

5축 볼엔드밀 가공 NC 데이터의 최적 공구 길이 계산

조현욱*, 박정환**

Optimal Tool Length Computation of NC Data for 5-axis Ball-ended Milling

Hyeon-Uk Cho* and Jung Whan Park**

ABSTRACT

The paper presents an efficient computation of optimal tool length for 5-axis mold & die machining. The implemented procedure processes an NC file as an initial input, where the NC data is generated by another commercial CAM system. A commercial CAM system generates 5-axis machining NC data which, in its own way, is optimal based on pre-defined machining condition such as tool-path pattern, tool-axis control via inclination angles, etc. The proper tool-length should also be provided. The tool-length should be as small as possible in order to enhance machinability as well as surface finish. A feasible tool-length at each NC block can be obtained by checking interference between workpiece and tool components, usually when the tool-axis is not modified at this stage for most CAM systems. Then the minimum feasible tool-length for an NC file consisting of N blocks is the maximum of N tool-length values. However, it can be noted that slight modification of tool-axis at each block may reduce the minimum feasible tool-length in mold & die machining. This approach can effectively be applied in machining feature regions such as steep wall or deep cavity. It has been implemented and is used at a molding die manufacturing company in Korea.

Key words : 5-Axis Machining, Optimal Tool Length, NC Data

1. 서 론

NC 가공에 있어서, 5축 가공은 3축 가공과 비교 하였을 때 많은 이점 및 품질향상 효과가 있는 것으로 알려져 있다^[1]. 5축 가공의 가장 큰 이점은 한번의 세팅으로 복잡한 형상을 가공하는데 걸리는 시간을 줄일 수 있고, 더 짧은 공구를 사용함으로써 가공 정밀도를 높일 수 있다는 점이다.

공구 길이는 NC 가공에 있어 가공품질에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 공구가 짧을수록 가공 품질은 우수해진다^[2]. 공구 길이가 적절하지 않을 경우, 즉 공구 길이가 길 경우에는 공구 떨림으로 공구가 파손되거나 과·비절삭(Overcut, Uncut)이 발생하기 쉽

고, 공구 길이가 적정 수준 이하일 경우 공구 홀더 (Tool Holder)와 가공 소재(Workpiece)의 간섭 등의 불량 발생할 수 있다. 본 연구에서는 공구 홀더 하단부에서 공구 끝점(Tip)까지를 공구 길이로 정의하고 (Fig. 1), 공구 홀더 및 샹크(Shank)와 가공대상 곡면 간의 충돌이 발생하지 않는 최단 공구 길이를 최적 공구 길이로 정의한다.

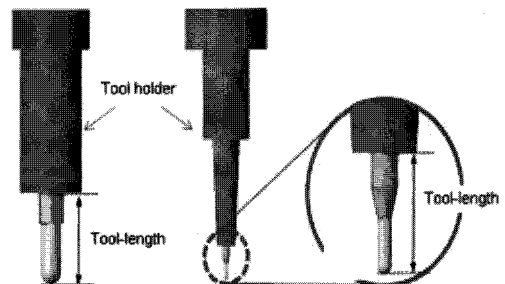


Fig. 1. Definition of Tool-length.

*학생회원, 영남대학교 대학원 기계공학과

**종신회원, 영남대학교 기계공학부

- 논문투고일: 2010. 04. 01

- 논문수정일: 2010. 08. 13

- 심사완료일: 2010. 08. 24

실제 가공 시 세팅 할 공구길이는 상용 CAM 시스템으로 NC Data를 생성한 이후, 그 NC Data에 적용할 수 있는 공구 길이를 계산하여 사용하게 된다. 즉 상용 CAM 시스템의 5축 가공 NC Data 생성은, 공구경로형식(Tool-path Pattern)과 공구자세(Tool-orientation), 초기 공구길이 등의 가공조건을 지정하게 된다. 또한 CL(Cutter Location) 데이터 계산 후 이루어지는 최적 공구길이 계산과정에서는, 결정된 공구 자세를 변경하지 않는 것이 일반적이다. 그런데 사출 금형 급경사 부위 등의 영역 가공에서는, 약간의 공구 자세 변경으로 공구길이를 더 줄일 수 있는 경우가 발생한다. 따라서 상용 CAM 시스템에서 생성한 동시 5축 가공용 NC Data에 대해 최적 공구길이를 계산하는 연구가 의미를 가진다.

