Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 27:4 (2018) 346~350

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.4.346

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

금형강의 하향절삭 시 절삭력 예측 및 실험에 대한 연구

정성택[a], 김성현[a], 김현정[a], 백승엽[a*]

Prediction and Experiments of Cutting Forces in Down Milling of Hardened Mold Steel

Sung Taek Jung[a], Seong Hyun Kim[a], Hyun Jeong Kim[a], Seung Yub Baek[a*]

[a] *Department of Mechanical Design Engineering, Induk University, 12, Choansan-ro, Nowon-gu, Seoul 01878, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:

Received	22	May	2018
Revised	2	July	2018
Accepted	9	July	2018

Keywords:
Cutting force
Finite element method (FEM)
Hardened mold steel
Down milling
Prediction

ABSTRACT

The vertical computer numerical control (CNC) milling machine is used in various industries and exhibits different proficiencies for different workers. Therefore, many companies have required the automation of the vertical milling machine to reduce human error. In this study, five cutting conditions were selected to predict the cutting force using the design of experiment, and the mechanical property of hardened mold materials was examined by a cutting experiment and FEM simulation The results show that for each cutting condition, the simulation value and experimental cutting force value are different; however, the differences have similar tendencies. In addition, the cause of deviation was analyzed to be friction and the mechanical property. In this study, we could examine the material property by simulation and experiment of the cutting force.

1. 서 론

최근에, 4차 산업이 들어오면서 공작기계를 이용한 ICT스마트 가공기술 개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이로 인하여 공작기계의 시장 상황에 대한 변화가 활발하게 변하고 있으며, 이는 국제적 경쟁력에 따라 제품의 수명 및 생산성 향상에 필연적이다. 특히, 경도가 높은 재료인 금형강과 같은 재료를 고속이송속도로 가공하기 위해서는 스마트 고속가공기가 필수적이며, 고속가공의 경우 이전의 범용장비와 비교하여 많은 이점을 제공한다[1]. 버(Burr)와 구선인선(Built-up Edge)의 발생을 최소화시키며 제품의 품질 향상을 기대할 수 있고 장비의 유효 가공시간을 단축시켜 다양한 제품군에 사용될 수 있다.

첫 번째로, 장비의 유지보수 비용 및 구매비용이 일반장비에 비해 비싸다. 두 번째로, 고속가공 중에 가공 부하가 많이 걸리며 잇따라 가공조건 선정에 어려움이 존재한다. 세 번째로, 복잡한 형상의 가공으로 인해 고도로 숙련된 작업자를 요구하며 이는 인건비의 상승으로 이어진다. 이러한, 단점에도 불구하고 고속가공기의 수요가 급증하고 있는 추세이다. 이와 더불어 고속가공기의 무인화를 위한 스마트 자동화 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 무엇보다도, 생산성 능률 및 무인화와 직접적인 관련이 있는 공구수명 예측에 대한 연구는 반드시 필요한 실정이다.

이 수요에 맞춰 많은 연구자들은 공구 수명에 대한 다양한 연구를 수행했다. H.Z. Li[2]은 상향과 하향 밀링의 절삭력의 비교분석을 통해 공구마모의 분석을 하였다. 또한, 마모메커니즘 해석모델

* Corresponding author. Tel.: +82-2-950-7525
Fax: +82-2-950-7539

E-mail address: sybaek@induk.ac.kr (Seung Yub Beak).

을 통해 기술되었으며, 다양한 센서 기술을 통하여 연구를 하였다[3-4]. Tugrul Özel은 고속가공에서 절삭력, 응력, 및 온도를 예측하기 위하여 유한요소해석을 사용하였고 특히, 금형강의 마모거동은 공구와 공작물 사이에서 매우 민감하다[5]. 시뮬레이션에 의한 절삭력 및 온도분포의 예측은 최적의 공구형상 및 가공조건을 도출할 수 있다[6]. Hansaki *et al*은 코팅된 공구를 이용하여 니켈합금 선삭가공 시 공구의 마모에 대해서 연구했다[7].

