

## 다이레스 CNC 포밍을 위한 등고선 공구경로 생성

강재관\*(경남대 기계자동화공학부), 진영길, 윤세봉, 강병수, 염경섭(경남대 대학원 기계공학과)

Contouring Tool Path Generation for Dieless CNC Forming

J. K. Kang\*, Y. G. Jin, S. B. Yun, B. S. Kang, K. S. Youm (Mech. Eng. Dept., KNU),

### ABSTRACT

The sheet parts are formed with dies conventionally. But this conventional forming process is not suited to small volume and varied production for the reason of high cost. For the solution of this problem, a new forming process, which is called CNC incremental sheet forming, is being introduced. This process can form sheet parts without die, and is very well suited to small volume and varied production in space flight and automobile. In this paper, dieless CNC forming system based on a machining center is developed. A special device to grasp and pull the blank sheet built in the machining center and tool path generation S/W from STL file of 3-D model are developed. Several sheet parts are incrementally formed to verify the effectiveness of the developed system.

**Key Words :** Dieless CNC forming(다이렉트 CNC 포밍), Sheet metal forming(판재 성형), Contouring tool path(등고선공구경로), STL offset(STL 오프셋)

### 1. 서론

자동차, 선박, 항공기, 전철 등의 외장품은 2차원 또는 3차원 곡면을 갖는 금속 판재로 제작되는 경우가 많다. 곡면 제품 특히 3차원 곡면 제품을 성형하는 방법으로는 전통적으로 서로 일치하는 한 쌍의 금형을 사용하여 판재를 프레스 성형한다. 그러나 프레스 성형 공법은 고가의 금형비와 설계에서 양산에 이르기까지 많은 시간이 요구되는 문제점이 있어 대량 소량생산, 단 납기로 표현되는 최근의 제품 개발 환경에 따라 금형 없이(dieless) 금속판재를 다양한 형태의 제품으로 제조할 수 있는 점진판재성형(incremental sheet forming - 이하 다이렉트 CNC 포밍)<sup>[1-6]</sup>기술이 크게 주목을 받고 있다.

다이렉트 CNC 포밍의 원리는 설계 형상의 CAD 정보로부터 점진 성형에 필요한 공구 궤적에 관한 정보를 추출하여 CNC 운동을 이용하여 판재를 점진적으로 성형하는 방식이다. 즉 Fig. 1에서와 같이 블랭크 재(SUS 또는 알루미늄)를 X-Y 테이블 상에 클램핑한 후 성형은 Z축에 장착된 볼 형상의 공구가

점진적으로 블랭크 재를 강압하면서 형을 만들어 나간다. 이 때 X-Y 테이블과 Z축의 이송 제어는 CAD 형상으로부터 생성된 NC 데이터에 의해 수행된다. 성형 과정 중 블랭크 재를 지지하기 위한 지그가 필요하며 공구는 등고선 모양의 공구 궤적을 그리며 일주 운동을 한 후 Z축 방향(아래쪽)으로 공구를 보내는 방식으로 점진 성형이 수행된다.

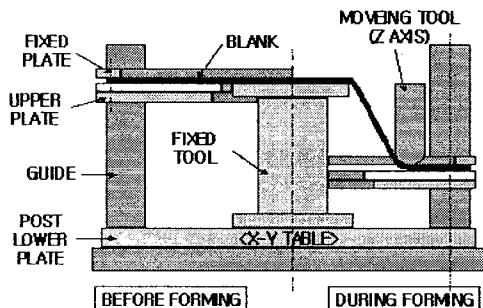


Fig. 1 Principle of dieless CNC forming

본 연구에서는 다이렉트 CNC 포밍을 이용하여 다

양한 판재성형 가공물을 제작하는 과정을 구현한다. 또한 3차원 CAD형상으로부터 점진판재성형에 필요한 CNC 코드를 생성하는 방법에 대하여 논의하고 CNC 머시닝 센터에 블랭크재를 잡아주는 치구부를 제작하여 Positive forming을 구현한 결과를 설명한다.