본 연구는 상용 CAM 시스템에서 생성한 동시 5축 가공용 NC Data를 분석하여 적용 공구 길이를 줄일 수 있는 공구 자세를 계산하고, 이에 따른 새로운 NC Data를 생성하는 것을 목적으로 한다. 부연한다면, 동시 5축 가공 시 적용 공구 길이에 영향을 미치는 공구 자세를 선별하고(Fig. 2(a)의 자세 2), Fig. 2(b)와 같이 공구 자세를 수정해줌으로써 적용 공구 길이를 줄일 수 있다(Fig. 2(c)).

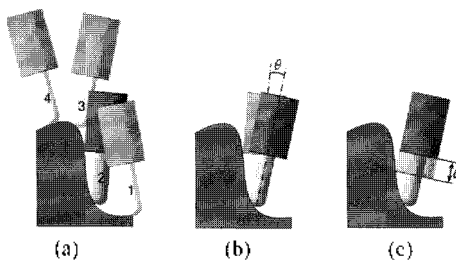


Fig. 2. Computation of Optimal Tool-length.

2. 최적 공구길이 계산 절차

2.1 전반적인 절차

본 연구에서 제안하는 시스템의 전반적인 절차는 다음과 같이 정리할 수 있다(Fig. 3). 입력 데이터는 상업용 CAM 시스템으로 작성한 동시 5축 NC Data, 금형 CAD model (Master Model), 기계, 홀더(Tool Holder) 및 공구 정보, 그리고 최소 공구길이 설정값 등이다. 여기서 ‘최소 공구길이 설정값’이란 홀더에 장착 가능한 최소 공구 길이를 의미하며, 공구의 형상 및 크기, 종류에 따라 금형 제작 업체에서 미리 설정해 놓은 값이다.

- (1) 초기 공구길이 계산
모든 NC 블록에 대해, 현재 공구자세에서의 블록별 최적 공구길이 계산
- (2) Target NC 블록 선별
공구길이 수정 대상 NC 블록의 선정
- (3) 최적 공구길이 산출
Target NC 블록에 대해, 각 블록 당 최단 가능 공구길이 계산 및 최적 공구길이 결정
- (4) 최적 공구자세 산출
Target NC 블록에 대해, 최적 공구길이를 만족하는 범위 내에서 최적 공구자세 결정

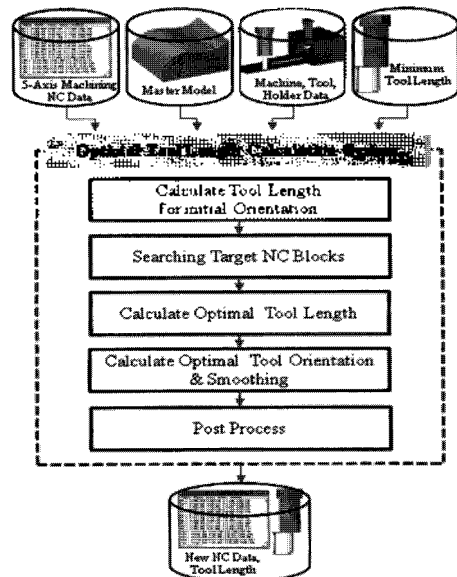


Fig. 3. Overall Procedure.

2.2 초기 공구길이 계산 및 Target NC 블록 선별

초기 공구길이 계산은, 상용 CAM 시스템에서 생성한 NC Data의 모든 NC 블록에 대해, 현재 공구자세를 유지한 상태에서 최적 공구 길이를 계산하는 과정이다. 각 NC 블록에서 공구길이 계산은 공구 홀더 및 섕크와 Master Model간의 충돌 검사를 통해 이루어지며, 자세한 내용은 별도 참고문헌을 참고한다¹⁾. 본 연구의 초기 공구길이 계산 과정을 다음과 같이 나타내었으며, 상세한 과정은 부록의 Fig. A-1에 나타내었다.

Procedure of Initial Tool Length Computation

0. Input : NC File, Master Model, Tool Data, Holder Data

1. $i = 1$;

2. Tool Length = Lm ;
3. Solve Inverse Kinematics;
4. Translate Machine and Tool;
5. If Holder Collision Occurs then Increase Tool Length, goto 5;
6. Record NC Block Number, Tool Length;
7. If i = N then goto 9;
8. i = i + 1, goto 2;
9. End.

