

## 터빈블레이드의 5축 고속가공에서 가공경로와 공구기울임 방향의 선정

임태순\*, 이유하\*, 이득우\*\*, 김정석\*\*

\* 부산대 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대 기계공학부

### Evaluation of Cutter Orientations in 5-Axis High Speed Milling of Turbine Blade

Tae Soon Lim\*, Yu Ha Lee\*, Deug Woo Lee\*\*, Jeong Suk Kim\*\*

\* Dept. of Precision Mechanical Engineering, Pusan National University

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

#### Abstract

Recently, the development of aerospace and automobile industries has brought new technological challenges, related to the growing complexity of products and the new geometry of the models. High speed milling with a 5-Axis milling machine has been widely used for 3D sculptured surface parts.

When turbine blades are machined by a 5-axis milling, their thin and cantilever shape causes vibrations, deflections and twists. Therefore, the surface roughness and the waviness of the workpiece are not good.

In this paper, the effects of cutter orientation and the lead/tilt angle used to machine turbine blades with a 5-axis high speed ball end-milling were investigated to improve geometric accuracy and surface integrity. The experiments were performed using a lead/tilt angle of 15° to the workpiece with four cutter directions such as horizontal outward, horizontal inward, vertical outward, and vertical inward directions.

Workpiece deflection, surface roughness and

the machined surface were all measured with various cutter orientations such as cutting directions, and lead/tilt angle.

The results show that the best cutting strategy for machining turbine blades with a 5-axis milling is horizontal inward direction with a tilt angle.

**Key Words** : High speed milling, 5-axis milling, Lead/Tilt angle, Cutter orientation

#### 1. 서론

최근 항공, 자동차, 기계, 전자, 반도체산업의 발달로 그 구성부품들이 더욱 정밀하며 복잡해지고 있고, 이러한 요구에 부응하기 위해 국외는 물론 국내에서도 고속가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 고속가공은 1924년 독일의 Carl J. Salomon<sup>[1]</sup>에 의해 착안되어 현재에 이르고 있는데, 일반 범용가공에 비해 높은 절삭속도를 적용함으로써 날당 소재 제거량을 작게한 반면, 고속이송으로 소재 제거율을 향상시켜 고정밀, 고능률 가공을 가능하게 한다.<sup>[2]</sup>

이와 더불어, 완제품자체의 형상에 굴곡이

많고, 다면(多面)에 대한 상호간의 치수정밀도가 크게 요구되는 부품의 사용이 증대되고 있다. 이러한 부품을 3축 가공만으로 제작하기 위해서는 각각의 면에 대해 여러 번의 지그 세팅이 필요하여 과도한 치수오차가 발생하게 된다. 그러나 5축 가공을 적용하게 되면 한번의 지그 세팅으로 완성품을 가공할 수 있으므로 치수오차를 획기적으로 줄일 수가 있다. 또한 작업자 임의대로 공구의 경사각을 변화시킬 수 있기 때문에 측면날을 이용한 가공(Side cutting)이 가능하고, 적절한 접촉면과 절삭속도를 적용함으로써 표면거칠기를 좋게 할 수도 있다. 주로 활용되고 있는 분야로는 터빈블레이드, 임펠러, 자동차의 타이어금형, 선박의 스크류 가공등에 많이 쓰이고 있다.

5축 가공에 대한 연구로서는 특유의 다자유도에서 기인한 제어상의 어려움을 해결하기 위한 연구와,<sup>[3]</sup> 생성된 NC파일에 대해 가공시 우려되는 충돌을 검증하기 위한 알고리즘들에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>[4]</sup> R. Baptista, J.F. Antune Simoes는 3축 가공에 비해서 피드방향으로 경사지게 가공할 경우에 더욱 양호한 표면을 얻을 수 있음을 밝혔고,<sup>[5]</sup> Tonshoff는 블록 소재에 대해 15°의 경사각이 가장 적절한 경사각임을 밝히기도 하였다.<sup>[6]</sup>

본 논문에서는 터빈블레이드 가공시 여러 가지의 가공경로와 리드/틸트각(Lead/Tilt angle)을 적용하면서 가공했을 때, 유연성(Flexibility)과 자유형상에서 기인한 소재의 떨림 신호와 표면거칠기, 표면형상등을 비교함으로써 최적의 가공경로와 적절한 공구 기울임방향을 결정하는 근거를 마련하는데 목적을 둔다.

