

# STL offset을 이용한 다이레스 CNC 포밍용 등고선 공구경로 생성

강재관<sup>#</sup>, 최동우<sup>\*</sup>

## Contouring Tool Path Generation for Dieless CNC Forming using STL Offset

Jae-Gwan Kang <sup>#</sup> and Dong-Woo Choi<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

Dieless CNC forming is an innovative technology which can form various materials with complex shape by numerically controlled incremental forming process. In this paper, a method of NC tool path generation based on an STL file for dieless CNC forming is proposed. Tool trajectory adopts the principle of layered manufacturing in rapid prototyping technology, but it is necessary to consider STL offset because of the ball shaped tool with a radius. Vertex offset method which enables to compute offset STL directly is engaged for STL offset. The offset STL is sliced by cutting planes to generate contouring tool path. Algorithm is implemented on a computer and experimented on a dieless CNC forming machine to show its validity.

**Key Words :** Dieless CNC forming(무금형 CNC 성형), Sheet metal forming(판재성형), Tool path generation(공구경로생성), STL offset(STL화일 옵셋), Layered manufacturing(적층가공)

### 1. 서론

자동차, 선박, 항공기, 전철 등의 외장품은 2차원 또는 3차원 곡면을 갖는 금속 판재로 제작되는 경우가 많다. 곡면제품 특히 3차원 곡면 제품을 성형하는 방법으로는 전통적으로 서로 일치하는 한 쌍의 금형을 사용하여 판재를 프레스 성형 한다. 그러나 프레스 성형 공법은 고가의 금형비와 설계에서 양산에 이르기까지 많은 시간이 요구되는 문제점이 있어 단품종 소량생산, 단납기로

표현되는 최근의 제품 개발 환경에 따라 금형없이 (dieless) 금속판재를 다양한 형태의 제품으로 제조 할 수 있는 점진판재성형(incremental sheet forming - 이하 다이레스 CNC 포밍)기술이 크게 주목을 받고 있다<sup>1-3</sup>.

다이레스 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 블랭크재(SUS 또는 알미늄)을 X-Y 테이블상

... 접수일: 2005년 7월 5일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

# 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail jkkang@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2703

\* 경남대학교 대학원 메카트로닉스전공

예를 클램핑한 후 성형은 Z축에 장착된 볼 형상의 공구가 점진적으로 블랭크재를 강압하면서 형을 만들어 나간다. 이 때 X-Y 테이블과 Z축의 이송제어는 CAD 형상으로부터 생성된 NC 데이터에 의해 수행된다.

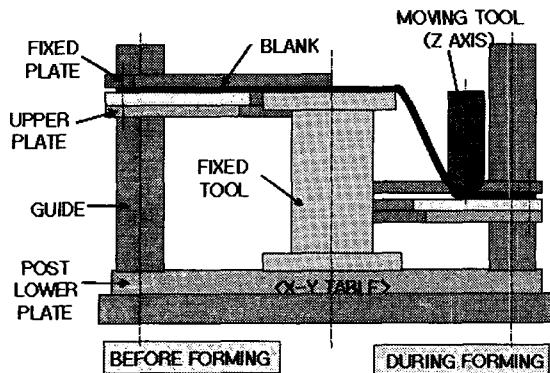


Fig. 1 Principle of dieless CNC forming

성형 과정 중 블랭크재를 지지하기 위한 치구가 필요하며 공구는 등고선 모양의 공구 궤적을 그리며 일주 운동을 한 후 Z축 방향(아래쪽)으로 공구를 보내는 방식으로 점진 성형이 수행된다. Fig. 2에 상용화된 다이레스 CNC 포밍 머신으로 제작된 다양한 성형물의 모습이 나타나 있다.

