

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 III

공구와 공작물의 상대적 변형량 예측을 위한 해석모델 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Analysis Model for Prediction of Relative Deformation between Cutting Tool and Workpiece

이문재^{1,✉}, 황영국¹, 이춘만^{1,✉}

Mun-Jae Lee¹, Young-Kug Hwang¹ and Choon-Man Lee^{1,✉}

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, Changwon National Univ.)
✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2010.2.4 / Revised: 2010.2.21 / Accepted: 2010.2.23

Any relative deformation between the cutting tool and the workpiece at the machining point, results directly in form and dimensional errors. The source of relative deformations between the cutting tool and the workpiece at the contact point may be due to thermal, weight, and cutting forces. This paper presents an investigation into dry and fluid machining with the objective of evaluating shape accuracy effect for the turning process of Al6061. The thermal distribution of cutting tool and cutting force was predicted using finite element method after measuring the temperature of the tool holder. To reach this goal, shape accuracy turning experiments are carried out according to cutting conditions with dry and fluid machining methods. The variable cutting conditions are cutting speed, depth of cutting and feed rate.

Key Words: Form error (형상 오차), Cutting Force (절삭력), Turning (선삭가공), Shape Accuracy (형상 정밀도), Relative Deformation (상대 변형량)

1. 서론

최근 기계가공 분야에서는 경제적, 환경적 등의 이유로 인하여 고속, 고정밀, 고능률 가공에 대한 요구가 급증하고 있다. 이에 따라 최종 가공물의 가공 오차의 원인을 파악하고 분석하는 것이 중요해지고 있다. 가공물의 가공오차의 주요 원인은 공작기계의 기하학적 오차, 열변형 오차 그리고 절삭력에 의한 공구의 변형오차를 들 수 있다.¹ 이러한 가공 오차를 최소화하기 위해서는 가공시스템의 개발과 함께 적절한 가공조건 선정이 대단히 중요하다. 가공조건은 절삭공구, 절삭조건,

가공재료 등과 같은 다양한 변수를 가진다. 이 중 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이와 같은 절삭조건은 가공오차에 직접적인 영향을 미친다.² 이에 절삭조건 변화에 따른 절삭성의 평가가 필요하다.³ 절삭과정 중 발생하는 절삭력, chip의 형태, 절삭온도, 공구마모 등의 방법에 의해 절삭성을 평가하기 위한 연구가 진행되고 있다.^{4,6} 최근에는 유한요소법을 통해 절삭가공 중 소성변형과 마찰열에 의한 시편과 공구에서의 온도분포, 절삭력과 잔류응력 등을 예측하는 많은 연구가 진행되고 있다.^{7,9} Shin 등¹⁰은 건삭, 습삭, MQL 가공에서 절삭조건이 가공물의 원통도에 미치는 영향을 분석하였다. 하지

만 대부분이 절삭공정 자체만의 이해에 대한 연구로 가공정밀도와 직접적으로 관계를 가지는 소재와 공구와의 상대적 변형량에 의한 실제 절삭깊이의 변화에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 Al6061 소재에 대한 원통외경 선삭실험을 수행하여 절삭력과 공구온도가 최종 가공물의 형상정밀도에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 또한 절삭조건의 변화에 따른 절삭력과 공구 온도 분포 등을 예측할 수 있는 유한요소해석 모델을 구축하여 공구와 공작물의 상대적 변형량을 예측하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

절삭가공 실험은 CNC 선반을 사용하였으며, 선삭가공시 가공조건이 형상정밀도에 미치는 영향을 파악하기 위해 Table 1 과 같은 실험장치를 사용하였다. Fig. 1 은 실험장치의 구성을 나타낸다. 절삭력은 압전식 공구동력계(Dynamometer)를 사용하여 측정하였고, 공구동력계로부터 전압을 증폭하기

