

## 2차원 자유형상의 레이저 절단을 위한 CNC 공구경로 생성

박형준\*, 안동규\*\*

### CNC Torch Path Generation for Laser Cutting of Planar Shapes

Hyungjun Park\* and Dong-Gyu Ahn\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, we propose a knowledge-based method for generating CNC torch path for laser cutting of the outlines of planar shapes. The proposed method consists of two main phases: laser cutting knowledge construction and CNC torch path generation using the knowledge. In the first phase, cutting experiments are conducted on various operating parameters, and then empirical data are stored and analyzed to make up the knowledge of laser cutting. With this knowledge, we can inquire what a kerf width is for specific operating parameters. In the second phase, using the knowledge of laser cutting, CNC torch path is generated for cutting the outlines of the given planar shapes. This phase is basically based on the offset generation of each outline by a sequence of arc splines, where the offset distance is the same as the half of the kerf width determined from the constructed knowledge. The proposed method based on laser cutting knowledge makes full use of arc interpolators in CNC torch path generation. The method can efficiently reduce the number of path segments while keeping the torch path within the desired accuracy.

**Key words:** Laser cutting, Kerf width, Operating parameters, CNC torch path generation, Offset generation, Arc splines

### 1. 서 론

레이저 가공 기술은 고열을 국부적으로 가공 재료에 입열하여 가공 재료의 절단, 용접, 클래딩, 열처리, 마킹, 천공, 미세가공 등을 수행하는 기술로서 열영향부(heat affected zone) 및 가공 후 열변형을 적게 발생시켜 기존 방법으로는 불가능했던 고정밀 박판재 절단/용접, 표면 클래딩, 국부 열처리, 초미세 가공작업 등을 가능하게 한다<sup>[1-3]</sup>. 레이저 가공 기술의 산업적 활용분야 중 박판재료의 절단 및 용접이 60% 이상을 차지하고 있다. 특히, 자동차, 항공, 조선, 전자제품, 컴퓨터부품, 통신부품 등에 있어 고정밀 박판제품의 제작에서는 레이저 절단 기술이 필수적이다<sup>[4,5]</sup>.

금속 박판재의 레이저 절단 가공은 2차원 평면에 놓인 금속판재 위에 주어진 윤곽선(outlines)을 따라

레이저 조사헤드를 적절히 이동시킴으로써 원하는 형상의 제품을 금속판재로부터 절단하는 가공을 말한다<sup>[2,3]</sup>. Fig. 1에서와 같이 레이저 빔은 재료의 한 점을 통과하는데, 이때 재료가 가열되어 녹으며, 부분적으로는 증발한다. 녹은 재료의 용이한 제거를 돕기 위해 가스가 레이저 빔과 함께 노즐에서 분사된다.

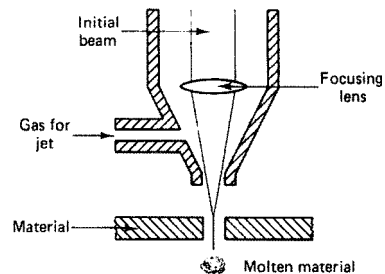


Fig. 1. Laser cutting process.

재료의 일부가 제거되면서 Fig. 2에서와 같이 절단 폭(kerf width)이 생긴다<sup>[6-10]</sup>. 이러한 절단폭은 재료와

\*교신저자, 중신회원, 조선대학교 산업공학과

\*\*정회원, 조선대학교 기계공학과

- 논문투고일: 2006. 07. 24

- 심사완료일: 2007. 01. 24

레이저 조사헤드 간의 상대적 이동에 의해 생성되며, 재료의 위쪽보다 아래쪽의 폭이 더 좁다.

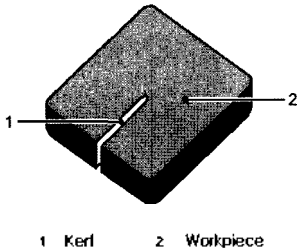


Fig. 2. Kerf width.

레이저 조사헤드의 이동경로를 제어하는 방식이 마치 2차원 CNC 밀링 가공을 위한 공구 경로 제어 방식과 매우 유사하다<sup>[2,3,11]</sup>. 즉, 금속 판재의 레이저 절단의 절단 경로 생성은 조사헤드를 통해 나오는 레이저 빔이 XY 평면에 정의된 윤곽선을 따라 이동하도록 해주는 일련의 동작 명령들을 정하는 것을 말한다.

레이저 절단 가공에서는 절단폭 만큼의 재료가 제거된다. 이러한 절단폭의 절반이 NC 밀링 가공에서의 공구반경에 해당하며, 오프셋 값(offset value)이 된다<sup>[11]</sup>. 따라서, 원하는 윤곽선 형상을 얻기 위해서는 Fig. 3에서와 같이 절단폭의 절반 만큼 윤곽선을 오프셋팅(offsetting)하여 얻어지는 오프셋 곡선을 레이저 절단 경로 곡선으로 이용한다<sup>[11,12]</sup>. 레이저 절단을 통해 원하는 형상을 얻기 위해서는 레이저 빔 중심이 절단폭의 절반 만큼 오프셋된 곡선을 따라 이동하도록 일련의 동작 명령을 생성해야 한다.

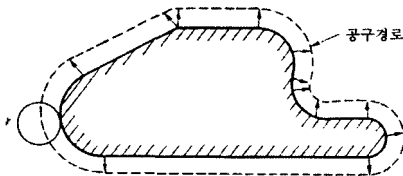


Fig. 3. Planar contour and its offset contour.

한편, 레이저 절단 가공에서의 절단폭은 레이저 종류 및 출력, 절단재료 및 두께, 절단속도, 절단형상 등에 따라 다르게 산출된다. 레이저를 이용한 박판 제품의 절단 가공을 위한 기존 방식에서는 Fig. 4에서와 같이 시행착오적(trial-and-errors) 방식에 의거하여 산출된 가공 에러 보정값을 이용하거나, 레이저 가공기 제작업체에서 제공하는 일반적 가공 에러 보정 데이터에 의거하여 레이저 절단 경로를 생성한다<sup>[11]</sup>.

