

트럭용 커넥팅 로드 소재의 내부 품질에 따른 절삭 특성 연구

A Study on the Machining Characteristics by the Internal Quality
of Connecting Rod's Materials for Trucks

金 東 炫*, 蔡 王 錫**

*원광대학교 기계공학과 교수(정회원)

**기아특수강(주) (정회원)

ABSTRACT

In this paper, We have studied internal quality including chemical compositions, microscopic structure and nonmetallic inclusion of test materials. We have analyzed dynamic characteristics of cutting resistance including tensile strength value, hardness value, impact value etc. we have compared chip treatments of test materials.

In analyzing internal quality, all of test materials have typical ferrite+pearlite structure. But, nonmetallic inclusion have oxide and sulfide inclusion in medium carbon steels, mainly sulfide inclusion is existed in S-free cutting steels.

In Ca+S-free cutting steels, calcium aluminate and sulfide complex inclusion, had low-melting points, as deformation of sulfide and oxide inclusion is existed.

machining characteristics, cutting resistance is maximum in Ca+S-free cutting steels, minimum in medium carbon steels. Chip treatments are excellent in S-free cutting steels, similar to the Ca+S free cutting steels and medium carbon steels.

key words : Internal Quality (내부품질) , Chip treatments (칩처리성)

External inclusion (외생적 개재물) , Internal inclusion(내생적 개재물)

1. 서 론

최근에 산업의 발전이 다양한 부분으로 급진전 및 발전함에 따라 여러 분야에서 다양하고 새로운 소재가 개발되어 사용되어 지고 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 생산 능력을 향상하기 위하여 쾌삭 첨가물(free machining additives)을 미량 첨가하여 금속 재료의 기계적 성질을 저하시키지 않는 범위에서 피삭성을 개선하려는 연구⁽¹⁾가 진행되고 있다.

보통 강재(鋼材)는 소량 혹은 다량의 기지 조직과 조성이 다른 불질을 함유하고 있는 비금속 개재물(Nonmetallic Inclusion)이 있는데 개재물이 강재에 대해서 나쁜 영향을 미치고 있으면 가능한 그 수를 감소시키거나 S, Ca과 같은 쾌삭 원소 첨가의 경우 개재물의 양을 증가시킴으로써 피삭성을 향상시키고 있다⁽²⁾.

최근에 쾌삭강의 요구가 생산성 향상과 공구 수명의 향상을 주목적으로 하는데 반해 기계 설비의 자동 생산 시스템(FA, FMS,

CIM, IMS)의 보급, 절삭 가공과 냉간 가공을 조합한 신 공법의 조합 등 부품 제조 기술은 현저히 발전하여 칩 처리성, 냉간성 등의 양호한 쾌삭강이 요구되고 있다. 따라서 높은(高) 경도화, 경량화, 성(省) 에너지화 등에 대응할 수 있는 쾌삭강의 개발이 이루어질 필요가 있다.

본 연구에서는 쾌삭 원소의 첨가에 따른 내부 품질 특성에 따른 피삭성을 연구하기 위하여 중탄소강, S쾌삭강, Ca+S 쾌삭강을 시험재료로 하여 화학 성분 분석, 현미경 조직 분석, 비금속 개재물 측정 및 정성 분석 등 내부 품질 실험을 통하여 쾌삭 원소의 첨가에 따른 제반 금속학적 특성을 고찰하며 동적특성분석과 칩처리성을 비교 검증자료로서 제안, 제시하고자 한다.

2. 관계이론

강재는 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 탄산 생성물로 생성된 경우는 내생적 개재물(內生的 介在物)⁽³⁾이 있다. 개재물 중 강재에 대해서 나쁜 영향을 가지고 있으면 가능한 한 그 수를 감소시키고 형상에 지장을 초래하지 않도록 하는 경우가 있고 역으로 개재물의 양을 증가시켜 강재의 피삭성을 개선함으로써 피삭 용도에 이용하는 추세이다. 실제로 S를 첨가하여 비금속 개재물(MnS)량을 증가시키거나 Pb를 첨가하여 금속

개재물을 증가시키는 경우가 있다⁽⁴⁾. 일반적으로 알려진 폐삭강은 1920년 제1차 세계 대전 중 연강을 제조하는 과정 중에 정련 불순 원소가 우연히 발견되어⁽⁴⁾ 폐삭성이 상당히 개선됨을 인식하게 되었고 그 후 질삭이 쉬운 강을 폐삭강이라 명명(命名)하고 의도적으로 S를 첨가한 강을 상용화하였으며 고탄소의 진정강(鎮靜鋼), 고급 탄소강에도 적용하고 실용화하게 되었다.