금형 가공용 NC Data에 대한 초기 공구길이 계산 결과 예를 Fig. 4에 보이고 있는데, 각 NC 블록에서 계산한 공구길이 중 최대값이 79 mm이므로, NC 가공 시 사용 가능한 최소 공구길이는 79 mm임을 알 수 있다. 참고로 이 예에서 적용한 공구는 반경 8 mm 볼 엔드밀 공구이며, 사용자가 입력한 최소 공구길이 설정값은 65 mm이다(점선 표시).

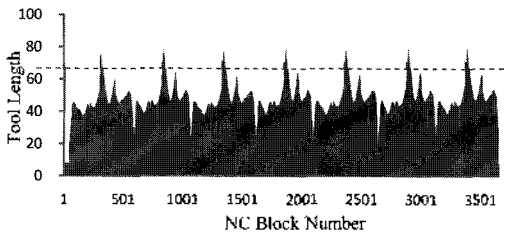


Fig. 4. Initial Tool Length Computation.

Target NC 블록은 공구자세 수정을 통해 기존 최적 공구길이를 줄이고자 하는 대상 NC 블록으로서, 최소 공구길이 설정값 이상의 공구길이를 가지는 NC 블록을 선택한다. Fig. 3의 예에서는 공구길이 >65 mm(점선 표시) 이상인 블록이 해당된다.

2.3 최적 공구길이 산출

2.3.1 공구자세 범위 설정

최적 공구길이 산출 단계에서는 각 Target NC 블록에 대해 공구자세를 수정함으로써 사용 가능한 공구길이를 줄이는 작업을 수행한다. 이 과정에서 수정 가능한 공구 자세 범위를 설정하도록 한다. 참고로 일반적인 상용 CAM 시스템은 공구경로 및 공구자세 등 측면에서 나름대로 최적화된 NC Data를 생성하기 때문에, 개별 NC 블록의 공구자세 변화를 가능한 최소화 하는 것이 의미가 있다.

본 연구에서 공구자세는 광역 기준 좌표계(World Coordinate System)에서 정의되는 두 개의 공구 회전

각인 고도각(Elevation Angle)과 방위각(Azimuth Angle)으로 표현하고(Fig. 5(a)), 고도각과 방위각의 조정 범위를 $\pm 5^\circ$ 로 제한하여 수정 가능 공구자세 범위를 설정한다(Fig. 5(b)). 이 값은 공구 자세 최적화를 위해 공구자세 수정 시 수정 허용 각도범위 설정에 관한 연구¹⁶⁾를 참고하여 설정한 수치이며, 이 각도 범위는 가공 시 적용되는 feed 혹은 공구 중심점 간의 거리에 따라 조절될 수 있는 값이다.

2.3.2 최적 공구길이 산출

원본 NC Data의 공구 자세를 기준으로 고도각과 방위각의 조정 범위를 $\pm 5^\circ$ 로 설정하고, 그 범위 내부를 일정 간격(e.g., 1°)으로 분할한다. 그리고 분할된 각 공구 자세에 대해 최적 공구길이를 계산한다. 이와 같은 방법으로 단일 NC 블록에서 공구길이를 계산한 결과 예를 Fig. 6에 보이고 있다. 본 연구에서는 이를 공구길이 맵(Tool Length Map: TL-map)이라고 부른다.

그림의 예에서는 기존 공구자세(중심위치)에 대한 공구길이가 79 mm이고, 설정된 공구회전각 범위에 대해 1° 간격으로 계산한 공구길이는 64~97 mm임을 알 수 있다. 따라서 이 NC 블록에서의 최소 가능 공구길이는 최소값인 64 mm가 된다. 물론 다른 Target NC 블록에서는 상이한 최소값이 나올 수 있다.

선별된 Target NC 블록 모두에 대해 이러한 계산을 수행하여 개별 블록의 최소 공구길이($\{L_k; k=1, \dots, N\}$)를 구하고, 이 중 가장 큰 최소 공구길이를 최적 공구길이(i.e., $L_o = \text{MAX}\{L_k; k=1, \dots, N\}$)로 결정한다. 본 연구의 최적 공구길이 계산 과정을 다음과 같이 나타냈었으며, 상세한 과정은 부록의 Fig. A-2에 나타내었다.