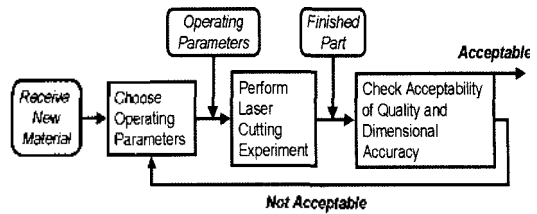


Fig. 4. Laser cutting based on trial-and-errors.

이러한 기존 레이저 절단 가공 방식에는 다음과 같은 문제점들이 내재되어 있다. 우선, 레이저 종류 및 출력, 절단재료 및 두께, 절단속도, 절단형상 등에 따른 공정지식의 부재로 인해 부정확한 정보(예: 오프셋 값)를 이용한 레이저 절단 경로를 생성하게 되고, 결국 가공 정밀도가 저하된다. 또한, 자유윤곽선의 절단 경로 생성을 위해 원호보간(arc interpolator)을 효율적으로 이용하지 않으므로 절단 시간 및 품질, 그리고 기억용량 측면에서 나쁜 영향을 초래한다<sup>[11,16]</sup>.

선행 연구들<sup>[2,3,6-10]</sup>을 분석하여 보면, 레이저 절단 공정과 공정변수(operating parameters)의 영향성에 대한 연구와 절단 경로 생성에 대한 연구가 독립적으로 진행되고 있으며, 레이저 절단 공정 특성이 고려된 절단 경로 생성 방법에 대한 연구를 거의 찾을 수 없다. 본 논문에서는 기존 레이저 절단 가공 방식의 문제점들을 극복할 수 있는 한가지 방안으로서 2차원 자유형상의 레이저 절단을 위한 공정지식기반 CNC 공구 경로 생성 방법을 제안한다.

## 2. 제안된 레이저 절단 경로 생성 방법

레이저 절단을 통해 연구사 하는 제품은 2차원 자유형상을 갖는 금속 박판 제품이다. 여기서, 2차원 자유형상은 여러 개의 평면 윤곽선들(planar outlines)로 이루어지며, 각 윤곽선은 직선, 원호, 그리고 2차원 자유곡선의 집합으로 구성된다. 제안된 레이저 절단 경로 생성 방법은 크게 두 단계로 구성되는데, 첫 단계가 레이저 절단 공정 지식 구축이며, 둘째 단계가 공정지식을 이용한 CNC 공구경로 생성이다.

첫 단계에서는 실험계획(experimental design)에 의거하여 다양한 공정변수들에 대한 레이저 절단 실험이 수행된다. 그런 다음, 해당 실험 데이터의 축적 및 체계적 분석을 통해 레이저 절단 공정지식을 구축한다. 구축된 공정지식을 통해 지정된 레이저 절단 조건 하에서 초래되는 절단폭을 예측할 수 있다.

둘째 단계에서는 레이저 절단 공정 지식을 이용하여 주어진 평면 윤곽선을 절단하기 위한 레이저 공구

경로를 생성한다. 이 단계는 근본적으로 각 윤곽선에 대한 오프셋 생성(offset generation) 및 원호 스플라인(arc splines)으로의 근사 작업에 의거한다. 여기서, 오프셋 값은 공정지식을 통해 결정되는 절단폭의 절반에 해당한다. 주어진 윤곽선들로부터 오프셋 원호 스플라인들(offset arc splines)을 생성한 후, 원호 스플라인들을 이용하여 CNC 공구경로를 생성한다.

레이저 절단 공정 지식에 근거한 레이저 절단 경로 생성 방법은 CNC 공구경로 생성 과정에서 원호 보간을 효율적으로 이용한다. 또한, 공구경로가 지정된 허용오차(tolerance) 이내로 유지되는 동시에 경로 세그먼트(path segments) 개수를 효율적으로 줄일 수 있다.

이제 레이저 공정 지식 구축 방안과 CNC 공구경로 생성 방안에 대해 구체적으로 살펴보자. 그런 다음, 제안된 방법의 적용결과를 통해 유용성을 보이고, 결론을 맺는다.

### 3. 레이저 절단 공정 지식 구축

#### 3.1 공정지식 구축 방안

Fig. 5는 레이저 절단 공정지식 구축을 위한 개념도를 나타낸다. 우선 절단재료, 레이저 종류, 절단 실험용 기초형상을 지정한다. 실험계획법<sup>[12]</sup>에 의거하여 공정지식 구축을 위해 고려되어야 할 공정변수들을 선정한 후, 공정변수들의 수치를 바꾸어 가면서 레이저 절단 실험을 수행한다. 각각의 절단 실험에 대해 절단 결과가 품질 및 치수 정확도 측면에서 수용할 만한 지를 검사한다. 수용할 만한 검사결과가 얻어지면, 해당 실험 데이터를 축적 및 분석하여 체계적으로 레이저 절단용 공정지식을 구축한 후, 레이저 절단용 공정지식 DB에 저장한다. 수용할 만한 검사결과가 얻어지지 않으면, 공정변수를 수정하여 레이저 절단 실험 및 검사를 반복한다.

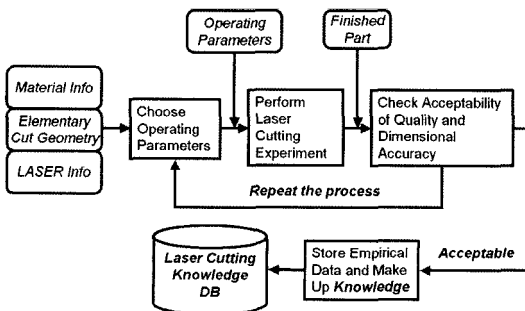


Fig. 5. Framework for constructing laser cutting knowledge.

레이저 절단 실험 및 검사의 반복, 그리고 충분한 실험 데이터의 축적에 의한 신뢰성 있는 공정지식이 구축되면, 관련 공정지식 정보를 레이저 절단에 활용한다.

