

자동차 차축 소재의 금속적 특징 및 밀링 절삭 특성 연구

채왕석*, 권용기**, 김동현***

A Study on the Material Characteristics of Material Quality and Milling of Axle Materials for a Automobile

W.S. CHAE*, Y.K. KWON**, D.H. KIM***

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 force of milling including tensile strength value, hardness etc. Test materials are used in the tempered carbon steel and the non-tempered carbon steel.

The obtained results are as follows:

1. In analyzing internal quality, the tempered carbon steel have typical martensite structure and the non-tempered carbon steel have ferrite + pearlite structure.
2. Yield strength, tensile strength and hardness value are in the non-tempered carbon steel but elongation is maximum value in the tempered carbon steel.
3. Cutting force is smaller non-tempered carbon steel than tempered carbon steel when feed speed and depth of cut is constant.
4. Cutting force is smaller non-tempered carbon steel than tempered carbon steel when cutting speed and depth of cut is constant.

Keywords : tempered carbon steel(중탄소강), non-tempered carbon steel(비조질강), cutting force(절삭력)

* 기아특수강(주)
** 전주공업전문대 기계과 교수
*** 원광대학교 기계공학과 교수

1. 서론

일반적으로 산업 현장에서 고부하가 걸리는 부품 또는 각종 구조 부재의 대부분은 보통 성형 가공, 열처리, 절삭, 용접 등의 제조 공정으로 이루어지고 있다.

1975년경 서독에서 소재 제조의 원가 절감 측면에서 관심과 연구가 시작 된 후 미국, 일본에서 제조 원가 절감을 통한 경쟁력 강화를 주목적으로 조질 처리 (Quenching & Tempering) 와 고주파 담금질 등의 열처리 공정을 생략하여 조질 공정에서 부여되는 부품의 필요한 강도 및 연성에 대해 조질 공정을 생략하고도 특정 부품에서 요구되는 제반 기계적 특성을 얻을 수 있는 비조질강의 개념이 도입되었고⁽¹⁾ 1979년 제 2 차 석유 파동 위기를 계기로 이에 대한 관심과 연구가 집중되게 되었다. 더불어 국내외의 각 자동차 제조 회사에서는 비조질강을 도입하므로써 얻어지는 이점 및 장점 즉, 열처리 공정의 생략, 소재 원가 절감, 열처리 변형 제거, 교정 (Straightening)의 최소화, 절삭성 향상 등으로써 에너지 절감, 생산 원가 절감, 제조 공정의 단축으로 인한 납기 단축, 재고 관리의 단순화 등으로 원가 절감의 필요성을 인식하게 되었으며 아울러 국내 각 자동차 제조 회사 및 자동차 관련 부품 제조 회사에 소재를 공급하는 철강 제조 업체에 대하여 비조질강의 연구 및 개발을 필연적으로 요구하게 되었다.

비조질강의 개발 초기에는 단조시 고열로 인한 조직의 조대화로 용접성이 떨어지고 충격 인성이 낮아 과도한 충격이 배제되는 저부하용의 부품 등에 그 사용이 제한되어 왔으나⁽²⁾ 최근에는 비조질강의 단점을 개선하고자 하는 연구가 활발히 진행됨에 따라 적용 범위가 점차 확대되어가고 있다^(3,4).

본 연구에서는 범용으로 쓰이는 중탄소강과 국내 자동차 제조 회사에서 실용화 단계에 있는 자동차 차축 소재인 직접 절삭용 비조질강을 비교 시험재료 하여 금속학적 특성을 고찰하고 실제 밀링 절삭 가공 시험을 통하여 발생하는 동적 특성 분석을 비교 검증하여 실제 산업 현장에서 절삭 가공 조건의 설정시 자료로서 제안, 제시하고자 한다.

2. 관계 이론

비조질강은 생략되는 조직 열처리의 공정 내용에 따라 소재를 담금질, 뜨임 공정을 생략하고 절삭하는 직접 절삭 비조질강과 열간 단조, 담금질, 뜨임 공정을 생략하고 절삭하는 열간 단조용 비조질강, 그리고 냉간 단조후 담금질, 뜨임 공정을 생략한 냉간 단조용 비조질강 등 3가지로 분류 구별 할 수 있다.