강재의 폐삭성에 영향을 미치는 성분 원소 및 폐삭 원소의 영향과 강재에 존재하는 비금속 개재물이 폐삭성에 미치는 영향은 Table. 2-1과 같이 요약할 수 있다⁽⁵⁾.

Table 2-1 Effect of nonmetallic inclusions on the machinability

Good		Bad	
Type	Hardness (H _v)	Type	Hardness (H _v)
MnS Mn(S, Se) Mn(S, Te) (Ca, Mn) S Pb Bi CaO · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ 2CaO · Al ₂ O ₃ · SiO ₂ 3MnO · 2Al ₂ O ₃ · 5SiO ₂	170~200 550 780	Al ₂ O ₃ 3Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ CaO · 6Al ₂ O ₃ NbC Nb(C, N) Zr(C, N)	2,000~3,500 1,300~1,500

여기서 강재의 폐삭성을 향상시키는 개재물은 MnS, (Ca, Mn) S, Pb, Bi 등 경도가 낮은 연질(軟質)의 개재물이고, 반면에 Al₂O₃, SiO₂, TiN과 같은 경질(硬質)의 개재물은 경도가 높고 취성(brittle)이 클 뿐 아니라 비연성이므로 질삭시 공구와 접촉하여 공구를 마모시킴으로써 수명을 단축시키며 특히 그 크기가 크고 양이 많을수록 그만큼 수명을 저하시킨다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 결과적으로 폐삭강에 있어서 폐삭성에 유해한 개재물을 제거 또는 Ca첨가에 의해 무해한 형상으로 적합한 폐삭 원소를 첨가하여 폐삭성에 좋은 개재물을 형성하는 것이 매우 중요하다.

질삭저항은 주분력(질삭 방향의 분력, F_x), 이송분력(이송 방향의 분력, F_y) 및 그것과 직각 방향인 배분력(F_z)⁽⁸⁾으로 나눈다.

주분력(F_x)은 주축에 가해지는 회전 torque, 주축의 구동력 및 발생하는 질삭열은 이러한 주분력에 비례한다. 이송분력(F_y)은 이송기구에 가해지는 힘 (F_y × 이송속도)과 주축의 thrust 등은 이것과 깊은 관계가 있고, 배분력(F_z)은 동력과 무관하나 공작물이나 공구의 탄성 변형은 이 배분력에 비례하여 오차가 발생되므로 특히 사상면 조도에 이 배분력의 영향이 크다⁽⁹⁾.

칩 형상을 결정하는 입자는 다양하다. 칩 형상은 하나는 한쪽만 지지되고 있는 칩에 외력(장애물의 접촉, 유출된 칩의 자중 증가, 원심력 변화 등에 의해 생기는 외력)이 가해지면 불균일한 응력이 부가되고 전단 영역에서의 slip방향이 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⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

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 나선의 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 소형 트럭용 Connecting Rod 및 Steering Yoke용으로 쓰이는 폐삭강 중 중탄소강 (Sample A)와 칩처리성 평가를 위한 S 첨가 폐삭강 (Sample B), 질삭 저항 평가를 위한 Ca+S 첨가 복합 폐삭강 (Sample C) 등 3가지 소재로 하였다.

2). 피삭재의 제조

피삭재의 제조공정은 다음 Fig. 3-1과 같다.

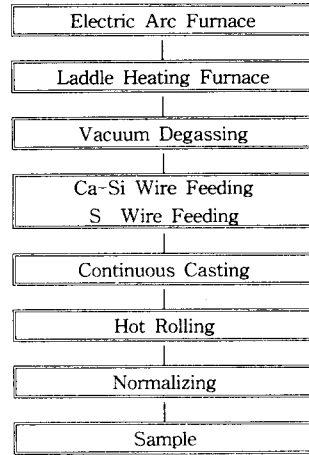


Fig. 3-1 Manufacturing process for samples

3). 실험 장치

본 실험에서 사용된 실험 장치 및 기기에 대한 사양은 Table. 3-1과 같다.

