

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.12.1088

공구경로 및 자세의 선정과 이송률 제어를 통한 임펠러 표면조도 개선에 관한 연구

황종대[†] · 오지영* · 정윤교**

(2008년 7월 16일 접수, 2008년 11월 9일 수정, 2008년 11월 18일 심사완료)

A Study on the Improvement of Surface Roughness of Impeller by Selection of Tool Path and Posture and Control of Feedrate

Jong Dae Hwang, Ji Young Oh and Yoon Gyo Jung

Key Words: 5-Axis Machining(5축가공), Post-Processor(포스트프로세서), Feedrate(이송률), Machining Trajectory(가공경로), Tool Posture(공구자세), Surface Roughness(표면거칠기)

Abstract

5-axis NC machining has a good advantage of the accessibility of tool motion by adding two rotary axes. It offers numerous advantages such as expanding machining fields in parts of turbo machineries like impeller, propeller, turbine blade and rotor, reasonable tool employment and great reduction of the set-up process. However, as adding two rotary axes, it is difficult to choose suitable machining conditions in terms of tool path, tool posture, feedrate control at a tool tip and post-processing. Therefore in this paper, it is proposed to decide suitable machining condition through an experimental method such as adopting various tool paths, tool postures, and feedrate types. Machining experiment on AL7075 for impeller is performed to define suitable machining condition, and measurement of surface roughness on machined surfaces depended on each machining condition is performed. By defining suitable machining condition, we should have conclusion as improving the surface quality in the aspect of surface roughness and machined shape of surface.

1. 서론

기호설명

- La : 리드각(Lead angle)
- Ta : 틸트각(Tilt angle)
- Ia : 공구기울임각(Inclination angle)
- Fd : 피드방향(Feed direction)
- Pd : 피크피드방향(Pick Feed direction)
- PL : 피벗거리(Pivot Length)
- GL : 게이지거리(Gage Length)

5축 가공은 3개의 직진이송축에 2개의 회전이송축을 추가함으로써 자유도가 확장되어 공구의 접근성이 좋아지는 장점을 갖는다. 이러한 장점은 임펠러, 프로펠러, 터빈블레이드, 로터와 같은 터보기계류 부품 및 특수가공 분야로 가공 영역을 확장하는 결과를 낳았으며 치구 및 총형커터 사용을 획기적으로 줄일 수 있는 등 다양한 기술적 진보를 꾀하게 되었다. 그러나 기술적 발전과 더불어 회전이송축 추가에 따른 간섭, 과절삭, 포스트프로세싱(Post-processing) 문제 등을 야기하였으며 자유 곡면을 갖는 형상의 부품에 대하여 표면조도를 개선하기 위한 가공경로 및 공구자세에 대한 연구나 공구 끝에서의 일정한 이

[†] 책임저자, 회원, 창원대학교 메카트로닉스 기술혁신센터

E-mail : ybigbell@changwon.ac.kr

TEL : (055)213-2867 FAX : (055)213-2877

* 창원대학교 대학원 기계공학과

** 창원대학교 기계공학과

송률을 제어하기 위한 연구 등 당면과제 해결에 대한 요구가 증가하였다. 따라서 이러한 5축가공의 제반문제를 해결하기 위하여 대표적인 5축가공품인 임펠러를 대상으로 하여 실험적, 해석적인 접근방법으로 적절한 가공방법을 제시하고자 하였다.

임펠러는 원심압축기를 비롯한 유체기계 내부에서 고속으로 회전하면서 유체에너지를 운동에너지로 변화시킨다. 특히 임펠러의 표면조도는 블레이드 사이를 통과하는 유체의 흐름에 영향을 주게 되므로 원활한 유동을 위하여 표면조도 개선은 필수적이다. 표면조도 개선을 위한 일반적인 절삭조건인 회전수, 이송속도, 절삭깊이 등에 관한 연구⁽¹⁾는 이미 광범위하게 연구된 바 있으나 임펠러와 같은 5축가공품에 직접적인 영향을 미치는 가공경로나 공구자세 선정에 대한 연구는 드물다. 가공경로 및 공구자세에 관한 연구⁽²⁾는 수행된 바 있으나 본 연구와 같이 원심펌프용 임펠러에 관한 연구와는 차이가 있었다. 또한 원심펌프용 임펠러의 가공기술에 관한 연구⁽³⁾가 수행되었으나 다양한 공구경로 및 자세제어에 관한 연구는 아니었으며 임펠러에 대한 다양한 절삭조건과 공구자세에 관한 연구⁽⁴⁾가 수행되었으나 표면조도가 아닌 형상정밀도를 개선하기 위한 연구였다. 따라서 본 연구에서는 임펠러 표면조도를 개선하기 위하여 가공경로 및 공구자세를 실험적인 방법으로 찾고 가공 후의 표면거칠기와 표면형상 등을 비교하여 적절한 가공경로 및 공구자세를 결정하기 위한 기초자료를 마련하고자 하였다.

