

고속가공에서 박막 측벽(Thin wall) 파트 가공을 위한 연구

A Study on the High-Speed Machining of Thin-wall Part

김흥배*(한국기술대학교 대학원), 이우영, 최성주(한국기술교육대학교 기계공학부)
Heung-Bae Kim*(Graduate School of KUT), Woo-Young Lee, Seong-Joo Choi(KUT)

ABSTRACT

The term 'High Speed Machining' has been used for many years to describe end milling with small diameter tools at high rotational speeds, typically 10,000 - 100,000 rpm. The process was applied in the aerospace industry for the machining of light alloys, notably aluminium. In recent years, however, the mold and die industry has begun to use the technology for the production of components, including those manufactured from hardened tool steels. And the end-mill is an important tool in the milling process. A typical examples for the end mill is the milling of pocket and slot in which a lot of material is removed from the workpiece. Therefore the proper selection of cutting parameters for end milling is one of the important factors affecting the cutting cost. The one of the advantages of HSM is cutting thin-wall part of light alloy like Al (thickness about 0.3mm). In this paper, firstly, we study characteristics of HSM, and then, we choose the optimal parameters(cutting forces) and investigate various machining strategies to cut thin-wall part by experiment.

Key Words

High-Speed Machining(고속가공), Cutting force (절삭력), Thin-wall(박막 측벽), Cutting Condition(가공조건)

1. 서론

고속가공이란 가공품의 정밀도 향상과 가공시간의 단축으로서 생산원가를 절감하고자 하는 목

적아래 1924년 독일의 Carl J. Salomon 박사에 의해 착안되었으며 1931년 독일 특허를 받으면서 시작되었다. 이 고속가공의 개념은 절삭가공 시 발생하는 절삭온도와 절삭속도의 관계에 근거를 두고 있다. 즉 절삭온도는 어떠한 임계속도에서 최대치가 되며 그 임계속도를 초과하게 되면 온도는 감소한다는 것이다. 그러나 여러 가지 논문 및 실험에 의하면 고속가공에서 Salomon의 주장대로 절삭속도가 고속화함에 따라 절삭온도가 감소하는 효과를 보이는 것은 아니며 절삭속도의 증가에 따른 생산성의 향상, 가공정밀도의 향상, 표면 거칠기의 향상 등의 효과를 얻어내는 것이다. Fig. 1에 나타난 Salomon의 실험결과들은 고속가공의 필요성을 잘 설명하고 있다.

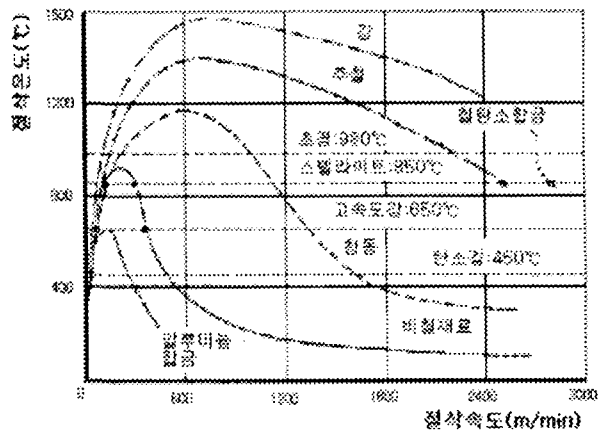


Fig. 1 Salomon's experimental results

고속가공의 장점 및 특징은 아래와 같다

- ① 가공시간을 단축시켜 가공능률, 생산성 향상
- ② 2차 공정을 감소시킨다
- ③ 표면정도의 향상

- ④ 공작물의 변형을 감소시킨다
- ⑤ 작은 직경의 공구를 효율적으로 사용한다
- ⑥ 얇거나 취성이 있는 소재를 효율적으로 가공한다

위의 특징 중에서 얇은 소재의 가공은 고도의 정밀도를 요구하는 것으로서 특히 항공기 부품의 경량화를 이루기 위해 많이 사용하고 있다. 고속 주축은 절삭력을 줄여주어 얇은 알루미늄 리브(rib), 흑연전극 같은 얇고 취성이 있는 재료를 가공하는데 있어서 장점이 있다. Fig. 2는 알루미늄을 이용한 Thin-wall 부품의 가공 예를 나타내고 있다.

