

## 3-D 칩생성과정의 역학적 해석 모델링

김경우\*, 김우순\*, 김동현\*\*

### Mechanistic Analysis Modeling for the 3-D Chip Formation Process

Kyong Woo Kim\*, Woo Soon Kim\*, Dong Hyun Kim\*\*

#### ABSTRACT

Once the chip has developed a mixed mode of side-curl and up-curl, it would generally curl to strike the tool flank. The development of the bending stresses and shear in the chip would ultimately lead to chip failure. This paper approach this problem from a mechanics-based approach, by treating the chip as a 3-D elastic curved beam, and applying appropriate constraints and forces. The expressions for bending, shear and direct stresses are developed through an energy-based criterion. The location of the maximum stresses is also identified and explained for simulated test conditions.

**Key Words** : chip curl(칩 만곡), side-curl(측면 만곡), up-curl(상향 만곡), bending stress(굽힘응력)

#### 1. 서론

최근 모든 산업의 급속한 발전은 기계가공에서도 기존의 제작 가공방법에서 자동화와 무인화 시대로 급속히 발전하고 있다. 자동화와 무인화 작업을 이루기 위해서는 실제 기계가공에서 넓은 범위의 가공조건에 적절하게 대응하며, 기계가공 과정을 모니터링 할 수 있는 기술과 제어기술을 통하여 신뢰성이 높은 가공기술을 필요로 하고 있다. 기계 가공기술에 대한 최근의 연구는 자동화와 무인화 된 가공작업에서 금속제거율(MRR)을 향상시키는 방법에 대하여 연구들이 진행되고 있다. 절삭가공 시 연속형 칩과 같은 불완전한 형상의 칩이 발생되면 작업자의 안전을 위협하고, 제품표면의 품질을 저하시키며, 절삭공구나 공작기계의 손상을 초래하고 칩처리성을 떨어뜨리는 결

과를 발생시킨다. 심한 경우 칩이 공작물이나 툴 홀더에 감겨 작업도중 공작기계를 정지시킨 후 칩을 제거하는 경우가 발생하여 가공시간의 증대로 인한 생산성의 저하가 발생한다. 따라서, 유용한 칩처리(Chip Disposal)와 칩절단(Chip Breaking)을 위한 칩제어(Chip Control)는 작업자의 안전을 보호하고, 공구와 공작물을 칩으로부터 보호하여 고품위, 고정도의 공작물을 얻기 위하여 가공기술에서 매우 중요한 변수로 취급되고 있다. 그러나, 최적의 칩형상을 얻기 위한 칩제어에 관한 연구의 부족으로 인하여 산업현장의 생산성 저하를 초래하는 실정이다.

칩 제어 연구의 현재 연구동향은 칩 형상과 절단 과정의 기초에 대한 학문적인 연구를 위하여 칩 유동, 만곡과 절단 과정을 이용하여 연구를 진행하고 있다.

\* 원광대학교 대학원 기계공학과

\*\* 원광대학교 기계공학부

Nakayama<sup>(1)</sup>는 일찍이 2차원 칩만곡과 칩절단에 관한 기초 연구를 확립하였으며, 장애물형 칩브레이커의 칩만곡 연구를 통해서 칩 브레이커에 의한 굽힘모멘트 작용에 기인하여 전단 평면에서 칩만곡이 발생한다는 것을 발견했다. Cook 등<sup>(2)</sup>은 2차원 상향만곡칩에서 칩만곡 메카니즘과 그에 따른 표면 거칠기와 공구마모에 관해서 연구했다. Spaans<sup>(3)</sup>는 3차원 칩만곡과 칩절단 현상을 폭 넓게 연구하여 칩뿌리와 칩만곡 반경에서의 굽힘모멘트 사이의 관계를 측면만곡칩과 상향만곡칩의 실험결과로 분석하였다.

본 연구는 3차원 칩만곡 모델의 구조적 발전 가능성에 대해 연구하였고, 칩 모델은 응력과 변형을 이용하여 모델링하여 분석하였다.

## 2. 나선형 칩(Spiral Chip)의 해석적 모델링

### 2.1 기하학적 모델링

측면만곡과 상향만곡이 조합된 모드의 칩의 실측을 이용하여 3차원 나선형 칩을 모델링한다. 이상화된 나선형 칩의 기하학적 모델링은 칩 만곡반경의 지속적인 변화와 고정된 중심선에서의 지속적인 중심점의 움직임을 고려하여 이를 수 있다.