임펠러를 비롯한 자유곡면의 표면조도를 개선하기 위한 5축가공 과정에서 또 하나의 중요한 요소는 회전이송시 발생하는 공구 끝 이송속도와 축이송계 이송속도의 불일치에 따른 실제가공 이송속도의 변동이며 이로 인한 가공시간의 지연 및 이송률 과다에 따른 과부하 등의 문제가 있다. 공구 끝의 이송속도를 일정하게 제어하기 위한 관련 연구가⁽⁵⁾ 수행되었으나 CL 데이터 자체의 곡률 반경 및 회전각이 큰 경우 단순히 최단직진거리로 새로운 이송속도를 계산함으로써 이송속도의 오차를 완벽하게 보정하지 못하는 한계가 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 직진

이송에 비하여 회전이송 거리가 큰 경우의 가공에 대해서도 일정한 이송속도를 제어할 수 있도록 함으로써 표면조도와 절삭부하를 최소화할 수 있는 안정적인 5축가공을 구현하고자 하였다.

따라서 추천 가공경로조건, 공구자세조건 정의 및 일정 이송률 제어 조건을 제시함으로써 임펠러의 표면조도를 개선하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 실험장치 및 조건

Fig. 1의 (a)는 본 연구의 실험과정에서 5축가공을 수행하는 장면이며 Fig. 1의 (b)는 5축가공 결과 가공된 임펠러의 형상이다. 본 실험에서 적용한 5축가공기는 Fig. 1의 (a)와 같이 테이블 틸팅축이 X축 중심으로 45도 회전된 상태로 틸팅 및 로테이션 이송을 하는 특수한 메커니즘을 가지는 70-eV 5축가공기(DMG, Germany, 최대회전수:30,000RPM)이고 적용 대상 임펠러는 Fig. 1의 (b)와 같이 블레이드 날수가 6개이며 수력펌프에 사용되는 임펠러로서 고품질의 표면조도가 요구된다. 각 실험에 적용된 절삭조건은 Table 1과 같고 표면조도 측정을 위하여 적용된 표면조도계는 축침식 표면조도계(SurfTest SU-600, Mitutoyo)이다. 표면조도 측정을 위하여 기초실험에서는 블레이드 날개 중간부분에 5회 반복 측정하여 평균값을 구하고, 공구자세 조합실험에서는 각 경우의 공구자세로 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 가공한 해당 블레이드 곡면을 허브와 인접한 부분(Hub region), 슈라우드와 인접한 부분(Shroud region) 및 중간영역 부분(Middle region)으로 나누고 각각을 또한 3회씩 반복 측정하여 평균값을 취하였다.



(a) 5-axis machining

(b) Machined part

Fig. 1 5-axis NC machining for impeller

Table 1 Machining conditions

Process	Roughing	Semi-finishing	Finishing
Step over(mm)	8	1.5	0.15
Depth of cut(mm)	1	0.5	0.2
Feedrate (mm/min)	5,000	2,000	2,000
Cutter type	φ 16 flat endmill	φ 6 taper ball endmill	φ 6 taper ball endmill
Rotational speed(RPM)	10,000	10,000	10,000
Workpiece	AL 6061		

