

Al2024의 고속 정면밀링 가공에서 표면 거칠기에 관한 연구

장성민^{1*}

¹조선이공대학교 선박해양·기계과

A Study on Surface roughness in High speed face milling machining of Al2024

Sung-Min Jang^{1*}

¹Dept. of Naval Architecture & Mechanics, Chosun College of Science & Tec.

요 약 항공기와 자동차 부품과 관련된 많은 제조업에서, 낮은 비중과 높은 강도에서 뛰어난 알루미늄 합금(Al2024)은 효과적으로 사용되었다. 가공소재의 표면거칠기 품질을 위한 정면밀링 가공기술은 이들 분야에서 적용되어 왔다. 챔퍼된 드로우 어웨이 타입의 인서트를 갖는 정면밀링 가공은 단지 이론적으로 완전한 평면을 생산할 수 있다. 그러나 그것은 절삭온도, 소성변형, 동적효과 등으로 인하여 불가능하다. 본 논문에서 실험적 연구는 검증된 고속가공이 가능한 정면밀링커터 바디를 사용하여 Al2024의 고속가공 후 표면거칠기를 개선하기 위하여 수행되었다.

Abstract In many manufacturing such as the components of airplane and automobile, aluminum alloys(Al2024) which remarkable in low specific gravity and high strength have been utilized effectively. Face milling machining technology for surface roughness quality of workpiece has been applied in these fields. A face milling machining with chamfered throw away type insert tip can produce a perfect flat surface only in theory. But It is impossible because of many unwanted factors, namely, cutting temperature, plastic deformation, dynamic effect, etc. In this paper, experimental investigations are performed to improve surface roughness after high speed machining of Al2024 using qualified face milling cutter body for high speed machining.

Key Words : Al2024, Face milling cutter body, high speed machining, plastic deformation, surface roughness

1. 서론

알루미늄 합금을 피삭재로 하는 밀링가공은 항공분야 부품생산에 적용되어 왔으며, 현재 자동차 엔진블록 등 그 활용범위가 확대되었다. 고속가공용 공구는 금형제작 등에서 플랫 또는 볼 엔드밀의 사용이 일반적이다. 그러나 엔드밀 공구는 소재의 제거율을 높이는 데에 비효율적이다. 특히 평면 가공에서 생산성 향상을 위해서는 재료 제거율을 높일 수 있는 정면밀링커터의 사용이 요구된다. 일반적으로 사용되고 있는 탄소강 소재의 정면밀링 커터 바디는 고속가공을 목적으로 제조되지 않았고, 특히 장시간 고속가공 시 관성의 영향으로 주축부에 극심한 발열을 유발시켜 주축의 변형, 정밀도 저하 및 공작기계 수명 단축 등을 초래할 수 있다.

정면밀링가공과 관련하여 정면밀링커터를 사용한 가공 후 표면조도 향상을 위한 연구[1~2], Choi[3] 등은 정면밀링커터를 이용한 고속가공에서 CBN공구 마멸에 관한 연구를 Rao[4]등은 알루미늄(7075-T6)을 대상으로 절삭속도 1,067~1,676m/min의 고속 정면밀링에서 카바이드와 다이아몬드 인서트 공구를 사용한 가공 후 표면품질에 영향을 미치는 파라미터에 관한 실험적인 연구를 하였다. 또한 Liu[5]등은 주철과 카본스틸을 대상으로 다양한 재료의 지름 100mm 공구를 사용하여 절삭속도 1,100m/min에서 공구마모 메카니즘을 분석하기 위해 고속 정면밀링가공실험을 수행하였다. 그러나 위 연구에서는 고속가공을 위한 밀링커터 바디를 사용한 것은 아니었다.

챔퍼된 공구를 사용한 정면밀링 후의 표면은 완전한

*Corresponding Author : Sung-Min Jang(Chosun College of Science & Tech.)