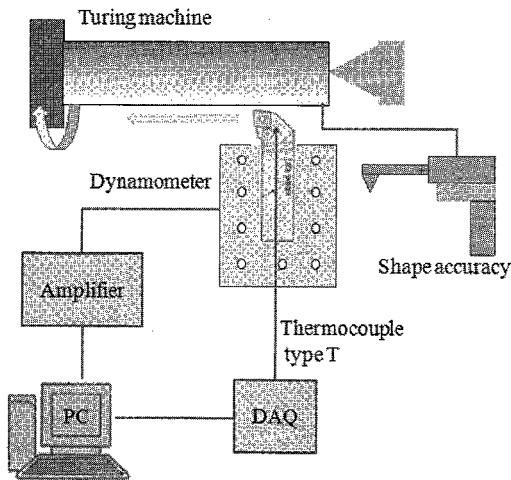


Fig. 1 Experimental set up

Table 1 Instruments and specifications

Instrument	Company	Specification
Turning machine	WIA	SKT 28
Dynamometer	Kistler	9257B
Charge amplifier	Kistler	5019
Shape accuracy tester	Optacom	VC-10

위하여 전하증폭기(Amplifier)를 사용하였다. 가공 후 피삭재의 형상정밀도 측정을 위해 축침식 형상 측정기를 이용하여 측정하였다.

2.2 시편 및 절삭공구

실험에 사용된 실험재는 Al6061 이며 Fig. 2 와 같은 형상과 치수로 시편을 가공하여 사용하였다.

절삭공구는 알루미늄 전용 절삭공구로 노즈반경이 0.4mm 인 인서트(CCGT 120404 FL K10, TaeguTek)를 사용하였다. 공구홀더는 외경 선삭용(SCLCL 2525 M1, TaeguTek)을 사용하였다.

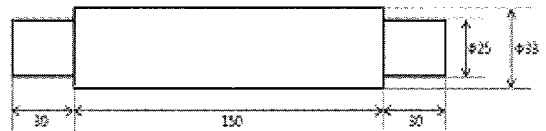


Fig. 2 Dimension of the specimen

2.3 실험방법

선삭가공 시 가공물의 형상정밀도에 영향을 미치는 여러 원인들 중 생산현장에서 작업자가 변경하기 가장 용이한 절삭 조건과 가공환경을 변화시켜 그에 따른 형상정밀도를 측정하여 분석하였다. Fig. 3 과 같이 시편과 공구를 장착하고 시편의 중앙부 150mm 를 원통 외경 선삭을 실시하였다. 실험과정에서 절삭력과 톨홀더의 온도를 실시간으로 측정하고 가공 후 가공물의 형상정밀도를 측정하였다.

실험을 위해 가공환경, 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이를 실험인자로 선정하여 각각 2 수준으로 실험배치를 하였으며 Table 2 는 실험배치를 보여주고 있다. 실험은 습식, 건식으로 분리하여 실시하였고 각 가공방식마다 8 회씩 총 32 회의 실험을 실시하였다. 가공물은 양단을 고정하였으며, 공구

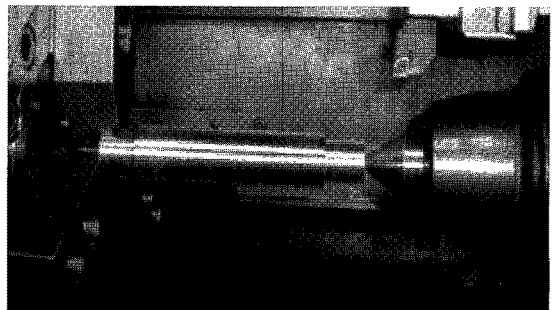


Fig. 3 Specimen set up

Table 2 Experimental conditions

Experiment No.	Cutting speed [m/min]	Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]
1	50	0.05	0.5
2	50	0.05	1
3	50	0.15	0.5
4	50	0.15	1
5	150	0.05	0.5
6	150	0.05	1
7	150	0.15	0.5
8	150	0.15	1

마모에 의한 영향을 배제하기 위해 각각의 실험마다 인서트를 교체하였다. 또한 각 시편마다 가공 조건을 동일하게 하기 위해 시편가공 후 툴홀더를 가공 전 초기 온도까지 상온에서 냉각시킨 후 다음 실험을 실시하였다.

