

알루미늄 합금(AI7075-T651)의 얇은 벽 고속밀링 가공 시
가공표면 상태와 가공변형 특성구준영^a, 황문창^a, 이종환^b, 김정석^{c*}Investigation of Machined-Surface Condition and Machining Deformation
in High-Speed Milling of Thin-Wall Aluminum 7075-T651Joon-Young Koo^a, Moon-Chang Hwang^a, Jong-Hwan Lee^b, Jeong-Suk Kim^{c*}^a School of Mechanical Engineering, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea^b Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic Air Colleges,
46, Daehak-gil, Sacheon, Gyeongnam-do, 52549, Korea^c School of Mechanical Engineering / Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing,
Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	4	April	2016
Revised	3	June	2016
Accepted	9	June	2016

Keywords:

Aluminium alloy (Al7075-T651)
Thin-wall machining
High speed milling
Cutting signal characteristics
Machining deformation
Machined surface condition

ABSTRACT

Al alloys are useful materials having high specific strength and are used in machining of parts having thin-walled structures for weight reduction in aircraft, automobiles, and portable devices. In machining of thin-walled structures, it is difficult to maintain dimensional accuracy because machining deformation occurs because of cutting forces and heat in the cutting zone. Thus, cutting conditions and methods need to be investigated and cutting signals need to be analyzed to diagnose and minimize machining deformation and thereby enhance machining quality. In this study, an investigation on cutting conditions to minimize machining deformation and an analysis on characteristics of cutting signals when machining deformation occurs are conducted. Cutting signals for the process are acquired by using an accelerometer and acoustic emission (AE) sensor. Signal characteristics according to the cutting conditions and the relation between machining deformation and cutting signals are analyzed.

1. 서론

최근 자동차, 항공기와 같은 수송장비 산업에서 경량화를 통한 연료 효율성을 증대시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다^{1,2)}. 이를 위해 다양한 경량화 소재를 적용함으로써 구조물의 강성과 강도를 유지하면서 부품의 경량화가 급속히 이루어지고 있는 실정이다.

다양한 경량화 소재 중에서 알루미늄 합금은 비강도가 높은 소재로 얇은 벽 구조로 가공하여도 강성과 강도를 유지할 수 있는 매우 효과적인 소재이며 안전과 관련이 있는 자동차와 항공기의 기계구조용 부품의 소재로 사용되고 있다²⁾. 뿐만 아니라, 최근에는 견고함과 경량화가 필요한 개인용 휴대기기의 프레임 및 외관 구조물의 소재로도 사용되고 있다.

* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-2334

Fax: +82-51-518-7207

E-mail address: juskim@pusan.ac.kr (Jeong-Suk Kim).

알루미늄 합금은 높은 비강도로 인해 주로 얇은 벽 구조를 가지는 부품에 사용된다. 하지만 얇은 벽 구조물은 가공 시 절삭력과 가공열에 의해 가공변형이 발생할 가능성이 높으며, 이로 인해 형상정밀도 및 치수정밀도가 악화될 가능성이 높다. 또한 과도한 가공조건에 의해 발생하는 진동은 표면상태를 악화시킴으로써 가공 표면진전을 저해한다. 따라서 알루미늄 합금의 얇은 벽 구조물 가공에서 가공변형을 최소화하고 생산성을 보장할 수 있는 적합한 절삭조건을 선정하는 것은 매우 중요하다.

Ning 등^[3]은 유한요소해석을 통해 시편의 벽면에 일정한 힘을 가하여 얇은 벽 가공 시 변형을 예측하는 연구를 수행하였다. Seguy 등^[4]은 얇은 벽 형상 가공 시 가공조건에 따른 가공표면의 변화에 관한 연구를 수행하였다. Rai 등^[5]은 알루미늄 합금 가공 전용 지그의 설계를 통해 얇은 벽 가공 시 진동을 최소화하기 위한 연구를 수행하였다. Subramanian 등^[6]은 알루미늄 합금(AI7075-T6)의 밀링가공에서 엔드밀 공구의 공구형상변수와 절삭변수의 변화에 따른 진동가속도의 변화를 분석하였다. Lee 등^[7]은 외팔보 형태의 알루미늄 합금(AI7075)의 밀링가공에서 블엔드밀 공구의 소재 진입지점과 가공경로가 소재의 휨(deflection)과 진동에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