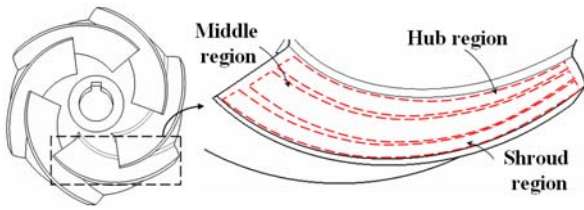


Fig. 2 Measuring region of surface roughness

3. 가공경로 및 공구자세의 선정

3.1 가공경로 선정

추천 가공경로조건을 선정하기 위하여 임펠러의 블레이드 6날에 대하여 각각 1날 당 가공경로를 다르게 하여 실험을 수행하였다. 가공경로는 Fig. 3과 같이 6가지의 상이한 궤적으로 하였으며 각각의 경로는 다음과 같다. 즉 가로방향, 양방향, 지그재그경로(Longitudinal Direction, Both way and Zig zag path, 이하 LDBZ), 가로방향, 한방향, 상향절삭(Longitudinal Direction, One way and Up cutting, 이하 LDOU), 가로방향, 한방향, 하향절삭(Longitudinal Direction, One way and Down cutting, 이하 LDOD), 세로방향, 양방향, 지그재그경로(Transverse Direction, Both way and Zig zag path, 이하 TDBZ), 세로방향, 한방향, 상향절삭(Transverse Direction, One way and Up cutting, 이하 TDOU), 세로방향, 한방향, 하향절삭(Transverse Direction, One way and Down cutting, 이하 TDOD)으로 생성하였으며 각각의 궤적에 따라 5축가공을 수행하였다. 6가지 경로조건으로 가공된 블레이드 곡면의 중간영역에 동일한 5지점에 대하여 각각 표면조도를 반복 측정하였다. 측정결과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 LDOD 경로를 적용한 블레이드의 표면조도가 R_a $0.44\mu\text{m}$ 으로, 선택한 경로조건

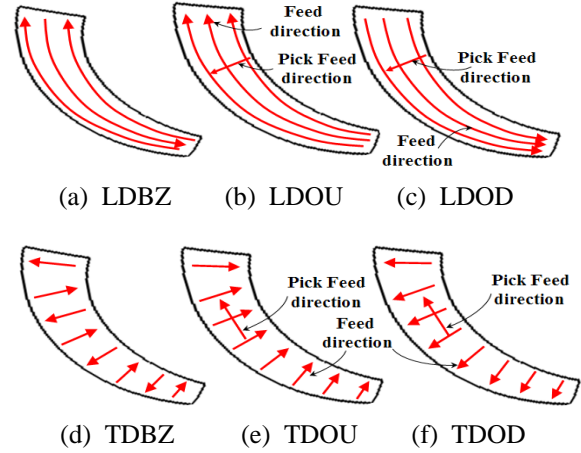


Fig. 3 Various tool path for deciding suitable machining trajectory type

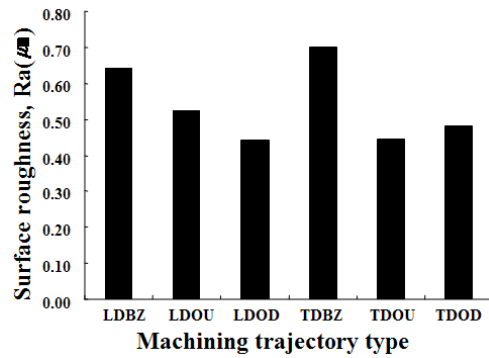


Fig. 4 Surface roughness according to machining trajectory

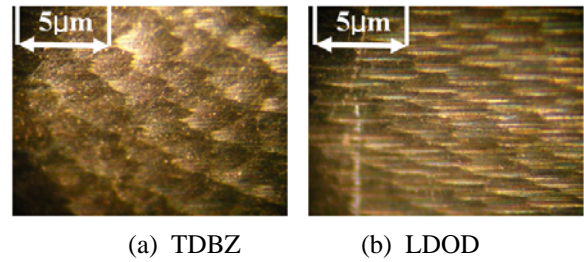


Fig. 5 Comparison of surface shapes based on machining trajectory

중에서 가장 양호하였으며 가장 표면조도가 나쁜 TDBZ 경로에 비하여 약 $0.25\mu\text{m}$ 정도 향상된 결과를 나타내었다. 또한 Fig. 5와 같이 현미경으로 촬영한 표면형상 비교에서도 TDBZ 경로에 비하여 양호한 표면형상 특성을 보임을 알 수 있다. 따라서 주어진 실험 조건에서 추천 가공경로는 LDOD 경로임을 알 수 있다.

3.2 공구자세의 결정

가공경로실험에서 정의한 추천가공경로인 LDOD 경로를 일률적으로 적용하여 임펠러의 6날개에 대하여 추천공구자세 조건을 찾기 위한 리드각 La과 틸트각 Ta 적용 실험을 수행하였다. 여기서 리드각과 틸트각은 Fig. 6에 정의되어진 바와 같이 공구가 피크피드 방향 Pd를 중심으로 하여 피드방향 Fd로 기울어져 가공될 때의 경사각을 리드각이라 하고, 피드방향을 중심으로 하여 피크피드방향으로 기울어진 경사각을 틸트각이라 하였다.