비조질강은 제조시 합금 원소의 조절에 따라 각종 기계적 특성을 변화 시킬 수 있는데⁽⁵⁾ 중요한 합금 원소의 특성을 보면 C는 경도 향상을 위해서 대단히 중요하며 어느 정도 강도 수준을 위해서는 최소한의 함량이 필요하다⁽⁶⁾. Mn은 매우 효과적인 고용 강화 원소로서 퍼얼라이트 부피 백분율을 높이고 페라이트 결정 입자 크기를 감소 시키며 퍼얼라이트 층간 거리를 감소시킴으로써 강도를 향상 시키지만 인성의 변화는 뚜렷하지 않다⁽⁴⁾. Si는 고용 강화 효과 및 내식성이 있어 보통 0.15 ~ 0.35 wt.% 정도가 첨가되어 있으며 S는 가공성 향상에 효과적인 원소로 0.05 wt. % 첨가시 MnS의 석출에 의한 페라이트 결정립 미세화 효과로 인성이 향상된다⁽⁷⁾. V는 석출 강화와 결정립 미세화를 위해서 첨가되며 특별히 강도에 큰 영향을 미친다.

미세 조직면에서 조질강은 템퍼링 마르텐사이트 조직이고 비조질강은 페라이트+퍼얼라이트 조직이다. 동일 경도시 비조질강이 조질강에 비해 구멍 가공을 제외한 제반 절삭 가공시 절삭성이 양호하다고 보고 있으나 실제로 절삭성의 우열을 정확히 평가하기 위해서는 부품의 크기, 공정 등을 복합적으로 면밀한 검토가 필요하다.

평면, 단면, 측면 등 다양한 가공을 할 수 있는 정면 밀링 가공은 절삭 조건, 절삭 공구의 기하학적 형상과 재질, 공구의 마모, 피삭재의 재질과 형태 등의 다양한 인자에 의해 가공 특성이 변화한다. 따라서 제품 품질의 수준을 향상시키려면 사용 공구, 구성 인선, 공작 기계의 진동, 피삭재 재질의 결합, 칩 형태, 공구의 마모와 파손^(8,9) 등의 영향을 파악하여야 한다.

또 정면 밀링 가공은 단속 절삭이며 하나의 절삭날이 절입한 후 다시 다른 절삭날이 절입해 오므로 절삭 두께가 항상 변화하여 절삭력이 변동하게 된다.

절삭력의 거동에 관한 연구는 정절삭력 모델과 동절삭력 모델로 나누어져 진행되어져 오고 있으며, W. Y. Lee와 H. C. Shin⁽¹⁰⁾은 정면 밀링에 있어서 정면 밀링 공구의 기하학적 형상을 이용하여 정절삭력 모델을

구성하였고 모델링한 정절삭력이 실제의 측정 절삭력과 일치함을 보였다.

Y. Takeuchi⁽¹¹⁾는 과도한 절삭력이 공작 기계 전체 구조에 대해 변형을 유발하여 공작 기계 주축에 편심(obliquity)을 발생시키고 공작 기계 주축의 진동 및 불안정으로 인해 가공 평면에 함몰부(concavity)를 생성시켜 가공 오차를 발생시키는 것을 지적하였다. Takeuchi는 정면 밀링 가공에 있어서 공작 기계의 변형과 가공 표면의 오차를 최소로 하기 위하여 3종류의 정면밀링 절삭 유형을 정하여 3가지 유형의 가공 방법에 대해서 절삭력을 수식화 하였다. H. S. Kim⁽¹²⁾ 등은 공작 기계의 구조적인 특성을 고려하여 정절삭력을 기초로 한 동절삭력 성분을 모델링하였다.

3. 실험

3-1. 피삭재 및 실험 장치

1) 피삭재 종류 및 제조 공정

피삭재는 자동차 부품 중 차축 소재로 쓰이는 중탄소강(Sample A)과 직접 절삭용 비조질강(Sample B) 등 2가지 소재를 비교 소재로 하였으며 피삭재의 제조 공정은 다음 Fig.1과 같다.