본 연구에서는 알루미늄 합금(AI7075-T651)의 얇은 벽 고속밀링 가공 실험을 통하여 절삭신호와 가공변형의 분석을 통해 가공변형 발생 시 신호특성을 파악하고자 한다. 주축회전속도와 반경방향 절삭 깊이, 그리고 날당 이송을 절삭변수로 하여 실험조건을 설계하고 가공실험을 진행하면서 가속도신호와 AE신호를 획득한다. 가공조건에 따른 얇은 벽의 가공표면 상태와 수직방향과 수평방향의 가공변형량을 각각 분석한 후 가공신호특성과 연관성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

가공조건에 따른 얇은 벽의 가공변형 상태 및 신호특성을 분석하기 위해 최대 20,000 rpm의 주축회전속도를 가지는 머시닝센터(V55, Makino)를 이용하여 밀링가공 실험을 수행하였다. 가공 시 발생하는 가속도신호를 획득하기 위해 가속도계(Type 4384, B&K)를 시편에 부착하였다. 또한 소재의 변형 및 절삭거동 시 발생하는 탄성파신호를 획득할 수 있는 AE센서(Pico 4431, PAC)를 시편에 부착하였다. 신호획득은 DAQ보드(PCI-4472, NI)를 이용하였으며 신호처리는 NI사의 Labview (Ver.2012, NI)를 이용하였다. 신호획득 시 샘플링레이트는 앨리어스현상을 방지하고 센서의 특성을 고려하여 가속도계는 51,200 Hz로 설정하고 AE센서는 1,000 kHz로 설정하였다. Fig. 1에는 실험장치에 대해 나타내었다. 실험에 사용된 알루미늄 합금은 AI7075-T651이며 항공기 및

자동차의 구조용 부품에 사용되고 있다. 소재의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 밀링가공은 10 mm의 공구경을 가지는 2날 엔드밀(CES2100-2500, Union Tool)을 이용하여 건식으로 수행하였다.

얇은 벽 형상 가공실험은 주축회전속도(spindle speed), 날당 이송(feed per tooth), 그리고 반경방향 절삭깊이(RDOC: radial depth of cut)에 따른 가공변형 상태 및 신호특성을 파악하기 위해 수행하였다. 사이드밀링가공을 수행하면서 가속도신호와 AE신호를 획득하였다. X축 방향을 이송방향으로 하고 축방향 깊이는 5.0 mm로 고정된 후 5스텝으로 가공하여 총 25.0 mm의 높이를 가지는 얇은 벽 형상을 가공하였다. 가공된 얇은 벽은 레이저변위 측정장치를 이용하여 가공변형량을 측정하여 각 가공조건별로 가공변형량 및 신호특성을 비교분석하였다. 알루미늄 합금의 얇은 벽 가공에서 주축회전속도, 날당 이송, 그리고 반경방향 깊이에 따른 가공변형 및 신호특성을 파악하기 위해 실험조건을 도출하였으며, Table 2에 나타내었다.

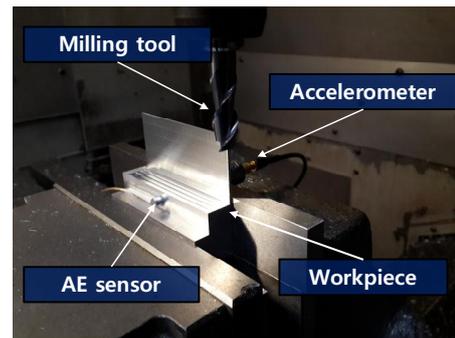


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Material properties of AI7075-T651^[8]

Density (g/cc)	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Poisson's ratio	Melting point (°C)
2.81	71.7	503.0	572.0	0.33	477.0