본 실험에서 가공 대상이 되는 임펠러의 경우에서의 추천 공구자세 각도 선정을 위하여 실험의 기준이 되는 기준 리드각과 기준 틸트각을 선정하는 기초실험을 우선 수행하였다. 기준 리드각을 선정하기 위한 실험은 테이퍼 볼 엔드밀의 테이퍼각을 고려하여 간섭이 발생하지 않는 최저 틸트각인 10°로 고정된 상태에서 리드각을 각각 7°, 9°, 11°, 13°, 15° 및 17°로 변화를 주어 주어진 조건 가운데 가장 양호한 리드각을 구하고자 하였고, 틸트각에 관한 실험은 리드각을 0°로 고정된 상태에서 10°, 12°, 14°, 16°, 18° 및 20°로 변화를 주어 주어진 조건 가운데 가장 양호한 틸트각을 구하고자 하였다. Fig. 7의 (a)는 기준리드각을 찾기 위한 실험결과이고 (b)는 기준틸트각을 찾기 위하여 표면조도변화를 나타낸 실험결과로서 각각의 측정 데이터를 커브 피팅한 결과 리드각은 약 10°부근에서, 틸트각은 17.5°부근에서 가장 양호한 표면조도의 값을 나타내는 것으로 추정되었다.

위의 기초실험을 통하여 얻은 기준리드각과 기준 틸트각을 중심으로 하여 틸트각과 리드각의 조합에 의한 공구자세 실험을 계획하였다. 기준

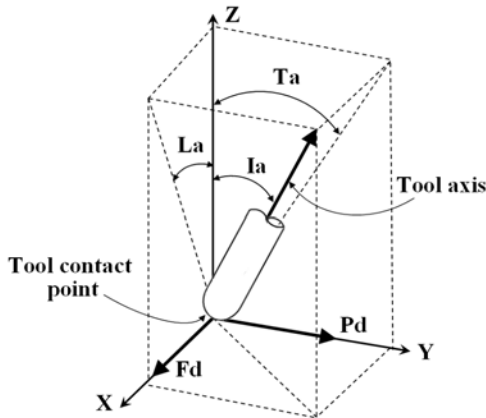


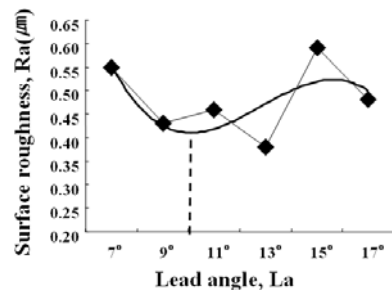
Fig. 6 Two types of inclined angle

틸트각 17.5°를 중심으로 하여 14°, 16°, 18°, 20°로 선정하고 4가지 경우의 틸트각에 대하여 각각 리드각을 0°, 3°, 6°, 10°, 13°, 16°로 조합하여 총 24가지 경우의 공구자세에 대하여 5축가공 실험을 수행하였다. 또한 공구자세가 표면조도에 미치는 영향을 좀 더 쉽게 식별하기 위하여 기초실험에서 적용한 조건보다 스텝오버량을 2배 늘려

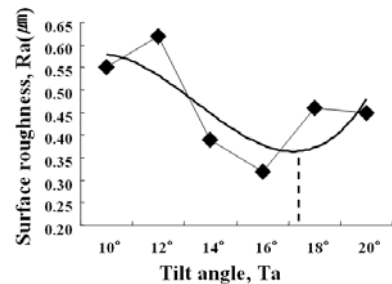
Table 2 Comparison of surface roughness, Ra(μm) based on relationship between tilt and lead angle

Lead angle	Tilt angle 14 °				Tilt angle 16 °			
	hub	mid	shr	Ave	hub	mid	shr	Ave
0 °	1.48	1.49	1.46	1.48	0.86	0.83	0.90	0.86
3 °	1.55	1.56	1.69	1.60	0.79	0.91	0.97	0.89
6 °	1.63	1.56	1.67	1.62	0.88	1.00	0.92	0.93
10 °	1.67	1.67	1.63	1.66	0.97	1.00	1.02	1.00
13 °	1.72	1.68	1.74	1.71	1.06	1.05	1.00	1.04
16 °	1.80	1.80	1.72	1.77	1.13	1.21	1.01	1.12
Ave.	1.64	1.63	1.65	1.64	0.95	1.00	0.97	0.97

Lead angle	Tilt angle 18 °				Tilt angle 20 °			
	hub	mid	shr	Ave	hub	mid	shr	Ave
0 °	0.81	0.82	0.80	0.81	1.09	0.99	0.85	0.98
3 °	0.75	0.78	0.85	0.79	0.92	0.95	0.97	0.95
6 °	0.73	0.79	0.89	0.80	0.90	1.01	0.95	0.95
10 °	0.84	0.80	0.90	0.85	0.88	0.96	1.02	0.95
13 °	0.86	0.90	0.88	0.88	0.97	0.95	0.96	0.96
16 °	0.85	0.78	0.83	0.82	1.03	0.94	1.00	0.99
Ave.	0.81	0.81	0.86	0.83	0.96	0.97	0.96	0.96