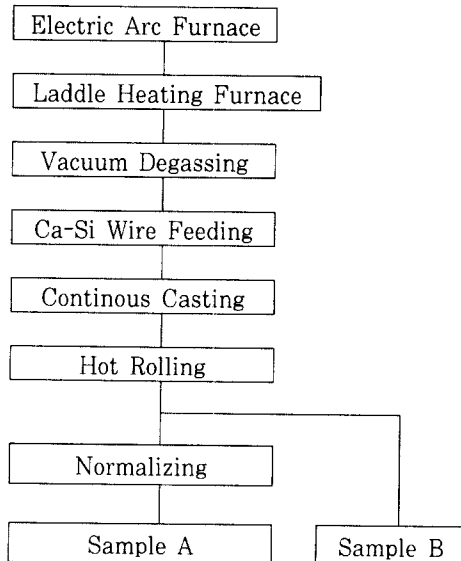


Fig.1 Manufacturing process of sample

피삭재의 제조 공정은 제강, 연주 공정에서 원자재(고철 등)를 전기로에서 용해하고 로의 정련과 진공 탈가스 공정 및 부원료 투입 공정을 거쳐 연속 주조 공정으로 브룸(Bloom)을 제조하고 압연 공정에서는 주문 사양(규격)에 따른 규격으로 압연 작업으로 비조질강이 제조되고 열처리 공정을 통하여 중탄소강이 제조된다.

2) 실험 장치

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

Table 1 The specifications of experimental apparatus

Spectrometer	- model : ARL-3460 - 34 channels
Image analyzer	- model : LECO-300 - $\times 50 \sim 200$
Tensile tester	- model : SHIMADZU UH-100AUH-100A - max range : 100 ton, 6range
Rockwell Hardness tester	-model : MATSUZAWA MXT- α 27 - B.C scale
Milling machine	- universal milling machine - bed size : 390 mm
Tool dynamometer	- model : KISTLER 9257B - max range FX, FY : ± 5 KN FZ : -5 KN ~ 10 KN - resolution : < 0.01 N
Charge amplifier	- model : KISTLER 5011A - max range : ± 500000 pC - sensitivity : 10 pC - output voltage : ± 10 V
A/D converter	- model : LAB V - resolution : 12 bit, - 16 channel - conversiotn time : 109 μ sec - measurement of a range : ± 10 V

3-2 금속학적 시험

비교 시험재의 내부 품질의 규명을 위한 금속학적 시험은 화학 성분은 ARL-3460 분광 분석기를 이용하여 성분을 분석하였으며 이때 시험편은 직경이 14mm 이상인 환봉을 사용하였다.

현미경 조직은 시험편을 압연한 강재의 단면 방향으로 절단하여 채취하였고 1,200까지 연마 후 연마액(알루미나)를 사용하여 연마 작업(polishing)을 하고 3% Nital 용액으로 적절히 부식 시킨 후 광학 현미경을 이용하여 200배율로 관찰하였다.

3-3 기계적 성질 실험

비교 시험재의 기계적 성질을 비교하기 위하여 인장 시험은 KS 4호 시험편을 준비하였고 100 ton 용량의 인장 시험기를 사용하여 3회 시험의 평균치를 인정 시험값으로 하였다. 경도시험은 록크웰 경도 시험기의 B scale을 사용하여 소재 단면의 표면에서 중심까지 5 point 시험의 평균치를 경도값으로 하였다.

3-4 절삭성 평가 시험

본 연구에서는 밀링 가공시 생성되는 절삭 저항에 관하여 Sample A, B를 비교 평가하기 위하여 다음과 같이 설정하였다.

1) 실험 장치

절삭 저항력에 대한 실험을 위하여 밀링 머신은 주축 회전수(spindle speed)를 9단으로 변환할 수 있고, 공작물의 이송 속도(feed speed)를 12단으로 변환할수 있는 만능 밀링 머신(universal milling machine)을 사용하였다.

절삭 저항력의 측정은 공구 동력계(tooldynamometer, KISTLER 9257B)를 사용하였으며, 공구 동력계에서 나온 절삭력 신호를 증폭기(charge amplifier, STLER 5001A)를 사용하여 증폭시키고 절삭시 발생하는 데이터는 A/D converter(LAB V)에서 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 개인용 컴퓨터를 이용, 데이터에 저장한 후 프린터와 플로터로 출력하였다.

Fig.2는 절삭 저항 평가 시험 장치의 개략도이다.