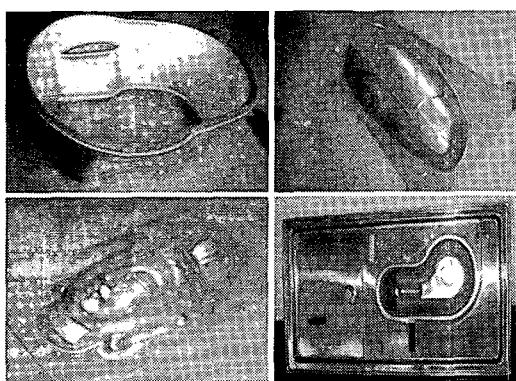


Fig. 2 Various dieless CNC forming products

이와 같이 전통적인 방법이 아닌 혁신적인 성형공법인 다이레스 CNC 포밍은 연구개발 단계에서 원가절감, 개발시간 단축 등의 장점 때문에 최근 국내외적으로 큰 관심과 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>4-8</sup>. 그러나 지금까지의 연구는 대부분 다

이레스 포밍시 소재에 발생하는 소성 변형의 특성에 관한 것이며<sup>4-7</sup> 다이레스 CNC 포밍용 공구 경로 생성 방법에 관한 연구는 매우 제한적이다. 특히 Jie<sup>8</sup>의 연구의 경우 다이레스 포밍용 공구경로 생성에 관한 기본적인 알고리즘 제시에만 그치고 있고 구체적인 구현 방법 및 성형 실험 결과 등의 분석이 없어 알고리즘의 유효성을 입증하기 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 3차원 CAD형상으로부터 점진판재성형에 필요한 CNC 코드를 생성하는 방법, 특히 기존의 방법과 다른 STL 꼭지점 읍셋을 이용한 공구경로 생성 방법의 세부적인 절차를 제시하고 이를 CNC 머시닝 센터를 이용하여 양각성형(Positive forming)을 행한 후 성형 정밀도를 측정함으로써 본 연구에서 개발된 공구경로 생성 방법의 타당성을 분석·고찰한다.

## 2. 다이레스 CNC 포밍

### 2.1 공구경로 생성 절차

다이레스 CNC 포밍에서의 공구경로는 폐속조형기에서 사용하는 적층가공 방법과 유사하다. 폐속조형에서는 대상물의 3차원 CAD 형상을 STL화 일로 변환한 뒤 층별로 슬라이싱(Slicing)한 후 이 정보를 따라 레이저 빔 등을 조사하여 성형을 수행한다<sup>8,9</sup>.

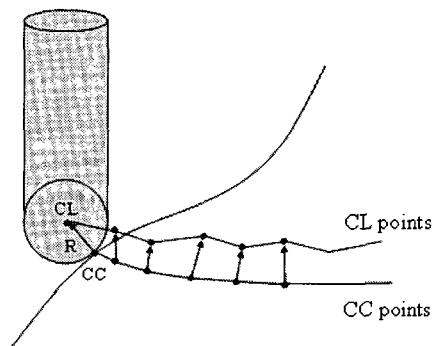


Fig. 3 CC and CL points in dieless forming

그러나 다이레스 CNC 포밍에서는 Fig. 3와 같이 공구의 끝이 구(球) 형태인 공구를 사용하기 때문에 3차원 형상이 직접 슬라이싱된 CC(Cutter Contact)점이 아닌 일정한 반경을 가지는 공구 중

심점의 위치인 CL(Cutter Location) 데이터가 필요하다. 이를 위해서는 계산된 CC점을 곡면의 법선 벡터 방향으로 공구반경  $R$ 만큼 옵셋시키는 방법을 생각할 수 있으나 슬라이싱 평면 상의 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 반경만큼 옵셋한 뒤 이 옵셋된 형상을 슬라이싱하는 것이 필요하다.

## 2.2 3차원 형상 옵셋 방법

STL로 표현된 3차원 형상을 옵셋하는 방법은 NC 절삭가공에서 공구경로를 생성하는 방법론의 하나로서 연구가 이루어져 왔다. 그 대표적인 방법으로 STL 파일을 구성하는 삼각면(facet)을 옵셋시키는 방법이 사용되었으나 최근 STL을 구성하는 각 꼭지점(vertex)을 옵셋하는 방법이 새로이 제시되었다.