(a) Selection of basic lead angle

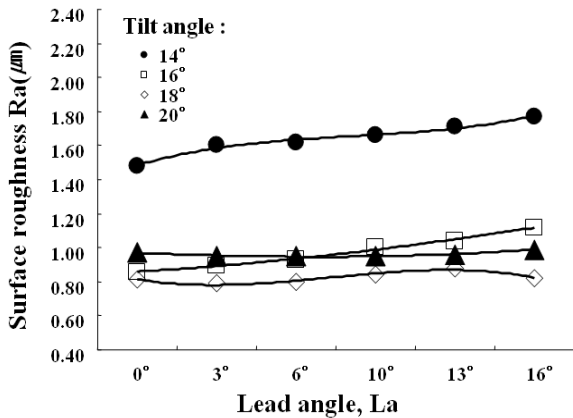


(b) Selection of basic tilt angle

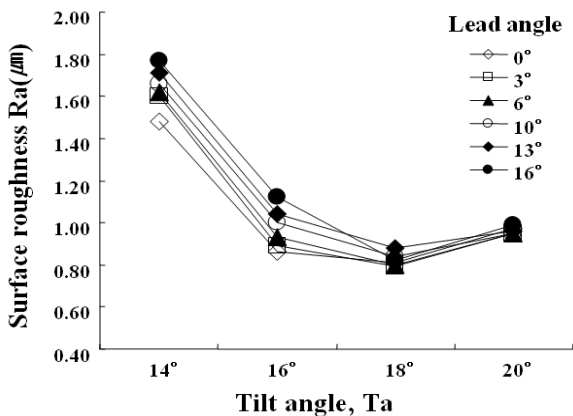
Fig. 7 Surface roughness according to tool posture

서 가공하였다. 측정결과는 Table 2에 나타내었다. Fig. 8은 Table 2를 그래프로 나타낸 것으로서 표면조도에 영향을 미치는 주요공구자세는 Fig. 8의 (b)에서 보이는 바와 같이 틸트각으로 틸트각 변화의 관점에서 비교하면 본 실험에서의 대상 임펠러에서는 기초실험 결과로 추정된 바와 유사하게 틸트각이 18°일 때 표면조도가 가장 양호하였다. 그리고 리드각은 틸트각에 비하여 표면조도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보이며 리드각 변화의 관점에서 비교하면 기초실험에서 추정되어진 10° 부근이 아니라 리드각이 작을수록 표면조도가 다소 양호한 값을 나타내는 경향을 보인다.

본 실험에서 틸트각 변화에 따른 그래프의 분



(a) Surface roughness of various tilt angles according to various lead angle



(b) Surface roughness of various lead angles according to various tilt angle

Fig. 8 Surface roughness according to tool posture based on relationship between tilt and lead angle

산정도를 회귀방정식의 결정계수 R^2 를 이용하여 파악한 결과 틸트각 14°일 때는 98.8%, 16°일 때는 99.68%, 18°일 때는 95.8%, 20°일 때는 96.6%로 오차범위 5% 이내로 파악되었다.

4. 일정 이송률 제어

4.1 이송률 제어 알고리즘

자유곡면의 5축가공에서 곡면의 곡률이 클수록 역기구해로 구한 NC 데이터와 가공물을 실제 절삭하는 공구 끝점인 CL 데이터간의 이송률은 큰 차이를 보인다⁽⁵⁾. 이는 5축제어가공에서의 이송속도는 CL데이터의 이송속도가 아니라 역변환한 NC 데이터에 의한 이송축의 이송속도를 나타내기 때문이다. Fig. 9는 이에 대한 개념도를 나타내고 있다. Fig. 9의 (a)는 임펠러 허브부에 대한 5축가공과 같이 오목한 형상을 가공할 때 이송률의 오차를 나타내는 개념도로써 CL 데이터의 이송거리가 피봇길이와 게이지길이를 합한 거리 (PL+GL) 만큼 움푹된 공구 틸팅축에서의 NC 데이터의 거리보다 길어지게 되어 주어진 NC 데이터의 이송률에 비해 속도가 빨라지게 되므로 절삭부하가 커지는 경우이다. 반면 Fig. 9의 (b)는 블레이드 곡면 가공과 같이 볼록한 형상의 경우로서 이때는 오목한 경우와 반대로 CL 데이터의 이송거리가 NC 데이터의 이송거리보다 짧아지게 되어 불필요한 가공시간의 지연이 예상된다.

