

# 터빈블레이드의 5축 고속가공에서 최적가공경로의 선정

임태순\*, 이채문\*, 김석원\*, 이득우\*\*

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

T. S. Lim, C. M. Lee, S. W. Kim and D. W. Lee

### Abstract

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

5-axis milling of turbine blade generates the vibration, deflection and twisting caused from thin and cantilever shape. So, the surface roughness and the waviness of workpiece are not good.

In this paper, The effects of cutter orientation and lead/tilt angle in 5-Axis high speed ball end-milling of turbine blade were investigated to improve the geometric accuracy and surface integrity. The experiments were performed at lead/tilt angle 15° of workpiece with four cutter directions such as horizontal outward, horizontal inward, vertical outward, and vertical inward. Workpiece deflection, surface roughness and machined surface were measured with various cutter orientations such as cutting direction, and lead/tilt angle.

The results show that when 5-axis machining of turbine blade, the best cutting strategy is horizontal inward direction with tilt angle.

**Key Words** : High Speed Machining, 5-Axis Machining, Lead/Tilt Angle, Cutter Orientation

### 1. 서 론

최근 항공, 자동차, 기계, 전자, 반도체산업의 발달로 그 구성부품들이 더욱 정밀하며 복잡해지고 있고, 이러

한 요구에 부응하기 위해 국외는 물론 국내에서도 고속가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

고속가공은 가공품의 정밀도를 향상시키고, 가공시간을 단축시킴으로서 생산원가를 절감하고자 하는 목적으

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

로 1924년 독일의 Carl J. Salomon<sup>(1)</sup>에 의해 착안되어 현재에 이르고 있다. 이러한 고속가공은 일반 범용가공에 비해 높은 절삭속도를 적용함으로써 낱당 소재제거량을 작게한 반면, 고속이송으로 소재제거율을 향상시켜 고정밀, 고능률 가공을 가능하게 한다<sup>(2,3)</sup>.

이와 더불어, 완제품자체의 형상에 굴곡이 많고, 다면(多面)에 대한 상호간의 치수정밀도가 크게 요구되는 부품의 사용이 증대되고 있다. 이러한 부품을 3축가공만으로 제작하기 위해서는 각각의 면에 대해 여러 번의 지그세팅(One chucking)이 필요하여 과도한 치수오차가 발생하게 된다. 하지만 5축가공을 적용하게되면 한번의 지그세팅으로 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 스크류가공등에 많이 쓰이고, 특히 거의 모든 부품들을 기계가공에 의존하고 있는 항공산업에 대해서는 그 필요성이 절대적이라 할 것이다.

5축가공에 대한 연구로서는 특유의 다자유도에서 기인한 제어상의 어려움을 해결하기 위한 연구와<sup>(4,5)</sup>, 생성된 NC파일에 대해 가공시 우려되는 충돌을 검증하기 위한 알고리즘들에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>(6)</sup>. R. Baptista, J.F. Antunes Simoes는 3축가공에 비해서 피드방향으로 경사지게 가공할 경우에 더욱 양호한 표면을 얻을 수 있음을 밝혔고<sup>(7)</sup>, Tonshoff는 블록소재에 대해 15°의 경사각이 가장 적절한 경사각임을 밝히기도 하였다<sup>(8)</sup>.

본 논문에서는 터빈블레이드 가공시 여러 가지의 가공경로와 리드/틸트각(Lead/Tilt angle)을 적용하면서 가공했을 때, 유연성(Flexibility)과 자유형상에서 기인한 소재의 떨림신호와 표면거칠기, 표면형상등을 비교함으로써 최적의 가공경로와 적절한 공구기울임방향을 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 가공모델에 대해 고유진동수 해석을 수행하였고, 해석결과는 Table 1과 같다. 이때 주축회전수는 1차, 2차 고유모드주파수에 대응하는 주축회전수를 회피하여 실험조건을 선정해야 한다.