Fig. 4 는 공구동력계와 열전대의 설치 모습을 나타낸다. 공구동력계는 전용치구를 이용하여 선반의 공구대에 장착하여 절삭력을 측정하였다. 측정된 신호는 전하증폭기로 보내져 증폭되고 증폭된 신호는 PC 에서 전용 프로그램에 의해 해석된다.

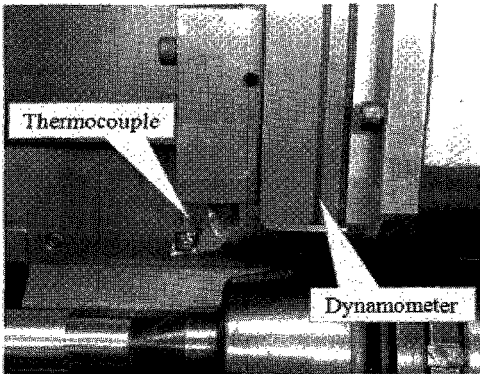


Fig. 4 Dynamometer and thermocouple set up

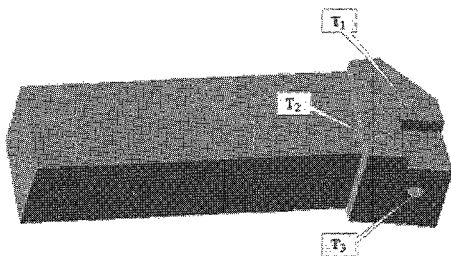


Fig. 5 Temperature measuring position of tool holder

가공 시 온도 측정을 위해 툴홀더 외부에 T 타입의 열전대를 설치하였다. 센서로부터의 신호는 DAQ 장비와 LabVIEW 를 이용하여 0.1 초 간격으로 받아들여 그 데이터를 저장하였다. Fig. 5 는 툴홀더에 설치된 열전대의 위치를 나타낸다.

형상정밀도 측정은 Optacom 사의 VC-10 을 이용하여 측정하였다. 가공시작점에서부터 150mm 까지의 형상정밀도를 측정한 다음 각각 10mm, 70mm, 130mm 의 3 지점에 대한 공작물 변형량을 산출하였다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 형상정밀도 측정사진과 변형량 측정지점을 나타낸다.

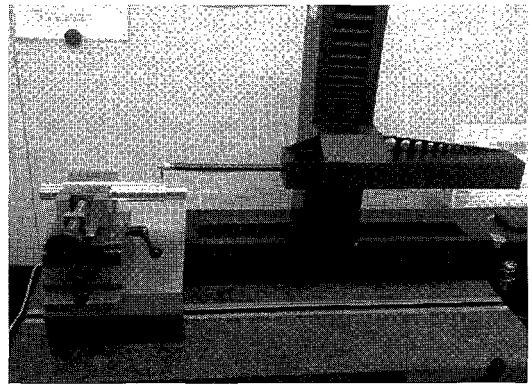


Fig. 6 Photograph of shape accuracy measuring

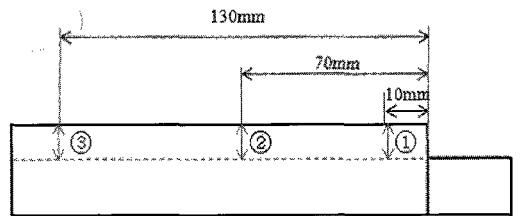


Fig. 7 Measuring points of shape accuracy

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭력

Fig. 8 은 건식과 습식가공에 대한 주분력은 Table 2 의 실험순서대로 나타낸 그래프이다. 절삭력은 절삭속도의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이는 알루미늄 가공 시 절삭속도가 증가하면서 소재의 인장력이 작아짐으로 칩 배출이 용이해지며, 또한 알루미늄 소재의 절삭가공 시 많이 발생하는 구성인선 현상이 고속가공에서는 많이 감소하여 절삭력이 감소되는 것으로 판단된다.