## 2. 실험조건 및 실험장치

### 2.1 시편의 고유진동수 해석 및 주축회전수결정

본 실험에 앞서 적절한 주축회전수를 결정하고 절삭상태를 파악하기 위해 Fig. 1과 같은 가공 모델에 대해 고유진동수 해석을 수행하였고, 해석결과는 Table 1과 같다. 1차, 2차 고유주파수에 대응하는 주축회전수를 회피하면서, 기계의 성능과 특성을 고려하였을 때, 1차 고유모드주파수 아래에서 20,000rpm의 주축회전수를 선정하였다.

그리고, 이때의 날 회전 주파수를 식(1)을 통하여 구해보면 약 667Hz 임을 알 수 있었다.

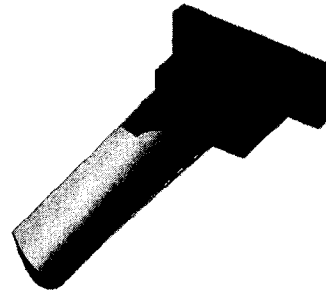


Fig. 1 The model used for analysis and experiment

Table 1 The results of modal analysis

Mode Number	Frequency (Hz)
1	845
2	1472

$$F_{th}(\text{Hz}) = \frac{nt}{60} \quad (1)$$

$n$  : Spindle Revolution (rpm)

$t$  : Number of Flutes

### 2.2 실험장치 및 방법

Table 2는 본 실험에 사용된 장치들에 대한 설명이다. 5축 고속가공기는 최대 주축회전수가 42,000rpm이고, 위치결정정밀도가 1 $\mu$ m의 고속회전, 고정밀 이송이 가능한 장비이다. 그리고, 변위센서는 0.5 $\mu$ m의 분해능(Resolution)이 가능하다. 절삭공구는 TiAlN 코팅된  $\phi$ 10 초경(Carbide) 볼 엔드밀을 사용하여 실험을 수행하였다.

Table 2 Experimental Equipment

Cutting condition	Value
5-Axis Machining Center	MIKRON-UCP 710 Spindle revolution (Max.) : 42,000rpm Feedrate (Max.) : 30m/min Location resolution : 1 $\mu$ m
Cutting Tool	$\phi$ 10 carbide ball endmill 2flutes(TiAlN coated)
Displacement Sensor	AEC-5505, PU-05 Resolution : 0.5 $\mu$ m Range : 0~2.0mm Frequency response : DC-20kHz

Table 3 Experimental Conditions

Cutting condition	Value
Spindle Speed	20,000rpm
Feedrate	4,000mm/min (0.1mm/tooth/rev)
Pick feed	0.2mm
Depth of cut	0.5 mm
Lead/Tilt angle	15°
Tool path	Horizontal Inward(H.I) Horizontal Outward(H.O) Vertical Inward(V.I) Vertical Outward(V.O)
Workpiece	Al 7075

Table 3은 실험조건을 나타낸 것으로 1차, 2차 고유진동수를 회피한 20,000rpm의 주축회전수를 적용하고, 각각의 경로에 대해 15°의 일정한 리드/틸트각(Lead/Tilt angle)을 유지하였다. 또한 가공시 절삭력이 작게 작용하는 하향절삭(Climb cutting)이 적용되도록 NC파일을 생성하였으며, 건식(Dry cutting)으로 가공하였다.

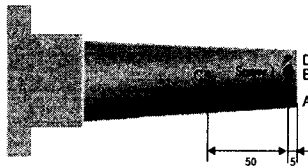


Fig. 2 The points of measurement and location of sensors

Fig. 2에서와 같이 터빈블레이드의 끝단으로부터 5mm되는 지점의 바로 아래에 변위센서 2개를 설치하여 가공중의 떨림 신호를 획득하였다.