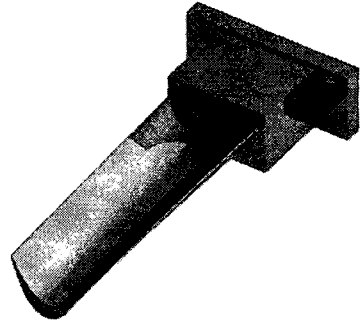


Fig. 1 The model used for analysis and experiment

Table 1 The results of modal analysis

Mode Number	Frequency (Hz)
1	845
2	1472

계산된 두 가지의 주축회전수를 회피하면서, 기계의 성능과 특성을 고려하였을 때, 1차고유모드주파수 아래에서 20,000rpm의 주축회전수를 선정하였다. 그리고, 이때의 날회전주파수를 식(1)을 통하여 구해보면 약 667Hz임을 알 수 있었다.

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

$n$  : Spindle Revolution (rpm)

$t$  : Number of Flutes

### 2.2 실험장치 및 방법

Table 2는 본 실험에 사용된 장치들에 대한 설명이다. 5축고속가공기는 최대 주축회전수가 42,000rpm이고, 위치결정정밀도가 1 $\mu$ m의 고속회전, 고정밀이송이 가능한 장비이다. 그리고, 변위센서는 0.5 $\mu$ m의 분해능이 가능하다. 절삭공구는 TiAlN 코팅된  $\phi$ 10 초경(Carbide) 볼엔드밀을 사용하여 실험을 수행하였다.

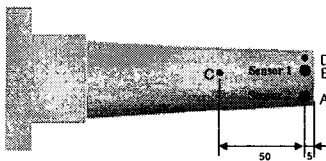
Table 3은 실험조건을 나타낸 것으로 1차, 2차 고유진동수를 회피한 20,000rpm의 주축회전수를 적용하고, 각각의 경로에 대해 15°의 일정한 리드/틸트각(Lead/Tilt angle)을 유지하였다. 또한 가공시 절삭력이 작게 작용하는 하향절삭(Climb cutting)이 적용되도록 NC파일을 생성하였으며, 건식(Dry cutting)으로 가공하였다.

**Table 2 Experimental Equipment**

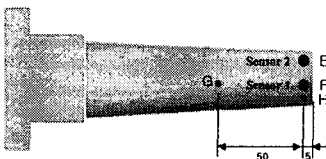
Cutting condition	Value
5-Axis Machining Center	MIKRON-UCP 710 Spindle revolution (Max.) : 42,000rpm Feedrate (Max.) : 30m/min Location resolution : 1 $\mu$ m
Cutting Tool	$\phi$ 10 carbide ball endmill 2flutes(TiAlN coated)
Displacement Sensor	AEC-5505, PU-05 Resolution : 0.5 $\mu$ m Range : 0~2.0mm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



(a) Concave sculptured surface



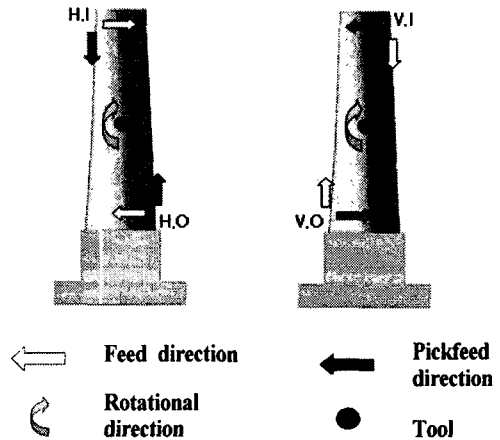
(b) Convex sculptured surface

**Fig. 2 The points of measurement and the location of sensors**

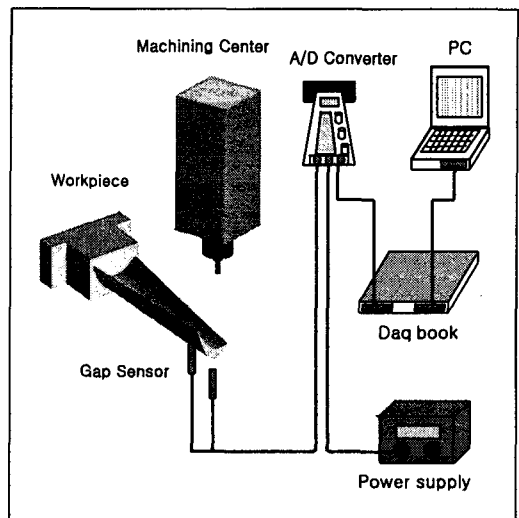
Fig. 2에서와 같이 터빈블레이드의 끝단으로부터 5mm 되는 지점의 바로 아래에 변위센서 2개를 설치하여 가공 중의 떨림신호를 획득하였다.