De Oliveira Junior *et al*는 공구수명을 연장 할 수 있고 가공면의 조도가 좋게 되는 효율적인 방법을 통해 실현 시켰다[8]. Wit Grzesik는 이송속도에 따른 공구수명에 대한 연구를 수행했다[9]. Nouari and Makich는 공구마모에 대한 절삭 변수와 칩 형성과정을 연구하였으며, 높은 절삭 온도와 높은 응력 발생으로 인한 공구마모과정을 발견했다[10]. 또한, Yann-Chang Huang는 신경망 회로를 사용하여 진단 분석에 적용했다[11]. Tetsutaro and Naotake는 절삭 공구 파손의 성공적인 예측과 검출을 위한 방법으로 데이터 처리 알고리즘에 적용했다[12].

앞선 연구결과들과 같이, 절삭가공에서 발생 된 공구 수명을 예측하거나 모니터링을 하기 위해 다양한 기법들을 적용하였다. 이러한 공구수명을 예측하기 위해서는 수많은 가공조건에 대한 데이터를 취합하여 분석하여야 한다. 하지만, 수많은 재료와 공구 중 에서 모든 재료의 물성 라이브러리(Library)를 구축하는 것은 경제적 어려움이 따른다. 또한, 모든 재료에 대하여 기계적 물성을 얻기 위해 역학적 시험 절차를 진행해야 하나 이 또한 어려운 상황이며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기계적 라이브러리를 확인하고자 시뮬레이션과 실험과의 절삭력 분석 결과를 통해 기계적 라이브러리를 확보하고자 방법론 적으로 접근하였다. 본 연구에서는 정보통신기술(Information and Communication Technology)을 이용한 스마트공작기계의 공구수명 예측 알고리즘 개발에 앞서 기계적 라이브러리를 확보하는 절차를 진행 하였으며, 이를 통해 금형 강 소재를 가지고 2D 절삭가공 해석과 가공실험을 통해 신뢰성 있는 물성 데이터를 검증하고자 절삭력 시뮬레이션 연구와 가공실험을 수행하였다.

2. 시뮬레이션 및 절삭력 실험방법

2.1 시뮬레이션

본 장에서는 금형산업(Mold Industry)에서 많이 사용되는 대표적인 피삭재를 선정하였고, 절삭력(Cutting Force)을 예측하기 위하여 절삭 시뮬레이션을 수행하였다. 이차원 절삭력 값을 확보하기 위하여 절삭가공 분야에서 사용되는 AdvantEdge 6.1[13]시뮬레이션을 사용했다. 사용하고자 하는 프로그램은 유한요소해석 기반의

Table 1 Material properties of hardened mold steel[15]

Thermal conductivity	34 W/m°C
Heat capacity	519 J/kg°C
Density	7,850 kg/m^3
Young's modulus	2.05E11 Pa
Alpha	0.0005 (1/°C)
Poisson's ratio	0.3

시뮬레이션으로서 절삭력, 온도, 공구응력의 결과를 볼 수 있으며 또한, 공구의 상태를 예측 할 수 있다.

본 시뮬레이션에서 다루는 기계적 재료의 물성은 Table 1과 같고 가공조건 선정은 공구수명과 공구부하에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 폭 절삭 깊이(Radial Width of Cut)에 대한 고려가 매우 중요하며 절삭 깊이와 피치 간격에 따라 공구에 걸리는 부하 및 수명도가 급격하게 차이 나기 때문에 본 연구에서는 공구의 선정을 직경 17 mm에 날 수가 2개인 공구를 선택하였고, 공구 직경의 30 %를 고려하여 5.6 mm를 절삭 하였다. Table 2는 시뮬레이션과 절삭력 실험 결과비교를 위해 사용될 가공조건 표를 나타내었다. 절삭 가공에서 고려해야 될 사항은 비선형구간에서 공구의 파손 및 온도에서 발생되는 열 유동(Heat Flow)과 대류열전달(Convection Force)을 고려해야 한다.