## 2. 디아레스 CNC 포밍

### 2.1 공구경로 생성 절차

점진판재성형공법을 이용한 Dieless CNC forming에서의 공구경로는 폐속조형기에서 사용하는 적층가공(Layered manufacturing) 방법과 유사하다<sup>[7-9]</sup>. 폐속조형에서는 대상물의 3차원 CAD 형상을 STL화일로 변환한 뒤 층별로 슬라이싱한 후 이 정보를 따라 레이저 빔 등을 조사하여 성형을 수행한다. 그러나 디아레스 CNC 포밍에서는 Fig. 2와 같이 공구의 끝이 구(球) 형태인 공구를 사용하기 때문에 3차원 형상이 직접 슬라이싱된 CC(Cutter Contact)점이 아닌 일정한 반경을 가지는 공구 중심점의 위치가 필요하다. 이를 위해서 계산된 CC점을 곡면의 법선벡터 방향으로 공구반경 r만큼 옵셋시키는 방법을 생각할 수 있으나 슬라이싱 평면상의 각 CC점에서의 법선 벡터의 방향이 일정하지 않기 때문에 옵셋 점들이 동일 평면상에 존재한다는 보장을 할 수 없다.

따라서 등고선 공구경로를 획득하기 위해서는 CC점의 옵셋이 아닌 3차원 형상 자체를 공구의 반경 만큼 옵셋 한 뒤 이 옵셋 된 형상을 슬라이싱하여 가공 경로를 획득하여야 한다.

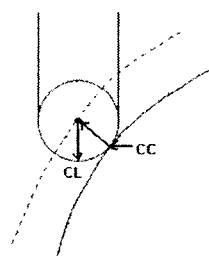


Fig. 2 Tool path considering tool radius

### 2.2 3차원 형상 옵셋 방법

STL로 표현된 3차원 형상을 옵셋 하는 방법으로

는 STL 파일을 구성하는 삼각형 면(facet)을 각각 옵셋 시키는 방법과 STL을 구성하는 각 꼭지(vertex)을 옵셋 하는 방법이 있다. 그러나 삼각형 면을 옵셋 방법은 옵셋된 형상에 갑이 생기거나 중첩(overlap)이 발생한다. 이런 갑을 메우거나 중첩을 제거한 후 최종 옵셋형상을 얻는 것은 매우 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 구현이 간단한 꼭지점을 옵셋 하는 방법을 사용한다.

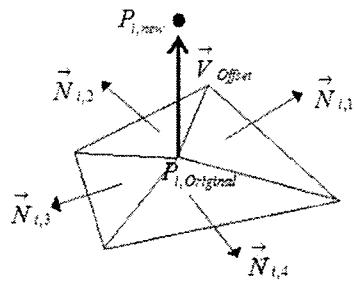


Fig. 3 Normal vector and offset vector

꼭지점을 옵셋 하는 방법에서는 꼭지점을 어느 방향으로 옵셋 하느냐를 결정하는 것이 가장 중요하다. 가장 직관적인 방법으로는 Fig. 3과 같이 대상 꼭지점을 공유하는 모든 삼각형의 법선 벡터들의 평균값을 구하는 것이다. 본 논문에서는 Qu<sup>[9]</sup>가 제안한 가중치 합을 이용한 옵셋 vector 방법을 사용한다.

$$V_{offset} = \sum_j^n W_j \cdot N_{i,j} \quad (1)$$

여기서  $W_j$ 는 꼭지점을 구성하는 각 삼각형면에 의해 결정되는 가중치를 나타낸다. 이하에서는  $W_j$ 를 계산하는 방법을 설명한다.

먼저 Fig. 3에서  $P_{i,original}$ 는 옵셋하기 전의 꼭지점,  $P_{i,new}$ 는 옵셋 후의 꼭지점의 위치를 각각 나타낸다. 꼭지점에서의 단위 법선벡터를  $V_{offset}$ , 원하는 옵셋거리를  $d_{offset}$ 로 표현하면 다음의 식 (2)의 관계를 만족한다.

$$P_{i,new} = P_{i,original} + V_{offset} \cdot d_{offset} \quad (2)$$

$P_{i,new}$ 는 관련된 모든 삼각면과 옵셋 조건을 만족하여야 하므로 삼각면까지의 수직 거리는  $d_{offset}$ 이어야 한다. 이를 식으로 표현하면

$$(P_{i,new} - P_{i,original}) \cdot N_{i,j} = d_{offset} \quad (3)$$

식(2)과 식(3)으로부터 식(4)이 유도되며

$$V_{\text{offset}} \cdot N_{i,j} = 1 \quad (4)$$

식(4)에 식(1)의  $V_{\text{offset}}$ 을 대입하면 아래의 식이 유도된다.

$$\left( \sum_j^n W_j \cdot N_{i,j} \right) \cdot N_{i,k} = 1 \quad (5)$$

식(5)를 전개 정리하면 식(6)과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)으로부터 식(1)의 읍셋벡터를 결정하는  $W(j=1 \dots n)$ 를 계산하여 식(1)로부터 읍셋 vector  $V_{\text{offset}}$ 을 계산할 수 있다.