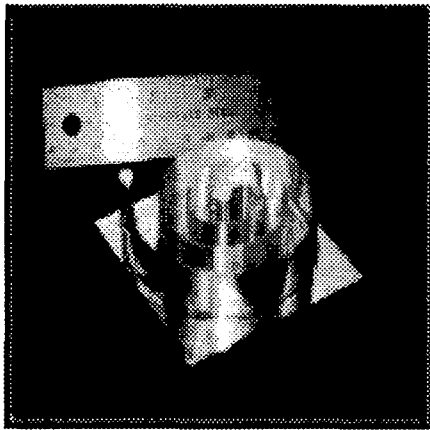


Fig. 2 An Example of Al Thin-wall (1mm Thickness, 20mm Height 42,000 rpm, 14986mm/min feedrate)

이 실험의 목적은 고속가공을 이용한 박막 측벽(Thin-wall)의 가공 기술 개발이며, 특히 가공특성과 가공방법을 중심으로 이루어졌다. 이 실험을 위하여 고속가공을 이용한 알루미늄의 절삭력 실험을 1차 적으로 하였으며, 이 실험결과를 바탕으로 다양한 가공방법에 관한 실험을 하였다.

2. 알루미늄의 절삭력 특성

이번 연구에 사용한 고속가공기(Roeders사, Germany)의 일반사양은 Table 1과 같으며, Table 2에는 절삭력 측정 장치에 대한 사양이 그리고 Table 3에는 절삭력 측정에 사용한 절삭 조건이 나타나 있다.

사양 항목	수 치
Max. Spindle Speed	42,000 rpm
Max. Feed Rate	30,000 mm/min
Max. Acceleration	2.0g

Table 1 The Specification of HSM

피삭재	Al6061
공구 동력계	Kistler사, type:9254
전하증폭기(Amplifier)	Kistler사, type:5019
A/D 보드	DAQ-MIO-16E (NI, Co.)

Table 2 Construction of Experiment for Cutting force

RPM (rev/min)	Feed/tooth (mm/tooth)	Axial depth (mm)	Radial depth (mm)
100-37500	0.01	5mm, 10mm	1mm, 2mm
	0.02		
	0.03		
	0.04		
	0.05		

Table 3 Experimental Cutting Conditions

공구는 TiCN 코팅처리 한 직경 12mm, 4날의 솔리드 엔드밀(Jabro Tools. Co.)을 사용하였다. 시험에 사용한 피삭재는 'I'형상을 하고 있는 알루미늄을 사용하여 이송방향과 반경방향의 절삭력을 측정하였다.

2.1 절삭속도에 따른 가공특성

이번 실험에서 최대 50 m/min - 1500 m/min까지의 절삭속도에서 상향, 하향 각각에 대해 X, Y 절삭력을 측정하였다. 절삭속도가 증가할수록 절삭력은 감소하는 경향을 보였다. 반경방향 절삭깊이, 축 방향 절삭깊이 그리고 날당이송이 같은 경우, 일반적으로 상향절삭의 이송방향 힘이 제일 크게 나타났다.

2.2 상·하향 절삭에 따른 절삭 특성

상향절삭과 하향절삭의 경우 상향절삭이 하향절삭보다 더 큰 절삭력을 나타냈다. 상향 절삭의 경우 절삭 속도의 증가에 따라 칩 배출이 원활하지 않아 가공 면이 매우 불량하였다. 이것은 고속에서 알루미늄의 가공에 의한 구성인선의 발생에

그 원인이 있다고 판단되며, 비틀림각(15°)이 작은 공구를 사용하여 생긴 영향도 있으리라 판단된다.