수학적 모델인 P-L (Power-Law) 식 (1)와 변형률 속도와 경화율을 표현하는 J-C (Johnson-Cook) 식 (2) 2가지 조건식이 존재한다[14]. 하지만, 이에 따른 물리적 수식은 각각의 재료에 따라 각기 다르게 반응될 수 있다고 사료된다. 본 시뮬레이션 에서는 이차원 하향절삭의 물성 모델을 Power-Law Model을 기반으로 해석을 진행하였다.

절삭력 시뮬레이션을 진행하기 위하여 하향밀링(Down Milling)에 대한 모습을 Fig. 1에서 보이고 있으며, 해석의 결과값을 보이기 위하여 가공길이(Cutting Length)를 5 mm까지 해석 수행을 하였다. 또한, 공구의 날 당 거동되는 절삭력을 확인하기 위하여, 윤활조건이 없는 건식(Dry) 조건에서 수행 하였다.

$$\sigma = (\epsilon^p, \dot{\epsilon}, T) = g(\epsilon^p) \times I(\dot{\epsilon}) \times \Theta(T) \quad (1)$$

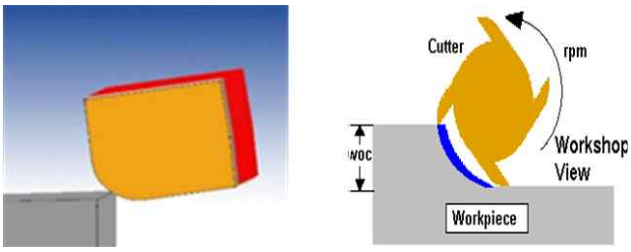

Fig. 1 Schematic illustration of operation in 2D model[13]

$$\sigma = (A + B_{\epsilon}^{n})\left(1 + Cln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}}\right)^m\right) \quad (2)$$

2.2 실험방법

절삭력 실험에서 사용된 장비는 산업현장에서 생산성 향상을 고려하여 고속 절삭가공을 요구하기 있기 때문에 트렌드 고려하여 고속 가공기를 사용하였고, 센서류의 선정은 절삭력의 3축에 대한 절삭력 신호를 받기 위해 Kistler사의 공구동력계(Dynamometer)를 사용하였다.

절삭력을 측정하고 있는 모습과 실험의 개략도를 Fig. 2에서 나타내고 있으며, 개략도에는 전반적으로 실험에서 다루는 장비 설치에 대한 내용을 다루고 있다. 절삭력 실험에서 사용된 소재는 금형강 소재의 사각재의 형상을 가지는 KP-4M(100×100×100 mm)와 인서트 타입의 날수가 2개인 17 mm의 공구를 선정하였다. 또한, 절삭력(Cutting Force) 실험을 진행하기 위해 측정 방식을 10초간 5000 Hz의 샘플링 타임을 선정하였고, 데이터의 양을 고려했을 때 단기적인(Short Term) 구간만을 측정하였다.

가공방법에 대한 툴 패스(Tool Path) 선정은 한 방향(Ony-Way)으로 하향밀링(Down Milling) 절삭 방법으로 정하여 평면가공 실험을 수행하였다. 하향밀링의 경우 주 절삭력(Main Cutting Force)의 받는 신호를 한 가지의 방향에서 보기 위하여 실험을 수행하였고, 지그재그(Zig-Zag) 방식의 툴 패스를 할 경우 공구의 부하가 심하게 작용되기 때문에, 하향밀링(Down-Milling)과 상향밀링(UP-Milling) 동시에 걸리게 된다. 따라서 본 실험에서 적용한 방법은 공구의 부하를 최소화 하기위해 One-Way방식의 하향밀링 방법을 선택 하였고, 윤활조건 또한 시뮬레이션 방법과 같은 동등한 환경조건으로 건식(Dry) 방법을 적용하였다. 실험에서는 절삭깊이, 이송속도 및 절삭속도 등 가공조건에 따른 가공특성 및 절삭력의 변화를 확인하고자 황삭 가공(Rough Machining) 조건을 무작위로 선정하였고 조건 표를 Table 2에서 보였다.