다.¹¹ 가공환경에 따른 절삭력은 습식가공에 비해 건식가공의 절삭력이 크게 나타났으나 그 차이가 절삭조건에 변화에 비해 크지 않은 것으로 나타났다. Table 3 은 실험결과 얻은 주분력(F_t), 이송분력(F_f), 배분력(F_r)을 보여준다.

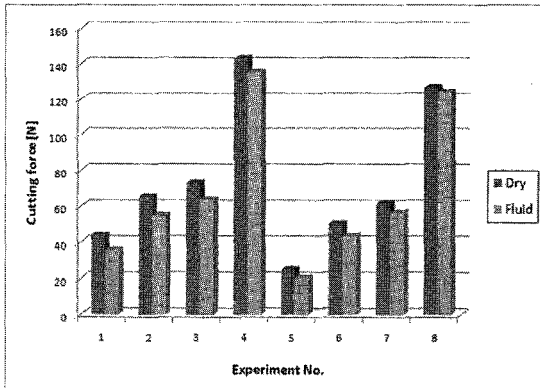


Fig. 8 Cutting force for each cutting conditions

Table 3 Experimental results for cutting forces

No.	Cutting force [N]					
	Dry			Fluid		
	F_t	F_f	F_r	F_t	F_f	F_r
1	43.9	25.4	18.3	35.5	15.2	8.1
2	65.2	36.8	12.6	54.7	25.2	9.4
3	72.9	28.8	20.9	63.4	26.8	18.2
4	143.1	61.4	11.9	135.2	46.4	4.5
5	24.9	9.7	7.9	20.3	8.2	5.1
6	50.4	20.9	7.6	43.4	18.6	3.5
7	61.5	20.4	14.8	56.3	19.6	10.5
8	126.8	45.8	22.5	124.2	45.6	15.2

3.2 온도

Fig. 9 는 건식가공에서 온도측정부의 최대온도 그래프를 나타낸다. 습식가공에서는 절삭유의 영향으로 온도변화가 나타나지 않았다.

온도변화는 절삭속도가 증가할수록 감소하였으며 절삭깊이가 증가할수록 온도는 증가하는 것으로 나타났다. T_3 위치에서 온도상승이 가장 크게 발생한 것은 가공 시 칩 배출이 원활하지 않아 칩 마찰에 의한 영향으로 사료된다. Table 4 는 초기온도에서 가공 시간 동안 변화한 공구온도를 나타낸다.

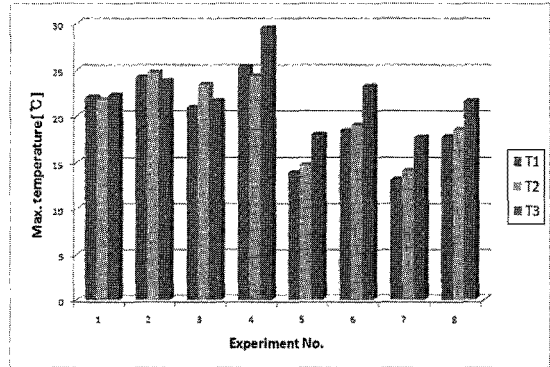


Fig. 9 Max. temperature for each cutting conditions

Table 4 Temperature change by experimental conditions

Experiment No.	δT_1 [°C]	δT_2 [°C]	δT_3 [°C]
1	10.5	10.3	10.7
2	12.7	13.2	12.3
3	9.4	11.9	10.1
4	13.8	12.8	18
5	2.4	3.2	6.5
6	6.9	7.5	11.7
7	1.6	2.6	6.2
8	6.3	7.1	10.1

3.3 형상정밀도

3.3.1 형상오차 예측

원통외경 선삭공정의 구조는 심압대로 지지되는 점에서는 편으로 모델링 하고, 주축의 척(chuck)에서는 굽힘 모멘트를 지지하는 편으로 모델링 할 수 있다.