Fig. 3은 각각의 가공경로에 대한 가공방향을 나타낸 것인데, 터빈블레이드의 지지단을 기준으로

- ①수평피드 안쪽피크피드방향(Horizontal Inward:H.I)
  - ②수평피드 바깥쪽피크피드방향(Horizontal Outward:H.O)
  - ③수직피드 안쪽피크피드방향(Vertical Inward:V.I)
  - ④수직피드 바깥쪽피크피드방향(Vertical Outward:V.O)
- 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/틸트각(Lead/Tilt angle)을 적용함으로써 가공중의 절삭속도와 접촉점은 일정하게 유지된다.



**Fig. 3 Cutting direction**



**Fig. 4 Experimental Set-up**

Fig. 4는 실험장치 구성도를 나타낸 그림이다. 변위센서로 가공중에 발생하는 떨림신호를 획득하고, 표면형상은 공구현미경을 이용하여 50배율로 확대관찰 하였으며, 표면거칠기는 촉침식 표면조도측정기(Talysurf Series2, Taylor Hobson LTD.)를 이용하였다.

### 2.3 절삭속도와 모멘텀에너지의 관계

Fig. 5는 리드각과 틸트각의 이해를 돕기 위한 그림이다. 일반적으로, 공구가 피드방향으로 기울어져 가공될 때의 경사각을 리드각(Lead angle)이라 하고, 피크피드 방향으로 기울어진 경우를 틸트각(Tilt angle)이라 한다. 이후부터는 리드각과 틸트각을 간편하게 표기하기 위해 각각을 LD와 TT로 표기하였다.

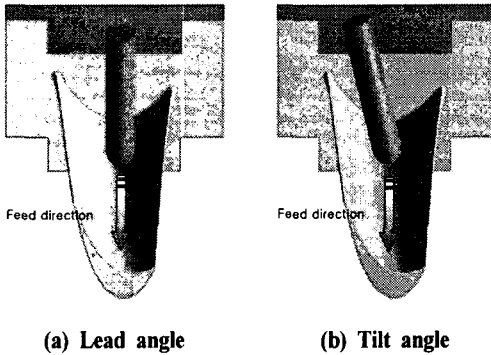


Fig. 5 Inclined angle

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 제곱에 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

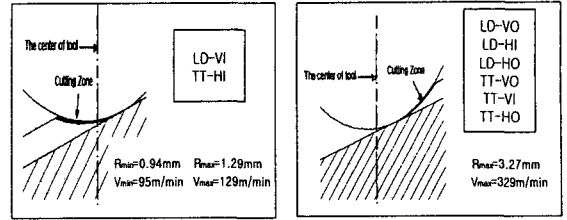


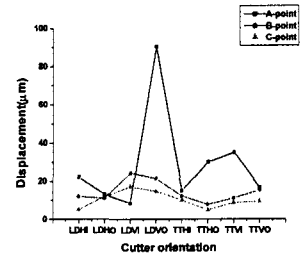
Fig. 6 Comparison of cutting speed according to the cutter orientations

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.

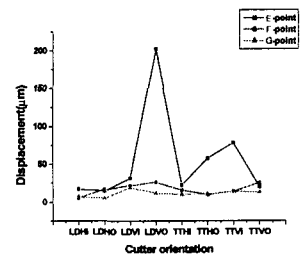
## 3. 실험결과

### 3.1 가공경로의 변화에 따른 최대떨림양

각각의 가공경로와 리드/틸트각(Lead/Tilt angle)에 따라 최대떨림양을 비교 분석하였다. Fig. 7(a),(b)는 오목한 면에서의 A, B, C지점과 볼록한 면에서의 E, F, G지점의 최대떨림양을 나타낸 그래프이다.



