f</sub> × 이송 속도), 주축의 트러스트 등에 깊은 관계가 있고, 배분력(F<sub>r</sub>)은 동력과 무관하나 공작물이나 공구의 탄성 변형은 이 배분력에 비례하여 오차가 발생되므로 특히 다듬질 면 조도에 영향이 크다.<sup>(9)</sup>

칩 형상을 결정하는 입자는 다양하다. 칩 형상은 한쪽만 지지되고 있는 칩에 외력(장애편의 접촉, 유출된 칩의 자중 증가, 원심력 변화 등에 의해 생기는 외력)이 가해지면 불균일한 응력이 부가되고 전단 영역에서의 슬립 방향이 변화하기 때문에 칩의 형상도 변화한다.

따라서 공구 경사면에 평행한 축의 주위 회전, 공구 경사면에 수직인 축의 주위 회전, 칩 유출각의 3가지 대소(大小)와 조합에 의해 칩 형상이 결정된다.<sup>(10)(11)</sup>

칩 형상은 칩 처리와 상당히 밀접한 관계를 가지고 있으며 보통 칩 자체 사진을 찍어 표시하는 것이 확실하지만 불편한 점이 많다. 수집한 칩 형상의 분류로는 보통 나

선의 외경(곡률), 피치, 나선의 축과 모선과의 사이각(curl의 방향)의 3가지를 사용하며 이 밖에도 칩 폭, 두께 및 길이가 주어지면 칩의 형상은 완전하게 나타낼 수 있다.

### 3. 실험

#### 3-1. 피삭재 및 실험 장치

##### 1). 피삭재 종류

피삭재는 자동차 부품 중 디젤 엔진용 캠축 소재로 쓰이는 패삭강 중 중탄소강 (Sample A)과 칩 처리성 평가를 위한 S 첨가 패삭강 (Sample B), 절삭 저항 평가를 위한 Ca+S 첨가 복합 패삭강 (Sample C) 등 3가지 소재로 하였다.

##### 2). 피삭재의 제조

피삭재의 제조공정은 다음 Fig. 1과 같다.

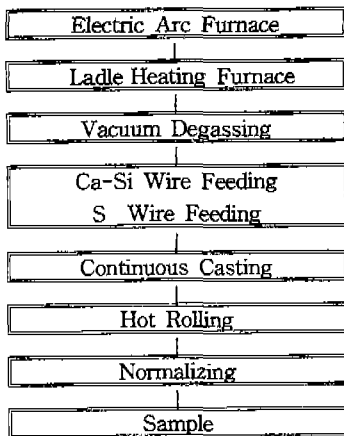


Fig. 1 Manufacturing process for samples

##### 3). 실험 장치

본 실험에서 사용된 실험 장치 및 기기에 대한 사양은 Table 2와 같다.

#### 3-2. 내부 품질 시험

화학적분은 분광 분석기(ARL-3460)를 이용하여 성분을 분석하였으며 이 때 시험편은 직경이 12mm 이상인 환봉을 사용하였다.

현미경 조직은 시험편은 압연한 강재의 단면 방향으로

Table 2 Experimental apparatus and tools

Test Item	Tester	Maker	Model	Spec
Chemical composition analyzer	Spectrometer	ARL (Swiss)	ARL-3460	34 channels
Structure and Inclusion Measurement	Image analyzer	LECO (USA)	LECO-300	비율 50~2000배
Component analyzer of Inclusion	EPMA	JOEL (USA)	JXA 8600MX	각종 상분석으로 개재물 측정(JIS,ASTM)
Free cutting test	Free cutting tester	WHA-CHEON (Korea)	HL-380	spindle speed: 45~1800rpm range of Feeds:0.06~0.84mm
	Tool dynamometer	KISTLER	TYPE-9257B	Range of force Fx,Fy : -5 KN~5 KN Fz : -5 KN~10 KN Sensitivity Fx,Fy : 75 PC/N Fz : -35 PC/N

절단하여 채취하였고 1200메쉬까지 연마한 후 연마액(알루미나)을 사용하여 폴리싱(polishing)하였다. 폴리싱한 후 부식액(3% Nital 용액)으로 적절히 부식시킨 후 광학 현미경을 이용하여 400배율로 단면 및 압연 방향으로 관찰하였다.

비금속 개재물 측정 및 정성 분석을 위하여 시험편은 압연 방향과 평행하게 중심선을 따라 R/4 부위에서 채취하였다.