#### 3.2 레이저 절단을 위한 실험계획

본 연구에서는 가공재료와 레이저 종류를 미리 고정시켰다. 시편으로 사용된 금속판재로서 포항제철<sup>[20]</sup>에서 개발되어 자동차용 및 구조물 판재로 많이 사용되고 있는 CSP 1N 압연강판을 사용하였다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서 사용된 고휘력 연속파형 Nd:YAG 레이저는 독일 Trumpf 사<sup>[10]</sup>에서 제작된 아르 플래시 램프 펄핑 장치가 부가된 레이저 발전기에서 생성된다. 연속파형 Nd:YAG 레이저의 최대 출력은 2.8 kW이고, 파장은 1.06 μm이며, 초점크기는 0.6 mm이다.

본 연구에서는 절단폭(kerfwidth)에 영향을 미치는 공정변수로서 레이저 출력(power, P), 판재 두께(thickness, T), 그리고 레이저 조사헤드의 이송속도(travel speed,  $V_c$ )를 고려하였다. 실험에 사용된 공정변수는 Table 1와 같으며, 절단가스 압력은 0.1 MPa로 고정하였다. 특히, 판재 두께는 0.5 mm에서 2 mm 사이로 산소절단과 플라즈마 절단시 절단후 후변형에 의하여 절단이 양호하지 못한 영역을 선정하였다.

Table 1. Experimental conditions

Process parameters	Conditions
Power of laser (Watt)	1,200-1,800
Cutting speed of laser (mm/min)	2,000-10,000
Thickness of CSP 1N (mm)	0.5-2.0
Gas pressure (MPa)	0.1

절단 실험용 기초형상으로서 길이 100 mm의 선분을 선택하였다. 실험 분석 과정에서 초기 레이저 안정화 길이 및 절단 종료부의 영향이 절단 품질 평가에 영향을 미치지 않게 하기 위하여 절단길이를 100 mm로 선정하여 60 mm 이상의 절단 품질 평가 길이가 확보되도록 하였다.

선정된 공정변수의 수치를 바꾸어가면서 레이저 절단 실험을 반복 수행하는데, 실험결과 얻어진 절단면(cut area)에는 과용융, 미절단, 그리고 거친 표면 등이 없어야 하며, 각 절단면의 품질과 치수 정확도 측면에서 수용할 만한 지를 검사해야 한다. 본 연구에서는 절단면에 대해 다음의 두 가지 제약조건이 만족되면 실험결과가 수용될 수 있다고 판단하였다.

- 절단면의 평균 드로스 면적(average dross area)이 0.5 mm<sup>2</sup> 이하이어야 한다.
- 절단면의 진직도(straightness)가 0.01 mm 이하이어야 한다.

평균 드로스 면적과 진직도를 관재의 바닥면을 기준으로 측정한다. 절단면의 평균 드로스 면적과 진직도의 계산 방법은 관련 문헌<sup>11)</sup>을 참고하기 바란다. 수용할 만하다고 판정된 절단면에 대해 관재 양쪽면에서의 절단폭을 측정한 다음, 두 값의 평균을 최종 절단폭으로 정의하였다. 공정지식 구축을 위한 충분한 실험데이터를 얻기 위해 위에서 언급된 방식으로 레이저 절단 실험과 실험결과 검사를 반복하였다.

**3.3 실험 분석과 공정지식 구축**

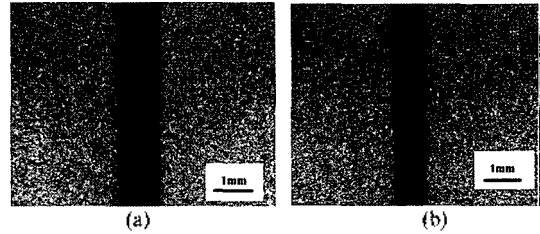
수용될 수 있다고 결정된 모든 실험 데이터들을 바탕으로 레이저 절단에 적합한 공정변수 허용영역(또는 절단가능영역)을 도출하였다. 이러한 공정변수 허용영역 내에서 수행된 레이저 절단 실험의 결과가 품질 및 치수 정확도 측면에서 수용할 만하다고 판단한다. Table 2는 실험결과 도출된 각 실험조건별 CW Nd:YAG 레이저의 CSP IN 박판재에 대한 절단가능영역이다.

**Table 2.** Permissible cutting conditions

T (mm)	P (Watt)	V <sub>tr,min</sub> (mm/min)	V <sub>tr,max</sub> (mm/min)
0.5	1,200	4,000	10,000
	1,400	4,000	10,000
	1,600	5,000	9,000
	1,800	5,000	9,000
1.0	1,200	4,000	6,000
	1,400	4,000	7,000
	1,600	4,000	7,000
	1,800	4,000	7,000
1.6	1,200	2,000	5,000
	1,400	2,000	5,000
	1,600	3,000	5,000
	1,800	3,000	5,000
2.0	1,200	3,000	4,000
	1,400	3,000	5,000
	1,600	3,000	5,000
	1,800	3,000	5,000

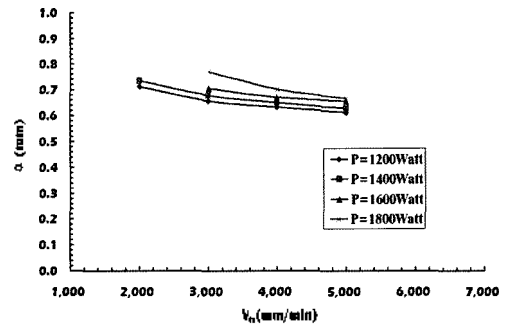
이러한 절단가능영역 내에서 레이저 절단 실험을 수행한 다음, 결과 데이터를 수집 및 분석하여 공정변

수가 절단폭에 미치는 영향성을 고찰하였다. Fig. 6은 레이저 출력 1,800 Watt, 재료두께 1.6 mm인 경우 두 가지 절단속도에 대한 레이저 절단 실험을 실행했을 때 얻어지는 절단면 형상이다.



**Fig. 6.** Cut areas obtained from the experiments with T = 1.6 mm and P = 1,800 Watt for two cutting speed levels: (a) 3,000 mm/min, (b) 5,000 mm/min.

Fig. 7은 CSP IN 박판재 두께가 1.6 mm인 경우 레이저 출력별 절단속도가 절단폭( $\alpha$ )에 미치는 영향을 보여주는 도표이다. Fig. 7에서 절단속도와 절단폭은 거의 반비례의 관계가 있음을 알 수 있다. 또한, 레이저 출력이 증가할수록 절단폭이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.