따라서 NC 데이터로 지령한 이송률을 실제가공 경로인 CL 데이터의 이송거리에 맞게 재설정 해주어야 하며 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$D_{CL} = |P_{CL1} - P_{CL0}|, \quad T_{CL} = D_{CL} / F_b$$

$$F^i = (P_{NC1}^i - P_{NC0}^i) / T_{CL}, \quad F_a = \sqrt{\sum_{i=1}^5 (F^i)^2} \quad (1)$$

여기서 D_{CL} : CL 데이터 P_{CL1} 과 P_{CL0} 간의 거리

F_b : 지령 이송속도

T_{CL} : D_{CL} 거리를 F_b 로 갈 때 소요시간

F^i : 각 축에서의 보정 이송속도

F_a : 축 보정 이송속도

식 (1)에서 CL 데이터의 이송거리, D_{CL} 은 현재 CL 데이터와 다음 CL 데이터 사이의 직선거리이다.

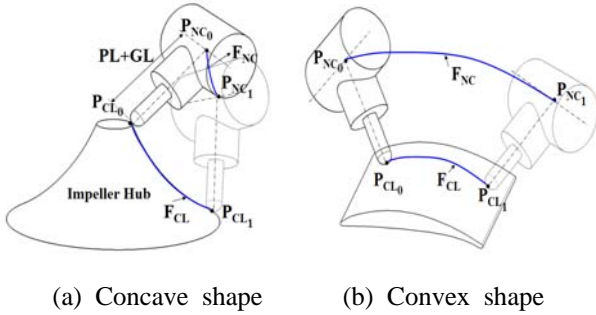


Fig. 9 Schematic of feedrate deviation between CL and NC

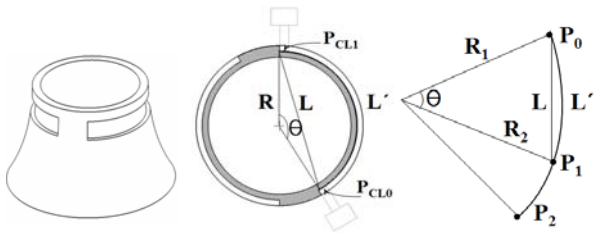


Fig. 10 Schematic of compensated feedrate for rotary motion

그러나 5축가공에서 많은 경우 Fig. 10과 같은 항공기 엔진 하우징 부품의 슬롯가공과 같이 회전이송만 존재하거나 직선이송거리가 회전이송거리에 비하여 매우 작을 수 있다. 이 때 직선거리 L 과 회전이송거리 L' 간의 거리 오차에 의하여 일정한 이송률을 제어하지 못하게 된다. 따라서 본 연구에서는 식 (2)와 같이 곡률의 변화가 없는 경우에는 식 (1)에서 구한 보정 이송속도, F_a 를 사용하고 그렇지 않은 경우에는 실제 회전이송거리를 고려한 새로운 이송속도, F'_a 를 적용함으로써 공구 끝에서 어떠한 경우라도 일정한 이송속도를 제어할 수 있도록 하였다.

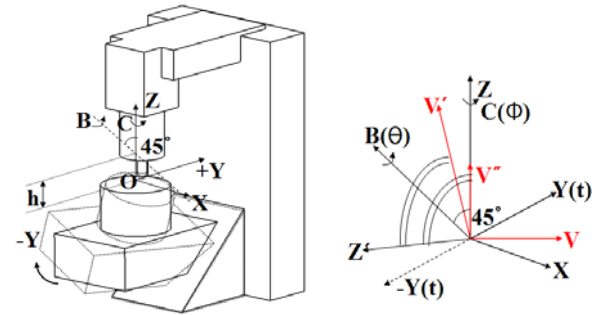
If $\overline{P_1 - P_0} = \overline{P_2 - P_1}$ then $F_a = F'_a$, else $F_a = F'_a$, $F'_a = KF_a$, $K = \frac{L'}{L}$ (2)

여기서 $\theta = \cos^{-1} \left(\frac{P_{0x}P_{1x} + P_{0y}P_{1y} + P_{0z}P_{1z}}{|\mathbf{P}_0||\mathbf{P}_1|} \right)$

$R = \max(R_1, R_2)$, $L = |\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_1|$, $L' = R\theta$
 F'_a : 회전이송 보정 이송속도