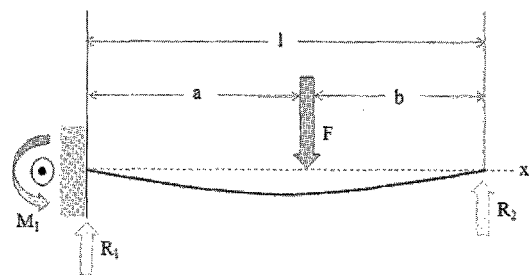


Fig. 10 Form errors in cylindrical turning of a shaft

주축의 평균 직경은 단순화를 위해 제거된 반경방향 절삭깊이를 고려한 직경으로 계산할 수 있다. 반경방향 절삭력(F_f)이 척으로부터 a 만큼 떨어

진 지점에 작용된다면 축 방향 위치 x 에서 부재의 반경방향 변형량은 식(1)로 구할 수 있다.¹²

$$y = \frac{Fbx^2}{12EI^3} [3l(b^2 - l^2) + x(3l^2 - b^2)] \quad (1)$$

여기서 E는 종탄성계수이고, I는 작업물의 단면 2차 단면모멘트이다.

Table 5는 식(1)과 실험을 통하여 구한 배분력을 사용하여 계산한 공구와 공작물 사이의 상대적 변형량을 나타낸다. Fig. 7에서와 같이 가공 시작점에서부터 10mm, 70mm, 130mm 지점의 변형량을 계산하였다.

Table 5 Results for relative deformation between cutting tool and workpiece

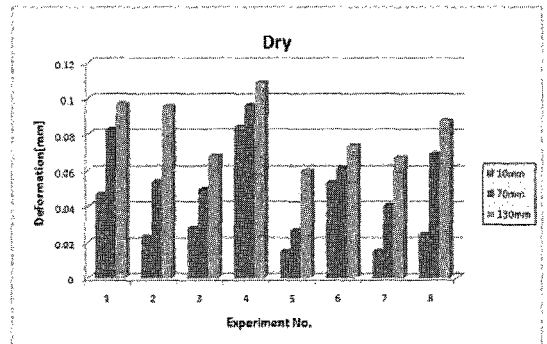
No.	Deformation[μ m]					
	Dry			Fluid		
	10mm	70mm	130mm	10mm	70mm	130mm
1	0.190	0.244	0.011	0.084	0.108	0.005
2	0.148	0.191	0.008	0.111	0.143	0.006
3	0.216	0.278	0.012	0.188	0.242	0.011
4	0.140	0.180	0.008	0.053	0.068	0.003
5	0.081	0.105	0.005	0.053	0.068	0.003
6	0.090	0.115	0.005	0.041	0.053	0.002
7	0.153	0.197	0.009	0.109	0.140	0.006
8	0.265	0.341	0.015	0.179	0.230	0.010