Procedure of Optimal Tool Length Computation

0. Input : Master Model(IGES), Tool, Holder Data, Search Angle Range, Search Angle Interval, NC File, Selected NC Block Numbers

1. i = 1;
2. Calculate Tool Center Point;
3. Calculate Tool Vector;
4. Solve Inverse Kinematics;
5. Translate Machine and Tool;
6. If Holder Collision Occurs then Increase Tool Length, goto 6;
7. Record Tool Length

8. If End of Searching Angle Occurs then goto 10;
9. Go Next Angle, goto 6;
10. Search Minimum Length;
11. Record Minimum Length;
12. If $i = Nt$ then goto 14;
13. $i = i + 1$, goto 2;
14. Search L_0 (=Maximum Length);
15. End.

이제 다음 단계로서, Target NC 블록 중 기존 공구길이 > L_0 인 블록만을 대상으로 해당 NC 블록의 공구길이 L_0 가 되도록 공구자세를 수정하게 된다(2.4 절 참조).

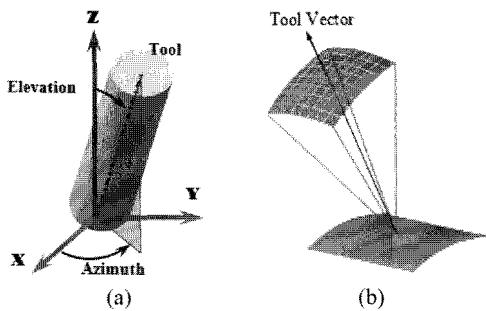


Fig. 5. Tool-orientation Angles and Defined Limit.

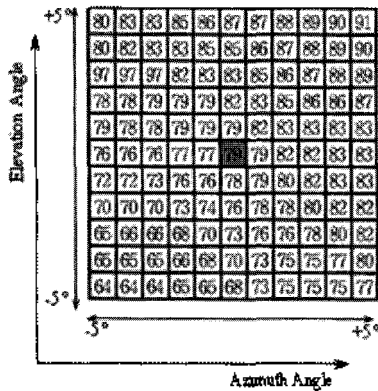


Fig. 6. Sample Result of Tool-length Map.

2.4 최적 공구자세 산출

최적 공구자세를 산출하기 위해서는 2.3절에서 계산한 target NC 블록의 TL-map(Tool Length Map)을 활용한다. Fig. 7(a)는 축벽을 가공하는 일련의 NC 블록에 대한 공구자세 및 TL-map을 보여주면, 각 NC 블록에서의 TL-map 중심점은 원본 NC data의 공구자세를 의미한다. 또한 TL-map에서 초록색으로

표시된 영역은 공구길이 < L_0 (2.3.2절의 최적 공구길이)인 공구자세를 의미하는데, 결과적으로 이 영역 내에서의 공구자세 변화는 앞서 계산한 L_0 에 영향을 미치지 않는다. Fig. 7(b)에 이러한 영역을 초록색으로 표시한 예를 보이고 있으며, 본 연구에서는 FOA (Feasible Orientation Area)라고 한다.

이제 target NC 블록 중 기존 공구길이 > L_0 인 블록을 대상으로 공구자세를 수정하는데, FOA 내에 위치하는 공구자세 중 기존 공구자세와 가장 가까운 위치를 최적 공구자세로 결정한다(Fig. 7(b)). 그림의 예에서는 기존 공구자세에서 방위각과 고도각을 각각 (-3°, -4°) 변화시켜, 공구길이를 79 mm에서 65 mm로 설정하는 경우를 나타낸다. 본 연구의 최적 공구자세 계산 과정을 다음과 같이 나타냈었으며, 상세한 과정은 부록의 Fig. A-3에 나타내었다.

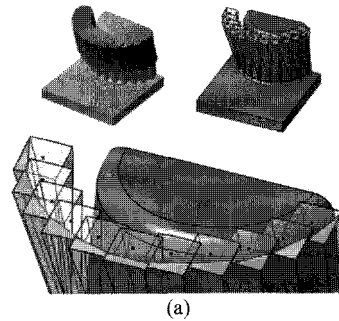


Fig. 7. Concept of Optimal Tool Orientation Computation.

Procedure of Optimal Tool Orientation Computation

0. Input : Master Model(IGES), Tool, Holder Data, Search Angle Range, Search Angle Interval, NC File, Selected NC Block Numbers

1. $i = 1$;

2. Calculate Tool Center Point;

3. Calculate Tool Vector;
4. Solve Inverse Kinematics;
5. Translate Machine and Tool;
6. If Stroke Over Occurs then goto 9;
7. If Machine or Tool Collision Occurs then goto 9;
8. Record Feasible Angle, goto10;
9. Record Infeasible Angle, goto10;
10. If End of Searching Angle Occurs then Calculate Nearest Tool Orientation, goto 12;
11. Go Next Angle, goto 6;
12. Record New Tool Orientation;
13. If(i = Nt) then{goto 15};
14. i = i + 1, goto 2;
15. End.