Table 2 Experimental conditions

Number	Spindle speed (rpm)	Feed per tooth (mm/tooth)	RDOC (mm)
1	3,000	0.05	3.5
2	15,000	0.05	3.5
3	9,000	0.01	3.5
4	9,000	0.09	3.5
5	9,000	0.05	0.5
6	9,000	0.05	6.5
7	9,000	0.05	3.5

3. 실험결과 및 고찰

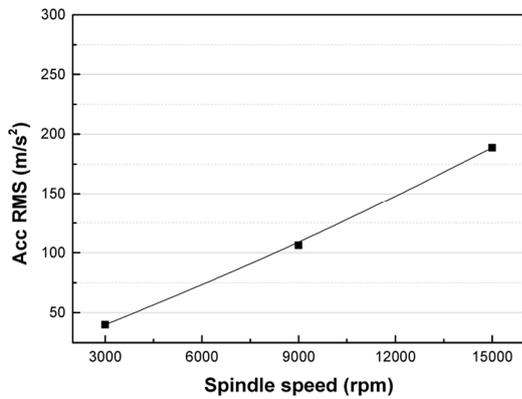
3.1 절삭신포

3.1.1 가속도 RMS

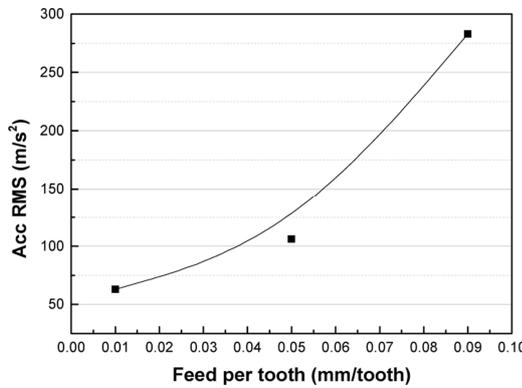
Fig. 2에 가공조건에 따른 가속도 RMS의 변화를 나타내었다. Fig. 2(a)에서 주축회전속도가 증가함에 따라 가속도 RMS는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 절삭속도 증가에 따른 충격 증가에 의해 발생한 현상으로 사료된다. Fig. 2(b)에서 날당 이송이 증가함에 따라 가속도 RMS가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 소재

제거율의 증가에 따른 절삭력 증가에 의한 것으로 판단된다. Fig. 2(c)는 반경방향 절삭깊이에 따른 가속도 RMS의 변화를 보여준다. 반경방향 절삭깊이가 증가함에 따라 가속도 RMS가 감소하는 경향을 나타내었다.

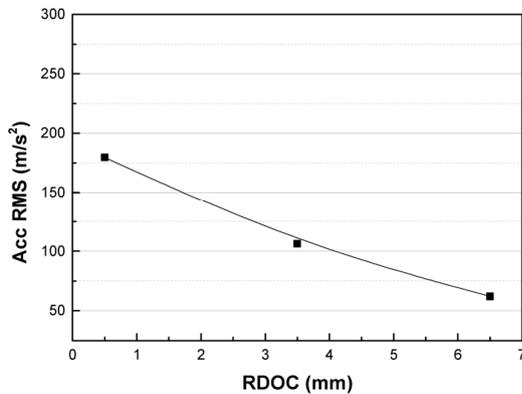
이는 얇은 벽의 최종두께인 0.5 mm를 만족시키기 위한 가공초기 두께의 차이에 기인하는 것으로 사료된다. 반경방향 깊이가 0.5 mm인 가공은 1.0 mm의 두께를 가지는 벽을 가공하고, 반경방향 깊이가 6.5 mm인 가공에서는 7.0 mm의 두께를 가지는 벽을 가공함으로써, 초기 소재의 강성차이에 기인하는 문제로 판단된다. 이러