3.3.2 형상오차 측정

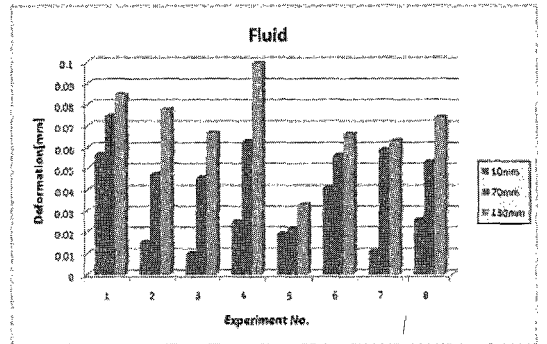
형상정밀도 측정은 Optacom 사의 VC-10 을 이용하여 측정하였다. 가공시작점에서부터 10mm, 70mm, 130mm 의 세 지점에 대한 공작물 변형량을 측정하였다. Fig. 11은 건식과 습식가공에서의 형상오차를 나타낸다. 형상오차는 절삭속도가 높을수록 작게 나타났으며 절삭깊이와 이송속도가 증가할수록 미소하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 절삭면적 증가에 의한 절삭력의 증가가 형상정밀도에 영향을 미친 결과로 판단된다. 실험순서 4 번에서 건식과 습식 모두 각각 0.108mm, 0.099mm 로 가장 큰 오차를 보였다. 이것은 Table 4의 온도 측정데이터에서 볼 수 있듯이 가장 큰 온도변화로 인해 공작물의 열변형이 가장 크게 일어난 것으로

판단된다. 또한 형상오차는 Fig. 9의 최고온도 그래프와 비슷한 경향을 보여주는데 이것은 형상오차에 공구와 공작물의 열변형이 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 실험순서 2번의 형상오차 측정 결과를 나타낸다. 절삭깊이가 1mm 이므로 측정 기준선(Base line)에서의 한쪽 평면 높이는 3mm 가 된다. 3mm 에서 각 지점의 측정값을 뺀 값이 형상오차를 나타낸다.



(a) dry cutting



(b) fluid cutting

Fig. 11 Form error results

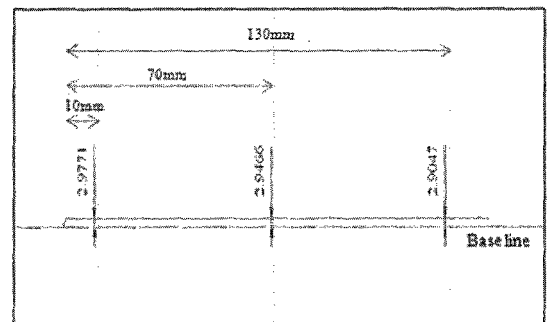
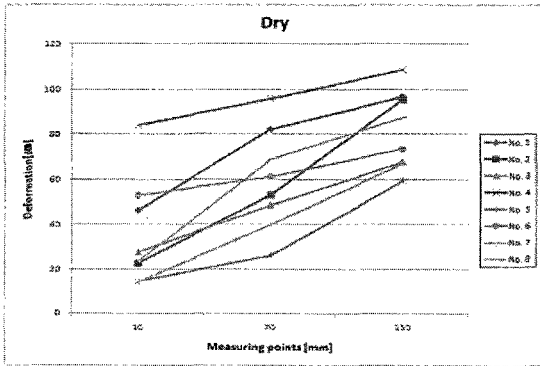
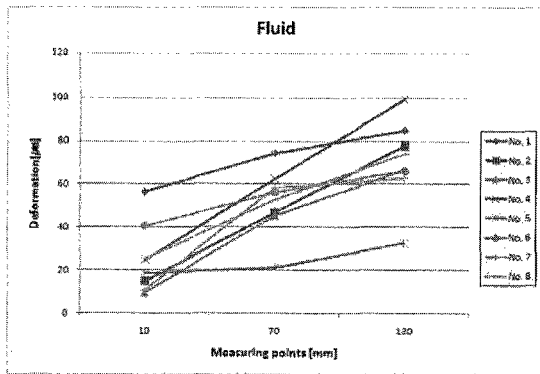


Fig. 12 Form error of experiment number 2



(a) dry cutting



(b) fluid cutting

Fig. 13 Thermal deformation results

Fig. 13 은 측정된 형상오차에서 배분력에 의한 형상오차 값을 제외한 열변형 오차를 나타낸다. 배분력에 의한 형상오차는 공작물의 중심부에서 가장 큰 오차를 보였지만 Fig. 13 의 그래프와 같이 절삭력에 의한 오차를 제외한 열변형 오차는 절삭 온도가 증가할수록 형상오차 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 그래프가 일정하게 증가하지 않는 것은 열변형 오차 외 가공오차, 측정오차 등이 포함된 것으로 판단된다.