**Fig. 7.** Influence of cutting speed and power of laser on kerf width for T = 1.6 mm.

레이저 출력과 레이저 절단속도가 절단폭에 미치는 영향을 동시에 고찰하기 위해 다음과 같이 정의되는 유효열입력량(effective heat input,  $Q_{eff}$ )을 도입하였다.

$$Q_{eff} = \frac{P}{V_{tr}} \tag{1}$$

여기서, P는 레이저 출력이고  $V_{tr}$ 은 레이저 조사헤드의 이송속도를 나타낸다. 절단가능영역에 속하는 공정변수 조합에 대한 절단실험 결과 데이터들을 이용하여 유효열입력량( $Q_{eff}$ )과 절단폭( $\alpha$ )과의 관계를 도표로 출력하였다. Fig. 8은 이러한 관계 도표를 나타낸다.

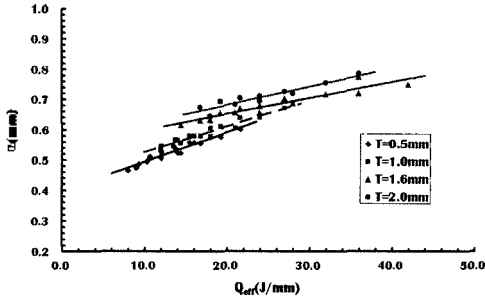


Fig. 8. Relationship between effective heat input and kerfwidth.

절단폭과 유효열입력량의 관계를 규명하기 위하여 얻어진 실험데이터를 선형회귀법으로 분석하였다.<sup>[12]</sup> 이 분석 결과를 이용하여 다음과 같은 절단폭과 유효열입력량의 선형 관계식을 유도할 수 있었다.

$$\alpha = \lambda_1 Q_{eff} + \lambda_2 = \lambda_1 \frac{P}{V_r} + \lambda_2 \quad (2)$$

Table 3은 절단폭과 유효열입력량의 선형 관계식에 서의 각 상수와 상관 계수(correlation coefficient)를 나타내는데, 절단폭과 유효열입력량의 상관관계수가 0.90~0.94 범위를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 절단폭과 유효열입력량의 관계는 강한 선형성이 존재함을 알 수 있다. 이러한 선형식을 통해 절단가능 영역 내에서의 레이저 절단으로부터 초래되는 절단폭을 예측할 수 있다. 절단폭 측정은 절단면의 진직도가 0.01 mm 이하인 샘플에 대해서 수행하였다(측정오차 0.01 mm 이하). 통상적인 레이저 절단에서의 형상 허용오차(dimensional tolerance)는 0.1~0.5 mm, 가공 허용오차(processing tolerance)는 0.05~0.5 mm이므로, 절단폭 측정오차가 선형식 결과에 큰 영향을 주지 않는다.

Table 3. Coefficient of equation for kerfwidth

T (mm)	$\lambda_1$	$\lambda_2$	Correlation coefficients
0.5	0.0097	0.398	0.93
1.0	0.0085	0.441	0.94
1.6	0.0053	0.546	0.91
2.0	0.0061	0.560	0.90

## 4. 공정지식 기반 CNC 공구 경로 생성

### 4.1 CNC 공구 경로 생성 방안

Fig. 9는 평면형상 윤곽선의 레이저 절단을 위한

CNC 공구 경로 생성을 위한 개념도를 나타낸다. 먼저 절단재료 및 두께, 레이저 종류 및 출력, 그리고 절단할 형상의 기하정보를 지정한다. 구축된 레이저 절단 공정지식을 이용하여 레이저 절단에 적합한 공정변수를 선정하고, 식 (2)를 이용하여 예측되는 절단폭을 결정한다. 그런 다음, 절단폭의 절반을 오프셋 반경으로 설정하여 주어진 윤곽선들에 대한 오프셋을 계산한다. 이러한 오프셋 정보를 바탕으로 레이저 절단을 위한 CNC 공구 경로를 생성한다.

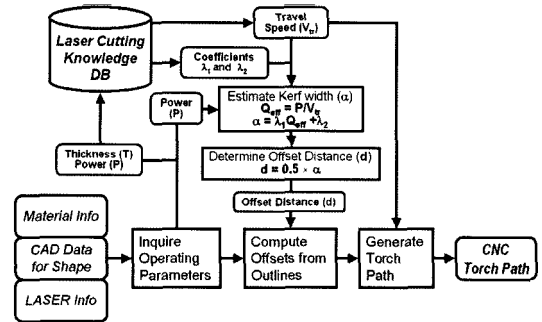


Fig. 9. Framework for generating CNC torch path.

### 4.2 윤곽선의 오프셋 생성

레이저 절단에 의해 제조될 금속 박판 제품의 2차원 형상은 여러 개의 평면 윤곽선들로 이루어지며, 각 윤곽선은 직선, 원호, 그리고 2차원 자유곡선의 집합으로 구성된다. 직선의 오프셋은 직선이고, 원호의 오프셋은 원호가 되므로 이들에 대한 오프셋 기하성분(offset geometry)을 구하는 일이 간단하다. 자유곡선  $C(t) = (x(t), y(t))$  이 주어졌을 때, 오프셋 반경  $d$ 에 대한 오프셋 곡선  $C_d(t)$  은 다음과 같이 정의된다.

$$C_d(t) = C(t) + d \cdot N(t) \quad (3)$$

여기서,  $N(t) = (y'(t), -x'(t)) / \sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2}$  이다.  $N(t)$ 의 분모항이 무리함수로 표현되어 있기에 오프셋 곡선은 원곡선에 비해 매우 복잡하다<sup>[13,14]</sup>. 각 윤곽선(outline)의 오프셋 생성은 다음의 절차에 의해 이루어진다.

- (1) 주어진 윤곽선을 접선 불연속한 모서리 점들 (corner points)에서 분할하여  $G^1$  이상의 연속성을 갖는 기하 성분들로 나눈다. 여기서, 각 기하 성분은 선분, 원호, 또는 자유곡선 중의 하나이다.
- (2) 오프셋 값을 고려하여 각 기하성분에 대한 오프셋 기하성분을 구한다. 분할된 기하성분이 자유

곡선인 경우, 다음을 수행한다.