Tel: +82-62-230-8203 email: twkjsm@cst.ac.kr

Received October 10, 2013

Revised November 4, 2013

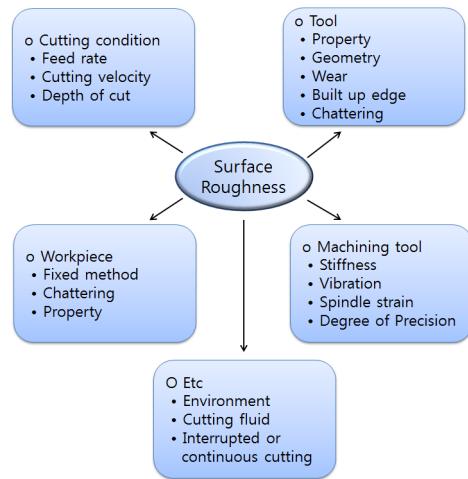
Accepted February 5, 2014

평면이 아닌데, 이것은 각 부품의 가공오차, 조립오차, 인서트 장착 오차 등에 기인한다. 표면조도를 향상시키기 위해 이미 제작된 공작기계에서 이러한 오차를 수정하거나 다시 설계 제작하는 것은 비경제적이다[6]. 알루미늄 합금의 정밀부품 가공 후 요구되는 표면 거칠기는 부품의 기능을 발휘하는 데에 대단히 중요하고 이를 위한 절삭조건 최적화는 고속·정밀 가공기술의 발달로 인해 중요하게 여겨지고 있다[7].

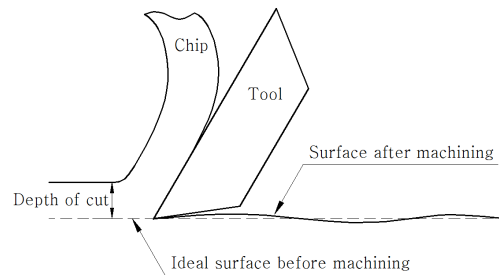
Fig. 1과 같이 다양한 인자들이 표면거칠기에 복합적으로 영향을 미치고 있다. 먼저 절삭조건에서 주된 영향은 이송속도이다. 그 외 절삭속도, 절삭깊이 등이 표면거칠기에 영향을 미친다. 사용하는 절삭공구의 경우 공구의 경도 및 강도와 같은 특징, 공구의 기하학적 형상, 공구 마멸, 구성인선, 채터 등의 영향이 표면거칠기에 영향을 준다. 공작물의 고정방법에서 발생하는 채터 현상, 경도 등 소재의 특성이 표면 거칠기에 영향을 미친다. 또한 공작기계의 강성, 진동발생 여부, 주축의 변형과 정밀도, 그리고 절삭유 사용유무 등 절삭환경에 의해서도 영향을 받는다.

정면밀링가공의 본 연구와 같이 절삭선단의 챔퍼각이 45°인 경우 날 당 이송속도가 챔퍼 길이 이하일 때 이론적으로 표면거칠기는 zero이다. 표면거칠기의 이론적 계산은 피삭재와 고정구 등이 완전 강체라는 가정에서 가능하다. 그러나 실제 절삭조건과 이에 따른 절삭력의 영향은 가공 후 피삭재의 변형을 초래하며, 가공 중 절삭선단 부에서 공작물은 팽창한다[8]. 이러한 현상은 절삭 후 금속의 높은 압력에 의해 소성 측면유동을 일으키기 때문이다[9]. Fig. 2에서와 같이 공구를 공작물에 수직방향으로 밀어붙임으로써 칩은 자유표면으로 유동하게 되고 칩 아래의 영역에서는 복잡한 탄성, 소성변형을 일으킨다[10-11].