## 2.4 형상 Slicing

STL형상의 읍셋 과정을 마치면 성형방향(Z축방향)과 수직한 절단평면(cutting plane)을 기준으로 STL 형상을 절단한다. 각 절단평면과 삼각면간의 교선(intersection line)을 구한 뒤 이 교선들을 연결하여 등고선 공구경로를 위한 페루프를 형성한다.

STL의 삼각면과 절단 평면과의 교선들의 페루프를 계산하는 방법으로 본 연구에서는 각각의 삼각면에 대하여 차례로 그 삼각면과 교선이 발생하는 절단 평면을 찾는 방법을 사용한다. 먼저 STL 형상이  $m$  개의 삼각면 ( $\Delta_i, i=1 \dots n$ )로 구성되었다고 가정한다. 그리고  $\Delta_i$ 들 중  $Z$ 축을 기준으로 최저 높이 값을  $z_o$ 로 표현한다. 임의의 삼각면  $\Delta_i$ 의 최저 높이 값을  $Z_i^{\min}$ , 최대 높이값을  $Z_i^{\max}$ 라 하면  $\Delta_i$ 와 교차가 발생하는 최저 절단 면의 번호  $n_i^{\min}$ 과 절단 면의 높이는 각각

$$n_i^{\min} = I\left(\frac{z_i^{\min} - z_o}{t}\right) + 1$$

$$h_i^{\min} = z_o + t \cdot n_i^{\min} \quad (7)$$

또한 교차가 발생하는 절단면의 최대번호는

$$n_i^{\max} = n_i^{\min} + \left\lceil \frac{Z_i^{\max} - h_i^{\min}}{t} \right\rceil \quad (8)$$

이와 같이 교차하는 절단 평면을 찾고 난 후 삼각면의 세 선분과 절단면과의 교점을 계산한다. 삼차원 공간 상에서 높이  $h$ 인 절단평면과 두 점  $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2)$ 로 이루어진 선분과의 교점을 두 점을 잇는 선분을 다음과 매개변수 방정식으로 표현하고 절단 평면의 방정식  $Z_o = h$ 을 주어진 선분과  $z$  절단평면과의 교점들을 연결하면 하나의 Line segment를 구할 수 있다. 각각의 Line segment들을 Fig. 4와 같이  $z$  값 순서대로 연결리스트로 저장한다.

연결리스트에 저장된 Line segment들은 페루프를 구성하는 순서대로 구성되어 있지 않다. 따라서 Fig. 5와 같이 서로 인접한 Line segment를 차례로 검색하여 페루프를 구성하는 연결리스트를 순서대로 재 정렬한다.

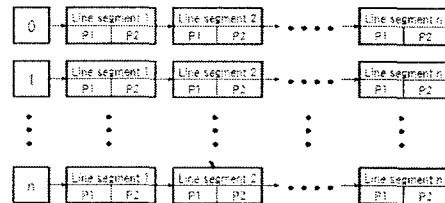


Fig. 4 Data structure line segments

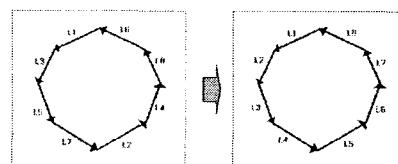


Fig. 5 Rearrangement of linked list

## 2.5 공구경로 생성

2.4절에서 구해진 Line segment 들은 이미 공구 반경만큼 Offset된 값들이므로 더 이상의 처리 과정을 필요로 하지 않는다. Line segment들이 저장되어 있는 연결 리스트를 차례로 순회하면서 G-Code로 변환하여 출력하는데 이 때 가공 방향은 폐속조형기와 달리 성형성을 높이기 위해서 각 층(Layer)에서 공구경로 방향을 CW, CCW로 교번하게 설정한다. 가공방향을 동일하게 할 경우 성형 형상

이 한쪽으로 Distort 될 가능성이 있기 때문이다.