(a) Concave sculptured surface



(b) Convex sculptured surface

Fig. 7 The maximum deflection value

대체적으로 오목한 면과 볼록한 면에 대한 떨림양들의 프로파일이 유사한 형태를 띄고있다. 모든 가공경로에 대해 지지부에서 가까운 C, G지점에서의 최대떨림양은 그 차이가  $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ 내외로 아주 미소한 값을 가진다. 반면에 LDVO의 경우, A와 E지점에서는 그 떨림값이 급격하게 크게 나타났다. 이것은 LDVI에 비해 절삭속도가 크므로 절삭과정에서 한번 소재가 가진되기 시작하면 계속적으로 가진력이 더크게 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 떨림특성이 확연히 나타나는 얇고 유연한 끝단에서의 떨림영향을 비교하는 것이 중요하다.

### 3.2 떨림신호와 주파수 분석

Fig. 8과 9는 LDVO와 TTHI의 가공경로에 대한 떨림신호와 FFT 분석(Fast Fourier Transform)을 나타낸 것이다. TTHI의 가공경로는 시편의 끝단에서 5mm되는 지점인 D-B-A, E-F-H지점을 지나는 가공패스에 대한 신호이고, LDVO의 가공경로는 시편의 지지부와 가장 얇은 A, E지점을 지날 때의 신호를 나타낸 것이다.