- (a) 자유곡선의 오프셋 곡선 내에 국소 루프(local loops)가 존재한다면, 이들을 제거한다.
- (b) 자유곡선의 오프셋 곡선을 G' 원호 스플라인(arc spline)으로 근사한다.
- (3) 이웃하는 두 개의 기하성분들에 대하여, 두 오프셋 기하성분의 끝 점이 서로 만나지 않으면, 두 오프셋 기하성분과 G' 연속하는 원호를 추가한다.
- (4) 오프셋 기하성분들을 하나의 오프셋 윤곽선이 되도록 연결한 후, 오프셋 윤곽선 내에 전역 루프(global loops)가 존재한다면, 이들을 제거한다.

결과로서 이 과정을 통해 최소 G<sup>0</sup> 연속한 오프셋 윤곽선들을 얻게 된다. 각 오프셋 윤곽선은 일련의 오프셋 기하성분들로 이루어 지며, 각 세그먼트는 선분, 원호, 또는 G' 원호 스플라인이 된다.

4.2.1 원호 스플라인을 이용한 오프셋 곡선 근사

원호 스플라인(arc spline)은 직선(line segments)과 원호(circular arcs)로 구성된 일종의 기하학적 곡선으로서 형상 모델링(shape modeling) 측면에서 사용하기 쉽고, 계산적으로 효율적이며, CNC 가공 측면에서 직선 및 원호 보간의 형태로 공구경로 표현을 위해 널리 이용된다<sup>[15,19]</sup>. CNC 공구경로 생성에서 원호보간을 충분히 활용하기 위해서 오프셋 곡선  $C_d(t)$  을 주어진 허용오차  $\delta$  이내로 G' 원호 스플라인으로 근사한다.

Biacr는 Fig. 10에서와 같이 두 점과 각 점에서의 접선을 지나는 두 개의 접선 연속한 원호로 이루어진다<sup>[13]</sup>. 하나의 원호 대신에 두 개의 원호를 사용하는 것은 하나의 원호는 두 점과 두 접선을 지날 수 없다는 사실에 기인한다<sup>[15,17]</sup>. Biacr는 NURBS(Non-Uniform Rational B-Splines) 형태로 표현될 수 있는데, Fig. 10에서와 같이 biacr는 다섯 개의 조종점  $\mathbf{p}_i^w = [w_i \mathbf{p}_i, w_i]^T$  ( $i=0, \dots, 4$ ) 으로 정의될 수 있다<sup>[17,19]</sup>.

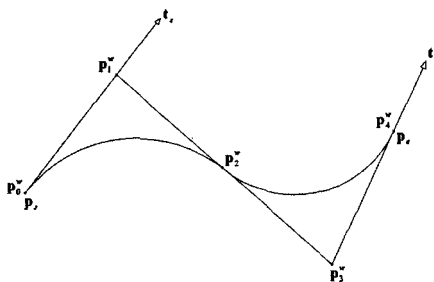


Fig. 10. Biacr formulation.

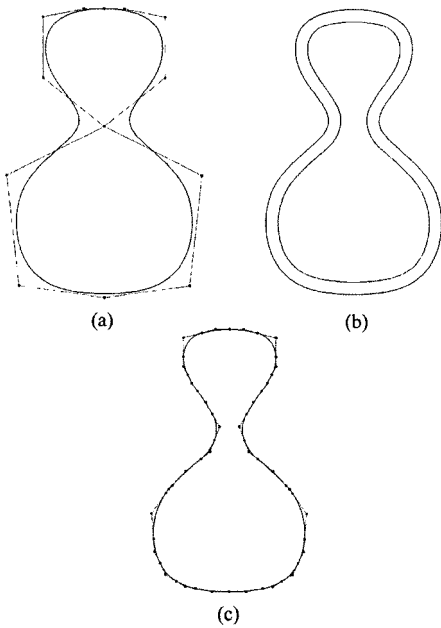
일련의 biacr들을 이용하여 G' 원호 스플라인을 구성한다. 오프셋 곡선이 기이한(singular) 형태가 아니며, 오프셋 곡선 내에 자체 교선(self-intersections)이 없다는 가정 하에 오프셋 곡선의 G' 원호 스플라인 근사는 Park<sup>[18,19]</sup>의 방법에 의거한다. 이에 대한 주요 절차는 다음과 같다.

- (1) 허용오차  $\delta$ 을 두 개의 오차  $\delta_1 = a\delta$ 과  $\delta_2 = b\delta$ 로 분할한다. 여기서,  $a + b = 1$ 이고,  $a \leq b$ 이다.
- (2) 오프셋 곡선  $C_d(t)$ 를 허용오차  $\delta_1$  이내로 근사하는 다각형(base polygon)  $\hat{\mathbf{P}} = \{\mathbf{p}_0, \dots, \mathbf{p}_m\}$ 을 생성한다.
- (3) 주어진 오프셋 곡선을 부분곡선들(curve segments)로 분할하되, 각 부분곡선에 속하는 부분 다각형(local polygon)이 단일 biacr로 허용오차  $\delta_2$  이내로 근사될 수 있도록 반복적으로 분할한다. 하나의 부분곡선을 근사하는 biacr는 다음과 같이 구해진다.
  - (a) 오프셋 부분곡선의 양 끝점  $\mathbf{p}_s$ 와  $\mathbf{p}_e$ 를 얻고, 끝점에서의 접선벡터  $\mathbf{t}_s$ 와  $\mathbf{t}_e$ 를 계산한다.
  - (b) 양 끝점과 오프셋 부분곡선  $CS_k$ 에 속하는 다각형의 점들을 이용하여 부분 다각형  $\mathbf{P}_k = \{\mathbf{p}_s, \dots, \mathbf{p}_e\}$ 를 만든다.
  - (c) 최적 단일 biacr fitting 기법<sup>[19]</sup>을 적용하여 부분 다각형의 양 끝점과 접선벡터를 지나는 biacr 중 부분 다각형  $\mathbf{P}_k$ 과 biacr 간의 거리가 최소가 되는 biacr  $\mathbf{B}_k$ 를 구한다.
  - (d) 만약 biacr  $\mathbf{B}_k$ 가 성공적으로 구해지고, 부분 다각형  $\mathbf{P}_k$ 과 biacr  $\mathbf{B}_k$ 간의 거리가  $\delta_2$  이내에 들면, biacr  $\mathbf{B}_k$ 를 저장한다. 그렇지 않으면, 현재의 부분곡선은 분할되어야 한다.
- (4) 구해진 biacr들을 모두 합쳐서 G' 원호 스플라인  $\hat{\mathbf{B}} = \{\mathbf{B}_0, \dots, \mathbf{B}_n\}$ 을 생성한다.