기존의 삼각면을 옵셋하는 방법은 STL을 구성하는 삼각면의 법선 방향으로 옵셋시키는 방법으로서 옵셋STL을 완성하기 위해서는 Fig. 4과 같이 옵셋된 삼각면 사이에 발생하는 갭(gap) 또는 중첩(overlap)된 부분을 처리하는 과정이 필요하며 이 때문에 알고리즘 구현이 다소 복잡한 문제점이 있다<sup>10,11</sup>. 이에 반하여 꼭지점을 옵셋하는 방법은 삼각면을 구성하는 꼭지점을 각각 계산된 방향으로 옵셋하는 방법이므로 옵셋 후 갭 또는 중첩의 문제가 발생하지 않는 장점이 있다.

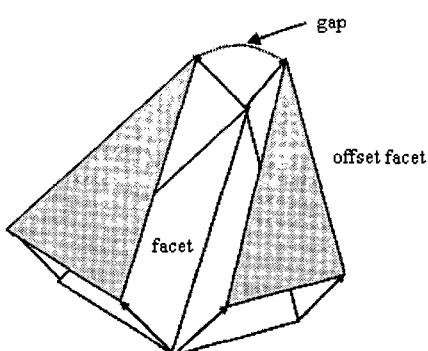


Fig. 4 Gap between offset facets

꼭지점을 옵셋하는 방법에서는 꼭지점을 어느 방향으로 옵셋하느냐를 결정하는 것이 가장 중요하다. 본 연구에서는 Qu<sup>10</sup>가 제안한 해당 꼭지점에 인접한 삼각면의 법선벡터의 가중치 합을 이용한 옵셋 vector 방법을 이용한다.

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

여기서  $W_j$ 는 꼭지점을 구성하는 각 삼각면에 의해 결정되는 가중치를 나타내며 이하에서는  $W_j$ 를 계산하는 방법은 다음과 같다.

먼저 Fig. 5에서  $P_{i,\text{original}}$ 는 옵셋하기 전의 꼭지점,  $P_{i,\text{new}}$ 는 옵셋 후의 꼭지점의 위치를 각각 나타내고, 꼭지점에서의 단위 법선벡터를  $V_{\text{offset}}$ , 원하는 옵셋거리를  $d_{\text{offset}}$ 로 표현하면 옵셋 위치 벡터인  $P_{i,\text{new}}$ 는 다음의 식 (2)로 표현할 수 있다.

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

$P_{i,\text{new}}$ 는 인접한 모든 삼각면과 옵셋 조건을 만족하여야 하므로 삼각면까지의 수직거리는  $d_{\text{offset}}$ 이어야 하며 이를 식으로 표현하면

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

식(2)와 식(3)으로부터 식(4)가 유도되며

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

식(4)에 식(1)의  $V_{\text{offset}}$ 을 대입하면 식(5)가 유도된다.

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

식(5)를 전개 정리하면 식(6)과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} N_{i,1} \cdot N_{i,1} & N_{i,2} \cdot N_{i,1} & \cdots & N_{i,n} \cdot N_{i,1} \\ N_{i,1} \cdot N_{i,2} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{i,1} \cdot N_{i,n} & \cdots & N_{i,n-1} \cdot N_{i,n} & N_{i,n} \cdot N_{i,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)으로부터 옵셋벡터를 결정하는 가중치 값인  $W_j (j=1\dots n)$ 를 계산하면 옵셋 vector  $V_{offset}$  을 얻을 수 있다.

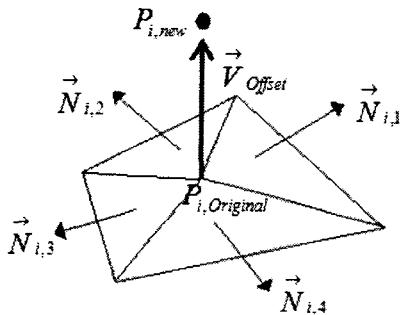


Fig. 5 Normal and offset vectors

### 2.3 옵셋 형상의 슬라이싱

STL형상의 옵셋 과정을 마치면 등고선 공구경로 생성을 위하여 성형방향(Z축방향)과 수직한 절단평면(cutting plane)을 기준으로 옵셋 STL 형상을 절단하는 슬라이싱과정이 필요하다. 즉 원하는 성형 깊이  $t$ 에 따른 절단평면과 삼각면간의 교선(intersection line segment)을 구한 뒤 이 교선들을 연결하여 폐루프를 형성하므로써 등고선 공구경로가 생성된다.