(a) Spindle speed

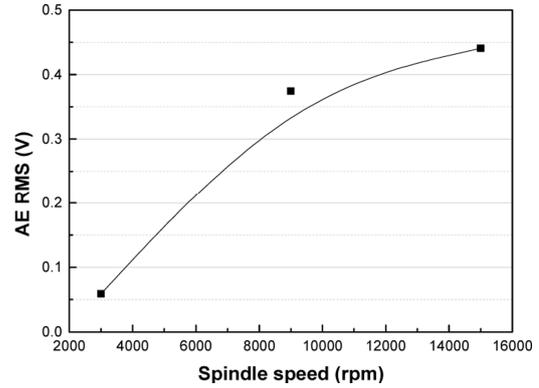


(b) Feed per tooth

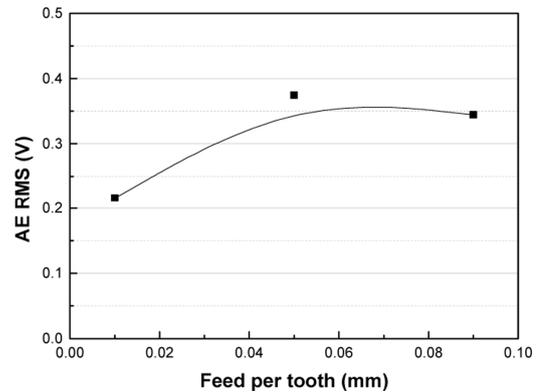


(c) Radial depth of cut

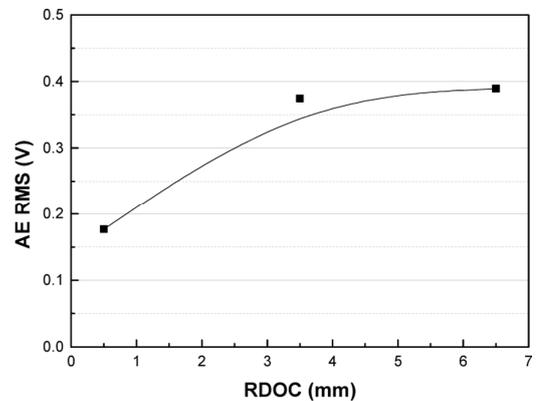
Fig. 2 Changes in Acceleration RMS



(a) Spindle speed



(b) Feed per tooth



(c) Radial depth of cut

Fig. 3 Changes in AE RMS

한 현상은 최종적으로 가공표면 상태 및 가공변형에 영향을 미친다.

3.1.2 AE RMS

Fig. 3에는 가공조건에 따른 AE RMS의 변화를 나타내었다. 주축회전속도가 증가함에 따라 AE RMS가 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 3(b)에서 AE RMS는 날당 이송이 증가함에 따라 증가하다가 0.09 mm/tooth의 날당 이송에서는 소폭 감소하였다. Fig. 3(c)에서 AE RMS는 반경방향 깊이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 날당 이송과 반경방향 깊이의 증가에 따른 신호값의 변화는 소재의 절삭에너지와 관련이 있는 것으로 사료된다. 이러한 현상은 반경방향 절삭깊이가 증가함에 따라 소성변형 영역이 커지고 절삭가공에 소요되는 에너지가 증가하기 때문으로 사료된다.

3.2 가공표면 상태

Fig. 4는 가공조건에 따른 가공표면상태의 변화를 보여준다. 주축회전속도가 3,000 rpm일 때 가공표면상태가 양호하며 공구의 툴마크가 거의 나타나지 않는다. 하지만 주축회전속도가 15,000 rpm일 때는 불규칙한 툴마크가 관찰되며, 표면상태가 불량하다. 이는 소재의 진동에 의한 것으로 진동가속도수치가 높은 것과

