

초정밀 고속가공 공정에서의 변형율속도를 고려한 전산 시뮬레이션 해석에 관한 연구

신보성[#], 제태진^{*}

A Study on Computational Analysis of Ultraprecision High-speed Machining Process Considering the Strain Rate Effect

Bo-Sung Shin[#], Tae-Jin Je^{*}

ABSTRACT

HSM(High-speed Machining) is widely used in rapid manufacturing of precision products and molds of various materials. Improvement in cutting efficiency is one of the important subjects in the HSM process. To analyse the dynamic behavior during a very short cutting time, the computational analysis code, LS-DYNA3D, was employed for the simulation of the mechanism of HSM for aluminium 7075. This cutting mechanism includes some difficult points in simulation, for example, material and geometrical non-linearity, high-speed dynamic impact, contact with friction, etc. In this paper, a finite element model considering the strain rate effect is proposed to predict the cutting phenomena such as chip deformation, strain and stress distributions, which will help us to design the HSM process.

Key Words : Screw Type Flow Meter(스크류유량계), Reverse Engineering(역공학), Performance Test(성능평가)

1. 서 론

고속절삭가공은 다양한 재료를 고효율적으로 쾌속 제작할 뿐만 아니라, 정밀 제품 및 금형을 단시간 내에 고품질로 제작가능한 장점이 있다^[1]. 고속가공의 높은 MRR(Material Removal Rate)은 제작시간을 크게 단축할 수 있으며, 고속가공기의 높은 주축회전수는 현재 약 100 μ m급의 작은 직경의 회전공구에 의한 초정밀 가공을 가능하게 되고 있다. 기존 연구로는 고

속가공기술을 기반으로 하여 팬(fan), 노브(knob) 및 두개골(skull) 형상과 같은 3차원 금속/비금속 제품을 쾌속제작한 응용사례와 관련연구가 이루어지고 있다^[2-4].

본 연구에서는 고속가공에서 회전공구에 걸리는 절삭 칩 생성(chip formation) 거동을 규명하기 위하여 2차원 전산해석 모델을 제안하고자 한다. 실제로 고속가공공정은 가공재질 및 공구 자체의 비선형성(non-linearity), 고속 동적/충격효과(high-speed dynamic impact), 접촉조건(contact condition), 마찰력(friction force) 등의 여러가지 현상들이 복합적으로 나타나기 때문에 그동안 해석적인 접근에 한계가 있었다^[5]. 따

교신저자 : 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소
E-mail : bosung@pusan.ac.kr

* 한국기계연구원 나노공정그룹

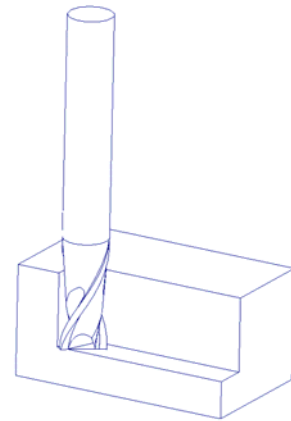
라서 본 연구에서는 고속절삭시 높은 변형율 속도 (strain rate) 효과를 고려한 유한요소해석 모델을 제안 하고, 칩발생시 칩과 가공재질의 접촉부위를 일일이 사용자가 지정하지 않아도 자체적으로 접촉 상태를 처리하는 자체접촉(self contact) 기능을 도입하고, 전산해석 결과가 실제 가공실험결과와 비교함으로써 이에 대한 가능성을 제시하고자한다. 본연구의 실험 재질(workpiece)은 알루미늄 7075이며 상용 유한요소 해석 도구로써 LS-DYNA3D 를 적용하였다.