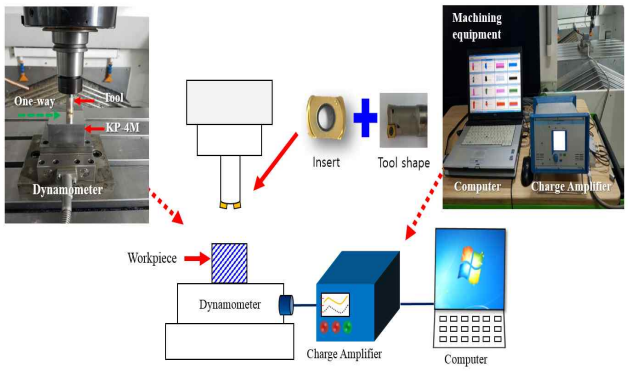

Fig. 2 Schematic of diagram experiment set-up

Table 2 Cutting force machining condition

No.	Factor		
	Spindle (RPM)	Feed (mm/min)	Depth of cut (mm)
1	2,500	1,800	0.8
2	3,500	1,800	0.5
3	4,800	4,300	0.5
4	2,500	3,150	0.5
5	3,500	4,300	1.0

절삭력 실험에서 황삭 조건을 선정한 이유는 공작기계에서 제품을 가공하기 위해 절삭성이 매우 중요하기 때문에 공구에 영향을 많이 받는 황삭 조건의 방법을 선정하였다. 또한, 황삭 가공 조건에 맞은 적정 실험 조건을 고려하여 실험을 진행하였다. 황삭 조건의 경우 대게 절삭 성 대비 가공시간을 줄이기 위해 빠른 이송속도로 가공을 하기 때문에 부하로 인한 공구의 손상이 있어 인서트의 수명을 단축시키는 것으로 초래될 수 있다. 현업에서는 제품을 가공하는 동안 공구를 지속적으로 오랜 시간 동안 사용할 수 있는 것을 선호 한다. 따라서 2절에서는 산업에서 일반적으로 사용하고 있는 피삭재 와 공구를 선정하여 실험 테이블 각 조건에 따라 주 절삭력 반응을 보기위한 실험 방법에 대한 개략도의 부분을 다루었으며, 결과 분석적인 내용은 3절에서 주 절삭력 상태 변화가 어떻게 일어나는지 자세히 다루고자 한다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3절에서는 절삭력 데이터에 대한 종합적인 결과를 다루고 시뮬레이션과 실험적인 내용을 분석하고자 한다. 이차원 절삭 시뮬레이션 의해 예측된 결과를 Fig. 3에서 주 절삭력 비교한 값을 그래프로 보이고 있다. 해석 결과에서 조건 5번(1010.34 N)과 조건 1번(601.382 N)을 비교 해볼 때 2가지의 조건이 가장 큰 값을 보이고

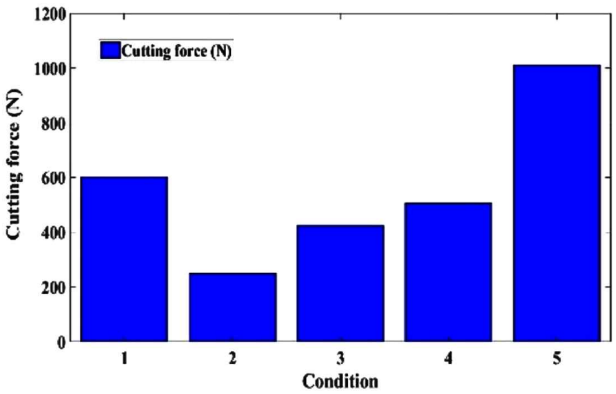

Fig. 3 Comparison of simulation result (condition vs cutting force)