모델링에 사용한 가정은 다음과 같다.

1. 칩은 완전 탄성이다.
2. 칩 단면의 모양은 사각형이다.
3. 칩의 자유단은 여유면에서 공구에 접한다.

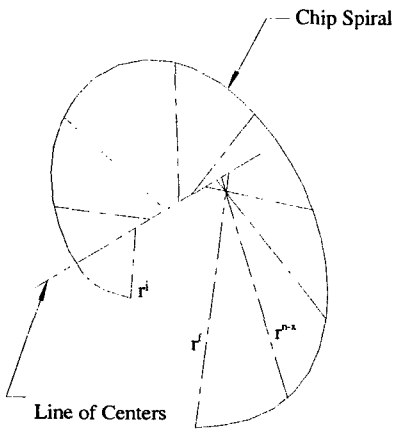


Fig. 1 Schematic Diagram of the Chip Spiral Showing Moving Center and a Varying Curl Radius

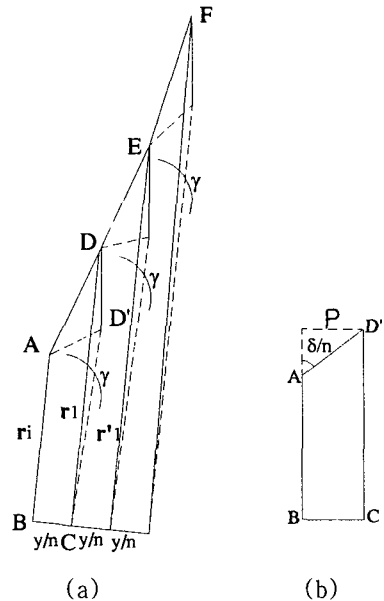


Fig. 2 Modeling the Geometry of the Chip Spiral  
(a)Linearization of the Curve (b)Projected Surface

Fig. 2(a)는 나선형 칩의 세그먼트를 반경  $r_i, r_1, r_2$ 로 나타낸 것이다. 첫 번째 세그먼트에서 점  $A, B, C$ 는 하나의 면을 이루고 점  $D$ 는 면의 밖에 있다. 점  $D'$ 은  $A, B, C$ 가 포함되어 있는 면에서 점  $D$ 를 투영시킨 점이다. Fig. 2(b)는 세그먼트  $ABCD$ 의 투영면을 나타낸 것이다. 나선형에서의 비틀림은 나선형의 한번의 완전한 회전에 따라서 일정하다고 가정하고, 세그먼트에서의 비틀림은  $\frac{\delta}{n}$ 에 의해 주어진다.

Fig. 2에서 점  $A$ 와  $D'$ 의 수직거리는 다음과 같다.

$$P = \frac{y}{n} \cot\left(\frac{\delta}{n}\right) \quad (1)$$

나선형 칩의 축에 대한 최종반경  $r_f$ 는 다음과 같고,

$$r_f = \frac{r_i(1 - \cos \gamma) + (y/n) \cot(\delta/n) [1 - \cos^{n-1} \gamma]}{\cos^n \gamma (1 - \cos \gamma)} \quad (2)$$

그러므로,  $\delta$ 는 다음과 같다.

$$\delta = n \tan^{-1} \left[ \left( \frac{y}{n} \right) \frac{[1 - \cos^{n-1} \gamma]}{[r_f \cos^n \gamma - r_i](1 - \cos \gamma)} \right] \quad (3)$$

세그먼트의 번호  $k$ 는 임의의 각  $\theta$ 와  $2\pi$ 에 의해 분할된  $n$ 에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k = \frac{n\theta}{2\pi} \quad (4)$$

각  $\theta$ 에 대응하는  $r_\theta$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_\theta = r_k = \frac{r_i}{\cos^k \gamma} + \left[ \frac{r_f \cos^n \gamma - r_i}{1 - \cos^{n-1} \gamma} \right] \left[ \frac{1 - \cos^{k-1} \gamma}{\cos^k \gamma} \right] \quad (5)$$

선택된 단면까지의 전체 칩 만곡  $\xi_\theta$ 는

$$\xi_\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y_k}{r_\theta} \right) \text{이다.}$$

### 2.2 작용력의 모델링

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 전형적인 3차원 칩의 기하학적인 공간도를 나타낸 것이다.