2) 실험 조건

절삭조건은 4개의 절삭속도와 4개의 이송속도가 비례적인 관계를 유지하도록 설정하였으며 물림깊이는 0.3 mm로 하였다. Sample A, B의 시편의 길이는

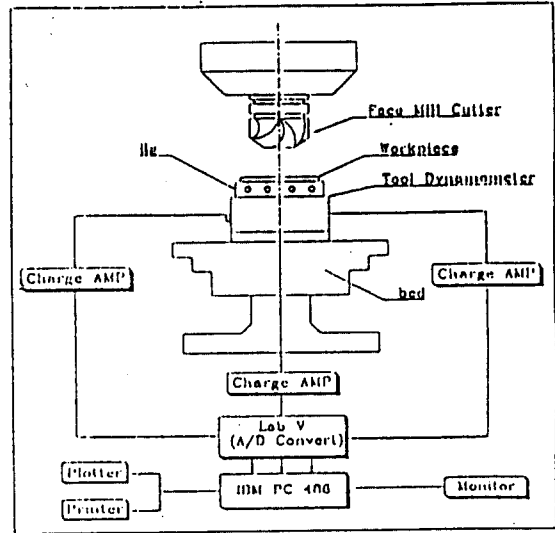


Fig. 2 The arrangement of cutting mill experiment apparatus

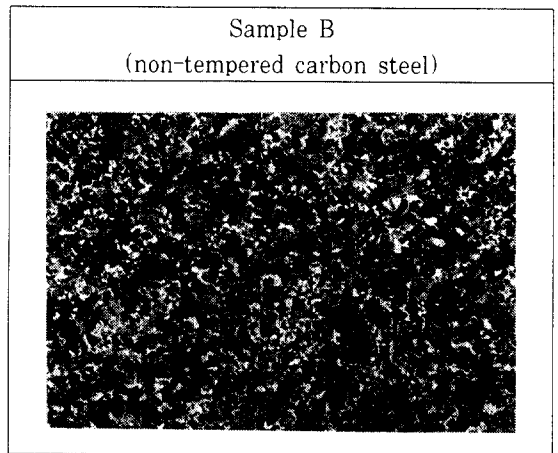
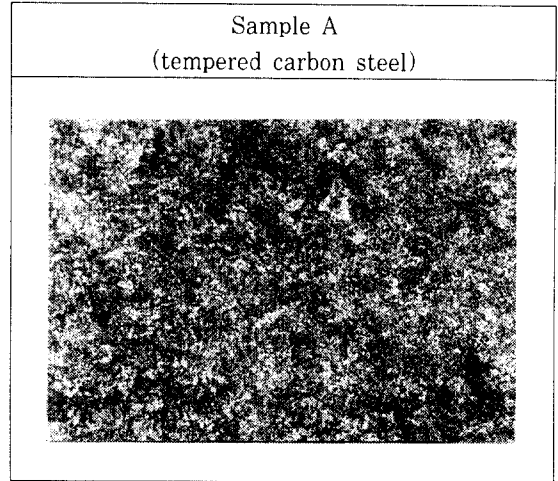
80~83 mm로 하였으며, 절삭시험이 시작되기 전 마모되지 않은 insert를 사용하여 520 rpm과 87 mm/min, 물림깊이 0.1 mm에서 예비절삭을 행하였다.

본 연구의 절삭성 실험 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental conditions

machine	universal milling machine (vertical milling machine)
environm ent	dry cutting
milling cutter	AD4125R (KORLOY, ϕ 125 mm) * lead angle : 45° * axial rake angle : +15° * radial rake angle : -4°

milling insert	uncoated tungsten carbide (A30, P30 grade, KORLOY, SDAN 1203 AETN) * clearance angle : 15° * thickness : 3.18 [mm]
work material	A) tempered carbon steel B) non-tempered carbon steel
cutting conditons	· spindle speed [rpm] : 370, 520, 715, 990 · cutting speed [m/min] : 145, 196, 281, 389 · feed speed [m/min] : 41, 61, 87, 127 · feed rate [mm/insert] : 0.079, 0.117, 0.167, 0.224 · depth of cut [mm] : 0.3 · number of insert : 1 · center milling



4. 결과 및 고찰

4-1. 금속학적 시험 결과

본 실험에서 사용한 비교 시험재의 화학 성분 분석 결과는 Table 3과 같으며 압연한 소재의 단면에 대한 현미경 조직의 관찰 결과는 Photo 1과 같다.