4. 유한요소해석

앞장에서 실험한 절삭조건을 바탕으로 유한요소해석을 수행하였다. 절삭 상용 해석 프로그램인 AdvantEdge 를 사용하였으며 Fig. 14 는 실험조건 7 번(150m/min, 0.15mm/rev, 0.5mm)의 절삭시뮬레이션 결과를 나타낸다.

Fig. 15 는 AdvantEdge 를 이용하여 구한 절삭력과 최고 온도의 변화를 보여준다.

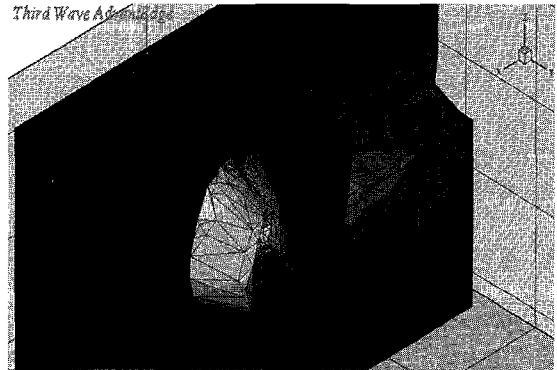


Fig. 14 The cutting simulation result

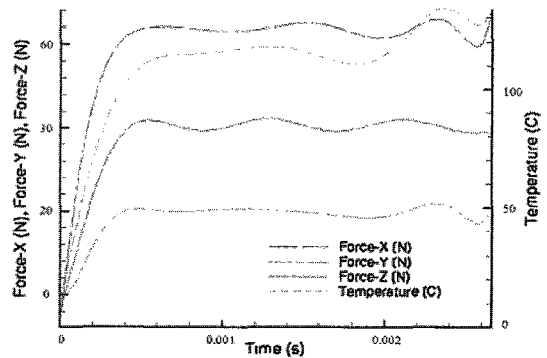


Fig. 15 Peak temperature and forces variation results

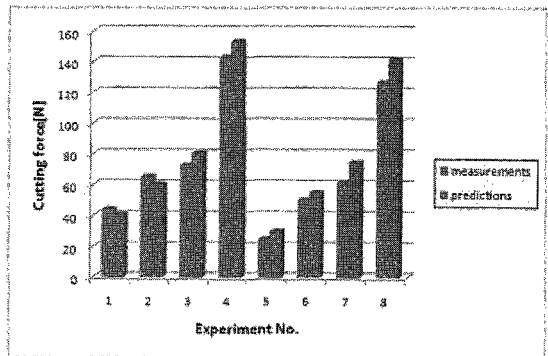


Fig. 16 Comparison results between predicted cutting force and measured cutting force

Fig. 16 은 실험에 의해 측정된 주분력 결과와 유한요소해석에 의해 예측된 주분력의 비교 그래프를 나타낸다. 절삭속도 50m/min, 이송속도 0.05mm/rev 인 실험번호 1, 2 번을 제외한 나머지 실험조건에서는 유한요소해석에 의해 예측된 값이 모두 크게 나타났다. 7~21%의 오차범위 내에서 일