4.2 일정 이송률제어 Post-processor

주어진 가공경로의 공구위치 및 공구자세 벡터 조합인 CL 데이터를 해당 5축 가공기의 메커니즘에 맞는 NC 데이터로 변환하기 위하여



(a) 70-eV 5-axis machine (b) Tilting and Rotation axis

Fig. 11 Special type of mechanism in 5-axis machine

Post-processing 작업이 수행되어야 한다. 5축가공기는 크게 3가지 형태의 메커니즘을 가지는데⁽⁶⁾ 각 회전이송축의 중심축 형태에 따른 6가지 기본 메커니즘 타입에 대한 Post-process를 구현한 바 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 Z축이 X축 중심으로 45도 회전축을 틸팅 회전축으로 하는 특수한 경우의 메커니즘을 가진 5축가공기를 사용하여 가공하였으며 개념도는 Fig. 11의 (a)와 같다. 특수한 형태 메커니즘에 대한 관련연구가⁽⁸⁾ 있었으나 핵심요소인 틸트각과 로테이션각에 대한 정의가 없어 적용상의 한계가 있었다. 따라서 6가지의 전형적인 메커니즘에 특수한 메커니즘을 추가 개발함으로써 Post-processor의 확장성과 실용성을 더하였다.

Fig. 11의 (b)는 틸팅축과 로테이션 축을 정의하기 위한 개념도이다. Fig. 11의 (b)에서 Z' 은 Z축을 B축 중심으로 틸트각, θ 만큼 회전했을 때의 벡터이고, V' 은 공구축, V 를 B축 중심으로 θ 만큼 회전했을 때의 벡터이다. $\angle Z'Z = \angle Z'V'$ 이므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z'_z Z_z = Z'_x V'_x + Z'_y V'_y + Z'_z V'_z \quad (3)$$

여기서 Z' 벡터와 V' 벡터는 식 (4) 및 식 (5)로부터 구할 수 있으며 틸트각, θ 는 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$Z' = ZR_B(\theta) = ZR_x(45)R_y(\theta)R_x(-45) \quad (4)$$

$$V' = [V]R_B(\theta) = (V)R_x(45)R_y(\theta)R_x(-45) \quad (5)$$

$$\theta = \cos^{-1}(2u_k - 1) \quad (6)$$

B축의 틸트각(θ)이 정의되면 C축의 로테이션각(ϕ)을 식 (7) 및 식 (8)로부터 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}'' &= \mathbf{Z} = \mathbf{V}' \mathbf{R}_B(\theta) \mathbf{R}_z(-\phi) \mathbf{R}_B(-\theta) \\ &= \mathbf{V} \mathbf{R}_z(-\phi) \mathbf{R}_B(-\theta) \\ &= \mathbf{V} \mathbf{R}_z(-\phi) \mathbf{R}_x(45) \mathbf{R}_y(-\theta) \mathbf{R}_x(-45) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{\sin 45 \sin \theta \mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j + \mathbf{u}_j \cdot \mathbf{u}_k}{\mathbf{u}_i^2 + \mathbf{u}_j^2} \right) \quad (8)$$

로테이션각과 틸트각이 구해지면 변환행렬, \mathbf{T} 를 이용하여 CL 데이터의 좌표계 위치벡터, \mathbf{P}_p 를 NC 데이터의 머신좌표계 위치벡터, \mathbf{P}_m 으로 변환하며 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{P}_m = \mathbf{P}_p \cdot \mathbf{T}, \quad \mathbf{T} = \prod_{k=1}^8 \mathbf{T}_k, \quad (9)$$

$$\text{여기서 } \mathbf{T}_1 = \mathbf{T}_{xyz}(x_0, y_0, z_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_0 & y_0 & z_0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_2 = \mathbf{R}_z(-\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_3 = \mathbf{T}_z(-h) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -h & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_4 = \mathbf{R}_x(45) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 45 & \sin 45 & 0 \\ 0 & -\sin 45 & \cos 45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_5 = \mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_6 = \mathbf{R}_x(-45) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 45 & -\sin 45 & 0 \\ 0 & \sin 45 & \cos 45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_7 = \mathbf{T}_z(h) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & h & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_8 = \mathbf{T}_{xyz}(-x_0, -y_0, -z_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_0 & -y_0 & -z_0 & 1 \end{bmatrix}$$

따라서 2절에서 구한 최종보정 이송률을 적용한 NC 데이터는 아래와 같고 이로부터 일정 이송률이 제어된 Post-processor가 완성되었다.