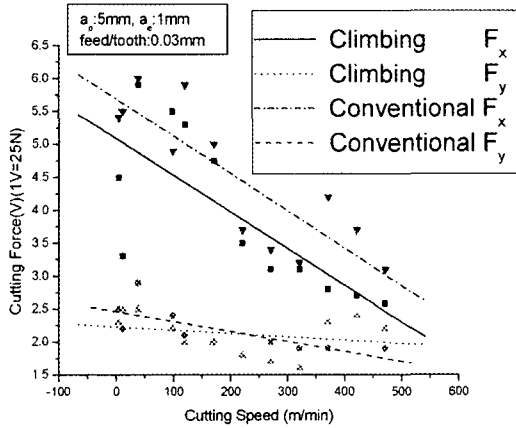


Fig. 3

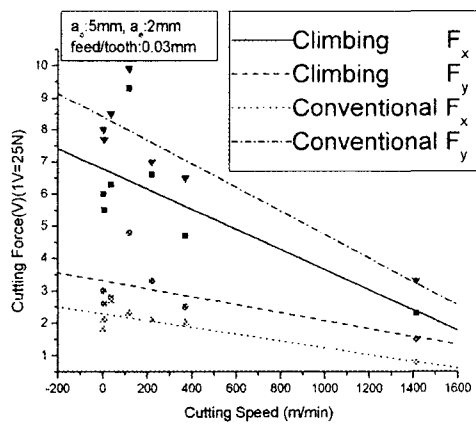


Fig. 4

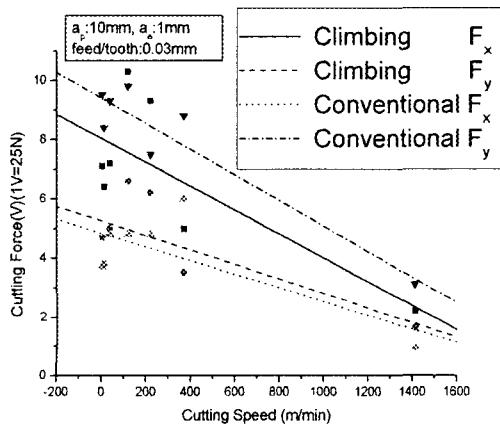


Fig. 5

2.3 이송방향 힘과 반경방향 힘의 특성

이송방향 힘과 반경방향 힘의 경우 반경방향의 힘이 크게 작용하는데, 이것은 반경방향의 절입깊이(RDOC)에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

2.4 날당 이송변화에 따른 가공 특성

이번 실험에서는 0.01 - 0.05mm/tooth 까지의 날당 이송량을 변화를 주어서 실험을 하였다. 날당 이송의 경우에도 절삭속도의 증가에 따라 모두 감소하는 경향을 보였는데, 초기에 날당이송이 큰 경우에 날당이송이 작은 경우보다 큰 절삭력을 나타내지만, 절삭속도가 증가하면 날당이송이 작은 경우가 날당이송이 큰 경우보다 절삭력이 크게 나타났다. 이것은 절삭속도의 증가에 따른 절삭력의 감소율이 다르다는 것을 의미한다. 이것은 그래프에서 확실하게 확인할 수 있으며 상향, 하향 또는 반경방향의 절삭깊이, 축 방향 절삭깊이 그리고 이송방향힘(Y-Force), 반경방향 힘(X-Force)의 변화에 따라 힘이 반전되는 구간이 다양하게 나타났다. 하향절삭보다 상향 절삭이 더 큰 절삭 속도에서 반전의 경향을 보였으며, 상향에서는 일반적으로 이송방향의 힘(Y-Force)이 반경방향 힘(X-Force)보다 더 큰 절삭속도에서 반전하는 경향을 나타내었으나, 하향의 경우에는 반전 영역이 같거나 이송방향 힘이 더 작은 절삭속도에서 반전의 경향을 나타냈다.

2.5 축 방향 절삭깊이 변화에 따른 특성

축 방향 절삭깊이의 증가에 모든 절삭력은 증가하는 경향을 나타냈으며, 반경방향의 힘보다 이송방향의 힘이 더 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 또 하향절삭보다 상향절삭이 축방향 절삭깊이의 증가에 따라 더 큰 절삭력이 증가하는 경향을 나타냈다.

2.6 반경방향 절삭깊이에 따른 특성

이송방향 절삭깊이의 증가에 모든 절삭력은 증가하는 경향을 나타냈으며, 이송방향의 힘 보다 반경방향의 힘이 더 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 또 하향절삭보다 상향절삭이 축방향 절삭깊이의 증가에 따라 더 크게 절삭력이 증가하는 경향을 나타냈다.