치하였고 절삭속도가 작고 절삭깊이는 클수록 주분력 예측에 상당히 유용한 결과를 제공하는 것으로 나타났다. 이렇게 예측된 절삭력을 통해 많은 비용과 시간이 소모되는 실험을 통하지 않고 절삭조건 변화에 따른 공구와 공작물의 상대적 변형량을 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 A16061 소재의 선삭가공 시 건식, 습식과 같은 가공환경의 변화와 절삭조건에 따른 형상정밀도의 차이를 실험적으로 검증하고, 형상정밀도에 미치는 영향 분석하였다. 또한 유한요소해석을 통해 해석모델의 신뢰성을 검토하였다. 본 연구에서 수행한 가공조건의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 절삭력은 평균적으로 습식가공보다 건식가공에서 더 높게 나타났다. 절삭속도가 증가할수록 절삭력은 감소하였으며, 이송속도와 절삭깊이가 증가할수록 절삭력은 증가하였다. 툴홀더의 온도 변화는 건식가공에서 최대 13.8℃의 온도 변화가 발생하였으며 습식가공에서의 온도변화는 발생하지 않았다.

2) 형상오차는 습식가공보다 건식가공에서 더 크게 나타났으며 절삭력에 의한 형상오차는 미미한 것으로 나타났다. 형상오차는 온도변화에 가장 큰 영향을 받으며 온도가 증가함에 따라 형상오차가 증가함을 확인하였다.

3) 유한요소해석을 통해 절삭력과 온도분포를 확인하였다. 절삭력은 7~21%의 오차범위 내에서 일치하였고 절삭속도가 작고 절삭깊이는 클수록 절삭력 예측에 유용한 결과를 나타냈다.

후 기

본 연구는 2009~2010 년도 창원대학교 연구비와 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Oh, M. S., Yoon, I. J. and Baek, D. K., "Study of the Thermal Deflection Error and the Deflection Error Induced by the Cutting Force," Journal of KSIA, Vol. 5, No. 4, pp. 373-378, 2002.

2. Dornfeld, D. and Lee, D. E., "Precision Manufacturing," Springer, 2007.

3. Oh, S. H., "A Study on the Correlation between Machinability and the Cutting Condition in Machining Aluminum Alloy," Journal of KSMPE, Vol. 3, No. 4, pp. 56-62, 2004.

4. Sim, G. J., Cheong, C. Y., Oh, S. H. and Seo, N. S., "A Study on the Classification and Prediction of the Chip Type under the Specified Cutting Condition in Turning," Journal of KSPE, Vol. 12, No. 8, pp. 53-62, 1995.

5. Masuda, M. and Torri, M., "The Influence of Cutting Force on Boundary Failure of Cutting Tool," Journal of JSPE, Vol. 53, No. 10, pp. 1596-1601, 1987.

6. Levy, E. K., Tsai, C. L. and Groover, M. P., "Analytical Investigation of the Effect of Tool Wear on the Temperature Variations in a Metal Cutting Tool," Trans. ASME, Vol. 98, No. 1, pp. 251-257, 1976.

7. Shih, A. J., "Finite Element Analysis of Orthogonal Metal Cutting Mechanics," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 36, No. 2, pp. 255-273, 1996.

8. Kim, K. W. and Sin, H. C., "Development of a Thermo-Viscoplastic Cutting Model using Finite Element Method," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 36, No. 3, pp. 379-397, 1996.

9. Ng, E. G., Aspinwall, D. K., Brazil, D. and Monaghan, J., "Modelling of Temperature and Force When Orthogonally machining Hardened Steel," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, No. 6, pp. 885-903, 1999.

10. Shin, S. W., Hwang, Y. K. and Lee, C. M., "Correlation Analysis between Cutting Conditions and Cylindricity in MQL Turning," Journal of KSMPE, Vol. 8, No. 3, pp. 74-81, 2009

11. Choi, T. K., Kim, J. S., Park, J. H. and Lim, H. J., "The Machinability Estimation Depending on Cutting Condition in Al6061-T6 Turning Operations," Journal of KSMTE, Vol. 18, No. 6, pp. 675-680, 2009.

12. Joseph, E. S., Charles, R. M. and Richard, G. B., "Mechanical Engineering Design," McGraw-Hill, pp. 753-760, 2005.