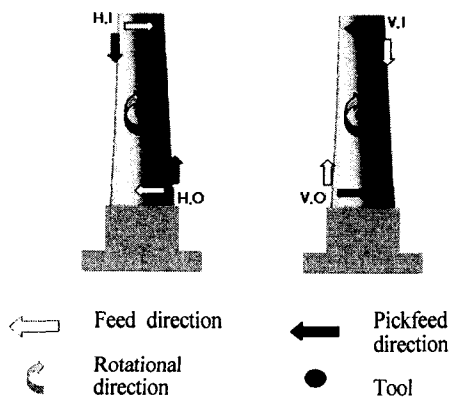


Fig. 3 Cutting direction

Fig. 3은 가공방향을 나타낸 것인데, 터빈블레이드의 지지단을 기준으로

- ①수평피드 안쪽피크피드방향(Horizontal Inward)
- ②수평피드 바깥피크피드방향(Horizontal Outward)
- ③수직피드 안쪽피크피드방향(Vertical Inward)
- ④수직피드 바깥피크피드방향(Vertical Outward)

의 4가지 가공경로와 각각에 대해 리드/틸트각(Lead/Tilt angle)을 적용함으로써 총 8가지의 경우에 대해 실험을 진행하였다. 그리고, 시편이 자유곡면을 가지고 있더라도 NC파일 생성과정에서 15°의 일정한 리드/틸트각을 적용함으로써 가공중의 절삭속도와 접촉점은 일정하게 유지된다.

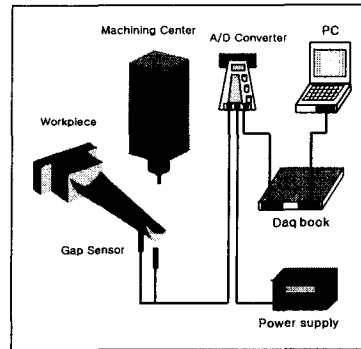


Fig. 4 Experimental Set-up

Fig. 4는 실험장치 구성도를 나타낸 그림이다. 변위센서로 가공중의 떨림 신호를 획득하고, 표면형상은 공구현미경을 이용하여 50배율로 확대 관찰 하였으며, 표면거칠기는 축침식 표면조도 측정기(Talysurf Series2, Taylor Hobson LTD)를 사용하였다.

### 2.3 절삭속도와 모멘텀에너지의 관계

Fig. 5는 리드각과 틸트각의 이해를 돕기 위한 그림이다.

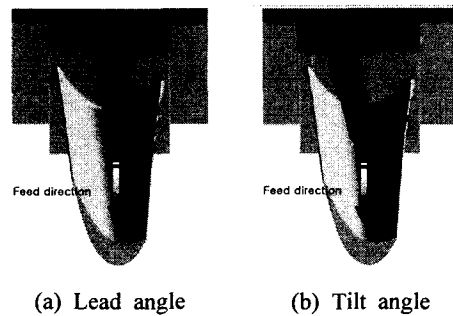


Fig. 5 Inclined angle

일반적으로, 공구가 피드방향으로 기울어져 가공될 때의 경사각을 리드각(Lead angle)이라 하고, 피크피드방향으로 기울어진 경우를 틸트각(Tilt angle)이라 한다. 이후부터는 리드각과 틸트각을 간편하게 표기하기 위해 각각을 LD와 TT로 표기하였다.

절삭과정중 전단면에서 칩의 모멘텀을 바꾸기 위한 힘을 모멘텀력이라 하며 식(2)와 같이 나타낼 수 있고, 단위체적당 모멘텀에너지를 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 식(3)에서 알 수 있듯이 절삭속도가 증가할수록 그 칩에 비례하여 모멘텀에너지가 증가함을 알 수 있다.

$$F_m = (\rho b t V) V_s \quad (2)$$

$$U_m = \frac{F_m V_s}{b t V} = \rho V^2 \left[ \frac{\cos \alpha}{\cos(\psi - \alpha)} \right]^2 \quad (3)$$