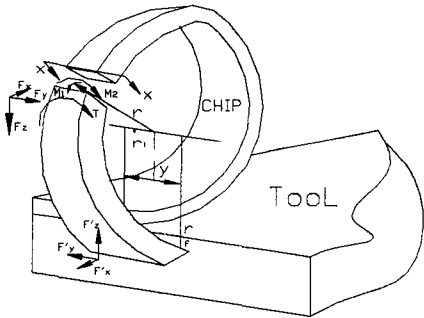


Fig. 3 3-D Chip Showing Development of Reaction Forces and Moments at any Arbitrary Section

Fig. 4는 나선형 칩의 임의의 단면에서 작용력과 모멘트에 대해서 자유물체도를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서

$$x' = -r_\theta \sin \theta$$

$$y' = y(1 - k/n)$$

$$z' = r_f - r_\theta \cos \theta$$

칩 in-plane에서 총 굽힘 모멘트는 다음과 같다.

$$F'_x(r_\theta \cos \theta - r_f) - F'_z(r_\theta \sin \theta) \quad (6)$$

칩 out-of-plane에서 총 굽힘 모멘트는 다음과 같다.

$$F'_x \cdot y(k/n - 1) - F'_y(r_\theta \sin \theta) \quad (7)$$

총 토크는 다음과 같다.

$$F'_z \cdot y(1 - k/n) - F'_y(r_f - r_\theta \cos \theta) \quad (8)$$

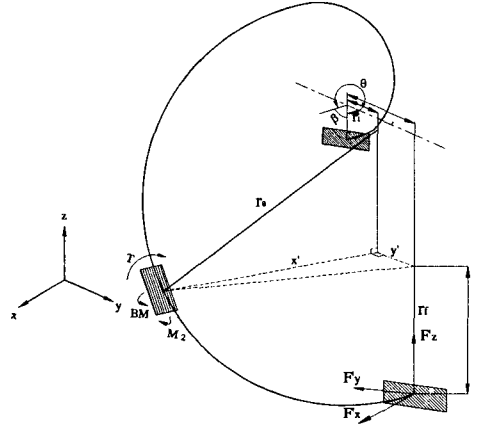


Fig. 4 Reaction Forces and Moments at any Section of the Chip Spiral

### 2.3 비틀림

토크는 칩에서의 전단응력을 발생한다. 전단응력은 에너지로 구할 수 있다.

사각형 단면을 갖는 바의 비틀림에 대해 바의 최종면은 수축에 의한 영향이 없고 물체력은 고려하지 않는다. 또한 비틀림의 단위 각  $\alpha$ 는 미리 정해져 있다고 가정한다.

바의 전체 포텐셜에너지는 다음과 같다.

$$\pi_s = \frac{LGA^2}{2} \int_A \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} + x \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} - y \right)^2 \right] = \frac{LT\alpha}{2} \quad (9)$$

$\phi$ 는 warping 함수이다.

포텐셜 에너지에 의한 전단응력은

$$(\tau_{yz})_P = \frac{G\alpha}{2} (1 + A_1 + \overline{A_2}x^2 + 3\overline{A_3}y^2)x \quad (10)$$

$$(\tau_{zx})_P = \frac{G\alpha}{2} (-1 + A_1 + \overline{A_2}x^2 + 3\overline{A_3}y^2)y \quad (11)$$

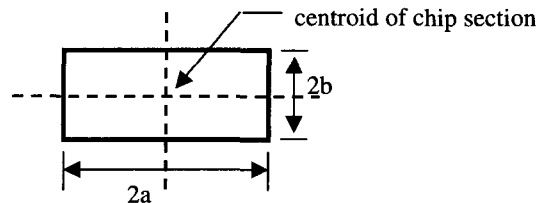


Fig. 5 A Schematic Diagram Showing Chip Cross Section

비틀림 상수  $J = T/G\alpha$  이므로

$$(\tau_{yz})_P = \frac{T}{2J}(1 + A_1 + \overline{A_2}x^2 + 3\overline{A_3}y^2)x \quad (12)$$

$$(\tau_{zx})_P = \frac{T}{2J}(-1 + A_1 + \overline{A_2}x^2 + 3\overline{A_3}y^2)y \quad (13)$$

컴프리멘터리 포텐셜은 다음과 같다.

$$\pi_c = \frac{L}{2G} \int_A \left[ \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 - 4G\alpha \psi \right] = \frac{-LT\alpha}{2} \quad (14)$$

$\psi$ 는 응력함수이다.