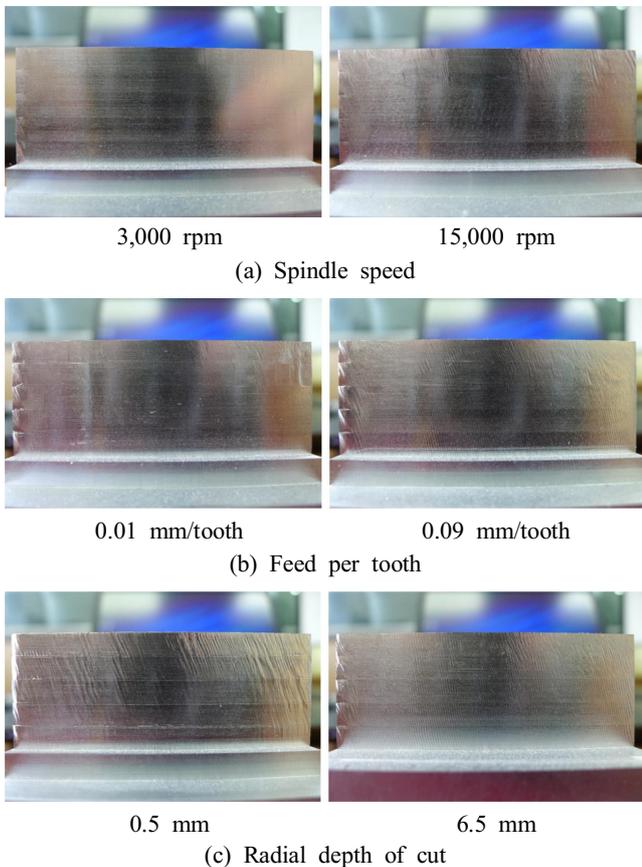


Fig. 4 Machined surface condition

상당한 관련이 있는 것으로 판단된다. 0.01 mm/tooth의 날당 이송에서 표면상태는 양호하였으나, 0.09 mm/tooth의 날당 이송에서 진동에 의한 불규칙한 공구마크가 관찰되며, 이에 따라 표면상태가 불량하였다. 0.5 mm의 반경방향 절삭깊이에서 표면상태는 불량하며, 진동에 의한 불규칙하고 깊은 공구마크가 관찰되었다. 반면에 반경방향 깊이가 6.5 mm인 가공에서 상대적으로 양호한 표면이 관찰되었으며, 이는 소재의 초기 두께차이에 의한 강성차이로 발생한 문제로 사료된다.

가공표면 상태와 절삭신호와의 관계를 파악하기 위해 실험 1번의 가공표면과 가공영역에 따른 절삭신호를 Fig. 5에 나타내었다. 절삭가공의 시작점과 종료점에서 공구의 접촉에 의한 충격으로 가속도신호가 가장 크게 측정되었다. 얇은 벽의 상단부인 Area-A에서 가공형상이 가지는 특성으로 인해 진동이 가장 크게 발생함을 확인하였다. 절삭신호에서 진폭의 변화가 상대적으로 크며 표면에 툴마크가 깊게 생성되었다. 얇은 벽의 하단부인 Area-B는 강성이 큰 영역으로 진동가속도와 AE RMS의 수치가 상대적으로 낮으며, 표면상태가 상대적으로 양호하였다.