비금속 개재물 측정 시험은 상분석기 (LECO image analyzer)를 이용하여 JIS G0555의 규정에 의해 측정하였고 비금속 개재물의 분포 형태를 관찰하였다.

또한, 패삭 원소의 첨가에 따른 비금속 개재물의 조성 변화를 살펴보기 위하여 EPMA (JEL JAX 8600MX)를 이용하여 비금속 개재물을 정성 분석하였다.

#### 3-3. 피삭성 평가 시험

본 연구에서는 선삭시 절삭 공구에 미치는 절삭 저항과 칩 처리성을 평가 기준으로 다음과 같이 설정하였다.

##### 1). 실험 장치

피삭성 평가 시험은 CNC 선반에 공구 동력계( tool dynamometer, KISTLER 9257B)를 사용하였고 바이트 홀더(tool holder)는 CNC선반용인 PCLNR2020-K12, 인서트 팁은 TiCN 이 코팅된 WC 초경 공구인 CNMG120408의 KT300을 각각 사용하였고 Fig. 2는 피삭성 평가 시험 장치의 개략도이다.

##### 2). 실험 조건

각 피삭재는 먼저 얼처리 스케일(scale)을 제거하고 선삭 회전시 편심을 없애기 위하여 표면을 1 mm 깊이로 예비 절삭을 한 후 절삭 깊이를 2mm로 하고 절삭 속도를 109 m/min, 122 m/min, 134 m/min, 152

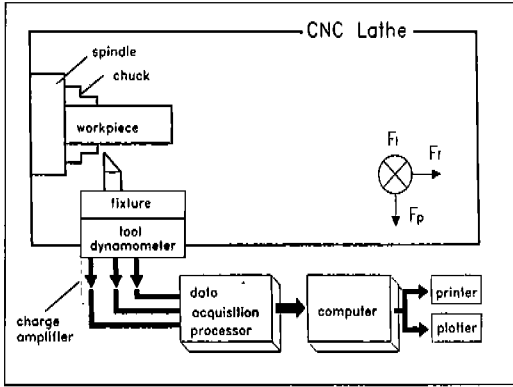


Fig. 2 Schematic diagram of machinability tester

m/min, 170 m/min, 187 m/min로 하였다. 절삭저항은  $F_p$  (주 분력),  $F_t$  (배분력),  $F_t$  (이송 분력) 등의 3분력의 합력으로 구하였고 측정 시간은 총 14초이고 매 1초마다 10개의 저항값의 평균치를 나타내었다. 칩 처리성은 절삭 저항시와 동일 조건에서 칩을 채취하여 조사 분석하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4-1. 내부 품질 시험 결과

피삭재의 화학 성분 분석 결과는 Table 3과 같다. 중탄소강인 Sample A에 비해 S과소강인 Sample B는 S함량이 0.058wt.%이고 Ca+S복합폐삭강인 Sample C는 S 0.043wt.%, Ca 0.0015wt.%의 조성을 나타내었다. 본 실험에서 압연한 소재의 단면 및 압연 방향에 대한 현미경 조직을 관찰한 결과 Photo 1에서 보는 바와 같이 각 Sample이 공통적으로 모두 전형적인 퍼얼라이트+페라이트(Pearlite + Ferrite) 조직을 나타내었고 비교적 균일한 조직 분포를 하고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Chemical composition of determined samples

Component	(wt. %)						
Sample	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca
A	0.56	0.25	0.80	0.018	0.014	0.010	0.0003
B	0.57	0.20	0.89	0.020	0.058	0.006	0.0001
C	0.54	0.21	0.88	0.015	0.043	0.011	0.0015

조직 사진에서 보면 흰색 부위로 보이는 퍼얼라이트

(Pearlite)와 검게 보이지만 층상 조직을 하고 있는 페라이트(Ferrite)는 강재의 C함량에 따라 조직 분포가 달라지는데, 일반적으로 C함량이 낮으면 경도가 낮은 퍼얼라

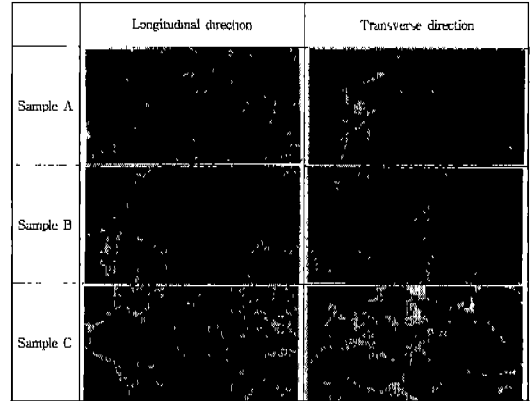


Photo 1 Optical microstructure of tested samples (x400)

이트 조직이 크게 분포하고 C함량이 높으면 상대적으로 경도가 높은 페라이트 조직이 우세하게 형성된다. 따라서 C함량이 높은 강재는 페라이트 조직 분포가 크게 되고 조직의 경도가 높게 되어 압연 상태에 있는 강재에서는 전 반적으로 소재 경도가 높게 된다.