먼저 STL 형상이  $m$ 개의 삼각면 ( $\Delta_i, i=1\dots m$ )으로 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 최저절단면의 번호  $n_i^{\min}$ 과 절단면의 높이는 각각

$$n_i^{\min} = I \left( \frac{Z_i^{\min} - Z_o}{t} \right) + 1 \quad (7)$$

$$h_i^{\min} = z_0 + t \cdot n_i^{\min}$$

로 표현된다. 여기서  $I(\cdot)$ 는 정수값을 구하는 기호이다. 그리고 교차가 발생하는 절단면의 최대 번호는 식(8)로 계산된다.

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

이와 같이 교차하는 절단 평면을 찾은 후 삼각면의 각 선분과 절단면과의 교점을 계산한다.

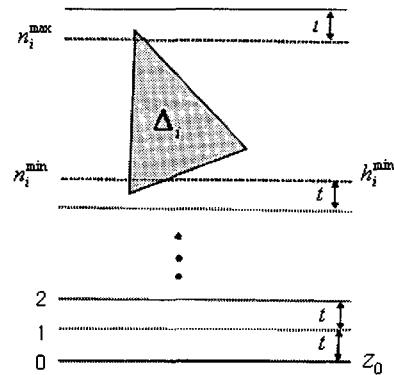


Fig. 6 Slicing of offset STL

### 2.4 삼각면의 선분과 절단면과의 교점

공간 상에서 높이  $h$ 인 절단평면과 삼각면의 두 꼭지점  $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2)$ 로 이루어진 선분과의 교점의 계산은 다음과 같다. 먼저 Fig. 7과 같이 두 점을 잇는 선분을 다음과 같이 매개변수 방정식으로 표현하고

$$x = x_1 + t(x_2 - x_1) \quad (9)$$

$$y = y_1 + t(y_2 - y_1) \quad t \in [0, 1]$$

$$z = z_1 + t(z_2 - z_1)$$

또한 절단평면의 방정식을

$$z = h \quad (10)$$

로 표현하면 식(8)과 (9)로부터 교점을 결정하는 매개변수  $t$ 의 값은 다음과 같이 계산된다.

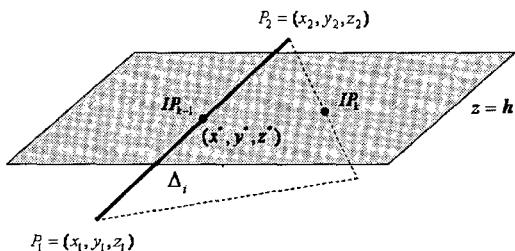


Fig. 7 Intersection of plane and line segment

즉  $t \in [0, 1]$ 이면 교점이 존재함을 나타낸다.

$$t = \frac{h - z_1}{z_2 - z_1} \quad (11)$$

위 식으로부터 삼각면의 각 선분과 절단평면과의 교점  $IP_{k-1}(x^*, y^*, z^*)$ 은 식(12)로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} x^* &= x_1 + (x_2 - x_1) \left( \frac{h - z_1}{z_2 - z_1} \right) \\ y^* &= y_1 + (y_2 - y_1) \left( \frac{h - z_1}{z_2 - z_1} \right) \\ z^* &= h \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)를 이용하여 삼각면과 절단평면과의 두 교점을 구한 뒤 이를 연결하면 하나의 선분(line segment)이 구해지며 이를 차례로 절단평면  $z$ 에 대응하는 연결리스트(linked list)에 저장한다. 이 과정을 형상을 구성하는  $m$ 개의 삼각면 ( $\Delta_i, i=1\cdots m$ ) 전체에 대하여 적용하면 각각의 절단 평면에 대응하는 연결리스트를 얻게 된다.