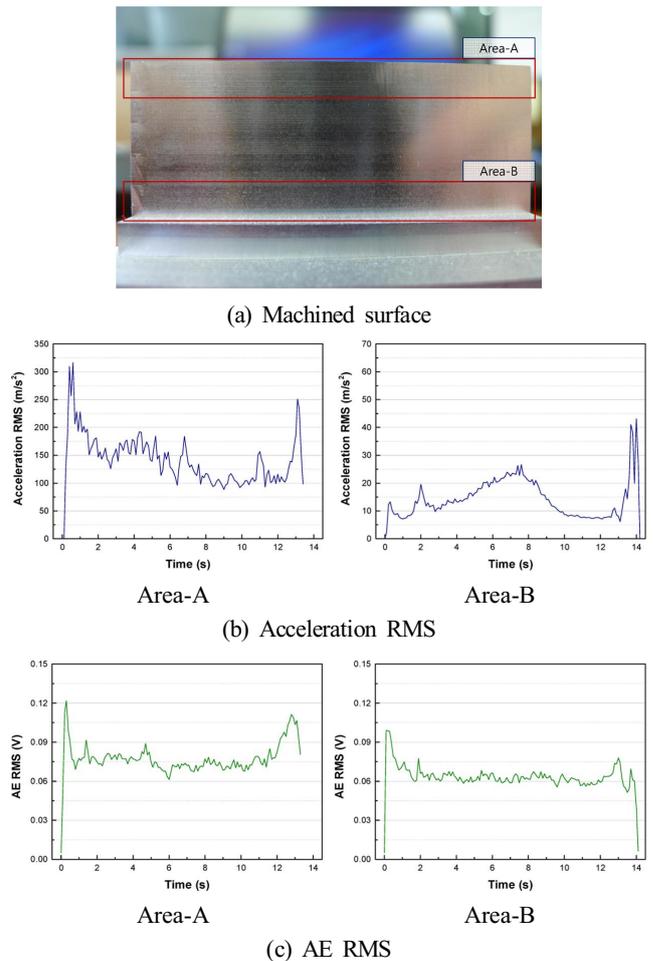


Fig. 5 Machined surface and cutting signals according to machining area

Fig. 6에는 Area-A와 Area-B의 절삭신호에 대한 주파수영역 분석을 통해 도출한 워터폴(waterfall)그래프를 나타내었다. Area-A의 가공에서 가공시작점과 종료점에서 고주파수 영역인 5,000~6,000 Hz에서 높은 수치가 관찰되었다. 반면에 소재의 가운데 영역에서는 상대적으로 낮은 주파수 영역에서 진동이 발생하였다. Area-B의 가공에서 낮은 주파수 대역에서 진동이 관찰되었으며, 가공표면 상태도 양호하였다. 이러한 현상은 소재의 형상에 의한 것으로 판단된다.

3.3 가공변형

Fig. 7은 비접촉 레이저측정기를 이용하여 측정된 가공표면의 프로파일데이터를 이용하여 가공표면을 3차원 표면그래프로 나타내었으며, 이를 이용하여 표면형상을 분석하고 가공변형량을 측정하였다. Fig. 8에는 절삭조건에 따른 수평방향 가공변형량의 변화를 나타내었다. 주축회전속도가 9,000 rpm일 때 감소하다가 15,000 rpm에서 약간 증가하는 특성을 보였다. 날당 이송이 증가함에 따라 가공변형이 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 MRR의 증가에 의한 절삭력의 증가에 의한 것으로 사료된다. 반면에 반경방향 깊이가 증가함에 따라 수평방향 가공변형량은 감소하는 경향을 나타내었다. 0.5 mm의 두께를 가지는 얇은 벽을 가공하기 위해 반경방향 깊이가 0.5 mm인 가공조건에서는 1.0 mm의 두께를 가지는 소재를 가공하였다. 이로 인한 낮은 강성으로 인해 가공시 진동이 발생하고, 변형량이 상대적으로 증가한 것으로 판단된

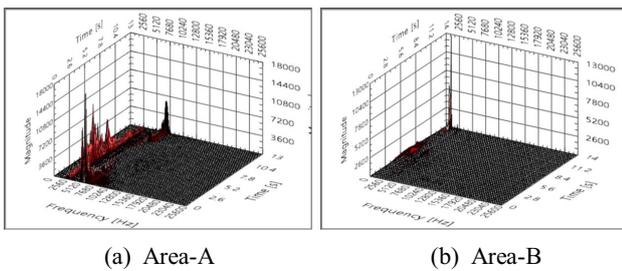


Fig. 6 Waterfall graph according to machining area

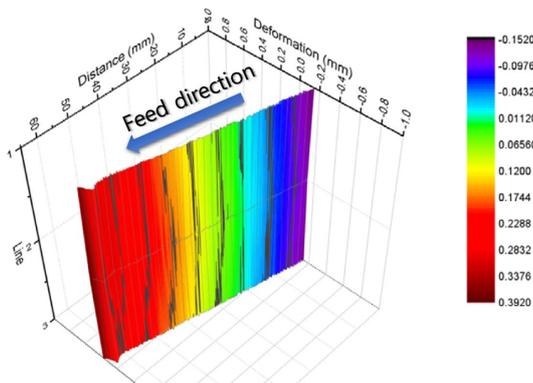
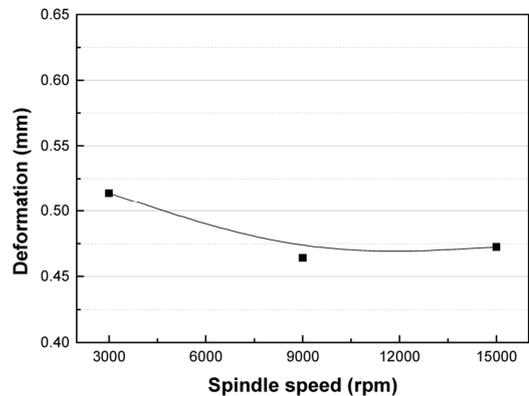