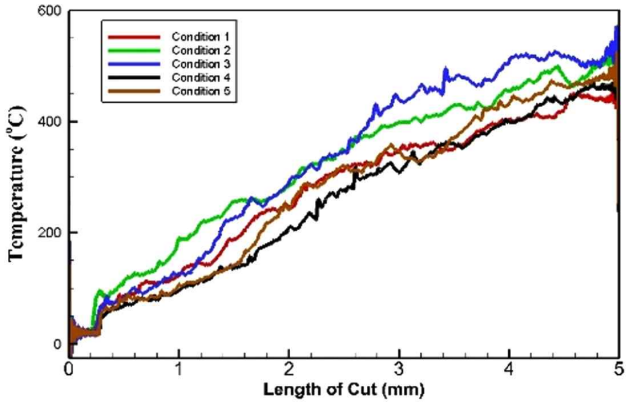

Fig. 4 Comparison of the simulation result (length of cut vs temperature)

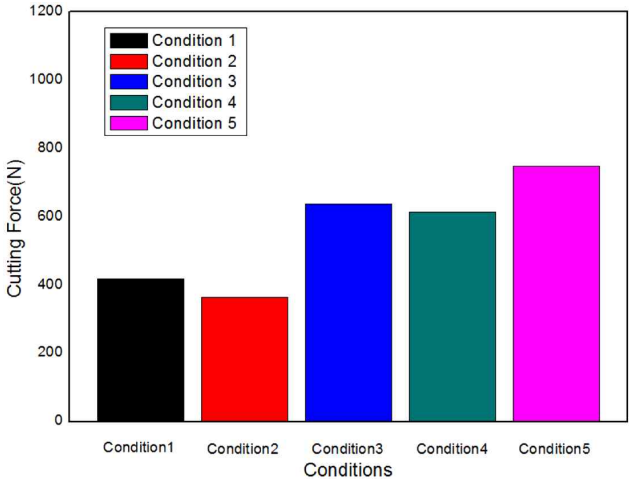

Fig. 5 Photograph in the experiments condition result

있으며, 반면에 조건 2번(250.198 N)의 경우 절삭력의 값이 가장 낮게 반응을 보였다. 조건 2번(RPM: 3,500, Feed: 1,800, Depth of cut: 0.5)의 경우 빠른 RPM회전 영역에서 이송속도가 다른 절삭 조건에 비해 느린 속도에서 절삭되기 때문에 절삭력 값이 현저히 낮게 반응된 것을 확인 되었었으며 또한, 절삭력 결과로 분석했을 때 주축에 대한 회전영역이 크므로 공구가 피삭재를 가공하는데 무리가 없어 보이며 절삭성이 좋은 것으로 분석된다.

절삭 시뮬레이션에서 각 조건에 대한 온도의 분포를 Fig. 4 (Length of cut vs Temperature)에서 보여주고 있다. 가공 실험에서 5가지 조건에 대한 주 절삭력의 결과 값을 Fig. 5에서 비교하고 있으며, 실험 결과와 시뮬레이션 해석 결과 비교 검증을 Fig. 6에서 분석하였다. 시뮬레이션에서 예측된 온도결과는 주 절삭력과 동일하게 구간 5 mm에서만 확인 하였다. 예측된 영향도는 가공이 진행됨에 따라 온도가 증가 추세를 보이고 있으며 5조건 모두 비슷한 경향을 보이고 있다. 본 연구에서 실험과 해석의 결과의 비교 목적은 앞선 내용과 같이 수많은 재료의 물성을 분석하는 것은 많은

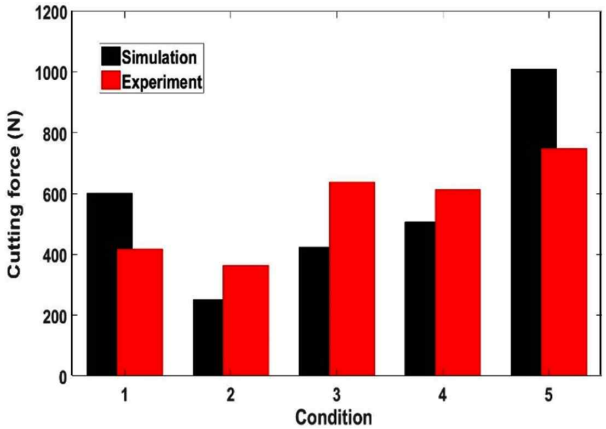

Fig. 6 Photograph of comparison between simulation and experiment

어려움에 있다. 따라서, 기계적 물성재료를 확보하여 다음과 같이 절삭력 비교 분석을 수행하였다.