이 방법을 적용하여 최적 공구길이를 보장 하도록 공구자세를 수정하였을 때, NC 블록 간 공구 회전각 변화 사례를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서는 각 NC 블록의 블록 간 거리에 비례하여 TL-map을 보이고 있으며, 수정 전후의 공구자세 변화 추이를 곡선으로 표시하였다.

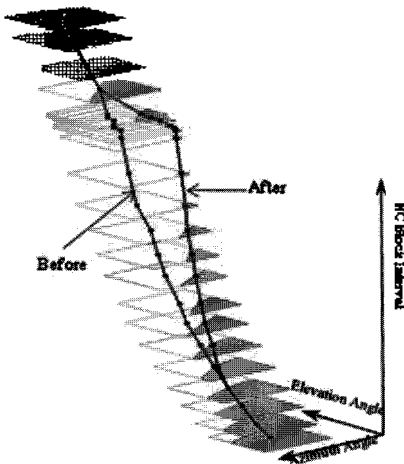


Fig. 8. Tool Orientation Variation.

참고로 수정 전후의 공구자세 변화량을 비교하였을 때 원본 NC data에 비해 급격한 변화량을 보이는 구간이 나타날 수 있는데, 절삭가공 시 바람직하지 않은 결과를 가져올 수도 있다. 이 문제는 적절한 방식으로 NC 블록 간 공구자세 평활화(Smoothing 혹은 Fairing)를 수행함으로써 어느 정도 해결이 가능하다.

본 연구에서는 각 NC 블록의 FOA(Feasible Orientation Area)를 벗어나지 않는 범위에서 NC 블록 간 거리를 고려하여 공구자세 곡선(Fig. 8)을 평활화 하는 방법을 추후 연구로 진행하고자 한다.

3. 구현 및 적용사례

3.1 시스템 구현

본 연구에서 제안하는 방법을 Windows XP, Visual C++ 환경에서 I-Master CAM 시스템을¹⁾ 기반으로 구현하였으며, Fig. 9에 GUI와 함께 보이고 있다. 초기 공구 길이 계산(①), 초기 공구 길이로 Target NC 블록 선별(②), 최적 공구길이와 공구자세 계산(③), NC Data로딩(④) 및 최종 계산결과 출력창(⑤) 등이 있다.

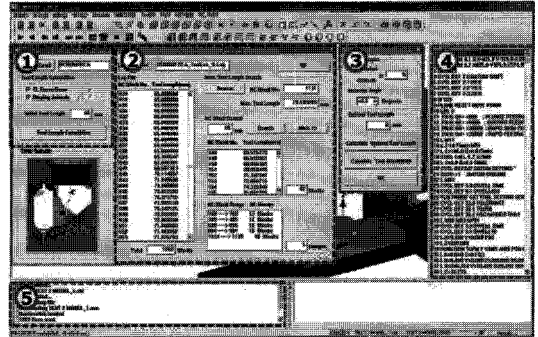
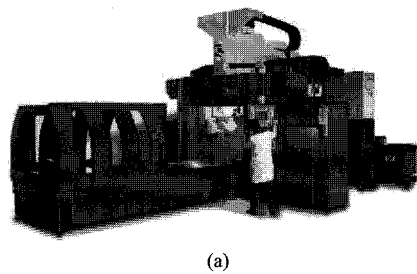
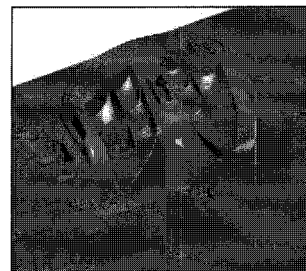


Fig. 9. Implemented System.



(a)



(b)

Fig. 10. 5-axis Machine and Molding Die Model.

Fig. 10(a)는 본 연구에서 적용한 FTP사의 DINO 5축 가공기이며, Fig. 10(b)는 본 연구내용을 적용하기 위한 예제 금형 모델이다.