컴프리멘터리 포텐셜에 의한 전단응력은 다음과 같다.

$$(\tau_{yx})_c = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = x(B_1 + 2\overline{B_2}x^2 - \overline{B_2}a^2 + \overline{B_3}y^2)(b^2 - y^2) \quad (15)$$

$$(\tau_{zx})_c = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = y(B_1 + \overline{B_2}x^2 + 2\overline{B_2}y^2 - \overline{B_3}b^2)(x^2 - a^2) \quad (16)$$

## 2.4 칩의 실제 평면에서 반경 결정

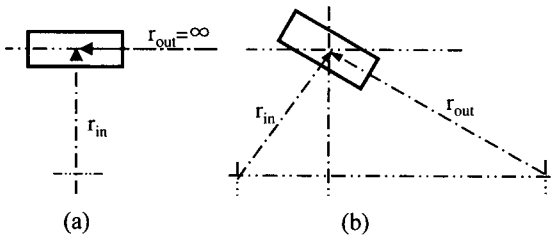


Fig. 6 Measurement of in-plane and out-of plane curl radii (a) initial and final (b) any other arbitrary position

in-plane 칩과 out-of-plane의 칩 반경은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$r_{i\theta} = \frac{r_\theta}{\cos \epsilon}, \quad r_{o\theta} = \frac{r_\theta}{\sin \epsilon}$$

선택한 단면까지의 총 칩 비틀림은 다음과 같다.

$$\epsilon = L_\theta \cdot \alpha$$

## 2.5 In-pane 굽힘

in-plane 굽힘 응력은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_b = \frac{M}{AR} \left( 1 + \frac{1}{Z} \frac{y}{R+y} \right) \quad (17)$$

Fig.5와 같은 단면에서 극관성모멘트는

$$Z = -1 \frac{R}{2c} \log_e \left( \frac{R+c}{R-c} \right) \quad (18)$$

$c = \pm b$ ,  $M$ 은 in-plane 굽힘응력이다.

내면에서의 굽힘응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\sigma_{bxi})_- &= -\sigma_{bi-} \cos \xi_\theta \cos \theta \\ (\sigma_{bxi})_- &= \sigma_{bi-} \cos \xi_\theta \sin \theta \\ (\sigma_{bzi})_- &= \sigma_{bi-} \sin \xi_\theta \cos \xi_\theta \end{aligned} \quad (19)$$

외면에서의 굽힘응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\sigma_{bxi})_+ &= -\sigma_{bi+} \cos \xi_\theta \cos \theta \\ (\sigma_{bxi})_+ &= \sigma_{bi+} \cos \xi_\theta \sin \theta \\ (\sigma_{bzi})_+ &= \sigma_{bi+} \sin \xi_\theta \cos \xi_\theta \end{aligned} \quad (20)$$

## 2.6 out-of-plane 굽힘

2.5절의 in-plane 굽힘응력식에서  $c = \pm b$ ,  $M$ 이 out-of-plane 굽힘응력 일 때,

내면에서의 굽힘응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\sigma_{bxo})_- &= -\sigma_{bo-} \cos \xi_\theta \cos \theta \\ (\sigma_{bxo})_- &= \sigma_{bo-} \cos \xi_\theta \sin \theta \\ (\sigma_{bzo})_- &= \sigma_{bo-} \sin \xi_\theta \cos \xi_\theta \end{aligned} \quad (21)$$

외면에서의 굽힘응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\sigma_{bxo})_+ &= -\sigma_{bo+} \cos \xi_\theta \cos \theta \\ (\sigma_{bxo})_+ &= \sigma_{bo+} \cos \xi_\theta \sin \theta \\ (\sigma_{bzo})_+ &= \sigma_{bo+} \sin \xi_\theta \cos \xi_\theta \end{aligned} \quad (22)$$

## 3. 시뮬레이션 및 결과

피삭재 SM45C를 절삭속도 230m/min, 절입깊이 2.54mm, 이송 0.254mm/rev의 절삭조건으로 선삭실험을 통하여 얻은 실험데이터와 칩의 치수들은 다음과 같다.

$$F_x' = 80N, \quad F_y' = 64N, \quad F_z' = 96N$$

$$r_i = 5mm, \quad r_f = 13mm, \quad y = 3.6mm$$

$$2a = 3.4mm, \quad 2b = 1.0mm$$

실험데이터를 초기값으로 입력하여 시뮬레이션 한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 in-plane, out-of-plane에서의 칩 반경의 변화를 보여준다. in-plane에서의 반경이 13mm의 마지막 반경으로 감소하기 전에 약 23mm의 최대값에 이른다. out-of-plane에서의 반경은 in-plane에서 반경이 최대값에 이를 때 최소값을 나타냈다.