기존의 탄소강 소재의 밀링커터 바디는 언밸런싱과 회전관성의 영향으로 약 3,000rpm이상으로 회전할 경우 위험속도에 도달하였다는 것을 엔지니어는 소음과 진동을 통해 감지할 수 있다. 이러한 이유 때문에 정면밀링커터 바디를 사용한 고속가공은 공작기계의 안전을 저해할 수 있어 지속적인 실험적 연구가 어려웠다. 특히 본 연구에서는 이미 검증된 고속가공이 가능한 정면밀링커터 바디를 사용하여 실험적 연구를 수행하였으며, 때문에 공작기계의 안전을 고려한 연구였다는 점에서 더 의미가 있다고 사료된다. 금속재료의 표면거칠기 개선을 위한 연구는 이론적, 시뮬레이션 방법 등을 고려할 수 있으나, 실험적 방법을 통하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 절삭조건에 따른 Al2024의 표면거칠기 향상을 위한 실험 후 그 결과를 분석하였다.



[Fig. 1] Schematic diagram of the surface roughness variable

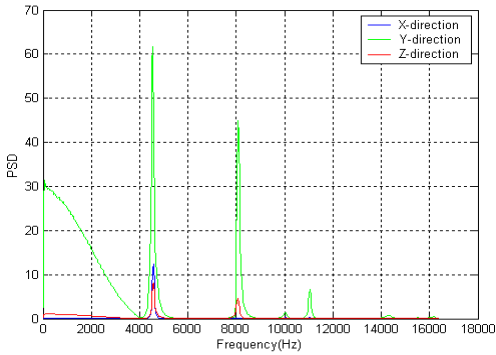


[Fig. 2] Effect of material anisotropy on recovered surface

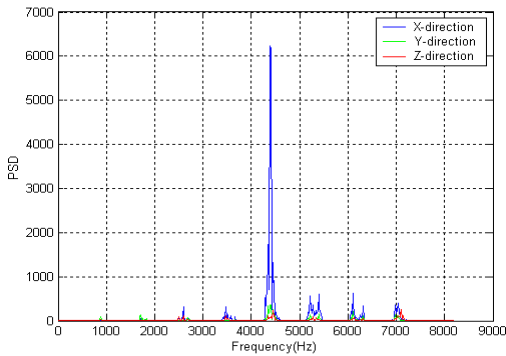
2. 고속 정면밀링 커터바디

본 연구에서는 고속 평면가공을 안전하게 수행하기 위해서 정면밀링커터 바디와 그 부속품인 카트리지를 초두랄루민으로 제조한 후 ISO 규격에 적합하게 밸런싱된 정면밀링커터 바디를 사용하였다.

Fig. 3은 본 연구에 사용된 정면밀링커터 바디의 자유상태에서 주파수 응답을, Fig. 4는 절삭속도 1885m/min에서 가공 중 파워스펙트럼 밀도(power spectrum density) 결과를 나타낸 것으로서 자유상태에서는 4.528kHz의 고유 진동수와 이에 대한 배수 성분을, 가공 중에는 X, Y, Z 방향에 대한 공진 영역 약 4.5kHz에서 진폭이 증가함을 확인하였고 특히, ISO 규격에 근거하여 G1.0mm/s에서 1,500rpm을 기준으로 할 때 최대 편심량 1.2gr·mm로 1,500rpm의 고속회전 가공에도 안전함을 확인하였다 [12]. 그러므로 정면밀링커터 바디는 본 연구의 절삭조건에서 안전하게 사용할 수 있다.