2. 유한요소 해석

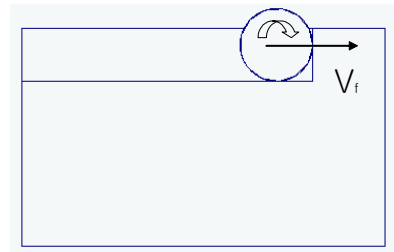
2.1 해석 모델

고속절삭시 발생하는 칩의 길이에 비하면 칩의 폭 (width, 수 mm 급)와 두께(thickness, 수십 μm 급)는 매우 작지만, 타당한 해석결과를 얻기 위해서는 두께방향의 응력(stress)와 변형율(strain)의 분포를 구하는 것은 매우 중요하다. 본 연구의 해석모델(finite element model)에서는 사면체 유한요소가 칩생성 거동해석에 사용되었으며, 많은 유한요소수 처리에 적합하고, 고속 동적/충격 해석 문제를 해결 가능한 LS - DYNA3D와 같은 외삽적 유한요소법(explicit finite element method)이 채택되었다. Fig.1는 실제 가공에서의 공구와 가공재질의 형상을 보여준다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 해석모델이 칩, 가공재질 및 공구(tool)와 같이 3개의 영역으로 간단하게 구성된다. 칩의 형상은 공구운동에 따라 미리 결정되는 면을 포함하며, 공구는 정해놓은 방식에 따라 공구중심을 축으로 하는 회전속도(rotational velocity)만을 갖는 강체(rigid body)로 가정한다. 그리고 고속절삭되는 칩은 변형율 속도를 고려한 탄소성 (elastoplastic) 재질로 정의하였다. 칩과 가공면사이에는 공구선단이 닿으면 분리되는 얇은 두께막이 존재한다고 가정한다. 이때 Tie node가 파단(failure)되는 응력상태에서 얇은 막이 분리되도록 미리 정해놓은 Tie-break 의 Slide type 9이 본 연구에 도입되었다.

고속가공의 2차원 해석을 위하여 적절한 경계조건 (boundary conditions)이 부여된 Plane strain 유한요소가 사용되었다. 가공재질로부터 분리되는 칩은 충분히 얇기 때문에 Tie-break 경계면으로 취급한다.



(a)



(b)

Fig. 1 Two dimensional model of high-speed machining, (a) isometric view, (b) top view

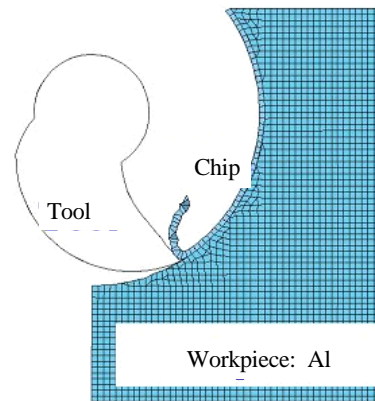


Fig. 2 Three parts of the finite element analysis model

2.2 모델재질 및 공정변수

가공재질의 유효응력과 유효변형율 속도의 관계식은 소성흐름식(flow stress-train rate relation)을 사용하

였다. 이때 관계식의 상수값은 가공온도에 따른 변수이며, Table 1에서는 가공재질인 알루미늄 7075의 값을 예시적으로 보여준다^[6]. 이때 K와 m은 소성흐름 관계식이 $\sigma = K(\dot{\epsilon})^m$ 과 같이 주어졌다고 가정한 경우의 특정온도에서의 상수값이다. 또한 고속가공에서의 변형을 속도 영향을 고려할 경우, Fig. 3에서 보는 바와 같이 기존의 Cowper and Symond 관계식(relation)과 응력과 변형률 속도의 소성흐름 관계식을 곡선 맞추기(curve fitting)함으로써 변수 C=15,000, p=5.0의 값을 구하였다. 이때 가공 칩의 온도는 400℃로 설정하였을 경우, 두 곡선간의 오차 범위는 최대 3.56%의 값을 갖는다.

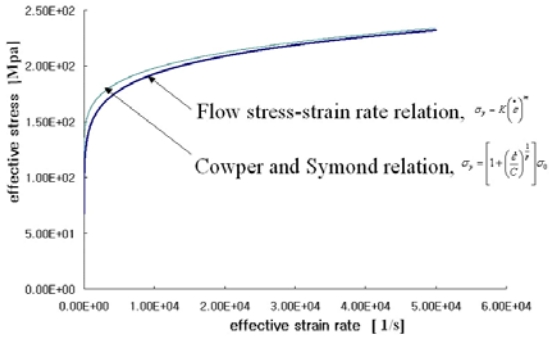


Fig. 3 Curve fitting between the effective plastic stress and the effective strain rate

또한 가공면과 공구사이에 작용하는 마찰력은 고속가공공정에서 매우 중요하나, 가공중의 마찰계수는 실제로 측정하기가 매우 곤란하다. 가공공정에서 정적 마찰계수(static friction coefficient)는 0.03에서 0.45

의 범위를 가지며, 동적 마찰계수(dynamic friction coefficient)는 이보다 훨씬 작다고 보고되고 있다^[7,8].