이 때 연결리스트에 저장된 각각의 선분들은 페루프를 구성하는 순서대로 연결되어 있지 않기 때문에 연결 리스트의 요소들을 차례로 검색하여 페루프가 되도록 재 정렬할 필요가 있다. 즉 선분

요소들의 끝점이 다음 선분 요소의 첫점이 되도록 하며 마지막 선분요소의 포인터가 연결리스트의 첫 선분요소를 지시하는 환형선형구조(circular linked list)가 되도록 재조정한다.(Fig. 8)

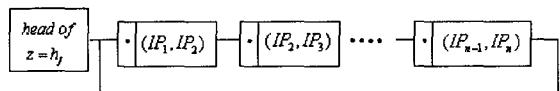


Fig. 8 Circular linked list for  $z = h_j$

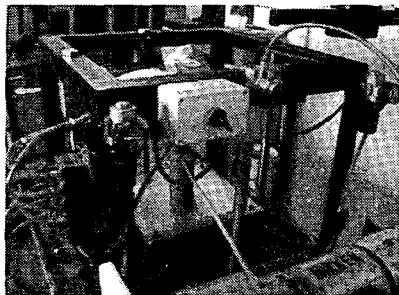
## 2.5 공구 경로 생성

2.4절에서 구해진 선분들은 이미 공구 반경만큼 옵셋된 값들이므로 CL데이터는 동일한 높이, 즉 등고선을 이루게 된다. 이로부터 NC 코드를 생성하기 위해서는 저장되어 있는 연결 리스트의 요소들을 차례로 순회하면서 컨트롤러에 맞게 G-Code로 변환하여 출력한다. 이 때 가공 방향은 쾌속조형기와 달리 성형성을 높이기 위해서 각층(Layer)에서 공구경로 방향을 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)가 교번되도록 설정한다. 가공방향을 동일하게 할 경우 성형이 한쪽 방향으로 치우쳐 최종 형상에 뒤틀림이 생길 가능성이 있기 때문이다.

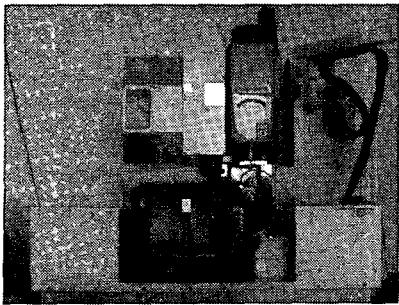
## 3. 실험 및 분석

먼저 Fig. 9는 본 연구의 실험을 위하여 자체 개발한 머시닝센터 기반의 다이레스 CNC 포밍 머신의 모습이다. 공압을 이용하여 일정한 압력으로 판재를 아래 방향으로 지속적으로 잡아 당겨 주는 치구를 Fig. 9(a)와 같이 제작하였다. 그리고 절삭공구 대신 다이레스 포밍을 위하여 구형상을 가진 공구를 스판들에 장착하였으며 x,y,z 3축 제어는 머시닝센터가 가지고 있는 CNC 제어 기능을 사용하였다.

그리고 본 연구에서 제시한 다이레스 CNC 포밍을 위한 공구경로 생성 알고리즘은 Pentium-IV급 컴퓨터에서 Visual C++ 6.0 및 Open GL을 이용하여 구현되었다. Fig. 10은 본 연구에서 개발된 다이레스 CNC 포밍을 위한 CAM S/W의 여러 모습들이다. STL 파일을 읽어와 화면에 나타내는 기능, 슬라이싱 두께와 공구 반경을 입력으로 공구경로를 생성하는 기능 등이 구현되어 있다.



(a) Fixture for dieless forming



(b) Machining center

Fig. 9 Dieless CNC forming machine based on MCT

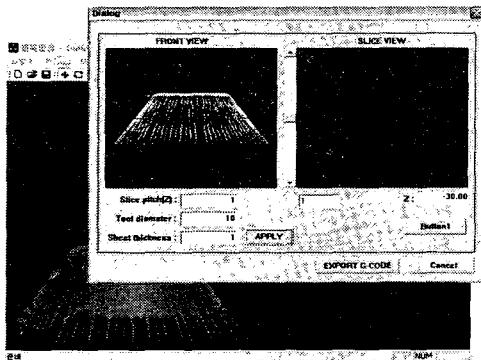


Fig. 10 CAM S/W for dieless CNC forming

Fig. 11는 STL 읍셋을 이용한 등고선 경로가 산출된 모습이다. Fig. 12(a)는 이 공구경로를 이용하여 다이레스 CNC 포밍 기계에서 SGCD 소재를 사용하여 성형실험을 하는 모습이며 Fig. 12(b)는 포밍이 완료된 최종 형상의 모습이다.