Table 3 Chemical composition of determined Samples

Sample Component(%)	A	B
C	0.458	0.422
Si	0.217	0.231
Mn	0.676	1.367
P	0.0072	0.0110
S	0.0159	0.0147
Cu	0.149	0.089
Ni	0.081	0.052
Cr	0.172	0.151
Mo	0.017	0.017
Al	0.0154	0.0291
Sn	0.0133	0.0058
V		0.107

Photo 1 Optical microstructure of tested samples(×200)

조직 사진에서 보면 Sample A는 조직이 마르텐사이트(Martensite)이며 일부에 가는 침상(針狀) 또는 삼잎(麻葉)모양이 보여진다. 이 조직은 강재의 오스테나이트계역(A1점 이상)에서 급냉하여 얻어지는 삼잎 모양의 침상 조직으로 대단히 높은 경도를 특색으로 한다. 마르텐사이트는 100 ℃정도의 템퍼링에 의해 템퍼링 마르텐사이트가 되지만 거의 조직의 변화가 없는 것을 알 수 있다. Sample B는 퍼얼라이트와 웨라이트(Perlite and Ferrite) 조직이다. 사진에서 백색은 웨라이트이

며, 흑색 및 층상은 퍼얼라이트를 나타낸다. C 함량이 0.44 wt.%이므로 웨라이트 이외에 퍼얼라이트가 뚜렷이 나타나며 이 퍼얼라이트가 차지하는 면적은 탄소 함유량이 증가함에 따라 증대하고 불림(Normalizing) 상태에서는 0.4 wt.% 전후에서는 절반 정도, 0.77 wt.%에서는 전부 퍼얼라이트가 된다. 퍼얼라이트가 많아짐에 따라 경도, 인장강도는 증가하고 반대로 연신율, 충격치 등은 감소한다. 퍼얼라이트의 부분은 응고시 수축에 의해 입경계(粒境界)에 미세한 간격(diffused hole)이 발생되고 이 부근은 부식액(etching reagent)이 쉽게 침입하여 부식되기 쉽고 고배율로 보면 층상으로 보인다.

4-2 기계적 성질 시험 결과

본 실험에서 사용한 비교 시험재인 각 Sample에 대한 인장시험 및 경도시험 결과를 요약하면 Table 4와 같다.

Table 4 Results of tensile test and hardness test

Item	Sample	
	A	B
Yield strength (Kgf/mm ²)	35.6	58.1
Tensile strength (Kgf/mm ²)	67.1	84.1
Elongation (%)	26.3	20.4
Hardness (H _R B)	207	241

즉, Sample B가 Sample A보다 항복 강도 및 인장 강도와 경도가 높았으며 연신율은 Sample A가 Sample B보다 높은 것으로 나타났다. 이것은 Sample B의 조직이 퍼얼라이트가 많은데 기인된 것으로 판단되며, 또 Sample B가 Sample A보다 경도가 높은 것은 C의 함량의 다소에 원인이 있는 것으로 판단된다.

따라서 비교 시험재 중 Sample B를 자동차 소재로

적용 할 경우 Sample A와 비교하여 기계적 성질이 우수함과 동시에 제조 공정시 Q/T를 생략함으로써 원가 절감의 효과를 기대 할 수 있다고 판단된다.

4-3 절삭력 평가

Fig.3은 각 Sample A, B에 대하여 이송 속도 87 mm/min, 절삭 깊이를 0.3 mm로 일정하게 고정시켰을 때 절삭 속도의 변화에 따른 절삭력의 변화를 보여주고 있다.

절삭 속도가 증가함에 따라 각 Sample A, B 모두 절삭력이 52kgf~38kgf, 48kgf~28kgf으로 감소하는 것을 볼 수 있었고 직접 절삭용 비조질강인 Sample B보다 중탄소강인 Sample A가 절삭력이 높게 나타났다.

Fig.4는 절삭 속도 196 m/min, 절삭 깊이를 0.3 mm로 일정하게 하였을 때 각 Sample A, B에 대한 이송 속도의 변화에 따른 절삭력의 변동을 보여주고 있다.

각 Sample A, B 모두 이송 속도의 변화에 따라서 절삭력이 29.5kgf~53kgf, 26kgf~51kgf으로 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있고 미소하나마 Sample B보다 Sample A가 절삭성 면에서 우수함을 볼 수 있다.

따라서 Sample B가 Sample A에 비하여 제조 원가가 저렴한 반면 절삭성은 우수하다고 판단된다.