이와 같이 변형률 속도를 고려하는 경우에 본 해석에서는 정적 및 동적 마찰계수 둘다 모두 0.125의 값을 갖는다고 가정하고 해석을 수행하였다. 그리고 Table 2에서는 해석과 가공실험에 사용된 알루미늄 7075 소재와 Tie-break 경계면의 항복응력(yield stress), 탄성계수(Young's modulus) 및 Tie-break 응력 등의 기계적 물성치(mechanical property)를 나타내고 있다. Tie-break 경계면의 분리응력(break stress)는 다음의 식(1)과 같이 수정되어진다.

$$\sigma'_n = S\sigma_n \tag{1}$$

이때 크기변수(scale factor) S는 식(2)에서 주어진다. 앞서 계산한 변수 C와 p의 값과 후처리과정(postprocessing)에서 구한 변형률 속도 43,494.2 (1/sec)를 대입하면, S= 약 2.4의 값이 계산되었다.

$$S = \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^p \right) \tag{2}$$

그리고 해석과 실험에 사용된 고속가공공구는 공구의 커터(cutter) 날수가 2개이며, 밀면이 평면인 프랫 엔드밀(endmill)로써 경사각(rake angle) 15°의 형상을 선택하였다. 본 해석에 사용된 공정변수로 주축회전수(spindle rotational speed)는 50,000 (rpm), 이송속도(feed rate) 9,000 (mm/min), 공구 날당 이송(f_z , feed per tooth) 0.09 (mm), 공구날 폭(woc, width of cut) 4.8(mm), 공구 직경(d)은 6.0mm를 사용하였다. 이들 변수에 대한 설명은 Fig. 4에서와 같다.

Table 1 Summary of K (ksi) and m values describing the flow stress-strain rate for Al 7075 alloys at various temperature

Material	Strain rate range, s ⁻¹	Strain	K	m	C	m	K	m	K	m
Temperature °C(°F)	-	-	400(750)		450(840)		500(930)		550(1,020)	
Al 7075	0.4 - 311	0.115	10.0	0.090	6.0	0.135	3.9	0.150	2.9	0.170
		2.66	9.7	0.115	6.2	0.120	4.8	0.115	2.7	0.115

Table 2 Summary of mechanical properties of Al 7075 and the interface type

Material Type 3 (Elastoplastic)	Interface Type (Tie-Break)
Density (ρ) = 2,800 Kg/m ³	Ultimate tensile strength = 228 Mpa
Young modulus (E) = 72,000 Mpa	Ultimate shear strength = 152 Mpa
Poison rate (ν) = 0.33	V = 942.4 m/min
Yield strength = 103 Mpa	
Hardening modulus (H) = 26,900 Mpa	

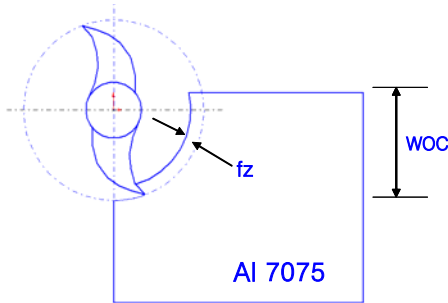


Fig. 4 Three parts of the finite element analysis model

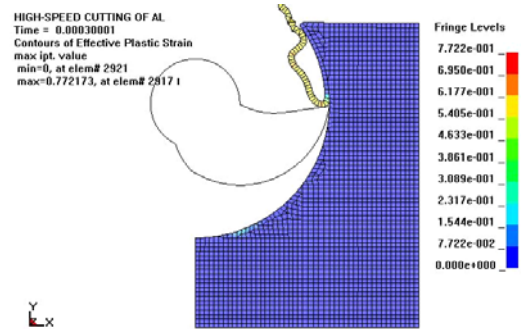


Fig. 5 Effective strain distribution for Al 7075

3. 전산해석 결과

3.1 변형률 속도를 무시한 경우

Fig. 5와 6은 변형률 속도를 고려하지 않고 전산해석을 수행한 유효소성변형률과 유효소성 v-M응력 (effective von Mises stress)의 계산결과이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 고속가공의 고속 충격 거동을 고려하지 않을 경우 요소번호 29,171에서 최대 유효변형률 0.772173을 갖는다. Fig. 6의 유효소성응력(v-M) 최대값은 요소번호 28,741에서 533.788으로 계산되었다.