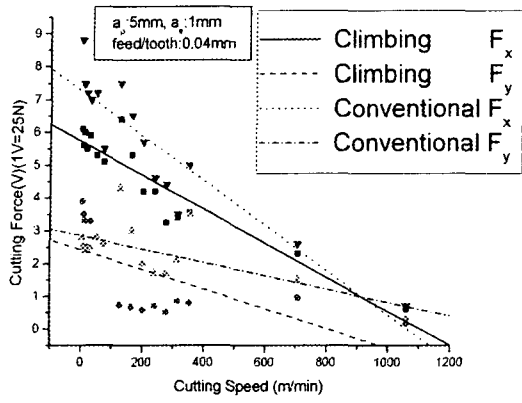


Fig. 6

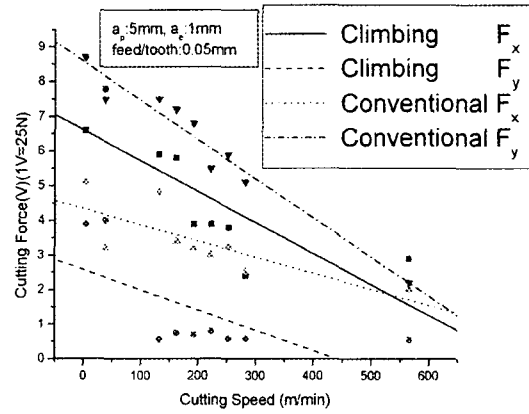


Fig. 9

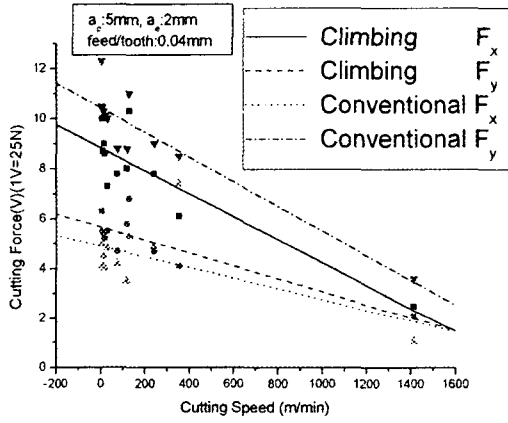


Fig. 7

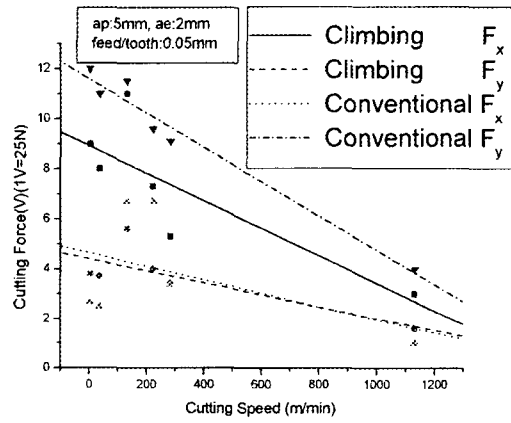


Fig. 10

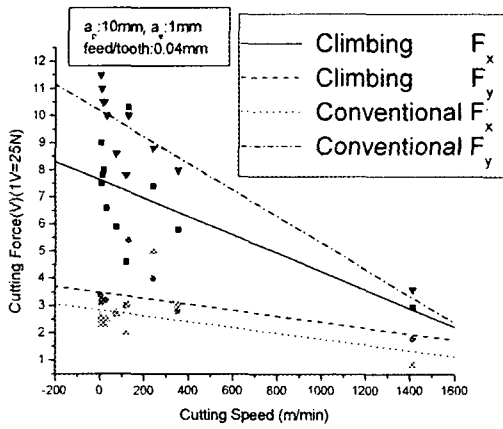


Fig. 8

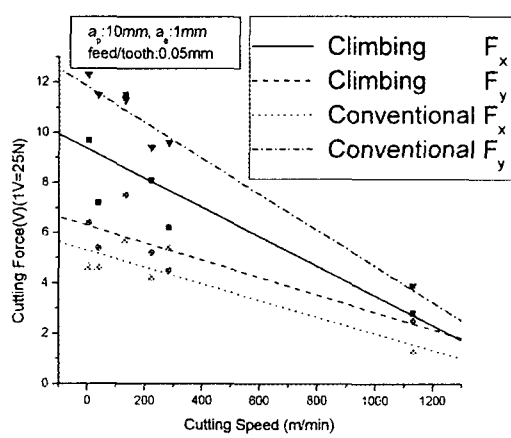


Fig. 11

3. Thin Wall의 가공특성

실험에서 얻어진 절삭력을 이용하여 실제가공을 하였으며, 절삭 조건이 박막층벽 가공에 미치는 영향을 파악하였다. 실제가공에 사용된 소재는 Al6061을 사용하였으며 가공 방법은 Fig. 12에 나타나 있다.