[Fig. 3] The response of frequency at free state



[Fig. 4] The response of frequency at 1,885m/min

3. 가공실험

3.1 실험방법 및 조건

본 연구에서는 초두랄루민 소재의 정면밀링커터 바디에 인서트 팁을 조립하여 항공용 부품으로 사용되는 AI2024의 고속 정면밀링가공 후 표면 거칠기를 측정하였다. 실험에 사용된 밀링커터는 지름 80mm, 공작물의 표면과 만나는 어프로치 각 45°, 축 방향 경사각 15°, 반경 방향 경사각 -3°등 포지·네거티브 경사각 조합방법을 채택하였다. 또한 격심한 충격하중이 지속되는 것을 극복하기 위하여 여유각을 작게 하였다. 직접 절삭가공을 수행하는 드로우 어웨이 형식의 인서트 팁 규격은 SEEX09T3AFN-E04 F15M이며 팁은 한번 실험 후 새로운 팁을 사용하여 구성인선 또는 공구마멸에 의한 영향이 없도록 하였다. 시편은 100mm×100mm×50mm(가로×세로×높이)의 AI2024를 사용하여 건식절삭 하였다. 또한 다인공구의 특성인 절삭선단의 높낮이 차이로 인한 런아웃(run out)의 영향을 받지 않도록 하여 가공물의 표면품위를 향상시킬 수 있도록 단인 선단에 의한 절삭이 되도록 하였다.

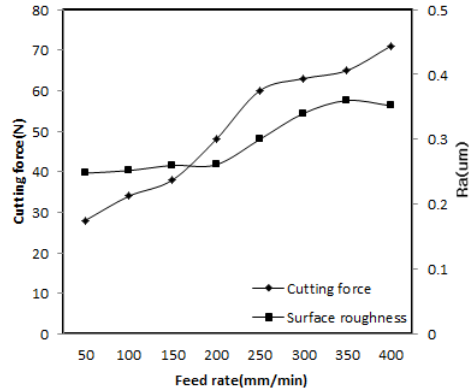
록 하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

연질특성의 AI2024를 고속 정면밀링가공 후 절삭조건이 표면거칠기에 미치는 영향을 실험적으로 파악하기 위해 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 등 절삭조건 변화에 따른 영향을 분석하였다. 측정장비(Surtronic3+)를 사용하여 절삭 후 표면거칠기(Ra)를 측정하였으며 절삭력 측정은 공구동력계(Kistler 9272)를 이용하였다. 절삭력과 표면거칠기 측정결과는 Fig. 5~7에 각각 나타내었다[13]. 모든 절삭실험에서 공구의 반경방향 절삭깊이는 40mm로 하였다.

3.2.1 이송속도의 영향

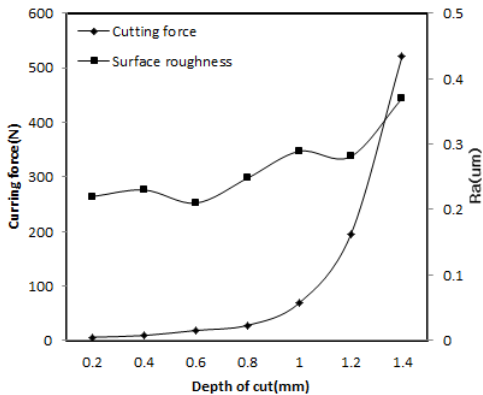
Fig. 5는 이송속도 변화에 대한 실험 후 절삭력과 표면거칠기의 측정 결과를 나타낸 것이다. 이송속도는 50~400mm/min의 범위에서 50mm/min으로 변화를 주어 실험을 하였다. 이송속도가 점차 증가하여 200mm/min까지는 표면 거칠기가 다소 상승하였으나 그 값의 차이가 크지 않았다. 그러나 이송속도 250mm/min 이상에서는 표면 거칠기가 점점 크게 상승되어 표면의 품위를 악화시켰다. 그러므로 200mm/min 이내의 이송속도는 생산성과 표면 품위를 고려한 이송속도 범위로 사료된다. 절삭력의 경우에서도 200mm/min 이상의 이송속도에서 절삭력을 크게 상승시킨다. 이송속도의 증가는 절삭 날 당 소재의 제거량을 증가시키고, 이에 비례하여 절삭력이 상승되었다. 절삭력의 증가는 chatter 등으로 인하여 공구에 미시적 변화를 초래하였을 것으로 예상되나 재료 제거량 증가로 인한 절삭력의 증가는 가공 후 연질특성 피삭재의 소성 유동을 다소 증가시켜 표면 거칠기의 상승에 영향을 미친 것으로 사료된다.