이때 가공칩의 변형형상(deformation shape)은 길게 생성되는 것을 알 수 있다. 또한 생성된 칩과 가공면의 접촉 상태는 알 수 없더라도 자동적으로 처리되는 자체접촉(self contact) 기능을 사용하여 전산해석을 수행하였다. 이러한 기능은 복잡한 공구형상과 가공 칩과의 전산해석에 매우 유익할 뿐만 아니라, 접촉 조건(contact condition)의 상관 관계인 슬래브와 마스터(slave and master)와의 관계도 구분할 필요가 없어 편리하다 할 수 있다.

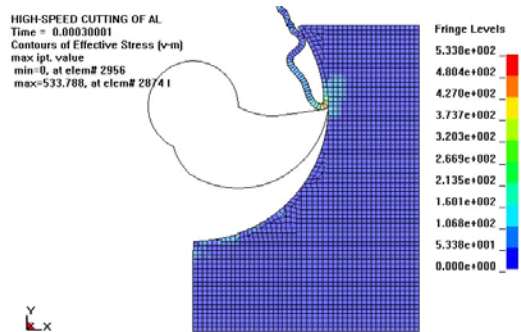


Fig. 6 Effective stress(v-M) distribution for Al 7075

3.2 변형률 속도를 고려한 경우

Fig. 7과 8은 변형률 속도 효과를 고려한 유효소성 변형률과 유효소성 v-M응력의 계산결과이다. 그리고 Fig. 7에서 보는 바와 같이 고속 거동을 고려했을 경우 요소번호 28,911에서 최대 유효변형률 0.2811을 갖는다. Fig. 8의 유효소성응력(v-M) 최대값은 요소번호 29,361에서 333.988으로 계산되었다. 이러한 값은

앞서 계산한 값들과 비교해보면, 변형을 속도효과를 고려할 경우, 최대 유효변형율과 최대 유효소성응력 (v-M) 값 모두 작아지는 것을 알 수 있다.