3.2 적용 사례

자동차 부품 성형 사출금형을 가공하기 위한 5축 가공 데이터 2가지(NC-A, NC-B)에 대해 본 연구결과를 적용하고 결과를 살펴보았다. 각 NC 파일에 대해 초기 공구길이를 계산한 결과를 Fig. 11에 보이고 있다. 참고로 본 NC 데이터는 PowerMill™ 시스템에서 작성하였으며, 각각 3650개, 8602개 NC 블록을 가진다. 절삭 가공 부위는 Fig. 12에 나타내었다.

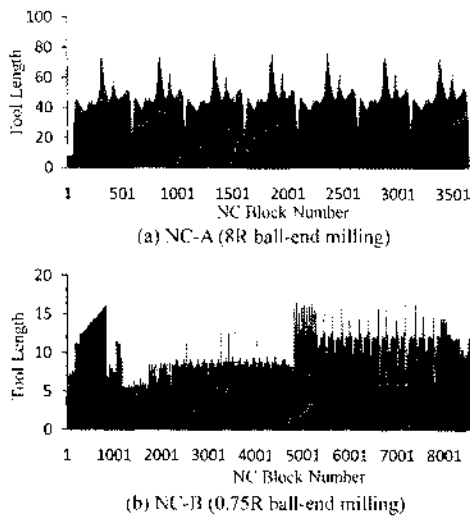


Fig. 11. Initial Tool Length Computation.

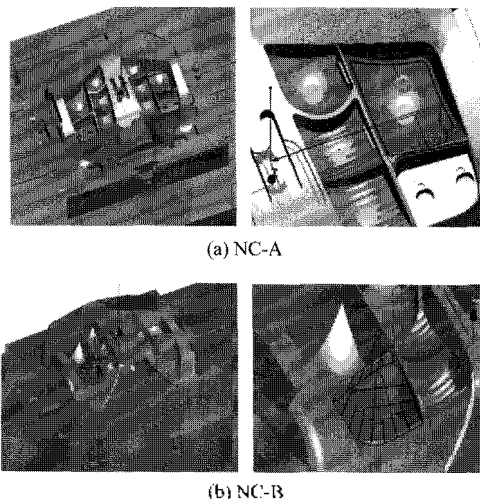


Fig. 12. Machining Tool-paths.

초기 공구길이 정보(Fig. 11)를 기준으로 할 경우, NC-A의 경우 공구길이 최대값은 79.1 mm, NC-B의 최대값은 17.1 mm이다. 따라서 실제 절삭가공 시 설정하는 공구길이는 이 최대값보다 커야 한다. 참고로 본 시스템을 사용하지 않을 경우, 실제 가공에서는 각각 85 mm와 23 mm로 세팅하였다.

다음으로, 원본 NC Data의 적용 공구길이(초기 공구길이 최대값)와 본 연구결과를 적용하여 계산한 최적 공구길이를 비교하여 표시하였다(Fig. 13). 이때 최소 공구길이 설정값은 각각 65 mm, 15 mm이고, 이 값을 초과하는 초기 공구길이를 가지는 Target NC 블록은 각각 241개, 548개를 선별하였다. NC-A의 경우 79.1 mm에서 64.8 mm, NC-B는 17.1 mm에서 14.9 mm로, 초기 공구길이 대비 13~18% 공구길이 감소가 가능하였다. 이 결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

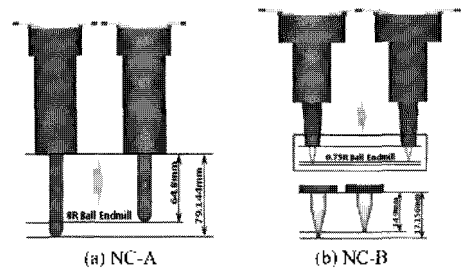


Fig. 13. Comparisons of Tool-length Computation.

Table 1. Summary of Tool-length Computation

	N	Nt	Li	Is	Im	Lo	Rd	T
A	3650	241	79.1	85	65	64.8	18	4.1
B	8602	548	17.1	23	15	14.9	13	8.5

N: 전체 NC 블록 개수, Nt: Target NC 블록 개수, Li: 초기 공구길이 최대값, Is: 절가공 시 세팅한 공구길이, Im: 최소 공구길이 설정값, Lo: 최적 공구길이, Rd: 공구길이 감소율(%), T: 계산 소요 시간(분), (Core2Quard Q6600 2.4GHz, 2GB RAM).