[Fig. 5] Cutting force and surface roughness by variance of feed rate(cutting speed:1600m/min, depth of cut:0.8mm)

3.2.2 절삭깊이의 영향

Fig. 6은 0.2~1.4mm 범위에서 절삭깊이에 변화를 주어 절삭력과 표면 거칠기를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 절삭깊이가 점차 증가하여 0.6mm까지는 표면 거칠기에 다소 변화가 발생하였으나 상승 모드로의 뚜렷한 변화가 시작된 것은 아니다. 그러나 절삭깊이 0.8mm이상에서는 표면 거칠기가 상승 모드로 전환되었다. 이론적으로 절삭깊이는 표면 거칠기에 영향을 미치지 않는다. 그러나 절삭깊이의 증가는 공작물 표면에 수직방향의 작용력을 증가시킨다. Fig. 2에서 설명하였듯 실제로는 가공 후 칩 아래 피삭재 영역의 탄소성변형을 일으켜 표면 거칠기에 영향을 미친다. 절삭깊이 0.8mm 이상에서 절삭력이 점점 크게 증가하여 가공 후 연질특성인 피삭재의 탄소성변형을 초래하였다. 이 때문에 표면 거칠기를 상승시킨 것으로 사료된다. 그러므로 생산성과 표면품위를 동시에 고려할 때 이송속도를 200mm/min 이내로 결정하였듯이 절삭깊이는 0.6mm 이내에서 적용이 적절한 것으로 사료된다.

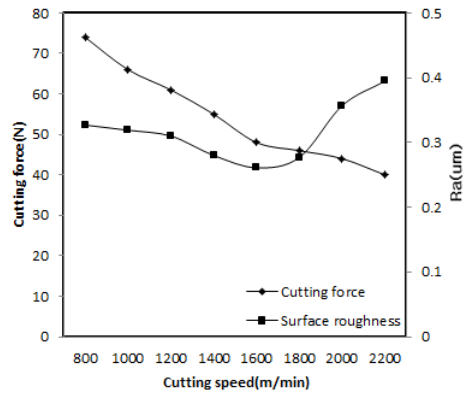


[Fig. 6] Cutting force and surface roughness by variance of depth of cut (cutting speed: 1600m/min, feed rate: 200mm/min)

3.2.3 절삭속도의 영향

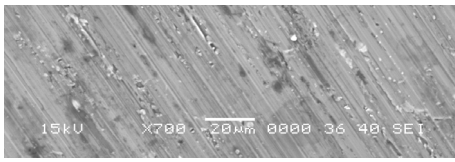
Fig. 7은 절삭속도 800~2,200m/min 범위에서 정면밀링 가공 후 절삭력과 표면 거칠기의 측정 결과를 나타낸 것이다. 적용된 절삭속도 범위 내에서 200m/min의 변화를 주어 실험을 수행하였다. 그 결과 절삭속도의 증가에 따라 표면품위가 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 1,800m/min에서 표면 거칠기 값이 상승하였고 2,000m/min 이상에서는 급격히 상승하는 것으로 나타났다. 절삭속도가 고속화되면 표면 거칠기는 향상되어 표면품위를 개선시키는 것이 일반적인데, 오히려 1,800m/min 이상에서 표면 거칠기가 상승모드로 전환되었다. 절삭속도가 고속으로 증가할수록 피삭재에 열연화 현상이 발생

하였고, 이로 인하여 가공 후 연질특성의 Al2024 피삭재 표면에 소성유동을 유발시켰기 때문에 사료된다. 이와 같은 현상을 규명하기 위해 가공된 시편의 일부를 Fig. 8과 같이 SEM사진으로 관측한 결과 피삭재 표면에 소성유동이 발생한 것을 확인하였으며 이것이 표면 거칠기를 악화시켰음을 검증하였다[13]. 실험결과 절삭속도 1,600m/min까지는 열연화 현상에 의한 표면 거칠기의 상승이 없다. 그리고 표면 거칠기를 급격히 상승시킨 절삭속도 2,000m/min과 2,200m/min에서 소성유동이 크게 발생하였음을 Fig. 8 (g)와 (h)의 SEM 사진에서 확인할 수 있다. 따라서 부품의 표면품위와 동작기계의 안전을 고려할 때 절삭속도는 1,600m/min으로 하는 것이 바람직하다. 그리고 절삭속도의 고속화로 인한 피삭재의 열연화현상은 가공성을 향상시켜 절삭력의 지속적인 감소에 영향을 주었다.