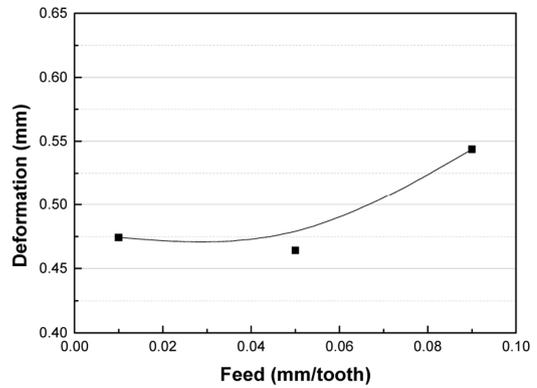
Fig. 7 3D surface graph

다. 따라서 얇은 벽 형상가공의 가공품질을 보장하기 위해서 소재의 진동과 변형을 고려한 적절한 반경방향 깊이의 선정이 필요한 것으로 판단된다.

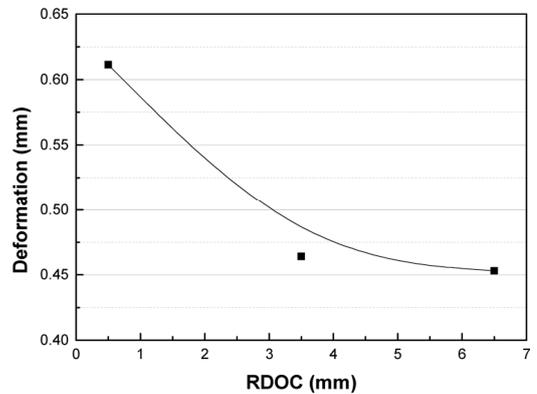
Fig. 9에는 절삭조건에 따른 수직방향 가공변형량의 변화를 나타내었다. 주축회전속도가 증가함에 따라 가공변형이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 날당 이송이 증가함에 따라 가공변형이 증가하는 경향을 나타내었다. 반면에 반경방향 깊이가 증가함에 따라 수평방향 가공변형량은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 수평방향변형에서 발생한 현상의 원인과 같은 것으로 판단된다. 수직방향 가공변형량의 변화는 진동가속도신호의 변화와 유사한 경향을 나