Table. 3-1. 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 개재물측정 (JIS, ASTM)
Free cutting Test	Free cutting Tester	WHA-CHEON (Japan)	HL-380	spindle speed: 45~1800rpm range of Feeds: 0.06~0.84mm
	Tool dynamometer	KISTLER	TYPE-9257B	Range of force Fx, Fy: -5KN~5 KN Fz: -5KN~10KN Sensitivity Fx, Fy: 7.5 PC/N Fz: -3.5 PC/N

3-2. 내부 품질 시험

화학성분은 ARL-3460 분석기를 이용하여 성분을 분석하였으며 이 때 시험편은 직경이 12mm 이상인 환봉을 사용하였다.

현미경 조직은 시험편은 압연한 강재의 단면 방향으로 절단하여 채취하였고 1200까지 연마한 후 연마액(알루미나)을 사용하여 polishing하였다. polishing한 후 3% Nital 용액으로 적절히 부식시킨 후 광학 현미경을 이용하여 400배율로 단면 방향 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, 폐삭 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

피삭성에 대한 평가 시험 방법은 범용 선반에 KISTLER의 Tool Dynamometer를 사용하였고 Tool Holder는 CNC선반용인 PCLNR2020-K12, Insert Tip은 TiCN coated WC 초경 공구인 CNMG120408의 KT300을 각각 사용하였고 Fig. 3-2은 피삭성 평가 시험 장치의 개략도이다.

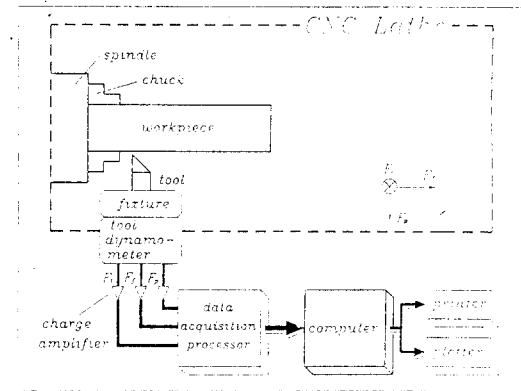


Fig. 3-2 Schematic diagram of machinability tester

2). 실험 조건

각 피삭재는 먼저 열처리 scale을 제거하고 선삭 회전시 편심을 없애기 위하여 표면을 1 mm 깊이로 pceling을 한 후 절삭 깊이를 2mm로 하고 절삭 속도를 109 m/min, 122 m/min, 134 m/min, 152 m/min, 170 m/min, 187 m/min로 하였다.

절삭저항은 F_p (주 분력), F_t (배분력), F_f (이송 분력) 등의 3분력의 합력으로 구하였고 측정 시간은 총 14초이고 매 1초마다 10개의 저항값의 평균치를 나타내었다. 칩 처리성은 절삭 저항사와 동일 조건에서 칩을 채취하여 조사 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 내부 품질 시험 결과

피삭재의 화학 성분 분석 결과는 Table 4-1과 같다. 중탄소강인 Sample A에 비해 S폐삭강인 Sample B는 S함량이 0.058%이고 Ca+S복합폐삭강인 Sample C는 S 0.043%, Ca 0.0015%의 조성을 나타내었다.

Table. 4-1 Chemical composition of determined samples

Sample	component (wt %)						
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca
A	0.55	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

본 실험에서 압연한 소재의 단면 및 압연 방향에 대한 현미경 조직을 관찰한 결과 Photo. 4-1에서 보는 바와 같이 각 Sample이 공통적으로 모두 전형적인 Ferrite + Pearlite 조직을 나타내었고 비교적 균일한 조직 분포를 하고 있음을 알 수 있다.