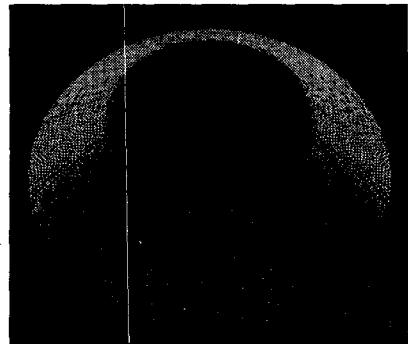
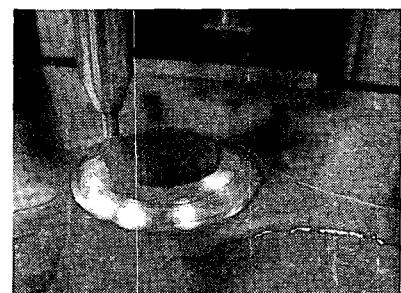
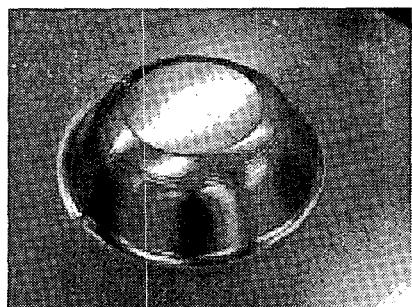


Fig. 11 Contouring tool path

Fig. 13(a)은 자동차 부품인 브레이크 쉘드의 축소 모형을 다이레스 포밍으로 성형한 결과이다. 상대적으로 복잡한 형상의 경우에는 Fig. 13(b)와 같은 베이스몰드(base mold)를 가공하여 서포터로 사용하는 것이 좋다. 베이스몰드의 소재로는 절삭성이 좋은 케미칼우드(chemical wood)를 사용하였다.

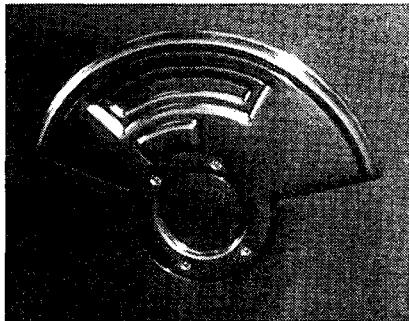


(a) CNC forming

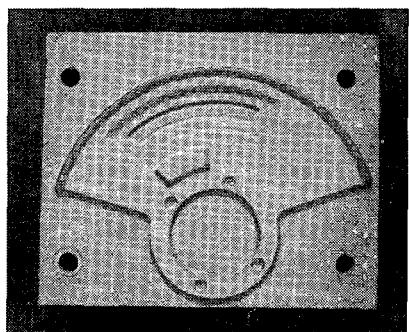


(b) Final product

Fig. 12 Dieless CNC forming



(a) Final forming product



(b) Base mold

Fig. 13 Dieless forming of a brake shield

이는 사용된 머시닝센터를 이용한 다이레스 포밍 머신 프로토타입의 정밀도 부족 및 소성변형에 따른 스프링백(spring back)이 누적된 것으로 판단된다. 그러나 다이레스 포밍 머신이 기본적으로 양산 제품이 아닌 시제품 성형에 주로 사용되기 때문에 성형 깊이 120mm에 이 정도의 정밀도는 사용 상 충분히 허용할 수 있는 가공 정밀도로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

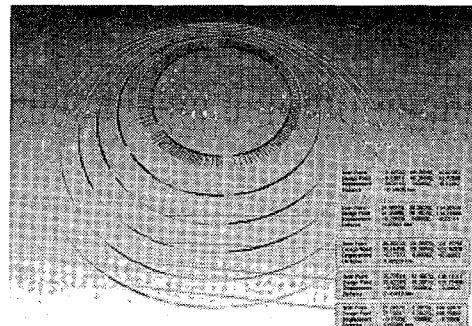
본 연구에서는 최근 성형 기술의 새로운 분야로 각광을 받고 있는 무금형 점진 판재 성형을 위한 공구경로 생성 방법을 논의하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다이레스 CNC 포밍을 위한 공구경로 생성은 기본적으로 쾌속조형에서 사용하는 STL화일을 이용하여 등고선 공구경로를 생성하는 과정과 유사하나 공구 반경을 필히 고려해야 하기 때문에 STL 형상을 읍셋하는 과정이 필요하다.