$F_m$  : 모멘텀력       $\alpha$  : 전단각(Shear angle)  
 $U_m$  : 단위체적당 모멘텀에너지     $V_s$  : 전단속도  
 $\rho$  : 피삭재 밀도       $V$  : 절삭속도  
 $\psi$  : 경사각(Rake angle)  
 $b t V$  : 단위시간당 제거되는 칩의 부피

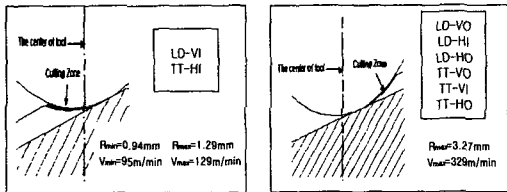


Fig. 6 Comparison of cutting speed according to the cutter orientations

Fig. 6은 경사각이 15° 일 때 국소적인 접촉면에서의 절삭상태를 크게 확대하여 나타낸 그림으로 LDVI와 TTHI의 절삭속도가 다른 가공경로에 비해 작으므로 모멘텀에너지가 작고, 가진력의 영향이 작다는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 가공경로의 변화에 따른 최대 떨림양

각각의 가공경로와 리드/틸트각에 따라 최대 떨림양을 비교 분석하였다. Fig. 7은 A, B, C지점을 가공할 때의 최대 떨림양을 나타낸 그래프이

다. 모든 가공경로에 대해 지지부에서 가까운 C 지점에서의 최대 떨림양은 그 차이가 10 $\mu$ m~20 $\mu$ m 내외로 아주 미소한 값을 가진다.

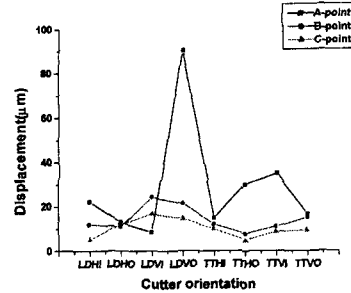


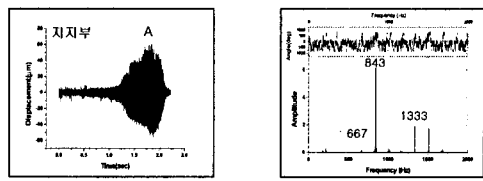
Fig. 7 The maximum deflection value

반면에 LDVO의 경우, A지점에서 그 떨림값이 급격하게 크게 나타났다. 이것은 LDVI에 비해 절삭속도가 크므로 절삭과정에서 한번 소재가 가진되기 시작하면 계속적으로 가진력이 더 크게 증폭되며, 소재의 두께와 유연성(Flexibility)에 매우 민감한 가공경로라는 것을 의미한다.

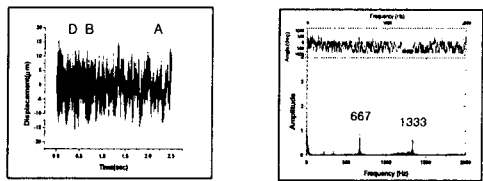
LDHO, TTHI, TTVO는 3지점에서 비슷한 떨림값을 가지고 있는데, 소재의 두께나 유연성에 대해 큰 영향을 받지 않는 가공경로임을 의미한다. 이와 같이, 터빈블레이드를 가공할 때는 가공경로에 따라 떨림 특성이 확연히 나타나는 얇고 유연한 끝단에서의 떨림 영향을 비교하는 것이 중요하다.

#### 3.2 떨림신호와 주파수 분석

Fig. 8은 LDVO와 TTHI의 가공경로에 대한 떨림 신호와 FFT 분석(Fast Fourier Transform)을 나타낸 것이다. TTHI의 가공경로는 시편의 끝단에서 5mm되는 지점인 D-B-A지점을 지나는 가공패스에 대한 신호이고, LDVO의 가공경로는 시편의 지지부와 가장 얇은 A지점을 지날 때의 신호를 나타낸 것이다. LDVO의 경우, 지지단에서 미소한 떨림을 가지다가 끝단인 A지점에서는 그 떨림이 아주 커지는 반면에 TTHI의 경우는 대체로 가공이 시작될 때부터 완료될 때까지 일정한 양의 떨림을 가지면서 안정된 절삭이 이루어졌음을 알 수 있다. FFT분석결과, 660Hz대의 날 회전주파수와 1차, 2차 고유모드 주파수가 서로 이격되어 나타나고 있다.