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 상용 CAM 시스템에서 생성한 동시 5축 가공용 NC Data를 분석하여, 더 짧은 공구길이를 적용할 수 있는 새로운 NC Data를 생성하는 시스템을 개발하였다. 전체 NC Data에 대한 초기 공구길이를 계산한 후, 기준 공구길이를 초과하는 NC 날들에 대해 최소한의 공구자체 수정을 통하여 최적 공구길이를 줄이는 방안을 제시하였다.

현재 본 시스템은 국내 자동차 부품 사출금형 제작 업체에서 활용하고 있으며, 다음과 같은 향후 연구과제를 고려하고 있다.

- 충돌 검사 곡면 모델 정확도 향상
- 공구자세 최적화 시 평활화

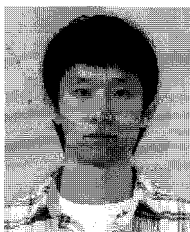
본 연구에서는 공구홀더, 생크와 가공곡면 간의 충돌 검사 시, 가공 형상(Cut Workpiece)이 아니라 설계 형상(Design Surface)을 고려 하였는데, 가공여유가 상대적으로 큰 황삭 등의 가공에 적용하고자 한다면 모의가공을 통하여 가공 형상을 보다 정확하게 모델링 하는 과정이 필요할 것이다. 그리고 공구자세 최적화 과정(2.4절 참조)에서 언급하였듯이, 급격한 공구자세 변화를 방지하는 공구자세 평활화 과정에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. Mason, F., "5×5 for High-productivity Airfoil Milling", *American Machinist*, Nov., pp. 37-39, 1991.
2. Tonshoff, H. K. and Hernaadx-Camacho, J., "Die Manufacturing by 5-and 3-axis Milling", *Mechanical Working Technology*, Vol. 20, pp. 105-119, 1989.
3. Hopkin, B., "Benefits of Positional Five-axis Machining", *Moldmaking Technology*, May 2005.
4. Prosenjit Gupta, Ravi Janardan, Jayanth Majhi, and Tony Woo, "Efficient Geometric Algorithms for Workpiece Orientation in 4 and 5-axis NC Machining", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 8, pp. 577-587, 1996.
5. Jianhua Fan and Alan Ball, "Quadric Method for Cutter Orientation in Five-axis Sculptured Surface Machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, pp. 788-801, 2008.
6. Tang, K., Chen, L.-L. and Chou, S.-Y., "Optimal Workpiece Setups for 4-axis Numerical Control Machining Based on Machinability", *Computers in Industry*, Vol. 37, pp. 27-41, 1998.
7. Takata, S., Tsai, M. D. and Inui, M., "A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation

Using a Workpiece Model", *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 417-420, 1989.

8. Hool, T. V., "Real Time Shaded NC Milling Display", *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 15-20, 1986.
9. Park, J.-W. and Lee, J.-G., "5-axis Machining ; C-space (Configuration Space); Effective Radius ; Optimal Tool Position", *Journal of the Korean Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 7, No. 1, pp. 34-41, 2002.
10. Kang, I.-S., Kim, J.-S., Kim, S.-W. and Lee, K.-Y., "The Characteristics of Cutting Force and Surface Roughness According to Tool Tilting Angle in 5-axis High Speed Machining of Molds", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 63-69, 2007.
11. Kang, J.-G., "Interference-Free Tool Path with High Machinability for 4- and 5-axis NC Machining of Free-Formed Surface", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 2 pp. 146-153, 1998.
12. Lee, J.-G., Yang, S.-J. and Park, J.-W., "Setup Data Generation for Position 5-axis Machining of Die and Mold", *Journal of the Korean Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 13, No. 5, pp. 382-390, 2008.
13. Kim, S. J., "NC Milling Productivity Incensement by Short Milling Tool Setting Method", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 5, May 2008.
14. Delcam Korea, <http://www.delcam.co.kr>
15. Cubictek, <http://www.cubictek.com>
16. Castagnetti, C., Duc, E. and Ray, P., "The Domain of Admissible Orientation Concept: A New Method for Five-Axis Tool Path Optimisation", *Computer-Aided Design*, Vol. 40, pp. 938-950, 2008.
17. Jun, C.-S., Cha, K. D. and Lee, Y.-S., "Optimal Tool Orientations for 5-Axis Machining by Configuration-Space Search Method", *Computer-Aided Design*, Vol. 35, pp. 549-566, 2003.
18. Lim, T.-S., Lee, C.-M., Kim, S.-W. and Lee, D.-W., "Evaluation of Cutter Orientations in 5-Axis High Speed Milling of Turbine Blade", *Journal of Materials Processing Technology* 130-131, pp. 401-406, 2002.
19. Park, J.-W., "Tool-path Generation for 5-axis Machining", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 26, No. 10, pp. 18-24, 2009.