그러나 본 시험재는 압연후 풀림 열처리(annealing, 840°C, 1Hr)를 하여 조직을 균일화 시킨 후 샘플링(sampling)하였고 시험재별 C함량 차이가 분석 허용 오차 이내의 수준이므로 조직 비교에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며 그 밖의 소재 시험에서도 조직의 차이에 따른 물성치의 변화도 없을 것으로 판단된다.

소재 상태에서 비금속 개재물을 측정할 결과 Table 4에서와 같이 Sample A에 비해서 Sample B는 A계인 황화물(sulfide) 개재물이 높게 나타났으며 Sample C는 Sample B에 비해 황화물(sulfide)개재물이 낮은 반면, 각각 B계, C계인 알루미늄(alumina)와 구상 산화물(globular oxide)개재물이 상대적으로 높게 나타났다.

Table 4 Results of determined nonmetallic inclusions(JIS G0555)

	Sulfide( A <sub>1</sub> )	Silicate( A <sub>2</sub> )	alumina( B )	globular oxide ( C )	dT
Sample A	0.188	0.001	0.059	0.010	0.028
Sample B	0.283	0	0.034	0.002	0.319
Sample C	0.215	0	0.054	0.062	0.331

Photo 2는 각 Sample에서 관찰된 전형적인 비금속 개재물 형태를 나타내고 있다.

Sample A에는 주로 황화물(sulfide)과 알루미나(alumina) 개재물이 존재하였고 S를 첨가한 Sample B에는 대부분 크기가 큰 황화물(sulfide) 개재물이 분포하였다. 반면에 Ca+S복합 첨가시 Sample A에서 나타났던 알루미나(alumina) 개재물이 형태 제어되어 Sample C의 개재물 사진과 같이 구상화, 미세화되었고 비교적 균일하게 분포되었다. 이와 같은 개재물 타입의 변화는 폐삭 원소인 S와 Ca의 첨가량에 따라 형성되는 개재물의 조성구성과 형태가 달라지기 때문으로 사료된다. 한편, 각 Sample에서 나타난 대표적인 비금속 개재물을 EPMA를 이용하여 정성 분석한 결과, Photo 3과 같은 비금속 개재물의 SEM 조적이 나타났다.

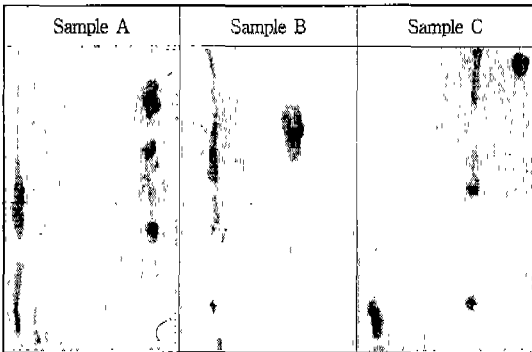


Photo 2 Morphology of nonmetallic inclusions(×400)

결과적으로 Sample A의 비금속 개재물은 주로 Al, O, Mn, Ca의 원소로 이루어진 전형적인 산화물(oxide) 개재물 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO 등)이었고 Sample B는 Mn, S 성분으로 형성된 황화물(sulfide) 개재물(MnS)이었다. 반면에 Sample C는 Al, O, Mn, Ca, S의 성분으로 구성된 칼슘 알루미나이트(calcium-aluminate)와 (Mn·Ca)S의 복합 개재물을 나타내었다.

이는 본래의 형태이던 알루미나(alumina)와 황화물(sulfide) 개재물이 Ca 원소의 첨가에 의해 비금속 개재물의 조성구성과 형상이 변형된 결과로 사료된다. 이러한 복합 개재물은 저융점을 가지고 알루미나(alumina)보다 큰 연성을 가지므로 폐삭강의 피삭성을 향상시켜주는 요인으로 작용하게 되는 것으로 알려져 있다.