절삭력을 비교 분석하기 위해 5가지의 조건에 대한 결과 치를 가지고 Bar 그래프로 보였고, 실험결과와 해석의 결과 값에서 심한 편차를 보였다. 비교 결과 주 절삭력에 대한 값의 차이가 1.5배 정도의 편차가 나는 것을 확인 하였다. 절삭력에 대한 영향도를 보았을 때 경향은 비슷하게 보이고 있으며 이에 따른 편차는 기계적 물성에 대한 정확한 DB의 문제인 것으로 분석 되어 진다. 그러나 조건 2번의 경우 예측 결과(250.198 N) 값과 실험에서(364.166 N) 나온 값이 유사 반응을 보이고 있다. 이는 조건에 따른 마찰 반응이 적게 반응을 보여 결과 값이 비슷하게 나온 것으로 보인다. 절삭속도가 빠르게 절삭을 진행하기 때문에 마찰 반응이 적게 일어난다고 가정 할 수 있다.

공작기계에서 가장 취약한 부분을 작용하는 것은 절삭 속도를 높이는 것이며 이는 값이 증가 할수록 절삭력에 대한 값은 상승한다. 따라서, 같은 5번 조건의 경우 시뮬레이션 예측(1010.34 N)과 실험 결과 값(747.04 N)이 가장 심하게 편차를 보이고 있으며, 이는 부적합 한 가공 조건을 사용 한 것으로 인해 발생된 원인으로 보인다. 스핀들의 회적속도 대비 이송속도가 첫째로 빠른 원인이며, 또한, 조건들에 비해 절삭 깊이를 과도하게 1 mm를 사용하여 가공을 수행하였기 때문에 다소 다른 조건과 많은 편차가 나타는 것을 분석하였다.

가공조건을 가지고 시뮬레이션 결과와 실험값을 검토한 결과 재료의 기계적 물성 검토가 필요하며, 실제 실험에서의 반응을 보인 주 절삭력에 대한 수치적 값들이 해석결과 값 보다 높은 수치를 보이고 있다. 이는 반대로 실제 실험에서의 환경적인 요인도 있으며, 예측을 하기 위한 해석조건의 문제로도 작용된다. 본 논문에서는 비교 결과를 통하여 경향을 분석에 따른 1차적 검토를 진행 하였고 다소 문제점으로 보여 지는 것을 추정 했을 때 원인은 기계적

물성치의 값에 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 절삭 성을 고려했을 때 현 산업에서 많이 사용하고 있는 금형 강 소재(KP-4M)를 선정하였고, 하향절삭 시뮬레이션과 가공실험을 진행 하였다. 황삭 가공조건 5가지를 선정하여 해석 결과와 실험값을 비교 검증을 진행하는 연구를 수행하였다. 해석에서 사용한 기계적 물성데이터는 KP-4M과 유사한 P-20의 재료의 물성을 확보하여 해석 결과 값 도출에 사용하였다.

(1) 2D-하향절삭 시뮬레이션에서 5가지의 조건을 가지고 건식 제약조건(Constraint Condition)에서 주 절삭력을 예측하였다. 높은 예측 값을 보인 조건은 5번 조건(1010.34 N)이며, 낮은 수치를 보인 것은 2번 조건(250.198 N)이다. 상기의 문제는 첫 번째: 절삭속도(187 m/min)와 같은 5번조건의 경우 절삭 깊이의 변수가 2번 조건에 비해 2배가 높은 문제가 있다. 두 번째: 고속가공으로 이송속도 또한 빠르게 작용된다. 상기의 내용을 종합 했을 때 예측된 결과 값이 1.5배 정도 편차가 생기는 것은 적정하다고 분석되어진다.