오프셋 부분곡선의 biacr 근사는 오프셋 부분곡선의 다각형 근사와 근사 다각형의 단일 biacr fitting이라는 두 단계를 거쳐서 이루어 진다<sup>[18,19]</sup>. 위에서 설명된 근사 방법을 통해 구해진 G' 원호 스플라인은 주어진 허용오차를 항상 만족하며, 적은 수의 원호를 생성한다는 장점을 갖는다.

Fig. 11은 3차 B-spline 곡선의 안쪽 오프셋 곡선에 대한 G' 원호 스플라인 근사 예를 나타낸다. 원 곡선은  $16 \times 23 \text{ mm}^2$  크기의 사각형에 포함된다. 오프셋 반경( $d$ )는 1 mm로 주어졌다. 허용오차는 0.1 mm로 주어졌으며, 각각  $a = 0.2, b = 0.8$  비율로 나누어져서 다

각형 근사와 단일 biarc fitting에 이용되었다.



**Fig. 11.** Arc spline approximation of an offset curve: (a) a cubic B-spline curve with its control points, (b) the B-spline curve and its inward offset curve approximated by an arc spline, (c) the arc spline with its control points.

4.2.2 오프셋 곡선의 곡소 및 전역 루프 제거

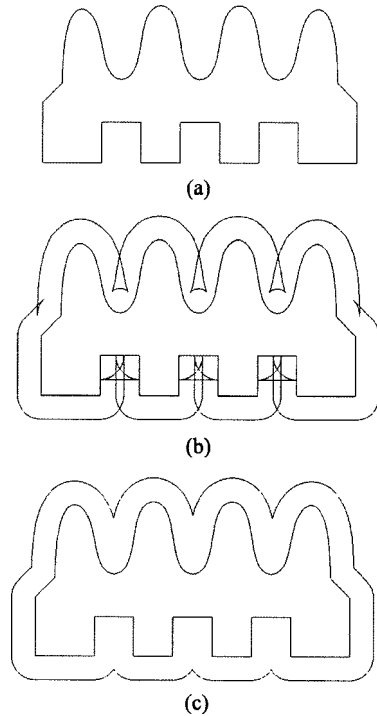
본 연구에서는 오프셋 윤곽선을 직선과 원호들로 구성된 원호 스플라인으로 표현하고, 미절단(undercut)이 발생하는 절점 부위에 원호를 추가하거나 인접한 기하성분들 간의 간섭이 발생하는 부위를 적절하게 제거해준다<sup>13,14</sup>.

먼저, 원호 스플라인으로 표현된 오프셋 윤곽선 내에 존재하는 곡소 루프(local loops)를 발견하고 제거한다. 각 원호 스플라인을 이루는 직선 또는 원호들 간의 교차를 수행한다. 인접하지 않은 기하 성분(직선, 원호)들간의 교차점들이 존재하는 구간에서 곡소 루프가 발생하므로, 해당 구간을 처리하여 원호 스플라인으로부터 제거한다. 이 과정을 거쳐 구해지는 새로운 오프셋 윤곽선도 원호 스플라인으로 표현된다.

그런 다음, 서로 다른 오프셋 윤곽선들 간에 존재하는 전역 루프(global loops)를 발견하고 제거한다. 하나의 오프셋 윤곽선에 대한 원호 스플라인을 이루는 기하 성분(직선, 원호)들과 다른 하나의 오프셋 윤곽선에 대한 원호 스플라인을 이루는 기하 성분(직선, 원호)들 간의 교차를 수행한다. 교차점들이 존재하는

구간에서 전역 루프가 발생하므로, 해당 구간을 처리하여 교차를 수행한 두 원호 스플라인의 특정 부위를 제거하고, 각각 원호 스플라인을 분할한다. 이 경우 오프셋 윤곽선의 수가 증가한다. 물론, 이 과정을 거쳐 구해지는 새로운 오프셋 윤곽선도 원호 스플라인으로 표현된다.

Fig. 12는 간섭 루프의 발견 및 제거 예를 보여준다. Fig. 12(a)는 17개의 직선과 1개의 자유곡선으로 이루어진 입력 윤곽선을 나타낸다. 윤곽선은 40×20 mm<sup>2</sup> 크기의 사각형에 포함된다. Fig. 12(b)는 이러한 윤곽선에 대하여 간섭을 고려하지 않은 오프셋 결과를 보여준다. 여기서, 오프셋 반경은 3 mm로 하였다. Fig. 12(c)는 간섭이 제거된 오프셋 윤곽선을 나타낸다.



**Fig. 12.** Elimination of self-intersecting loops from an offset outline: (a) input outline, (b) offset outline with local and global loops, (c) offset outline free of self-intersecting loops.

4.3 NC 코드 산출

간섭이 제거된 오프셋 윤곽선들은 각각 원호 스플라인들로 구성된다. 따라서, 각 오프셋 윤곽선에 대한 원호 스플라인을 구성하는 기하성분들에 대해 직선보간(G00 또는 G01) 및 원호보간(G02 또는 G03)을

이용하여 레이저 절단 경로를 위한 NC 코드를 산출한다<sup>(11,21)</sup>.

제한된 레이저 절단 경로 생성 방법은 CNC 공구경로 생성을 위해 오프셋 곡선에 대한 오차보장  $G^1$  원호 스플라인 근사를 도입하였기에 생성되는 공구경로가 지정된 허용오차이내로 유지됨과 동시에  $G^1$  연속성을 갖춘 원호 세그먼트들을 포함하는 적은 개수의 경로 세그먼트(path segments)로 이루어진다.