(2) STL 형상을 읍셋하는 방법에는 STL을 구성하는 삼각면을 읍셋하는 방법과 각 꼭지점을 읍셋하는 방법이 있으며 삼각면을 읍셋하는 방법의 경우 읍셋면 간의 갭 또는 중첩 문제가 해결되어야 한다. 이에 반하여 삼각면 꼭지점을 읍셋하는 방법은 단번에 읍셋 STL을 구할 수 있는 장점이 있다.

(3) 본 연구에서 개발된 공구경로로 다이레스 포밍을 수행한 결과 최대 0.43mm 정도의 오차가 발생하였으며 이는 본 연구에서 사용된 간이형 다이레스 포밍 머신의 정밀도 및 점진 성형 후의 스프링 백에 의한 것으로 보여지나 시제품 성형에 주로 사용될 다이레스 포밍의 용도상 허용할 수 있는 가공 정밀도로 판단되었다.

본 연구는 다이레스 CNC 포밍용 전용 CAM시스템의 기초 연구로서 향후 활용도를 제고하기 위해서는 성형성이 좋은 나선형(Spiral) 공구경로의 생성, 공구 사이즈에 따른 공작물과의 간섭 자동체크, 스프링백 등의 성형 오차를 고려한 적응형 CAM 시스템의 개발 등의 연구가 요구된다.



Section no.	Maximum error
1	-0.14635 mm
2	0.25567 mm
3	0.42520 mm
4	0.42472 mm
5	0.42086 mm

Fig. 14 Forming accuracy on each section plane

## 후기

본 연구는 2005년 경남대학교 학술연구진흥비 지원으로 이루어졌음.

## 참고문헌

- Computer-Aided Design, Vol. 34, pp.379-389, 2002.
12. Qu, X. and Stucker, B., "A 3D surface offset method for STL-format model," Rapid Prototyping Journal, Vol. 9, No. 3, pp.133-141, 2003.
1. Kochan, A., "Dieless forming," Assembly Automation, Vol. 21, No. 4, pp.321-322, 2001.
  2. Park, J. Y., "Dieless Press Forming Technology of Sheet Metal," Korean Monthly Press Technology, Vol. 2, pp.80-89, 2003.
  3. Amino, H., "Dieless Digital Manufacturing Technology," Korean Monthly Press Technology, Vol. 2, pp. 38-45, 2003.
  4. Dai, K., Wang, Z. R. and Fang, Y., "CNC incremental sheet forming of axially symmetric specimen and the locus of optimization," J. Mater. Process. Technol., Vol. 102, pp.164-167, 2000.
  5. Shim, M. S. and Park, J. J., "The formality of aluminum sheet in incremental forming," J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, pp.654-658, 2001.
  6. Kim, Y. H. and Park, J. J., "Effect of parameters on formability in incremental forming of sheet metal," J. Mater. Process. Technol., Vol. 130, pp.42-46, 2002.
  7. Park, J. J. and Kim, Y. H., "Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique," J. Mater. Process. Technol., Vol. 140, pp.447-453, 2003.
  8. Lee, S., Ahn, D., Kim, H., Yang, D., Park, D. and Chae, H. "Generation of Cutting Path Data for Two Steps of the Cutting Process in Full-Automated VLM-ST," J. of KSPE, Vol. 21, No. 1, pp.140-148, 2004.
  9. Park, J. H. and Shin, Y. H., "Accuracy of Enhancement in Direct & Adaptive Slicing of a Rotational Surface," J. of KSPE, Vol. 17, No. 1, pp.185-191, 2000.
  10. Jie, L., Jianhua, M. and Shuhuai, H., "Sheet metal dieless forming and its tool path generation based on STL files," Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 23, No. 9-10, pp.696-699, 2004.
  11. Jun, C. S., Kim, D. S. and Park, S. Y., "A new curve-based approach to polyhedral machining,"