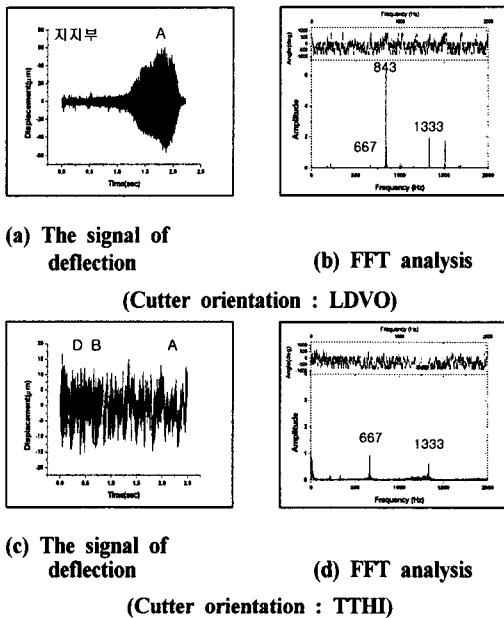


Fig. 8 The signal of deflection and FFT analysis at concave surface

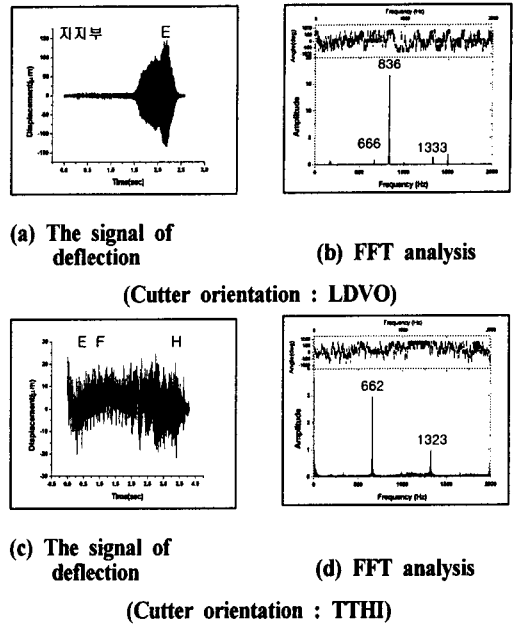


Fig. 9 The signal of deflection and FFT analysis at convex surface

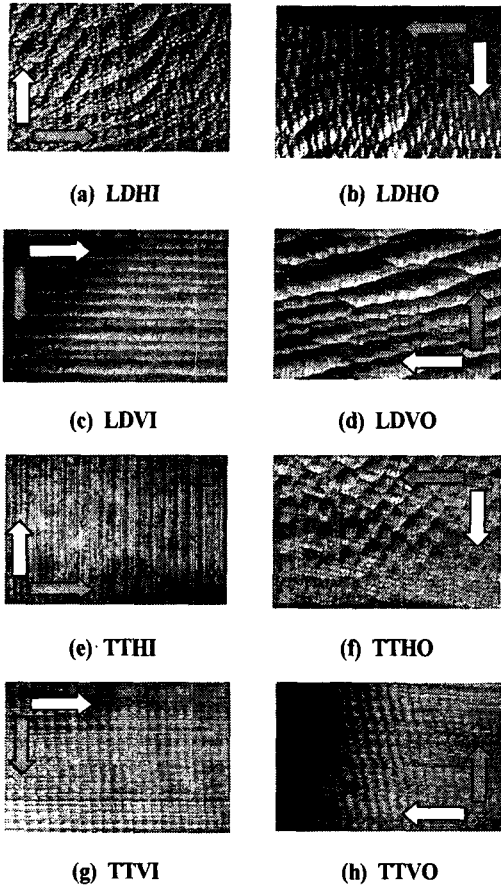
LDVO의 경우, 지지부에서 미소한 떨림을 가지다가 끝단인 A, E 지점에서는 그 떨림이 아주 커지는 반면에 TTHI의 경우는 대체로 가공이 시작될 때부터 완료될 때까지 일정한 양의 떨림을 가지면서 안정된 절삭이 이루어졌음을 알 수 있다. FFT분석결과, 660Hz대의 날회전 주파수와 1차, 2차 고유모드 주파수가 서로 이격되어 나타나고 있다. 그리고, LDVO의 경우는 이송방향이 1차 모드 방향이기 때문에 1차모드주파수가 크게 나타나고, TTHI의 경우는 이송방향이 2차모드방향이기 때문에 2차모드대의 주파수가 크게 나타나고 있다.

### 3.3 가공경로와 표면형상과의 관계

시편의 가공상태를 비교하기 위하여 A지점과 E지점에 대해 각각의 가공경로에 따라 표면형상을 비교하였다. Fig. 10과 11은 실제 가공된 터빈블레이드를 공구현미경을 사용하여 50배 확대관찰한 사진들이다.

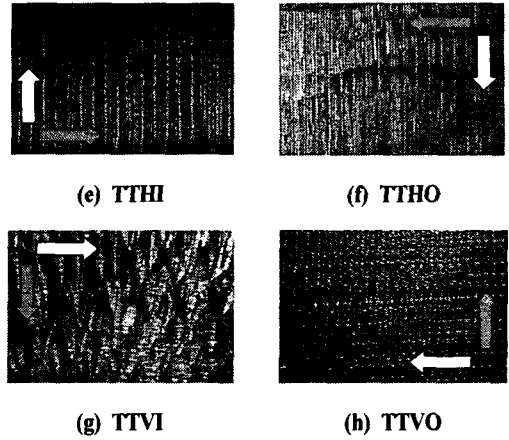
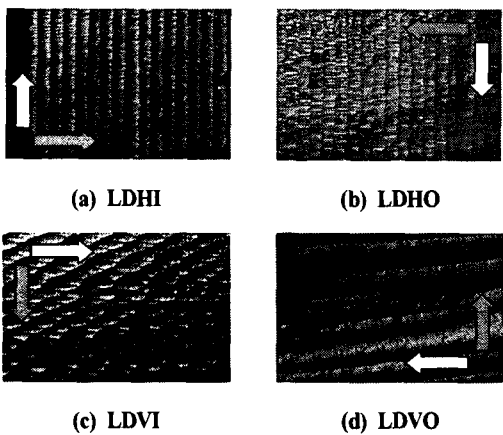
떨림값이 큰 LDVO의 경우, 피크피드와 피드의 흔적을 식별하기 힘들 정도로 가공이 극히 불안정하게 이루어졌음을 알 수 있다. 반면에, TTHI의 경우는 A지점과 E지점 모두에서 피크피드와 피드의 가공흔이 일정하고, 안정된 절삭이 이루어졌음을 알 수 있다. 또한 LDVI의 경우, TTHI와 같은 절삭속도를 가짐에도 불구하고 다소 불안정한 절삭이 이루어진 것을 볼 수 있는데, 이는 가