결과적으로 얻어진 NC 코드는 적은 수의 직선운동과 원호운동으로 구성되므로 적은 기억용량을 소요하고, 동일 오프셋 윤곽선 내에서는 레이저 조사 헤드가 접선 연속한 궤적을 이동하도록 해주므로 표면조도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다<sup>(11,16)</sup>.

### 5. 실험결과

공정지식 기반 CNC 공구 경로 생성 방법은 IBM 호환 PC 상에서 C 언어를 이용하여 구현하였다. 다양한 형상의 평면 윤곽선들에 대해 제안된 방법을 적용하여 오프셋 윤곽선과 NC 코드 생성을 수행하였다.

본 논문에서는 제안된 방법을 문자 K 형상의 자유 윤곽선에 대해 적용하였다. 절단재료로서 크기  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ , 두께 2.0 mm인 CSP IN 금속 박판재를 사

용하였다. 레이저의 출력을 1.8 kW로 하였고, 레이저 공구의 이송속도는 4000 mm/min을 정하였다. 이러한 가공 조건에 대해 식 (2)에 의해 결정된 절단폭은 0.56 mm에 해당한다. 따라서, 오프셋 반경 0.28 mm에 대한 오프셋 윤곽선을 생성하였으며, 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13(a)는 13개의 자유곡선들로 구성된 입력 윤곽선을 보여준다. 윤곽선은  $41 \times 42 \text{ mm}^2$  크기의 사각형에 포함된다. Fig. 13(b)는 입력 윤곽선의 자유곡선들과 이들의 조종점들을 나타낸다. Fig. 13(c)는 오프셋 반경 0.28 mm에 대해 구해진 오프셋 윤곽선을 나타낸다. 여기서, 근사오차를 0.1 mm로 했다. 오프셋 윤곽선은 14개의 원호 스플라인과 8개의 원호로 구성되며, 전체 120개의 원호로 구성된다. Fig. 13(d)는 입력 윤곽선과 오프셋 윤곽선을 이루는 곡선들의 조종점을 나타낸다.

오프셋 윤곽선의 근사오차 검사를 수행한 결과, 원호 스플라인으로 근사된 오프셋 윤곽선이 항상 허용 오차 이내에 있음을 확인했다. 생성된 레이저 공구 경로에 대한 NC 코드를 생성한 후, 이를 이용하여 NC 절단 시뮬레이션을 수행하였다. 그런 다음, 주어진 절단조건 하에서 생성된 NC 코드를 이용하여 레이저 절단을 수행하였다. Fig. 14는 생성된 NC 코드를 이용한 NC 절단 시뮬레이션 예를 보여준다. Fig. 15은 생성된 NC 코드를 이용한 레이저 절단을 수행한 결과를 보여준다. 가공물의 형상오차를 확인하기 위해 3차원 접촉식 측정기를 통해 최종 가공물을 측정한 후, 측정데이터로부터 가공물의 윤곽선을 추출하였다. 그런 다음, 추출된 윤곽선과 입력윤곽선 간의 형상오차를 비교하였다. 결과로서 대부분 영역에서는 형상오차가 0.05 mm보다 작았으나, 날카로운 모서리 점 영역에서의 최대 형상오차가 0.4 mm에 이르렀다. 이것은 날카로운 모서리 점 주위에서의 열용량 증가에 따른 그울립(burning) 및 과용융(over-melting) 현상에 기인한다.

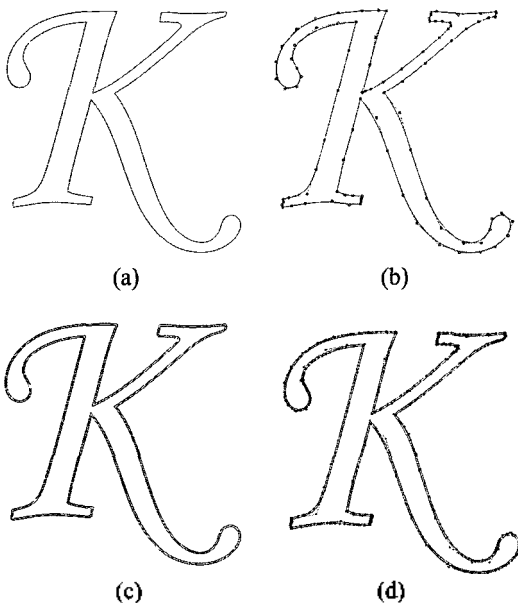


Fig. 13. Offset generation of a K-shaped outline: (a) input outline in B-splines, (b) its control points, (c) input outline and its outward offset outline, (d) their control points.

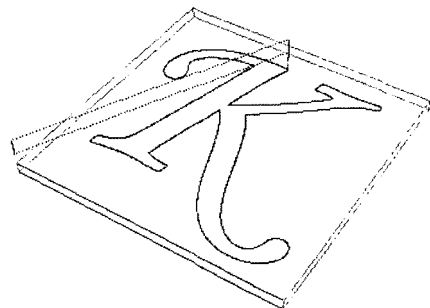


Fig. 14. Graphical simulation of laser cutting.



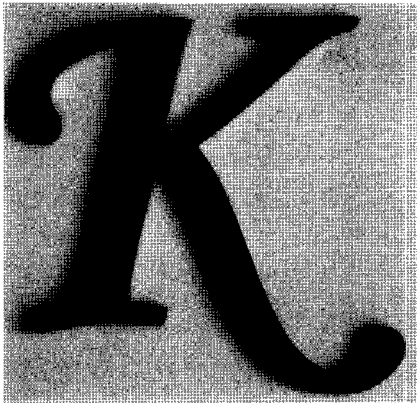


Fig. 15. Finished parts produced by laser cutting.

## 6. 맺음말

공구직경 만큼의 일정한 절삭폭(width of cut)이 발생하는 밀링 가공과는 다르게 금속 박판재의 레이저 절단에서는 공정변수가 바뀔에 따라 초래되는 절단폭(kerfwidth)이 함께 변한다. 즉, 레이저 절단에서의 절단폭은 레이저 종류 및 출력, 절단속도, 절단재료 및 두께, 절단형상 등에 따라 다르게 산출된다. 따라서, 이러한 공정변수와 절단폭과의 상관관계에 대한 고려 없이 생성된 CNC 공구 경로를 이용하여 레이저 절단을 수행할 경우, 원하지 않는 품질을 얻게 된다.