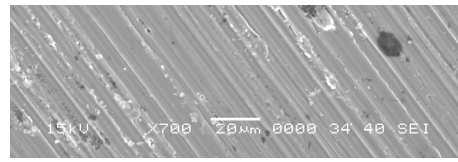


[Fig. 7] Cutting force and surface roughness by variance of cutting speed (feed rate: 200mm/min, depth of cut: 0.8mm)

제조현장에서 절삭속도의 상승은 표면 거칠기 관점에서 생산부품의 품질을 향상시킨다고 일반적으로 알려져 있다. 그러나 Al2024는 1,800m/min 이상의 절삭속도에서는 오히려 품질을 저해한다는 것을 실험결과 알 수 있었으며 그 원인이 분석되었다. 또한 절삭속도의 불필요한 상승은 결국 동작기계의 에너지 소모를 증가시키므로 경제적으로도 적절한 절삭속도의 적용이 필요하다. 그러므로 본 연구결과에서 나타난 바와 같이 절삭속도는 1,600m/min에서 적용하는 것이 경제적 측면에서도 매우 유익하다.

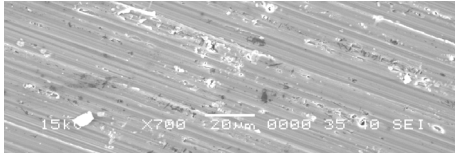


(a) V=800m/min

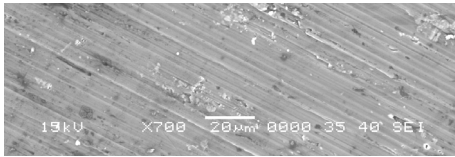


(h) V=2,200m/min

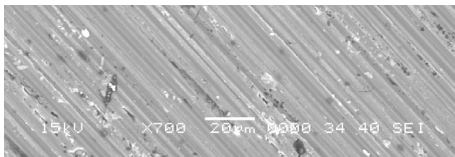
[Fig. 8] SEM photograph by variation of cutting speed