공이 시편의 유연한 끝단에서 시작됨에 따라 절삭초기의 공구진입에 의한 큰 진동성분이 그후의 가공에 악영향을 미치기 때문이다.



← Feed direction   ← Pickfeed direction

Fig. 10 Machined surface on concave point A

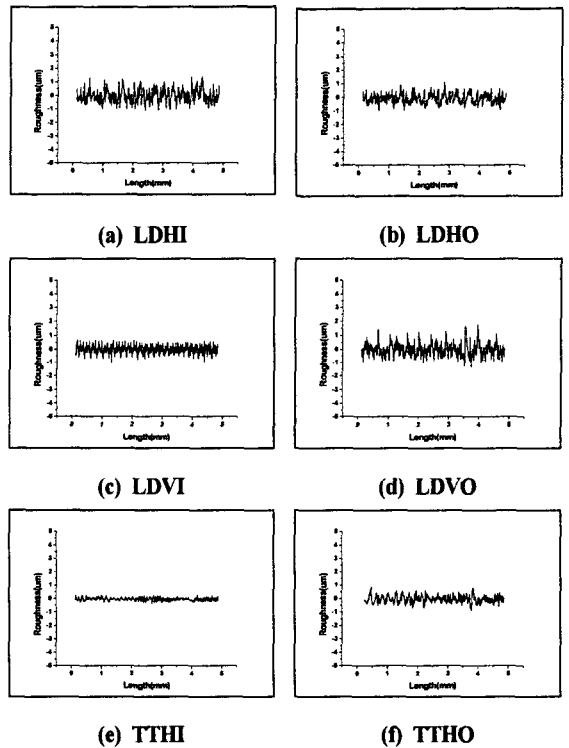


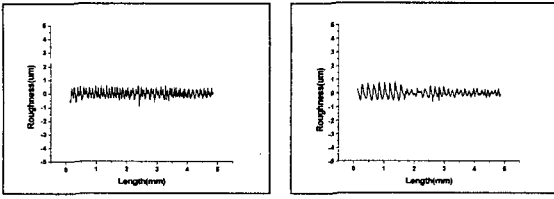
← Feed direction   ← Pickfeed direction

Fig. 11 Machined surface on convex point E

### 3.4 가공경로와 표면거칠기와의 관계

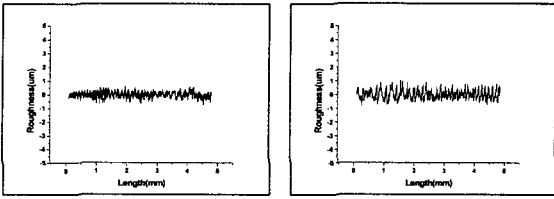
가공된 터빈블레이드의 표면상태를 측정하여 가공경로에 따른 표면거칠기와의 관계를 살펴보았다. 측정은 가장 떨림이 크게 발생한 A와 E지점에서 피드방향으로 5mm를 측정하고, Ra값으로 표면거칠기를 비교하였다.



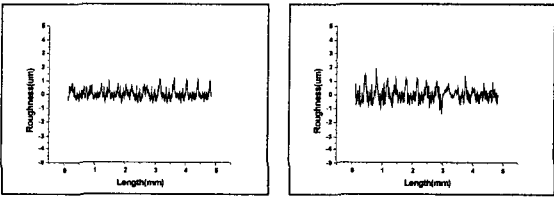


(g) TTVI (h) TTVO

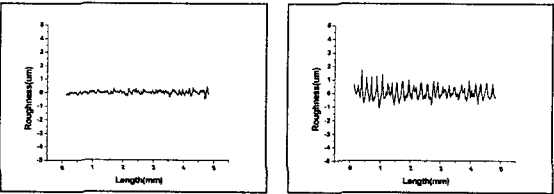
Fig. 12 The surface roughness of feed-direction at point-A of concave surface