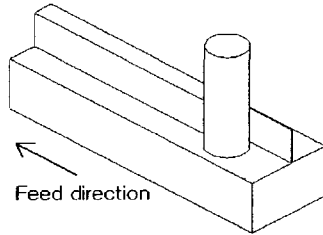


Fig. 12 Thin-wall machining

공구는 솔리드 엔드밀(Jabro Tools Co. Netherlands)에 TiCN 코팅 처리를 한 $\varnothing 12\text{mm}$, 2날 공구를 사용하였다. 일반적으로 고능률 엔드밀로 설계된 6날 이상에 비틀림각이 45도 이상인 공구는 절삭력 및 가공 능률면에서는 다른 공구보다 우수하지만 알루미늄의 가공에는 그 연성 및 전성의 특성으로 인하여 Fig. 13과 같은 문제가 발생하게 된다

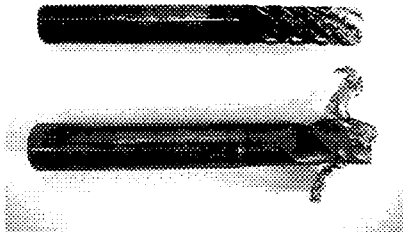
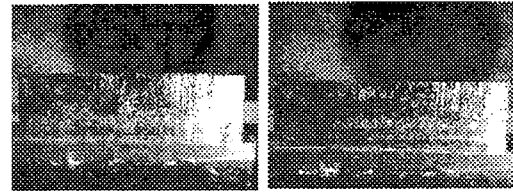


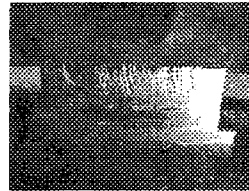
Fig. 13 Example of tool failure

알루미늄을 이용한 박막 층벽 가공의 가장 큰 문제는 공구의 고속회전 시 발생하는 런-아웃에 의한 박막 층벽의 가공오차와 이것으로 유발되는 Thin-wall(0.3mm 이하)의 가공 불량이다. Fig 14는 가공두께에 따른 그 표면 불량을 보여주고 있다. Fig. 14에서 알 수 있듯이 표면 불량은 Thin-wall의 두께가 얇아질수록 증가하는 경향이 있다.

일반적으로 박막의 두께가 얇아질수록 그리고 높이가 높아질수록 이러한 문제는 증가하는데 이것은 얇은 박막을 가공할 때 반경방향의 힘에 의해 유발되는 알루미늄의 탄성에 의한 것이다. 또한



(a) Thickness 1mm (b) Thickness 0.8mm



(c) Thickness 0.4mm

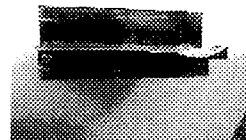
Fig. 14 The surface error due to run-out and elasticity

공구의 직경이 증가할수록 절삭속도가 감소할수록 이러한 표면오차는 증가하는 경향을 보였다. 이러한 문제는 가공 시 반경방향 절삭깊이를 증가시켜 해결하였으며, 이는 반경방향 절삭깊이가 클수록 가공중의 미 절삭부는 박막의 지지대 역할을 하여 강성을 증가시켜 주기 때문이다

또한 박막 가공 시 공구의 진입부와 절삭이 끝나는 부분에서는 Fig. 15와 같이 박막의 큰 파손이 발생하였다.



(a)공구 진입 부의 파손 (b) 가공 끝 부의 파손



(c) 가공 끝 부의 파손

Fig. 15 Examples of material failure

이것은 가공 시작점에서의 급작스런 충격에너지에 의한 것과 가공 중에는 미 가공된 충분히 두

꺼운 알루미늄 부재 부분에 전달되던 절삭력이 가공이 완료되면서 얇은 박막으로 순간적으로 전달되기 때문인 것이다. 이러한 문제는 가능하다면 설계 시에 박막 부의 양단에 Fig. 16 (a)와 같이 기둥형상을 이용하여 박막 부를 지지하는 것이 좋으며, 또한 가공 시작부와 가공 끝부분의 절삭 시에 발생하는 절삭력을 유연하게 분산하기 위하여 Fig. 16의 (b)와 같이 원형 진입 설계를 하여 파손을 방지할 수 있다.