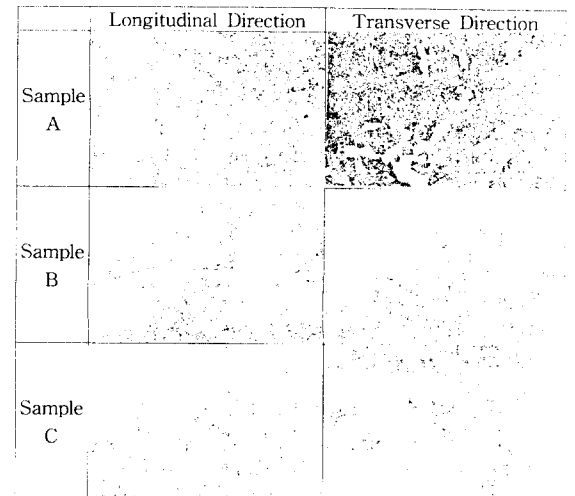


Photo. 4-1 Optical microstructure of tested samples(×400)

조직 사진에서 보면 흰색 부위로 보이는 Ferrite와 검게 보이는 Pearlite는 강재의 C함량에 따라 조직 분포가 달라지는데, 일반적으로 C함량이 낮으면 경도가 낮은 Ferrite 조직이 크게 분포하고 C함량이 높으면 상대적으로 경도가 높은 Pearlite 조직이 우세하게 형성된다. 따라서 C함량이 높은 강재는 Pearlite 조직 분포가 크게 되고 조직의 경도가 높게 되어 압연 상태에 있는 강재에서는 전반적으로 소재 경도가 높게 된다.

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

소재 상태에서 비금속 개재물을 측정된 결과 Table. 4-2에서와 같이 sample A에 비해서 sample B는 A계인 sulfide 개재물이

높게 나타났으며 sample C는 sample B에 비해 sulfide 개재물이 낮은 반면, 각각 B계, C계인 alumina와 globular oxide개재물이 상대적으로 높게 나타났다.

Table. 4-2 Results of determined nonmetallic inclusions (JIS G0555)

	sulfide (A ₁)	silicate (A ₂)	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. 4-2는 각 Sample에서 관찰된 전형적인 비금속 개재물 형태를 나타내고 있다.

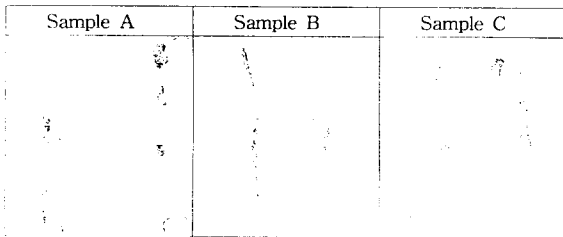


Photo. 4-2 Morphology of nonmetallic inclusions(X400)

Photo. 4-2에서와 같이 Sample A는 주로 sulfide와 alumina 개재물이 존재하였고 S를 첨가한 Sample B는 대부분 크기가 큰 sulfide 개재물이 분포하였다. 반면에 Ca+S복합 첨가시 Sample A에서 나타났던 alumina 개재물이 형태 제어되어 Sample C의 개재물 사진과 같이 구상화, 미세화되었고 비교적 균일하게 분포되었다. 이와 같은 개재물 type의 변화는 폐삭원소인 S와 Ca의 첨가량에 따라 형성되는 개재물의 조성 및 형태가 달라지기 때문으로 사료된다. 한편, 각 Sample에서 나타난 대표적인 비금속 개재물을 EPMA를 이용하여 정성 분석한 결과는 Photo. 4-3과 같은 비금속 개재물의 SEM 조적이 나타났으며 비금속 개재물에 대한 EPMA 정성 분석 결과 Fig. 4-1과 같이 그래프로 나타났다.