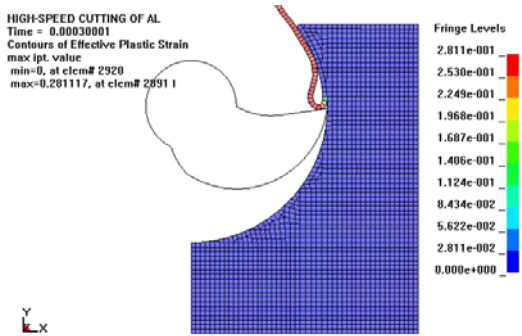


Fig. 7 Effective strain distribution considering the effect of strain rate

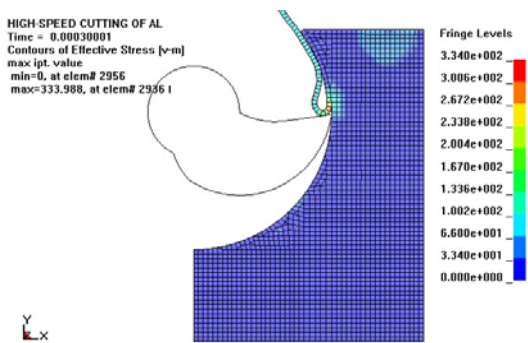


Fig. 8 Effective stress (v-M) distribution considering the effect of strain rate

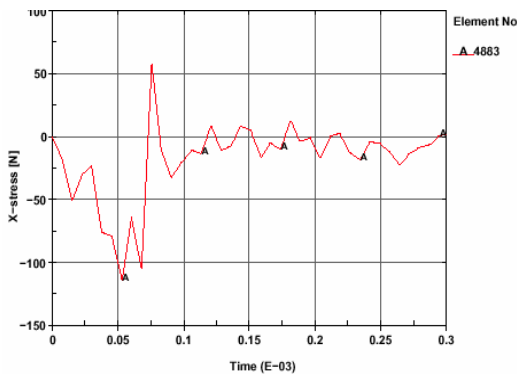


Fig. 8 Cutting force of x-direction obtained by computational analysis

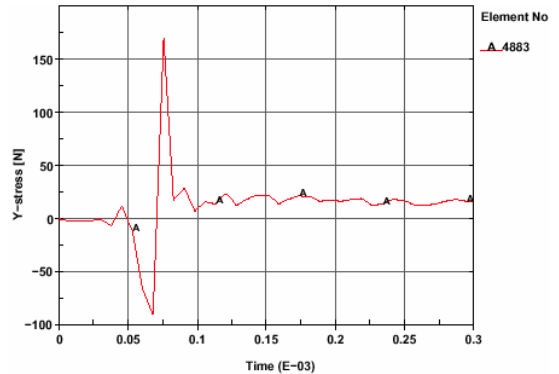


Fig. 8 Cutting force of y-direction obtained by computational analysis

3.2 시간에 따른 절삭력 해석

앞서 계산한 변형율과 응력분포 결과를 이용하여 후처리 과정을 통하여 시간 변화에 따른 x축과 y축의 응력의 변화를 산출한 결과가 Fig. 9와 Fig. 10과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 요소번호 4883번에서 0.003(sec)시간 동안 일어난 응력 값은 x 축, y축의 경우 각각 약 50 (N)과 150 (N)의 값을 갖는 것을 알 수 있었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 장치 구성도

Fig. 9은 실험 장치의 구성도와 시편의 크기를 나타낸 것이다. 공구동력계는 Kistler사의 9257A 2.3 kHz의 공구동력계를 사용하였고 검출되는 절삭력 신호의 변화거동을 관찰하기 위하여 오실로스코프(osilloscope)로 시각화 하였고, 신호를 증폭기(amplifier)로 증폭한 후 200MHz의 신호 획득 분해능을 가진 A/D변환기를 사용하여 얻어진 데이터를 컴퓨터에 저장하여 절삭력을 측정하였다.

Fig. 10은 실험장치를 통하여 측정된 절삭력의 그래프이다. 측정 결과 x축 및 y축의 절삭력은 각각 65(N), 50(N)임을 알 수 있었다. 본 실험에서 주축회전수(spindle rotational speed)는 50,000 (rpm), 이송속도(feed rate) 9,000 (mm/min), 공구 날당 이송(f_z , feed per tooth) 0.09 (mm) 그리고 공구 직경은 6.0 mm 를 사용하였다.

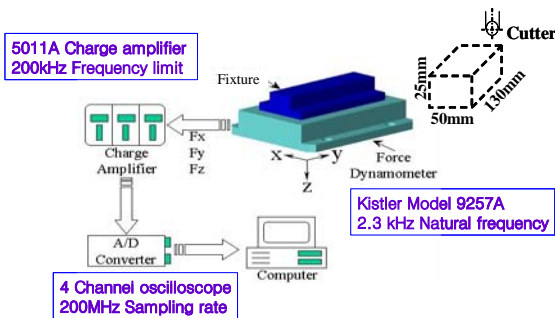
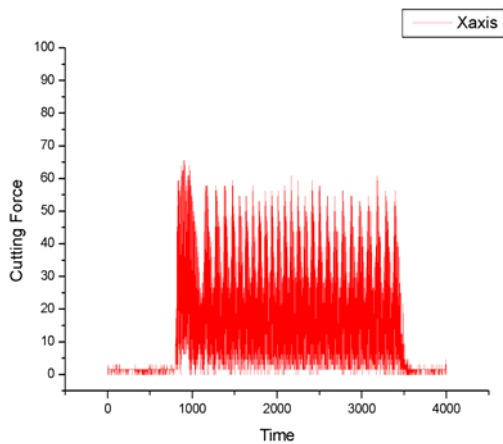
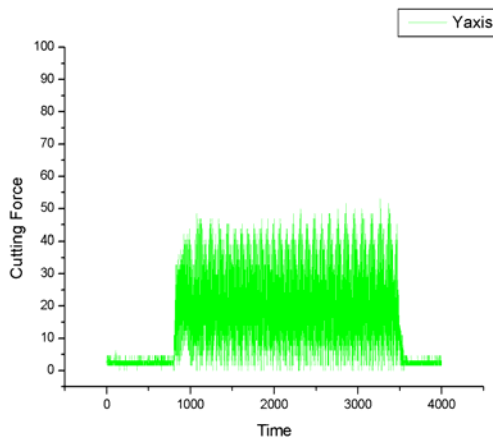


Fig. 9 Experimental set-up of high-speed machining



(a)



(b)

Fig. 10 Cutting forces at feed rate of 9,000 m/minn and at spindle speed of 50,000 rpm, (a) x-direction, (b) y-direction

4.2 절삭가공으로 생성된 칩 형상

Fig. 11은 가공속도에 따라 생성된 칩의 모양이다. 50,000(rpm)의 경우 절삭속도가 약 942m/min이며 이때 생성된 칩의 형상들이 Fig. 11의 하단 우측에서와 같이 실험 결과로 부터 얻었다.