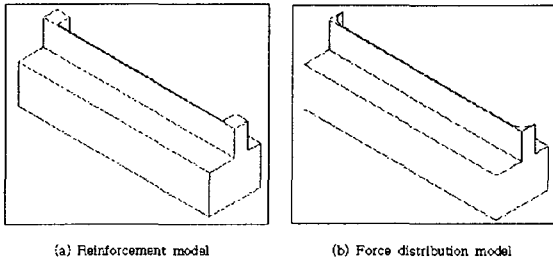


Fig. 16 Reinforced model of Thin-wall

또한 박막의 절삭 시 강성을 부여하기 위하여 Fig. 17과 같이 가공 반대방향 밀면의 단차를 이용하면 강성의 증가를 유도할 수 있다.

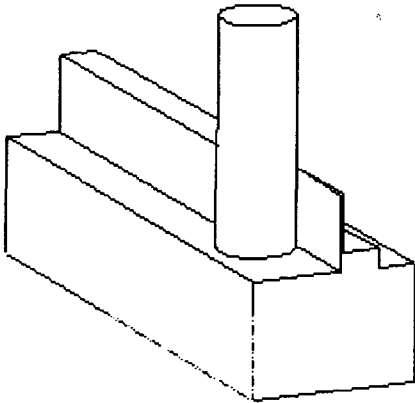


Fig. 17 Reinforcement of Thin-wall base

또한 일반적으로 축방향 절삭력으로 인한 박막부의 변형이 발생하므로 엔드밀의 밀면이 모재와 접촉하는 면적을 감소시켜야 하며, 이러한 밀면의 접촉 감소는 CAM을 이용한 Toolpath 생성단계에서 이루어져야 한다.

Fig. 18에는 이번 실험에서 가공한 박막 모델의 예이다. 절삭조건은 spindle speed 40,000 rpm, 1020 mm/min feed, thickness 0.3mm, height 15mm, 건식으로 절삭하였다.

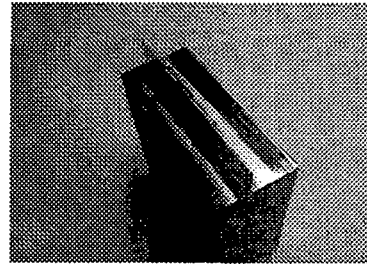


Fig. 18 Example of Thin-wall

4. 결론

이번 실험에서는 고속가공을 이용한 알루미늄 박막측벽의 가공 특성 및 가공 방법의 정립을 그 목적으로 하였으며 아래와 같은 실험 결론을 얻었다.

(1) 절삭력은 절삭속도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 상향절삭이 하향절삭보다 더 큰 절삭력을 나타냈다.

(2) 날당이송이 큰 경우에 날당이송이 작은 경우보다 큰 절삭력을 나타내지만, 절삭속도가 증가하면 날당이송이 작은 경우가 날당이송이 큰 경우보다 절삭력이 크게 나타났다.

(3) 박막 가공의 경우 가장 적은 반경방향 절삭력이 생기는 최고의 절삭속도에서 하향으로 절삭을 수행하는 것이 바람직하다.

(4) 박막의 두께가 감소할수록 반경방향 절삭력에 의한 표면오차(Surface error)가 발생하였으며, 이 오차는 공구 밀면의 접촉면적이 클수록 그리고 반경방향 절삭깊이가 작을수록 증가하였다.

(5)가공 시작 부와 끝 부분에서는 순간적이고 불안정한 충격 에너지에 의하여 파손이 발생하였으나 박막의 양단에 설계에 의한 지지부를 설치하여 파손을 예방할 수 있다

(6)알루미늄의 고속가공에서는 구성인성 및 공구 날수의 증가로 인한 공구의 파손 문제가 발생하였으나, 날수의 감소와 적정 가공조건 사용으로 문제를 해결하였다.(40,000 rpm, 1020mm/min)

참고 문헌

1. T. Moriwaki, "High-Speed Machining", CIRP, Vol.41, 1992
2. H. Schut, "High-Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Condition and Technology", CIRP, Vol.44 1995