(2) 절삭력 실험결과와 예측 결과의 비교검증 절차를 진행 하였다. 두 가지의 결과를 비교 했을 때 각 조건마다 다소 심한 편차를 보이고 있으며, 이는 실험에 대한 환경적인 변수와 물성 조건의 요인으로 분석되어 지며, 조건 2번과 4번의 경우 100 N 범위 내에서 편차를 보이고 있어 차후, 예측 결과와 실험 결과에 대한 예측 정확도를 높이기 위해 연구들이 지속적으로 이루어질 필요가 있다.

후 기

본 논문은 기계산업핵심기술개발사업 과제번호(10060188) 연구비 지원으로 진행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

References

[1] Rao, B., Shin, Y. C., 2001, Analysis on High-Speed Face-ming of 7075-T6 Aluminum Using Carbide and Diamond Cutters, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41:12 1763-1781.

[2] Li, H., Zeng, H., Chen. X., 2006, An Experimental Study of Tool Wear and Cutting Force Variation in the end Milling of Inconel 718 with Coated Carbide Inserts, Journal of Materials Processing Technology, 180:12 296-304.

[3] Attanasio, A., Cerettiet, E., Fiorentino, A., Cappellini, C., Giardini, C., 2010, Investigation and FEM-based Simulation of Tool Wear in Turning Operations with Uncoated Carbide Tools, Wear, 269:5-6 334-350.

[4] Byrne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I., Ketteler, G., König, W., Teti, R., 1995, Tool Condition Monitoring (TCM) the Status of Research and Industrial Application, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 44:2 541-567.

[5] Özel, T., 2003, Modeling of Hard Part Machining: Effect of Insert Edge Preparation in CBN Cutting Tools, Journal of Materials Processing Technology, 141:2 284-293.

[6] Fallböhmer, P., Rodríguez, C., A., Özel, T., Altan, T., 2003, High-Speed Machining of Cast Iron and Alloy Steels for Die and Mold Manufacturing, Journal of Materials Processing Technology, 98:1 104-115.

[7] Hanasaki, S., Fujiwara, J., Touge, M., Hasegawa, Y., Uehara, K., 1990, Tool Wear of Coated Tools When Machining a High Nickel Alloy, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 39:1 77-80.

[8] De Oliveira Junior, C. A., Diniz, A. E., Bertazzoli, R., 2014, Correlating Tool Wear, Surface Roughness and Corrosion Resistance in the Turning Process of Super Duplex Stainless Steel, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 36:1 775-785.

[9] Grzesik, W., Rech, J., Żak, K., 2014, Determination of Friction in Metal Cutting with Tool Wear and Flank Face Effects, Wear, 317:1 8-16.

[10] Nouari, M., Makich, H., 2014, On the Physics of Machining Titanium Alloys: Interactions Between Cutting Parameters, Microstructure and Tool Wear, Metals, 4:3 335-358.

[11] Huang, Y. C., 2002, Abductive Reasoning Network Based Diagnosis System for Fault Section Estimation in Power Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, 17:2 369-374.

[12] Uematsu, T., Mohri, N., 1986, Prediction and Detection of Cutting Tool Failure by modified group method of data handling, International Journal of Machine Tool Design and Research, 26:1 69-80.

[13] Third Wave Advant Edge., 2014, User's Manual, Version 6.1, Minneapolis, USA.

[14] Ku, M. S., Kim, J. S., Kim, P. H., Park, J. H., Kang, I. S., 2011 Evaluation of Machining Characteristics in Micro-scale Milling Process by Finite Element Analysis and Machining Experiment, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20:1 101-107.

[15] Beak, S. Y., Kong, J. S., Jung, S. T., Kim, S. H., Jin, D. S., 2017, A Study on the Simulation for Prediction of Cutting Force in Milling Process, Transactions of The Korean Society of Mechanical Engineers A, 41:5 353-359.