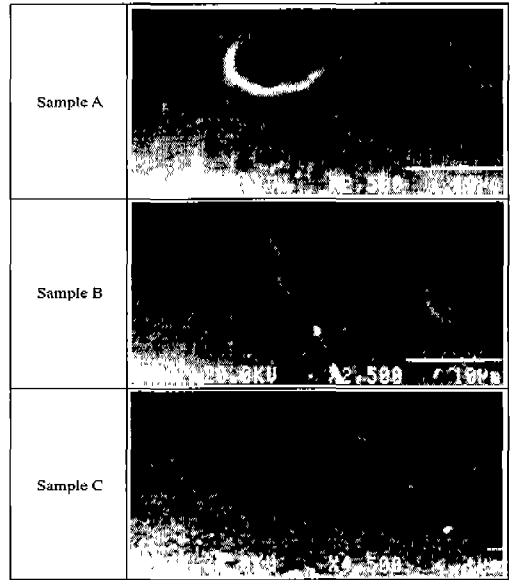


Photo 3 SEM micrographs of nonmetallic inclusions for each sample

#### 4-2. 피삭성 평가

##### 1). 절삭 저항

비교 시험체의 절삭 속도의 변화에 따른 절삭 저항 시험은 Table 5와 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다.

Table 5 Machining resistance of test sample

Cutting Force (kgf)	Cutting Speed(m/min)					
	109	122	134	152	170	187
Sample A	124.0	122.6	124.4	120.1	122.7	120.2
Sample B	116.0	116.9	115.9	113.6	117.0	113.0
Sample C	106.0	105.7	109.2	104.6	102.7	103.3

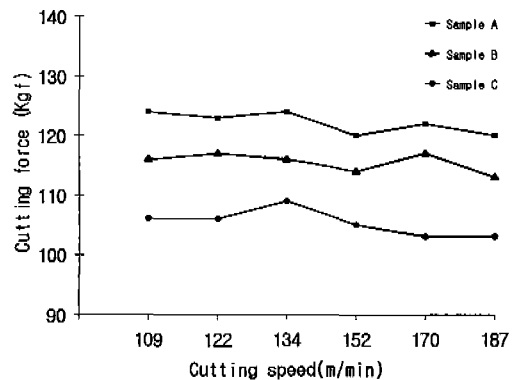


Fig. 3 Relative machining resistance of each sample

절삭 저항의 실험 결과 중탄소강인 Sample A의 경우 120.1 kgf에서 124 kgf범위의 절삭 저항값을 나타내고 S 폐삭강인 Sample B의 경우 113.6 kgf에서 118 kgf범위의 절삭 저항값이 나타났으며 Ca+S 폐삭강인 Sample C의 경우 102.7 kgf에서 109.2 kgf의 절삭 저항값을 나타냈다.

즉, 절삭 저항값은 Sample C < Sample B < Sample A 순으로의 결과를 얻었다.

따라서 본 실험 결과 폐삭 원소 Ca+S를 첨가하여 절삭할 때에 피삭성이 가장 우수한 것으로 나타났는데, 이는 황화물(MnS) 개재물이 둘러싸고 있는 각형(angular) 및 고융점의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 개재물이 Ca 첨가에 의해 구상(globular) 및 저융점의 칼슘 알루미늄이트(Ca-aluminate) 개재물로 변환되어 절삭 저항이 감소하였기 때문이다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 개재물은 절삭 가공시 공구면에 칩의 마찰에 의한 경사면 마멸(crater wear)과 여유면 마멸(flank wear)이 생성되어 절삭 저항을 증가시킨다. 반면에 저융점의 칼슘 알루미늄이트(Ca-aluminate) 개재물은 공구면에 Ca-Al-Si-O를 주성분으로 하는 부착물(belag)이 생성되므로, 공구면과 칩의 직접 마찰을 방지하여 경사면 마멸이 감소하고 부착물이 윤활막으로 작용하여 계면 온도가 낮아져 공구의 원소가 열 확산하여 방출되는 것을 방지하므로 여유면 마멸이 감소하고 절삭 저항이 감소한다.