(a) Spindle speed

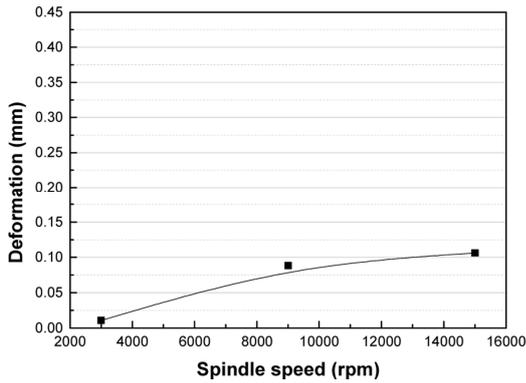


(b) Feed per tooth

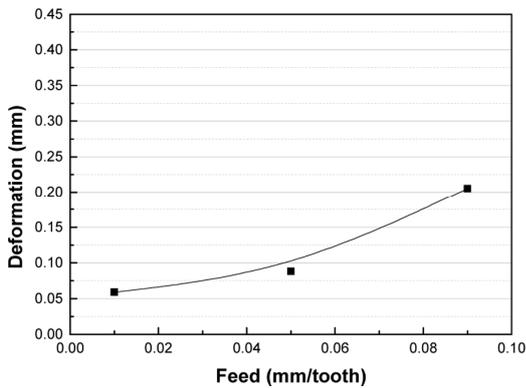


(c) Radial depth of cut

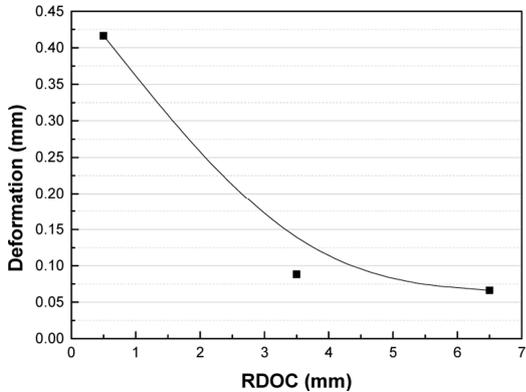
Fig. 8 Deformation of horizontal direction



(a) Spindle speed



(b) Feed per tooth



(c) Radial depth of cut

Fig. 9 Deformation of vertical direction

타내었으며, 이를 통해 가공변형의 상대적인 예측이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 알루미늄합금(Al7075-T651)의 얇은 벽 밀링가공의 절삭신평특성과 가공변형 및 표면상태 분석을 수행하였으며 이를 바탕으로 다음의 결론을 도출하였다.

주축회전속도와 날당 이송의 증가에 따라 진동이 증가하고 이로 인한 불규칙하고 깊은 공구마크가 가공표면에 생성되어 얇은 벽의

표면건전성이 저하됨을 확인하였다. 반경방향 절삭깊이가 작을 경우(0.5 mm) 표면상태가 불량해지며 가공변형이 상대적으로 크게 발생함을 확인하였다. 얇은 벽 상단부에서 양단은 진동에 의해 가공표면상태가 불량해지며 고주파수 영역(5,000~6,000 Hz)에서 높은 수치가 관찰되었다. 얇은 벽 가공에서 가공영역별 절삭신평 및 가공표면 특성을 고려하여 생산성과 가공품질을 위해 가공위치에 따른 적절한 가공조건의 선정이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2012R1A1A2040824).

References

- [1] Mohan, K. S., Pramod, R., Shashi, K. M. E., Govindaraju, H. K., 2014, Evaluation of Fracture Toughness and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 7075, T6 with Nickel Coating, *Procedia Engineering*, 97 178-185.
- [2] Odeshi, A. G., Adesola, A. O., Badmos, A. Y., 2013, Failure of AA6061 and 2099 Aluminum Alloys under Dynamic Shock Loading, *Engineering Failure Analysis*, 35 302-314.
- [3] Ning, H., Zhigang, W., Chengyu, J., Bing, Z., 2001, Analysis on High-speed Face-milling Of 7075-T6 Aluminum using Carbide and Diamond Cutters, *Int. Journal of Machine Tool and Manuf.*, 41:12 1763-1781.
- [4] Seguy, S., Dessein, G., Arnaud, L., 2008, Surface Roughness Variation of Thin Wall Milling, Related to Modal Interactions, *Int. Journal of Machine Tools and Manuf.*, 48:3/4 261-274.
- [5] Rai, J. K., Xirouchakis, P., 2008, Finite Element Method based Machining Simulation Environment for Analyzing Part Errors Induced During Milling of Thin-walled Components, *Int. Journal of Machine Tool and Manuf.*, 48:6 629-643.
- [6] Subramanian, M., Sakthivel, M., Sooryaprakash, K., Sudhakaran, R., 2013, Optimization of End Mill Tool Geometry Parameters For Al7075-T6 Machining Operations based on Vibration Amplitude by Response Surface Methodology, *Procedia Engineering* 64:10 690-700.
- [7] Lee, C. M., Kim, S. W., Choi, K. H., Lee, D. W., 2003, Evaluation of Cutter Orientations In High-speed Ball End Milling of Cantilever-shaped Thin Plate, *Journal of Materials Processing Technology*, 140:1/3 231-236.
- [8] Matweb, n.d., viewed 8 May 2015, <<http://www.matweb.com>>.