조 현 욱

2007년 영남대학교 기계공학부 학사
 2010년 영남대학교 대학원 기계공학과 석사
 2010년~ 영남대학교 대학원 기계공학과 박사과정
 관심분야: 5-Axis Machining, 설계자동화



박 정 환

1987년 서울대학교 물리학과 학사
 1991년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1995년 한국과학기술원 산업공학과 박사
 1995년~1997년 Chrysler Technology Center 연구원
 1997년~현재 영남대학교 기계공학부 교수
 관심분야: 5-axis machining, Virtual Manufacturing

Appendix: Detailed procedures

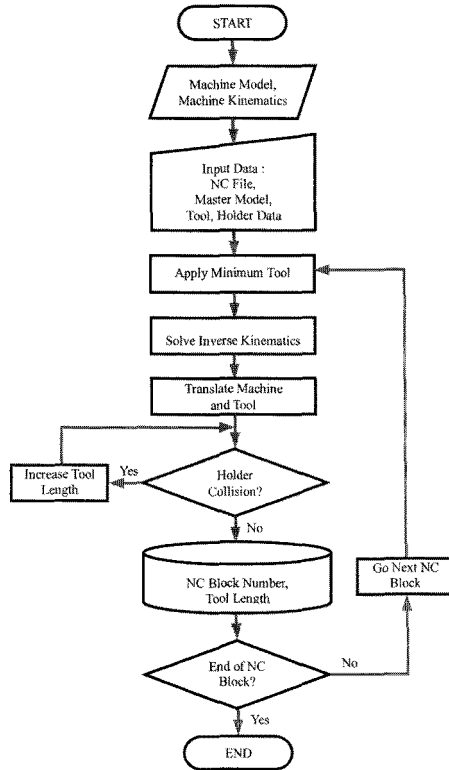


Fig. A-1. Procedure of Initial Tool Length.

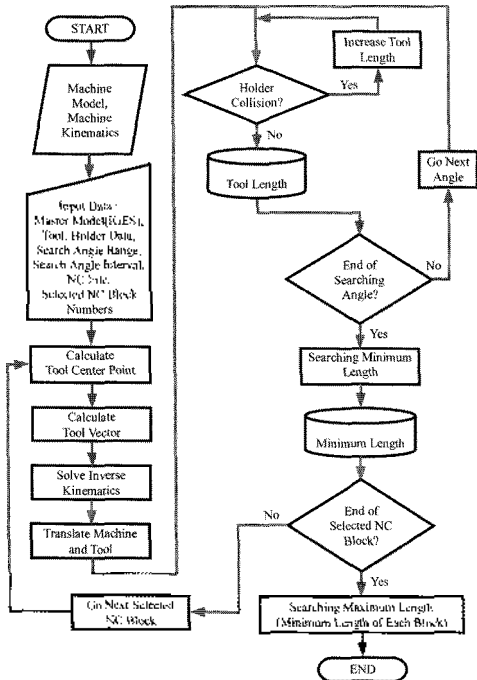


Fig. A-2. Procedure of Optimal Tool Length Computation.

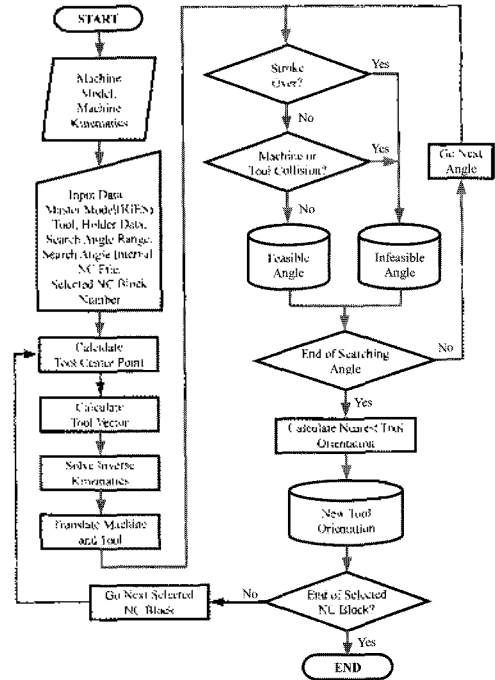


Fig. A-3. Procedure of Optimal Tool Orientation.