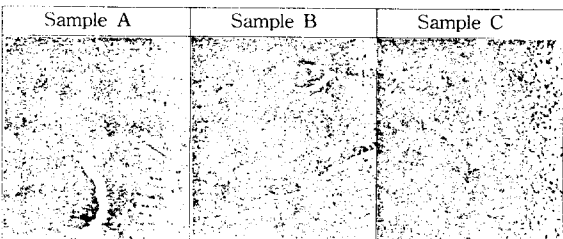


Photo. 4-3 SEM micrographs of nonmetallic inclusions for each sample

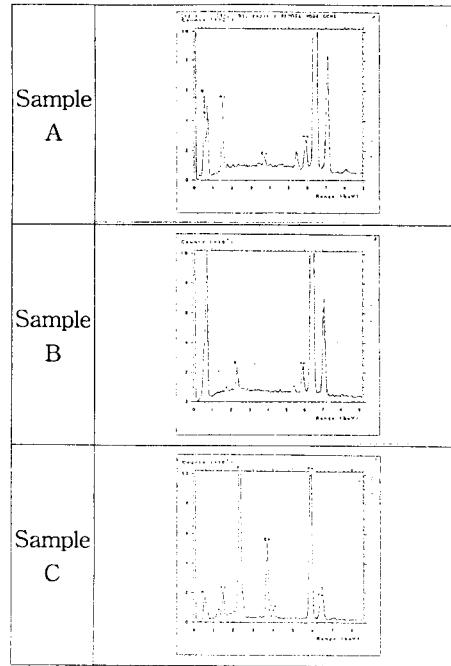


Fig. 4-1 EDS analysis of nonmetallic inclusion for each sample

결과적으로 Sample A의 비금속 개재물은 주로 Al, O, Mn, Ca의 원소로 이루어진 전형적인 oxide 개재물 (Al₂O₃, MnO 등)이었고 Sample B는 Mn, S성분으로 형성된 sulfide 개재물 (MnS)이었다. 반면에 Sample C는 Al, O, Mn, Ca, S의 성분으로 구성된 calcium-aluminate와 (Mn·Ca)S의 복합 개재물을 나타내었다.

이는 본래의 형태이던 alumina와 sulfide 개재물이 Ca 원소의 첨가에 의해 비금속 개재물의 조성과 형상이 변형된 결과로 사료된다. 이러한 복합 개재물은 저융점을 가지고 alumina보다 큰 연성을 가지므로 폐삭강의 피삭성을 향상시켜주는 요인으로 작용하게 되는 것으로 알려져 있다.

4-2. 피삭성 평가

1). 절삭 저항

비교 시험재의 절삭 속도의 변화에 따른 절삭 저항은

Table. 4-3과 Fig. 4-2 로 나타난 결과를 얻었다.

Table. 4-3 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

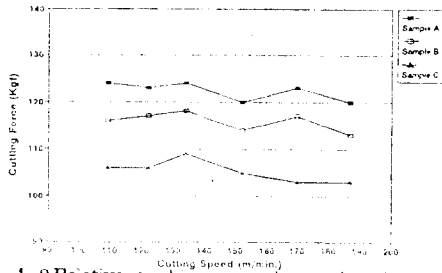


Fig. 4-2 Relative machining resistance of each sample

절삭 저항의 실험 결과 중탄소강인 sample A의 경우 120.1 kg에서 124 kg범위의 절삭 저항값을 나타내고 S 패삭강인 sample B의 경우 113.6 kg에서 118 kg범위의 절삭저항값이 나타났으며 Ca+S 패삭강인 sample C의 경우 102.7 kg에서 109.2 kg의 절삭저항값을 나타냈다. 즉, 절삭 저항값은 sample C < sample B < sample A 순으로의 결과를 얻었다.

따라서 본 실험 결과 패삭 원소 Ca+S를 첨가하여 절삭할 때 피삭성이 가장 우수한 것으로 나타났는데, 이는 MnS 개재물이 둘러싸고 있는 각형(angular) 및 고융점의 Al_2O_3 개재물이 Ca 첨가에 의해 구상(globular) 및 저융점의 Ca-aluminate 개재물로 변환되어 절삭 저항이 감소하였기 때문이다. Al_2O_3 개재물은 절삭 가공시 공구면에 칩의 마찰에 의한 경사면 마모(crater wear)와 여유면 마모(flank wear)가 생성되어 절삭 저항을 증가시킨다. 반면에 저융점의 Ca-aluminate 개재물은 공구면에 Ca-Al-Si-O를 주성분으로 하는 부착물(belag)이 생성되므로, 공구면과 칩의 직접 마찰을 방지하여 경사면 마모(crater wear)가 감소하고 부착물이 윤활막으로 작용하여 계면 온도가 낮아져 공구의 원소가 열 확산하여 방출되는 것을 방지하므로 여유면 마모(flank wear)가 감소하여 절삭 저항을 감소시킨다.