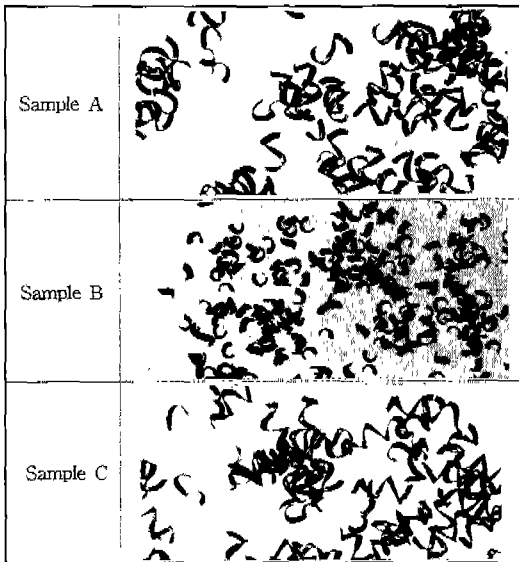


Photo 4 Chip shape with cutting rate (cutting depth 2mm)

## 2). 칩 처리성

비교 시험재의 절삭 조건에 따른 칩 형상은 Photo 4와 같다.

사진에서 보는 바와 같이 Sample A, B, C 공히 칩 형상이 전단형 칩형상으로 나타났으며 Sample A와 Sample C의 칩 형상은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며 Sample B의 칩 형상이 가장 우수한 것으로 나타났다.

따라서 폐삭 원소 S가 폐삭강 절삭의 칩 처리성을 우수하게 하는 중요한 인자로서 강 중에 망간이 적정량 존재하면 S가 망간 유화물을 형성하고 이 망간 유화물이 절삭 가공시 응력 집중원 및 미소 균열 발생원으로 작용하여 칩 파쇄를 용이하게 하고 망간 유화물의 체적분율이 증가함에 따라 칩 파쇄성이 향상됨을 알 수 있었다.

## 5. 결론

현재 자동차 부품 중에 디젤 엔진용 캠 축 소재로 사용되고 있는 폐삭강의 피삭성에 미치는 폐삭 원소의 영향을 규명하기 위하여 중탄소강, S 폐삭강, Ca+S 복합 폐삭강의 시험재에 대한 금속적 특성과 선삭 가공 특성을 비교 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 금속적 특성은 시험재 모두 전형적인 페라이트+퍼얼라이트 조직을 나타내었고, 비금속 개재물은 중탄소강에서 산화물 개재물(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO 등)과 황화물 개재물(MnS)이 나타났고 S 폐삭강은 S 첨가에 의해 황화물 개재물(MnS)이 산화물(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 함께 존재하였으며, Ca+S 복합 폐삭강은 기존의 황화물(MnS)과 산화물(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 개재물이 변형되어 저융점의 칼슘 알루미늄이트(CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)와 (Mn, Ca)S의 복합 개재물로 나타났다.

2) 선삭 가공 시험 결과 절삭 저항은 Ca+S 복합 폐삭강이 가장 우수하고 S 폐삭강, 중탄소강 순으로 우수하였다.

3) 칩 처리성은 S 폐삭강이 가장 우수하고 Ca+S 복합 폐삭강과 중탄소강은 거의 비슷하였다.

따라서 폐삭 원소 중 Ca 첨가시 절삭성이 우수하며 S 첨가시 칩 처리성이 우수한 것으로 나타났다.

아울러 비교 시험재의 금속적 특성 및 선삭 가공 특성을 고려하여 디젤 엔진용 캠축 소재 선정 및 가공시 품질이 우수한 소재의 공급이 가능하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 荒木, "快削鋼研究開發の 展望", 鐵と鋼, pp.73-74, 1982.
2. Robert H. ABORN, "Role of Additives in the Machinability of Steel", International Symposium on Influence of Merallurgy on Machinability of Steel, Tokyo, pp.381-395, Sep.1977.
3. 日本鐵鋼協會, "高潔淨鋼", 西山記念技術講座, 第126, 127回, pp.187-188, 1988.
4. G. Jha, S. Sharma, "Tool & Alloy Steels", No.1, pp.5, 1995.
5. 菅谷登平, 形浦安治, "カルシウム 鋼", pp.139-148, 1981.
6. W. E. Duckworth and E. Ineson, In lsl spec. Rep.77, London, pp.87-103, 1966.
7. Y. kawada, Z. H. Nakazawa and S. Kodama, Mem. Fac. Techn. Tokyo, Metropol.
8. T.Ohtani, K. Fujise and H. Yokogawa, "Cutting Force Characteristics in Finish Machining of Hardened Stee", JSPE, Vol.54-10, pp.1969-1974, Oct. 1988.
9. Metals Hand Book 9th Edition, Machining, ASM International, Vol.16, pp.137-138, 1989.
10. M. Masuda and M. Torii, "The Influence of Cutting" Force on Boundary Failure of Cutting Tool", JSPE, VOL. 53-10, pp.1596-1601, Oct. 1987.
11. Sturney. A. C, ASME, Vol.1. pp.141-142, 1965.