본 논문에서는 2차원 자유형상의 레이저 절단을 위한 공정지식기반 CNC 공구 경로 생성 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 레이저 절단 실험계획과 체계적 분석을 통해 레이저 절단용 공정지식을 구축한 후, 입력 윤곽선의 오프셋 곡선을 생성하여, 궁극적으로 레이저 절단용 CNC 공구 경로를 생성한다. 여기서 오프셋 반경은 구축된 공정지식을 통해 결정되는 절단폭의 절반에 해당한다.

제안된 레이저 절단 경로 생성 방법은 CNC 공구경로 생성 과정에서 원호보간을 효율적으로 이용한다. 그리고, 공구경로가 지정된 허용오차 이내로 유지되는 동시에 경로 세그먼트의 개수를 효율적으로 줄일 수 있다. 제안된 방법은 고품질의 완성품 생산을 위한 레이저 절단 공정에서 중요한 역할을 할 수 있으리라 사료된다.

후후 연구 계획은 다음과 같다. 우선적으로, 제안된 방법에 의해 생성된 레이저 절단 경로를 보다 체계적인 실험/가공/측정/검사 과정을 거쳐 검증할 것이다. 그리고, 다양한 재질의 판재와 레이저 종류에 대해 레이저 절단용 공정지식을 추가 확보할 계획이다. 또

한, Fig. 15에서와 같이 날카로운 모서리 점들(corner points) 주위에서 발생하는 그을림(burning)과 과용융(over-melting) 현상을 줄이기 위해 CNC 공구경로를 수정 및 보정하는 방안에 대한 심도 있는 연구를 수행할 계획이다.

## 감사의 글

본 논문은 2004년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-042-D00229).

## 참고문헌

1. El Wakil, S. D., "Processes and Design for Manufacturing", PWS Publishing Company, Boston, 1998.
2. Ready, J. F., "Industrial Applications of Lasers", Academy Press, Tokyo, 1997.
3. Wilson, J. and Hawkes, J. F. B., "Lasers Principles and Applications", Prentice Hall, 1987.
4. Geiger, M., Manufacturing Science-driving Force for Innovation, Proceedings of the 7th ICTP Conference, 17-30, 2002.
5. Wollermann-Windgasse, R. and Schinzel, C., Laser Technology in Manufacturing - State of the Art at the Beginning of the 21st Century, Proceedings of LANE 2001 Conference, 87-102, 2001.
6. Yilbas, B. S., "Experimental Investigation into CO<sub>2</sub> Laser Cutting Parameters", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 58, pp. 323-330, 1996.
7. Alope, R., Girish, V., Scrutton, R. F. and Molian, P. A., "A Model for Prediction of Dimensional Tolerances of Laser Cut Holes in Mild Steel Thin Plates", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 37, No. 8, pp. 1069-1078, 1997.
8. Yilbas, B. S., "Laser Cutting Quality Assessment and Thermal Efficiency Analysis", *Journal of Material Processing Technology*, 155-156, pp. 2106-2115, 2004.
9. Ahn, D. G., Kim, M. S., Lee, S. H., Park, H. and Yoo, Y. T., "Influence of Process Parameters on the Kerfwidth for the Case of Laser Cutting of CPS 1N Sheet Using High Power CW Nd:YAG Laser", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 7, pp. 19-26, 2005.
10. Trumpf Group, <http://www.trumpf.com>
11. 최병규 외, "CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공", 최중당, 1999.
12. Neter, J., Wasserman, W. and Kunter, M. H., "Applied Linear Statistical Models: Regression, Analysis of Variance, and Experimental Designs", IRWIN Inc., USA, 1990.

13. Lee, I. K., Kim, M. S. and Elber, G., "Planar Curve Offset Based on Circle Approximation", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 8, pp. 617-630, 1996.
14. Elber, G., Lee, I. K. and Kim, M. S., "Comparing Offset Curve Approximation Methods", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 17, No. 3, pp. 62-71, 1997.
15. Bolton, K. M., "Biarc Curves", *Computer-Aided Design*, Vol. 7, No. 2, pp. 89-92, 1975.
16. Yeung, M. K. and Walton, D. J., "Curve Fitting with Arc Splines for NC Toolpath Generation", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 11, pp. 845-849, 1994.
17. Piegl, L. A. and Tiller, W., "Biarc Approximation of NURBS Curves", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, No. 11, pp. 807-814, 2002.
18. Park, H., "Error-bounded Biarc Approximation of Planar Curves", *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 12, pp. 1241-1251, 2004.
19. Park, H., "Optimal Single Biarc Fitting and Its Applications", *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 1, No. 1-4, pp. 187-195, 2004.
20. POSCO, <http://www.posco.com>
21. Lee, K., "Principles of CAD/CAM/CAE Systems", Addison-Wesley, Tokyo, 1999.



### 박형준

1991년 2월 포항공과대학교 산업공학과 학사  
 1993년 2월 포항공과대학교 산업공학과 석사  
 1996년 2월 포항공과대학교 산업공학과 박사  
 1996년 3월~2001년 2월 삼성전자 중앙연구소 책임연구원

2001년 3월~현재 조선대학교 산업공학과 부교수  
 관심분야: Geometric Modeling and Processing, Virtual Prototyping of Engineered Products, 3D Shape Construction and Understanding, Reverse Engineering, CAD/CAM/CG Applications



### 안동규

1992년 2월 부산대학교 생산기계공학과 학사  
 1994년 2월 KAIST 정밀공학과 석사  
 1994년 3월~1999년 8월 대우중공업(주) 항공사업본부 우주항공연구소  
 1999년 9월~2002년 8월 KAIST 기계공학과 박사

2002년 9월~2003년 2월 KAIST 기계공학과 Post-Doc  
 2003년 3월~현재 조선대학교 기계공학과 조교수  
 관심분야: Rapid Prototyping/Rapid Tooling/Rapid Manufacturing, CAD/CAE, 첨단 생산시스템 개발, 광용융가공공정 개발, 초경량 기능성 재료 개발