2). 칩 처리성

비교 시험재의 절삭 조건에 따른 칩 형상은 Photo. 4-4와 같다.

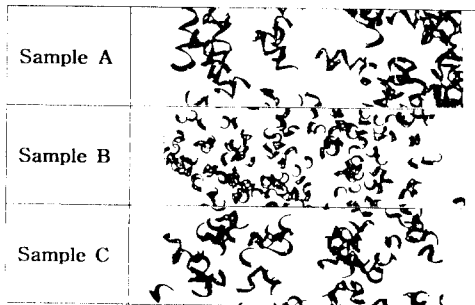


Photo. 4-4 Chip shape with cutting rate (cutting depth 2mm)

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

따라서 패삭 원소 S가 패삭강 절삭의 칩 처리성을 우수하게 하는 중요한 인자로서 강 중에 망간이 적정량 존재하면 S가 망간 유화물을 형성하고 이 망간 유화물이 절삭 가공시 윤활 집중

원 및 미소 균열 발생원으로 작용하여 칩 파쇄를 용이하게 하고 망간 유화물의 체적분율이 증가함에 따라 칩 파쇄성이 향상됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

현재 자동차 부품 중에 소형 트럭용 커넥팅 로드 및 Steering Yoke용 소재로 사용되고 있는 패삭강의 피삭성에 미치는 패삭 원소의 영향을 규명하기 위하여 중탄소강, S 패삭강, Ca+S 복합 패삭강의 시험재에 대한 내부 품질, 기계적 성질 및 피삭성을 비교 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압연 후 단면 및 압연 방향에 대한 현미경 조직은 시험재 모두 전형적인 페라이트(Ferrite)+퍼얼라이트(Pearlite) 조직을 나타내었다. 비금속 개재물은 중탄소강에서 oxide 개재물(Al_2O_3 , MnO 등), sulfide 개재물(MnS)이 나타났고 S 패삭강은 S 첨가에 의해 주로 sulfide 개재물(MnS)이 oxide(Al_2O_3)와 함께 존재하는 반면, Ca+S 복합 패삭강은 Ca+S 첨가에 의해 기존과 sulfide (MnS)와 oxide(Al_2O_3) 개재물이 변형되어 저융점의 calcium aluminate($CaO \cdot Al_2O_3$)와 sulfide(Mn, Ca)S의 복합 개재물로 나타났다.
- 2) 피삭성 시험 결과 절삭 저항은 Ca+S 복합 패삭강이 가장 우수하고 S 패삭강, 중탄소강 순으로 우수하였다. 또한 칩 처리성은 S 패삭강이 가장 우수하고 Ca+S 복합 패삭강과 중탄소강은 거의 비슷하였다. 따라서 패삭 원소 중 Ca 첨가시 절삭성이 우수하며 S 첨가시 칩 처리성이 우수한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] 荒木 ; “快削鋼研究開發の 展望”, 鐵と鋼, (1982) p.73
- [2] Robert H. ABORN ; “Role of Additives in the Machinability of Steel”, International symposium on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, Tokyo, Sep.(1977) p.381-395
- [3] 日本鐵鋼協會 ; “高潔淨鋼”, 第126,127回, 西山記念技術講座, (1988) p.187
- [4] G. Jha, S. Sharma ; “Tools & Alloy Steels”, No.1, (1990) p.5
- [5] 音谷登平, 形浦安治 ; “カルシウム 鋼”, (1981) p.139, pp.142-148
- [6] W, E, Duckworth and E, Ineson; In Isl spec. Rep.77, London. (1966) p.87-103
- [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 Steel”, JSPE, Vol.54-10, Oct. (1988) p.1969-1974
- [9] Metals Hand Book 9th Edition, Vol.16, Machining, ASM International,(1989) p.137
- [10] N. Ueda and T. Matsuo ; “Influence of Saw-Toothed Chip Formation on Tool Wear”, Proc. 4th Inter. Conf. Prod. Eng. Tokyo, (1980) p.512-517
- [11] Sturney. A. C ; ASME, Vol.1. (1965) p.141