(a) The signal of deflection  
(Cutter orientation : LDVO)  
(b) FFT analysis

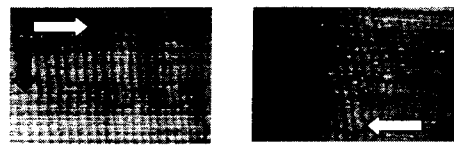
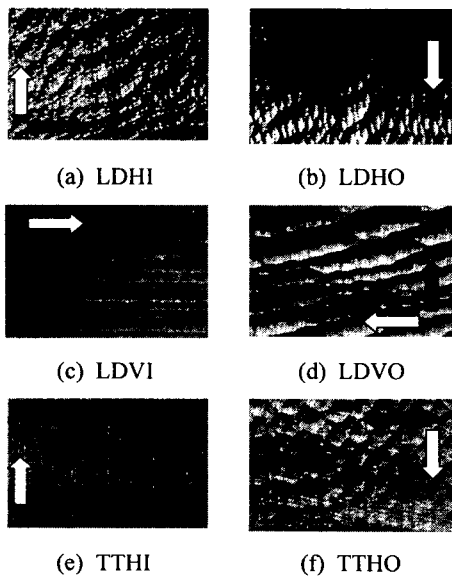


(c) The signal of deflection  
(Cutter orientation : TTHI)  
(d) FFT analysis

Fig. 8 The signal of deflection and FFT analysis

### 3.3 가공경로와 표면형상과의 관계

Fig. 9는 A지점에서의 가공상태를 비교하기 위해 공구현미경을 사용하여 50배 확대 관찰한 사진들이다. 떨림값이 큰 LDVO의 경우, 피크피드와 피드의 흔적을 식별하기 힘들 정도로 가공이 극히 불안정하게 이루어졌음을 알 수 있다. 반면에, TTHI의 경우는 A지점에서 피크피드와 피드의 가공흔이 일정하고, 안정된 절삭이 이루어졌음을 알 수 있다.



(g) TTVI  
(h) TTVO  
← Feed direction   ← Pickfeed direction

Fig. 9 Machined surface on point A

또한 LDVI의 경우, TTHI와 같은 절삭속도를 가짐에도 불구하고 다소 불안정한 절삭이 이루어진 것을 볼 수 있는데, 이는 가공이 시편의 유연한 끝단에서 시작됨에 따라 절삭초기의 공구진입에 의한 큰 진동성분이 가공면에 그대로 전사되었기 때문이다.