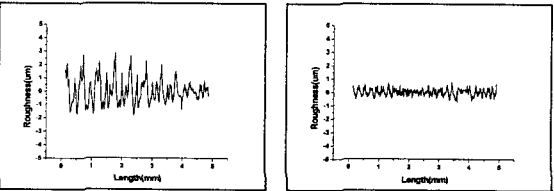
(a) LDHI (b) LDHO



(c) LDVI (d) LDVO



(e) TTHI (f) TTHO



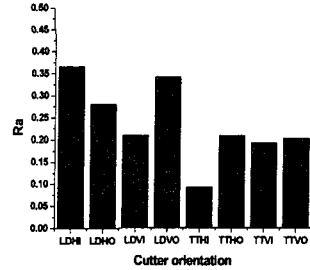
(g) TTVI (h) TTVO

Fig. 13 The surface roughness of feed-direction at point-E of convex surface

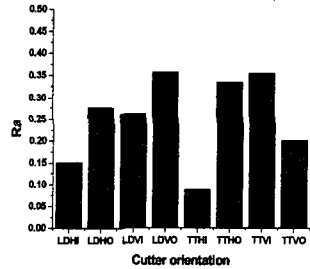
Fig. 12와 13은 오목한 면의 A지점과 볼록한 면의 E 지점의 피드방향 표면거칠기를 측정된 결과이다. 모든 가공경로 중에서 TTHI의 표면거칠기가 가장 양호한 반면에, LDVO, TTHO, TTVI의 경우는 좋지 못하다는 것

을 알 수 있다.

Fig. 14는 표면거칠기 값들을 쉽게 비교하기 위해 오목한 면의 A지점과 볼록한 면의 E지점의 피드방향 Ra 값을 나타낸 그래프이다.



(a) The point-A of Concave surface



(b) The point-E of Convex surface

Fig. 14 The Ra value

오목한 면과 볼록한 면 모두에 대해 절삭속도에 의한 가진력의 영향이 작은 TTHI로 가공했을 때의 표면거칠기가 가장 양호함을 알 수 있고, LDVO로 가공했을 때의 표면거칠기가 가장 좋지 않다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

가공경로와 리드/틸트각(Lead/Tilt angle)을 변화시켜 가면서 쉘틸레버 형태의 자유곡면을 가진 터빈블레이드를 5축고속가공하면서 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 다른 가공경로에 비해 급격하게 떨림이 증가하므로 유연한(Flexible) 터빈블레이드의 가공시, 가장 좋지 않은 가공경로이다.

(4) 절삭속도가 증가할수록, 강성이 큰 블록소재를 가공할 때는 절삭력이 감소하여 표면품질이 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(KOSEF) 우수연구센터 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) J.Tlusty, S.Smith, 1997, "Current Trends in High Speed Machining", Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME, Vol.119, pp 664~666.
- (4) G.Elber, 1995, "Freeform surface region optimization for 3-axis and 5-axis milling", Computer-Aided Design, Vol. 27, No.6, pp 465~470.
- (5) S.Bedi, S.Gravelle, Y.H.Chen, 1997, "Principal Curvature Alignment Technique for Machining Complex Surfaces", Manufacturing Science and Engineering, Vol.119 ASME, pp756~765.
- (6) N.Rao, F.Ismail and S.Bedi, 1997, " Tool Path Planning for Five-axis Machining Using The Principal Axis Method", International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Vol. 37, No. 7, pp 1025~1040.

(7) R.Baptista, J.F.Antune Simoes, 2000, "Three and Five-axes milling of sculptured surfaces", Journal of Materials. Processing Technology 103, pp398~403.

(8) H.K.Tonshoff, J. Hernandez-Camacho, 1989, "Die manufacturing by 5 and 3 axes milling" J. Mech. Working Technol. 20, pp 105~119.