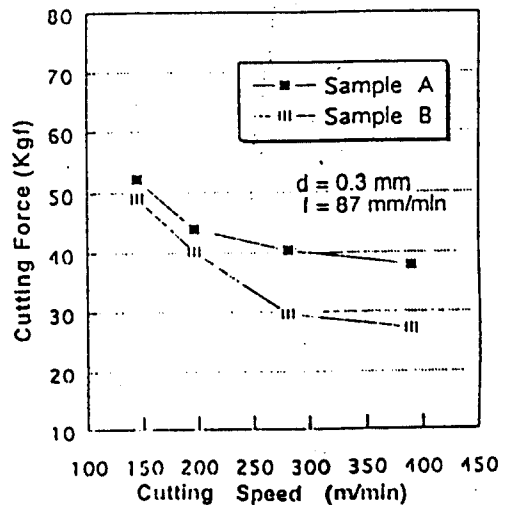


Fig. 3 Cutting speed vesus Cutting force for tempered carbon steel and non-tempered carbon steel

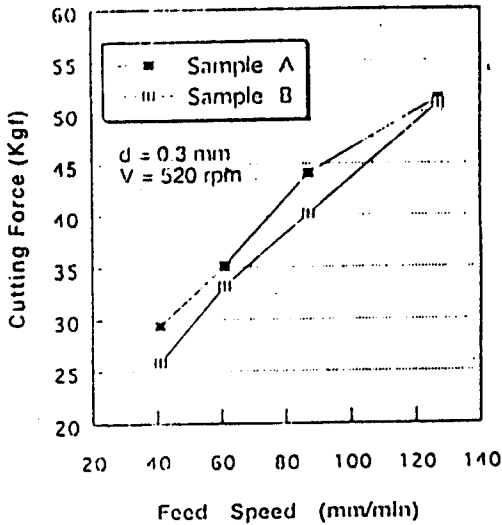


Fig. 4 Feed speed vesus Cutting force for tempered carbon steel and non-tempered carbon steel

5. 결 론

현재 자동차 부품 중 차축 소재로 사용되고 있는 중탄소강과 직접 절삭용 비조질강의 시험체에 대한 금속학적 특성 및 기계적 성질과 밀링 절삭 가공시 절삭력을 비교 시험한 결과, 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) 중탄소강은 마르텐사이트 조직으로 나타났으며, 비조질강은 퍼얼라이트 + 웨라이트 조직으로 나타났다.
- 2) 항복 강도 및 인장 강도와 경도는 비조질강이 높았으며, 연신율은 중탄소강이 높았다.
- 3) 이송 속도와 물림 깊이가 일정할 때 절삭속도의 변화에 따른 절삭력의 변동은 비조질강이 중탄소강보다 낮게 나타났다.
- 4) 절삭 속도와 물림 깊이가 일정할 때 이송속도의 변화에 따른 절삭력의 변동은 비조질강이 중탄소강보다 약간 낮게 나타났다.

따라서 비교 시험재 중 비조질강이 중탄소강에 비해 자동차 차축 가공시 우수한 품질의 저렴한 소재 공급이 가능하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) H. Hashimoto, Y. Serino, Y. Aoyama and K. Hashimoto, Technical paper SAE, 820125, 1982
- (2) S. Niwa, I. Machida, T. Kato, N. Uyehara and Y. Tanaka, Technical paper SAE, 810426, 1981
- (3) 池田宏, 特殊鋼, 36, 20, 1987
- (4) D.J.Naylor, Iron making and Steelmaking, 16, pp 246-251, 1989
- (5) Robert. H. ABORN, "Role of Additives in the Machinability of Steel", International symposium on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, Tokyo, pp 381-395, Sep 1977
- (6) T. Gladman, I. D. Mcluor, and F.B. Pickering, JISI, Vol.210, pp 916, 1972
- (7) I. Nomura, et al., Technical paper, SAE, 890511, 1989
- (8) G. Boothroyd, "Fundamental of Metal Machining and Machine Tools", McGRAW-Hill, pp 133~142, 1975
- (9) M. C. Shaw, "Meter Cutting Principles", Clarendon Press Oxford, pp 224-250, 1984
- (10) 이우영, 신호철, "전단 유동 응력에 의한 정면 밀링의 절삭력 해석", 대한 기계 학회 논문집, 제13권, 제6호, pp1170~1182
- (11) Y.Takeuchi, M.Sakamoto, "Analysis of Machining Error in Face Milling", Proc. 22nd MTDR conference, pp 153-158, 1981
- (12) 김희술, 이상석, 이병철, "정면 밀링 작업에서의 동절삭력의 해석", 대한 기계 학회 논문집, 제16권, 제12호, pp2268-2278, 1992