Fig. 9와 Fig. 10은 나선각에 따른 토오크의 변화

와 전단응력의 변화를 나타낸 것이다. 두 그래프 모두 처음에는 일정하다가 급격히 증가한다. 토오크는 약 180° 부근에서 최대치에 도달한 후 급격한 감소를 나타냈다. 전단응력 역시 180° 부근에서 최대값에 도달했다.

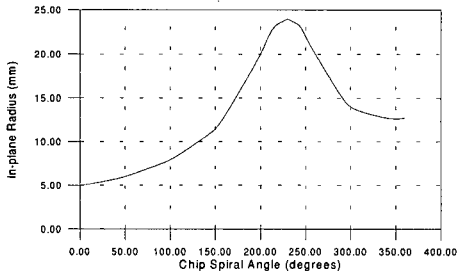


Fig. 7 Variation of in-plane Chip Radius with Spiral Angle

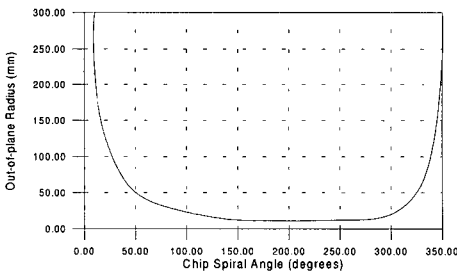


Fig. 8 Variation of out-of-plane Chip Radius with Spiral Angle

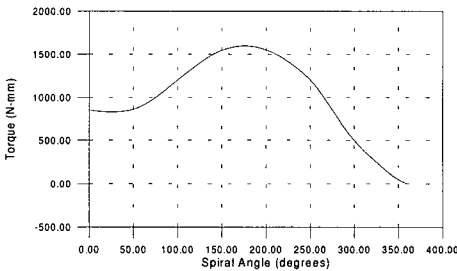


Fig. 9 Variation of Torque Along the Chip Spiral

Fig. 11은 나선각에 따른 in-plane의 굽힘모멘트를 나타낸 것이다. 최대 굽힘모멘트의 나선각 140°는 Zhang<sup>(4)</sup>의 연구에서 칩의 자유단이 회전하는 공작물을 때렸을 때 2-D 굽힘의 경우와 유사한 결과를 보인다. Fig. 12는 나선각에 따른 out-of-plane

의 굽힘모멘트를 나타낸 것이다.

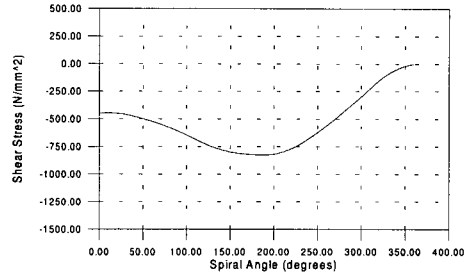


Fig. 10 Variation of Shear Stress along the Chip Spiral

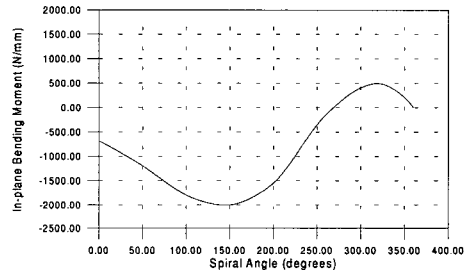


Fig. 11 Variation of in-plane Bending Moment along the Chip Spiral

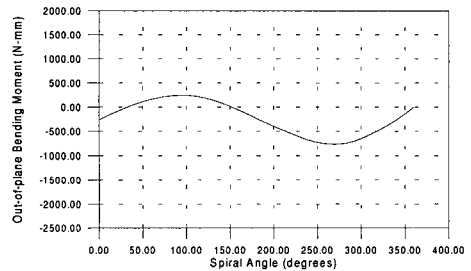


Fig.12 Variation of Out-of-plane Bending Moment along the Chip Spiral

Fig. 13와 Fig. 14는 칩의 내·외면에 대한 in-plane의 굽힘 응력을 나타낸 것이다. 응력의 절대값이 거의 같음을 알 수 있다. 내면에 대해서 기호(+)는 인장응력을 나타내며, 외면에 대해서 기호(-)는 압축응력을 나타낸다.