### 3.4 가공경로와 표면거칠기와의 관계

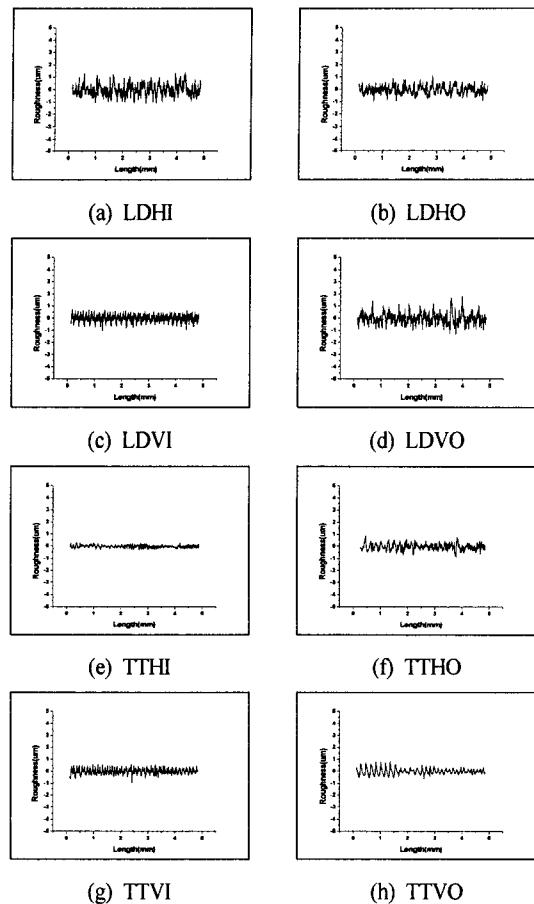


Fig. 10 The surface roughness of feed-direction at point-A

가공된 터빈블레이드의 표면상태를 측정하여 가공경로에 따른 표면거칠기와의 관계를 살펴 보았다. 측정은 가장 떨림이 크게 발생한 A지점에서 피드방향으로 5mm를 측정하고, Ra값으로 표면거칠기를 비교하였다.

Fig. 10은 A지점의 피드방향 표면거칠기를 측정 한 결과이다. 모든 가공경로 중에서 TTHI의 표면거칠기가 가장 양호한 반면에 LDVO, TTHO, TTVI의 경우는 좋지 않다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 표면거칠기 값들을 쉽게 비교하기 위해 A지점의 피드방향 Ra값을 나타낸 그래프이다.

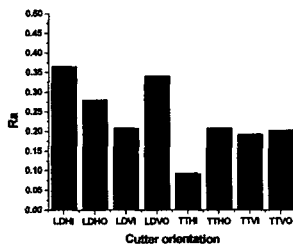


Fig. 11 The Ra value

다른 가공경로에 비해 절삭속도에 의한 가진력의 영향이 작은 TTHI로 가공했을 때의 표면거칠기가 가장 양호함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

가공경로와 리드/틸트각(Lead/Tilt angle)을 변화시켜가면서 캔틸레버(Cantilever) 형태의 자유곡면을 가진 터빈블레이드를 5축 고속가공하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 자유곡면을 가진 터빈블레이드 가공시, 가장 유연한 끝단에서는 절삭속도가 증가할수록 소재에 가해지는 가진력이 증가하여 크게 떨리는 현상이 발생하고 표면거칠기가 좋지 않다.

(2) 틸트각을 적용하고 수평피드 안쪽피크피드방향(TTHI)으로 가공했을 때, 피드방향의 표면거칠기가 가장 양호하다.

(3) 리드각을 적용하고 수직피드 바깥쪽피크피드방향(LDVO)으로 가공했을 때, 강성이 크고 두꺼운 지지단에서는 다른 가공경로와 큰 차이를 보이지 않지만, 강성이 약한 끝단으로 갈수록 다

른 가공경로에 비해 급격하게 떨림이 증가하므로 유연한(Flexible) 터빈블레이드의 가공시, 가장 좋지 않은 가공경로이다.

(4) 절삭속도가 증가할수록, 강성이 큰 블록 소재를 가공할 때는 절삭력이 감소하여 표면품위가 좋아질 수 있지만, 떨림이 많고 유연한 소재를 가공할 때는 오히려 큰 가진력을 작용시켜 표면거칠기가 좋지 않다.

#### 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단 우수 연구센터(KOSEF) 지원금에 의한 것입니다.

#### 참고 문헌

- (1) R.King, 1985, "Handbook of High Speed Machining Technology", Chapman and Hall.
- (2) T.Moriwaki, 1992, "High Speed Machining", CIRP, 41(2).
- (3) G. Elber, 1995, "Freeform surface region optimization for 3-axis and 5-axis milling", Computer Aided Design, Vol. 27, No.6, pp 465~470.
- (4) N.Rao, F.Ismail and S.Bedi, 1997, " Tool Path Planning for Five-axis Machining Using The PrincipalAxis Method", International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Vol. 37, No. 7, pp 1025~1040.
- (5) R.Baptista, J.F.Antune Simoes, 2000, "Three and Five-axes milling of sculptured surfaces", Journal of Materials Processing Technology 103, pp398~403.
- (6) H.K.Tonshoff, J.Hernandez-Camacho, 1989, "Die manufacturing by 5 and 3 axes milling" J. Mech. Working Technol. 20, pp105~119.