$$\text{NC} = \mathbf{P}_m, \theta, \phi, F_a$$

4.3 이송률제어를 고려한 가공 결과

이송률제어를 고려한 포스트프로세서의 검증 및 가공 실험을 수행하기 위하여 앞선 공구조합실험에서의 틸트각 16°에서 리드각을 변화하여 생성된 경우의 궤적으로 이송률을 제어하여 임펠러를 가공하였다. 이송률 제어를 고려한 가공 결과를 평가하기 위하여 블레이드 곡면에 대한 표면조도를 측정하였다. 표면조도측정은 앞선 실험에서의 방법과 동일하게 각 블레이드에 대하여 허브와 인접한 부분, 중간 부분, 슈라우드와 인접한 부분으로 나누어 각 부분에 3번씩 측정하였다. Fig. 12는 표면조도 측정결과 그래프로서 이송률을 제어하지 않은 가공(Uncontrolled Feedrate Cutting, ufc)과 이송률을 제어한 가공(Controlled Feedrate Cutting, cfc)에서 허브와 인접한 부분, 중간부분, 슈라우드와 인접한 부분의 표면조도를 각각 3부분을 측정하여 평균값으로 나타낸 것이다.

Fig. 12에서 보는 바와 같이 이송률을 제어하지 않은 가공에 비하여 이송률을 제어한 가공이 전체적으로 양호한 표면조도값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

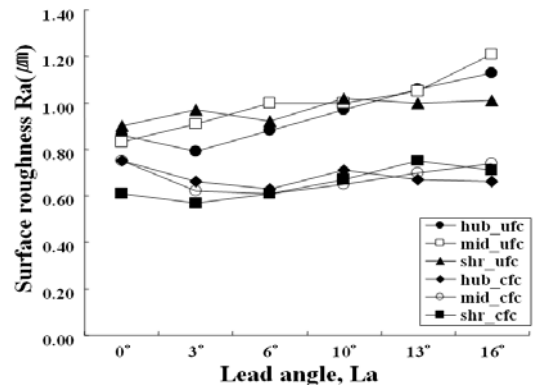


Fig. 12 Comparison of surface roughness based on feedrate type

5. 결 론

본 연구에서는 임펠러의 표면조도의 개선을 위하여 가공경로와 공구자세를 결정하기 위한 일련의 실험과 일정한 이송률로 절삭하는 알고리즘을 개발을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 표면조도에 영향을 미치는 가공경로는 가로방향, 한방향, 하향절삭(LDOD) 일 때가 가장 양호한 표면조도를 얻을 수 있었다.

(2) 표면조도에 영향을 미치는 주요공구자세는 틸트각으로 판단되고 본 연구의 조건범위 내에서 가장 양호한 표면조도를 나타내는 틸트각은 18°일 때이고 리드각은 표면조도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보이며 리드각이 작을수록 표면조도가 다소 향상되는 경향을 보였다.

(3) 공구축 이송계의 이송속도를 공구끝에서의 이송속도로 보정하고 회전이송이 큰 경우에 대한 이차적인 이송속도 보정을 통하여 공구 끝에서 일정한 이송률로 절삭할 수 있도록 하는 알고리즘을 개발하였으며 적용결과 공구에 작용하는 부하를 일정하게 함으로써 향상된 표면조도를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Fontaine, M., Devillez, A., Moufki, A. and Dudzinski, D., 2007, "Modeling of Cutting Forces

in Ball-End Milling with Tool-Surface Inclination Part II. Influence of Cutting Conditions, Run-Out, Ploughing And Inclination Angle," *J. of MPT*, 189, pp 85~96.

(2) Lauwers, B., Dejinghe, P. and Kruth, J. P., 2003, "Optimal and Collision Free Tool Posture in Five-Axis Machining Through the Tight Integration of Tool Path Generation and Machine Simulation," *Computer-Aided Design*, 35, pp. 421~432.

(3) Chen, S. L. and Wang, W. T., 2001, "Computer Aided Manufacturing Technologies for Centrifugal Compressor Impellers," *J. of MPT*, Vol. 115, pp. 284~293

(4) Lim, P. and Yang, G. E., 2007, "Optimization of Finish Cutting Condition of Impeller with Five-Axis Machine by Response Surface Method," *J. of KSME*, Vol. 31, No. 9, pp. 924~933

(5) Lee, C. S. and Lee, J. P., 2001, "Calculating the Feedrate of 5-Axis NC Machining Data for the Constant Cutting Speed at a CL-point," *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 6, No. 2, pp. 69~77.

(6) Lee R. S. and She C. H., 1997, "Developing a Postprocessor for Three Types of Five-Axis Machine Tools," *J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, pp. 658~665.

(7) Cho, E. J., Hwang, J. D., Jung, Y. G., 2006, "Study on the Development of Post-Processor for 5-Axis NC Machining," *J. of KSMTE*, Vol. 12, No. 1. pp. 53~58.

(8) Han, S. G. and Zhao, J., 2007, "A Generalized Simulation Model for Surface Topography Prediction on 5-axis Ball-end Milling," *Asian symposium for Precision Engineering and Nanotechnology*.