### 3. 성형실험

본 연구에서 개발한 머시닝 센터를 이용한 다이레스 CNC 포밍과 공구경로 생성 프로그램을 이용하여 점진판재성형 실험을 수행하였다. 판재재료로는 SUS를 사용하였다. Fig.6은 본 연구에서 구현한 CAM 소프트웨어를 보여주고 있다. STL 파일을 읽어와 형상을 화면에 Drawing하고, 슬라이스 디아얼로 그에서 슬라이싱 두께와 공구 반경을 입력으로 받아 형상의 전면을 그리고 슬라이드 바를 움직여 모든 Layer에서 절단된 형상의 모습을 볼 수 있다. 그리고 이러한 정보를 바탕으로 G-Code를 출력하여 머시닝 센터 기반의 다이레스 CNC 포밍에서 성형실험을 하여 형상을 가공하였다.

성형실험은 Positive forming 방식으로 진행하였는데 Positive forming의 경우 실린더 형상의 지지대를 사용하였고 성형작업이 진행되는 중에 고정장치가 블랭크채를 하방향으로 지속적으로 잡아당기도록 하였으며 성형결과를 나타내었다.

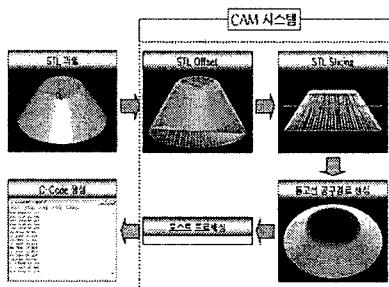


Fig. 6 Procedure of tool path generation

### 4. 결론

본 연구에서는 최근 성형 기술의 새로운 분야로 각광을 받고 있는 무금형 점진 판재 성형을 위한 공구경로 생성 방법을 논의하였다. 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다이레스 CNC 포밍을 위한 공구경로 생성은 기본적으로 캐속조형에서 사용하는 STL화일을 입력으로 등고선 공구경로를 생성하는 과정과 유사하나 공구반경을 고려하여 STL 형상을 옵셋하는 과정이 필요하다.

(2) STL 형상을 옵셋하는 방법에는 STL을 구성하는

삼각면을 옵셋하는 방법과 각 꼭지점을 옵셋하는 방법이 있으며 꼭지점을 옵셋하는 방법이 구현의 수월성 측면에서 장점이 있다.

(3) 옵셋 STL을 2차원 평면과 절단하는 과정은 삼각면을 기준으로 수행하였으며 한 단면 상에서 폐루프가 다수 발생하는 경우도 포함하였다.

본 연구는 최근 활발한 연구가 진행되고 있는 다이레스 CNC 포밍을 위한 기초 연구 단계의 결과로서 향후 복잡한 형상의 경우 발생하는 STL의 불완전성을 고려할 수 있는 강건한 시스템으로의 보강이 필요하며 또한 성형 오차를 고려한 적응형 CAM 시스템의 개발이 요구된다.

### 참고문헌

1. 박종우, "금속판재의 무금형 프레스 성형기술", 월간프레스기술, 제10권, pp. 80-89 (2003)
2. 아미노, "금형을 필요로 하지 않는 3차원 디지털가공기술", 월간프레스기술, 제2권, pp. 38-45 (2003)
3. K. Dai, Z. R. Wang, Y. Fang, "CNC incremental sheet forming of axially symmetric specimen and the locus of optimization", J. Mater. Process. Technol., Vol. 102, pp. 164-167 (2000)
4. M. S. Shim, J. J. Park, "The formality of aluminum sheet in incremental forming", J. Mater. Process. Technol. Vol. 113, pp. 654-658 (2001)
5. Y. H. Kim, J. J. Park, "Effect of parameters on formability in incremental forming of sheet metal", J. Mater. Process. Technol., Vol. 130, pp. 42-46 (2002)
6. J. J. Park, Y. H. Kim, "Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique", J. Mater. Process. Technol., Vol. 140, pp. 447-453 (2003)
7. C. S. Jun, D. S. Kim, S.Y. Park, "A new curve-based approach to polyhedral machining", Computer-Aided Design, Vol 34, pp. 379-389, 2002.
8. S. H. Choi, K. T. Kwok, "Hierarchical slice contours for layered-manufacturing", Computers in Industry, Vol. 48, pp. 219-239, 2002.
9. XiuZhi Qu, Brent Stucker, "A 3D surface offset method for STL-format model", Rapid Prototyping Journal, Vol 9, No. 3, pp. 133-141, 2003.