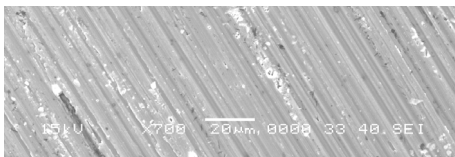
(b) V=1,000m/min



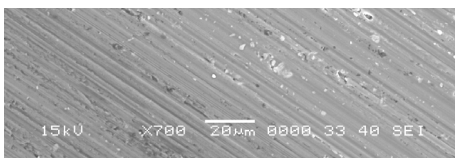
(c) V=1,200m/min



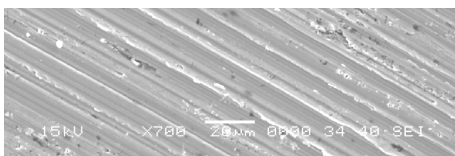
(d) V=1,400m/min



(e) V=1,600m/min



(f) V=1,800m/min



(g) V=2,000m/min

4. 결 론

본 연구에서는 고속가공이 가능한 정면밀링커터 바디를 사용하여 연질특성 소재인 Al2024를 대상으로 고속가공을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 고속가공이 가능한 정면밀링커터 바디를 사용하여 표면 거칠기 향상을 위한 고속 정면 밀링가공을 안전하게 수행하였다.
- (2) 생산성과 표면품위를 고려한 이송속도는 200mm/min 범위 내에서 적용되어야 한다.
- (3) 절삭깊이 증가로 인한 절삭력 상승은 가공면의 탄소성변형을 초래하여 표면 거칠기를 상승시켰으며, 특히 0.8mm이상의 절삭깊이에서 표면 거칠기를 크게 하였다. 그러므로 생산성과 표면품위를 동시에 고려한 절삭깊이는 0.6mm 이내에서 적용하여야 한다.
- (4) 절삭속도의 고속화는 피삭재의 열연화 현상을 초래하여 절삭력을 하락시키고 가공성을 향상시킨다. 그러나 가공 후 피삭재 면의 소성유동을 유발시켰고 특히 2,000m/min이상에서 표면 거칠기를 급격히 악화시켰음을 SEM 사진으로 확인하였다. 그러므로 부품의 표면품위와 동작기계의 안전 그리고 경제적 관점을 고려할 때 절삭속도는 1,600m/min로 적용하여야 한다.

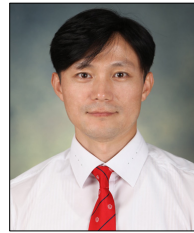
References

- [1] W. T. Kwon, S. S. Lee, "Improvement of the surface roughness by changing chamfered angle of the insert in face milling," KSPE, Vol. 18, No. 7, pp. 155-160, 2001.
- [2] H. Y. Lee, M. K. Kim, S. S. Lee, and W. T. Kwon, "Effect of tool angle on surface roughness in face milling," Proceedings of the KSMTE fall conference 1998, pp. 26-31.
- [3] J. S. Choi, J. H. Goo, and D. S. Park, "Tool wear in

- high speed face milling using CBN Tool," Proceedings of the KSMTE spring conference, pp. 332-338, 2000.
- [4] B. Rao and Y. C. Shin, "Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, pp. 1763-1781, 2001. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00033-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00033-5)
- [5] Z. Q. Liu, Ai, X., H. Zhang, Z. T. Wang, and Y. Wan, "Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, pp. 222-226, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00605-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00605-2)
- [6] W. T. Kwon, S. S. Lee, "Improvement of the Surface Roughness by Changing Chamfered Angle of the Insert in Face Milling" Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 7, July 2001.
- [7] C. Y. Kim, "An Experimental Study of Al2017 on Characteristics of the Surface Roughness in Machining Center Processing", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 68-72, 2012.
- [8] T. Sata, M. Li, S. Takata, H. Hiraoka, CQ. Li, XZ. Xing, XG. Xiao, "Analysis of surface roughness generation in turning operation and its applications. Annals CIRP. pp. 473-6, 1985.
- [9] MC. Shaw, JA. Crowell, "Finishing machining", Ann CIRP. Vol. 13. pp. 5-13, 1965.
- [10] S. Shimada, N. Ikawa, H. Tnanka, G. Ohmori, J. Uchikoshi, H. Yoshinaga, "Feasibility study of ultimate accuracy in microcutting using molecular dynamics simulation. Ann CIRP, pp. 91-4, 1993. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62399-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62399-3)
- [11] DJ. Whitehouse, "Handbook of Surface Metrology", Bristol, PA : Institute of Physics. 1994.
- [12] S. M. Jang, M. J. Maeng, W. S. Cho, "Development of Face Milling Cutter Body System for High Speed Machining", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 12, pp. 21-28, 2004.
- [13] S. M. Jang, "Development of Face Milling Cutter Body System and Cutting Reliability Evaluation for Precision High Speed Machining of Light Metals", Doctoral Dissertation, Inha University Graduate School, pp. 105-112, 2004.

장 성 민(Sung-Min Jang)

[정회원]



- 2000년 2월 : 숭실대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 2010년 2월 : (주) 정일기계 연구소장
- 2012년 1월 ~ 현재 : 조선이공대학교 선박해양기계과 교수

<관심분야>

정밀가공, 강도설계, 실험계획법, CAD/CAM