Fig. 15와 Fig. 16은 칩의 내·외면에 대한 out-of-plane의 굽힘 응력을 나타낸 것이다. 응력의 부호는 in-plane의 경우에 대해서 반대이다.

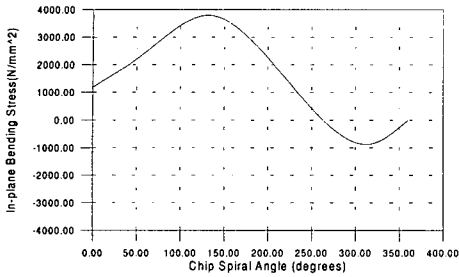


Fig. 13 Variation of in-plane Bending Stress  $\sigma_{bi-}$  (Inside Surface) with Spiral Angle

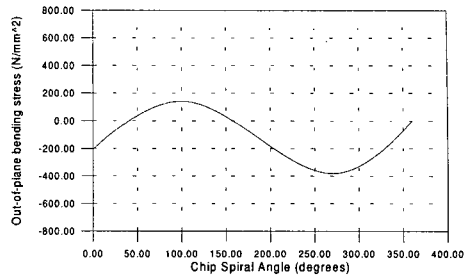


Fig. 16 Variation of out-of-plane Bending Stress  $\sigma_{bo+}$  (Outside Surface) with Spiral Angle

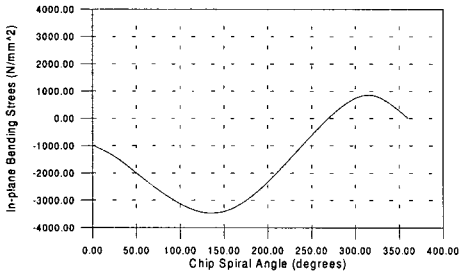


Fig. 14 Variation of in-plane Bending Stress  $\sigma_{bi+}$  (Outside Surface) with Spiral Angle

#### 4. 결론

본 연구를 통해서 완전 탄성체인 만곡된 3-D 칩에서의 응력분포를 역학적인 방법을 이용하여 개발했다. 해석결과로부터, 칩절단은 굽힘, 전단과 직접적인 응력 등의 복합 작용으로 인해서 발생한다는 것을 알 수 있었다. 최대응력의 위치를 포함한 응력변화의 양상을 실험데이터를 시뮬레이션하여 구할 수 있었다. 향후의 연구과제로서 역학적인 방법으로 얻은 결과를 유한요소법과 실험적인 방법을 이용하여 검증할 필요가 있다.

#### 참고문헌

1. Nakayama K., "A Study on the Chip Breaker," Bull. Jap. Soc. Prec. Eng., Vol. 39, No. 17, pp. 142, 1962.
2. Cook N. H., Jhaveri P., and Nayak N., "The Mechanism of Chip Curl and Its Importance in Metal Cutting," Trans. ASME, pp. 374, 1963.
3. Spaans, "The Fundamental of Three-dimensional Chip-curl, Chip Breaking and Chip Control," Doctoral Thesis, TH Delft, 1971.
4. Zhang J., "Simulation and Experimental Validation of Chip Curl Development, Chip Deformation and Chip Breaking in 2-D Metal Machining," M.S. Thesis, University of Kentucky, 1994.
5. 김동현, 박승근, 김 경우, "칩브레이커 형상변수에 의한 칩유동각 예측," 한국공작기계학회지, 제9권, 제2호, pp. 96-101, 2000.

전단응력과 in-plane과 out-of-plane 응력들에 따른 칩절단 기준을 세울 수 있다. 재료의 특성에 따른 이러한 변수들의 영향을 충분히 고려한다면 칩절단 모드에 대한 기준을 제시할 수 있을 것이다.

본 연구에서 얻은 결과와 실험과 유한요소해석을 통한 결과를 충분히 고찰한다면 일반적인 칩절단 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

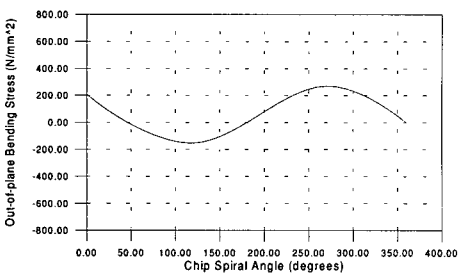


Fig. 15 Variation of out-of-plane Bending Stress  $\sigma_{bo-}$  (Inside Surface) with Spiral Angle