발생된 칩의 형태는 앞장의 전산해석 결과와 비교한 결과, 형태적으로 동일하지 않지만, 변형율 속도를 고려한 경우와 매우 유사한 경향을 보여준다. 변형율 속도를 고려하지 않은 경우보다 유연한 칩 생성 경향을 보인다고 판단 할 수 있었다. 그리고 측정된 절삭력의 경우에도 전산해석의 결과와 비교한 결과 절대값은 차이를 보이지만 이 또한 유사한 경향이 보여주고 있다. 이러한 절대값의 차이는 전산 모델의 설정할 때 부여한 불완전한 공정상수를 가정한 차이들도 무시할 수 없다고 사료되어진다. 즉 가공시 발생하는 국부적인 고온의 온도를 전체적으로 일정하다고 가정한 것과 공구와 재료사이의 마찰계수를 일정하다고 가정한 것 등이 주요 원인들이었으며, 이외에 아주 짧은 시간 내에 발생하는 고속 동적/충격 거동의 현상에 대한 연구에 대한 전산해석이 갖는 한계를 보여준다 하겠다. 따라서, 전산해석기술과 병행한 고속가공의 공정에 대한 실시간 측정 기술이 반드시 병행되어야 할 것으로 생각되어진다.

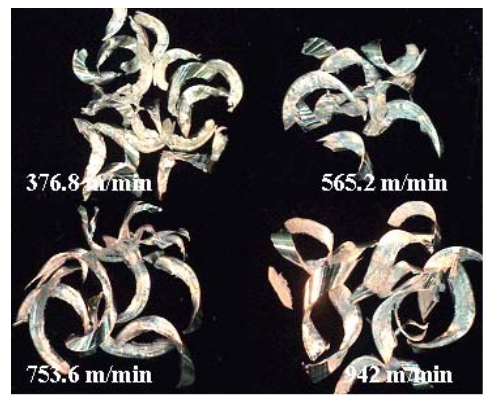


Fig. 11 Chips formation according to feed rate

5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 7075 재질의 고속 절삭가

공하는 유한요소 해석 모델을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고속 동적/충격 거동하는 알루미늄 재질의 고속 절삭 가공의 새로운 전산해석 모델을 제안하였다.
2. 특히 변형을 속도 효과를 고려한 해석 모델의 재료의 물성치를 규명하고, 해석모델에 적용하였다.
3. 제안한 동적, 충격 거동의 고속절삭 가공의 유한요소 해석을 수행한 결과들은 실험에서 얻은 측정치와의 차이가 있으며, 이러한 주요원인들은 마찰계수 및 열적 변형 거동 등으로 사료된다.

향후 보다 정확한 고속가공 현상을 규명하기 위해서는 전산 해석과 함께 고속 변형을 거동시 발생하는 마찰계수 및 국부적으로 발생하는 높은 온도 영향을 포함한 추가연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 교내학술 연구(4년 과제)에 의한 연구임을 밝히며, 또한 한국과학기술원 기계공학과 양동열교수님께 특별한 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Lee, E. S., Je, T. J. and Whang, K. H., "A New Rapid Manufacturing Process for Multi-face High-speed Machining," Int J Adv Technol, Vol. 22, pp. 68-74, 2003.
2. 신보성, 양동열, 최두선, 김기돈, 이웅숙, 제태진, 황경현, "절삭공정과 저융점금속에 의한 쾌속제작용 자동충진 공정개발," 한국 정밀 공학회지, 제19권 제3호, pp. 88 - 94, 2002.
3. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Lee, E. S., Je, T. J. and Whang, K. H., "Development of Rapid Manufacturing process by High-speed Machining with Automatic Fixturing," J. Mater. Proces. Technol. Vol. 130-131, pp. 363- 371, 2002.
4. 신보성 외, "절삭과 충전공정을 이용한 3차원 제품의 쾌속 제조방법 및 제조장치," 대한민국 특허 제 0383880호, 2003.
5. Kazuki, W. and Umezu, Y., "Cutting Simulation Using LS-DYNA3D," Third International LS-DYNA3D Conference 28th & 29th November, 1995.
6. Altan, T. et al., "Forging Equipment, materials and Practices," Metals and Ceramics Information Center, 1973.
7. <http://www.niagaracutter.com/coatings/>
8. Espinosa, H. D., Patanella, A. J. and Fischer, M., "Dynamic Friction Measurements at Sliding Velocities Representative of High-Speed Machining Processes," Transactions of the ASME, Vol. 122, 2000.