

## 후크 벤딩 금형 설계의 전산화에 관한 연구

조 은 정\* · 정 호 승\*\* · 정 철 우\*\* · 조 종 래\*\* · 최 일 동\*\*\*

### Study on the Computerization of Die Design for Bending Hook

E-J Cho\* · H-S Jeong\*\* · C-W Jeong\*\* · J-R Cho\*\* · I-D Choi\*\*

**Key words** : Hook(바늘), Die Design(금형설계), Elastic Deformation(탄성변형), Plastic Deformation(소성변형), Elastic Recovery(탄성회복), Numerical Analysis(수치해석)

#### Abstract

Die design for manufacturing hooks from steel wires has been depended on empirical procedures based on trial and error method. To design die, at first the curvature and bending angle of hook are computed by using AutoCAD and developed program which is composed of Visual Basic. Then spring back should be considered because the elastic recovery of material is very important in bending process. In this study, bending analysis of elastic-plastic materials is applied to predict curvature of hook and spring back. Therefore, systematic procedure of die design for bending hook is achieved to consider elastic recovery in terms of hook shapes. Experimental results are good agreement with calculated results.

#### 기 호 설 명

$\epsilon_x$  : x방향 수직 변형률

$\rho$  : 곡률 반경

$\sigma_x$  : x방향의 수직 응력

$M$  : 가해진 굽힘 모멘트

$M_E$  : 탄성 굽힘 모멘트

$E$  : 탄성계수

#### 1. 서 론

일반적으로 소성가공(plastic deformation) 공정은 두 개의 큰 범주로 체적성형(bulk forming)과 판재성형(sheet metal forming)으로 분류될 수 있다.<sup>(1)</sup> 체적성형의 경우에는 단면 또는 형상의 두드러진 변화만큼 큰 소성 변형을 일으키므로 탄성 변형 영역보다 소성변형 영역이 매우 커 일반적으로 탄성회복(elastic recovery)은 무시될 수 있으며, 판재성형의 경우에는 단순 굽힘가공과 같이 단

\* (주) PESSCO

\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부

\*\*\* 한국해양대학교 기계 소재공학부

면의 변화보다는 형상의 변화가 크고 영구변형뿐만 아니라 탄성변형 영역도 크기 때문에 탄성회복은 매우 중요하며 무시 될 수가 없다.<sup>(2)</sup> 낚시바늘(hook)과 같이 철선(steel wire)을 굽혀서 성형하는 공정은 판재의 굽힘 성형과 유사하다.

현재 판재 성형의 탄성회복에 대한 연구 논문은 박판성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용, 금속판재의 스프링백 특성에 관한 실험적 연구 등 많이 발표가 되고 있으나, 철선의 경우는 드물다.<sup>(3~5)</sup>

소성영역까지 굽힘 변형을 준 후 모멘트를 제거하면 탄성회복에 의해서 곡률 반경이 모멘트를 가하고 있는 상태에 비해 커지게 되므로 이 회복 양을 감안하여 제품의 요구 곡률 반경 혹은 굽힘 각을 얻을 수 있게 된다.<sup>(3)</sup>

현재 낚시 바늘을 생산하는 업체에서는 수요자의 카다로그에 있는 낚시바늘의 형상을 기준으로 경험이 많은 작업자가 금형을 제작하고 있다. 이때 수차례의 시행착오를 거치고 있으며 그나마 이러한 기술을 가지고 있는 사람도 많지 않고, 기술 전수도 어렵다.

이와 같이 본 논문에서는 Fig.1 과 같이 카다로그로 형상이 주어져있는 낚시바늘 제작에 필요한 금형을 설계하기 위하여 기존에 수행되었던 경험에 의존한 방법에서 단순 굽힘 가공 이론을 바탕으로 탄성회복의 정도를 결정하여 체계적으로 금형을 제작하고자 하며 이를 자동화 하고자 한다.



Fig. 1 Shape of hook in a catalog

## 2. 해석 이론

굽힘 가공에 있어서 모든 성형공정들은 굽힘 변형과 관계가 있다. 굽힘 변형 후 탄성회복력이 작용할 수도 있고, 잔류응력도 생겨날 수 있다. 굽힘 반경이 너무 작으면 과잉 인장응력이 외부 표면에 작용하여 파괴가 일어날 수도 있다. 때로는 굽힘

변형이 일어난 쪽에 과잉 압축력이 작용하여 재료가 불규칙적으로 튀어나오는 버클링(buckling)도 일어날 수 있다.<sup>(6,7)</sup>

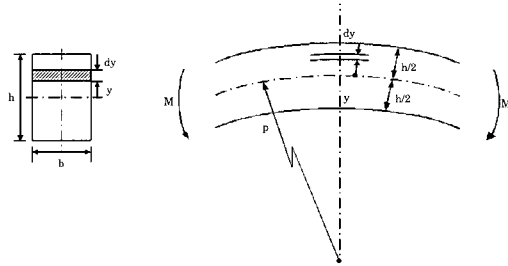


Fig. 2 Behavior of a beam in bending

### 2.1 단순 굽힘 이론

Fig.2과 같이 나비  $b$  높이  $h$ 인 직사각형 균일단면 보의 단순 굽힘을 생각할 때 굽힘의 곡률 반경  $\rho$ 가  $h$ 에 비하여 크면 다음과 같은 가정을 할 수 있다.

- 1) 횡단면의 치수와 형상은 굽힘에 의해 불변.
- 2) 보의 횡단면은 중립면에 대해 직각 유지.
- 3)  $x$ 방향 수직응력  $\sigma_x$  이외의 응력성분은 0.

이들 가정으로부터 다음의 두 평형조건이 구해진다.

$$\int_A \sigma_x dA = 0 \tag{1}$$

$$\int_A \sigma_x y dA = M \tag{2}$$

$x$ 방향의 수직변형률,  $\epsilon_x$

$$\epsilon_x = \frac{y}{\rho} \tag{3}$$

를 얻게된다. 여기서  $A$ 는 단면전체의 면적적분,  $M$ 은 가해진 굽힘 모멘트,  $\rho$ 는 중립면의 곡률 반경이다. 대칭성으로 중립면은 보 높이의 중앙인  $y=0$ 에 있다.

Fig.3는 탄성·소성 재료에 대한 판의 두께 위치별 응력의 분포를 나타낸 것이다.

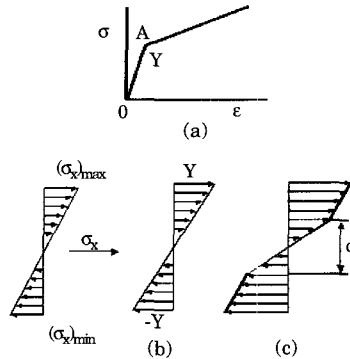


Fig. 3 Stress distribution in elastic-plastic beam

2.2 탄성(elastic) 상태

굽힘 모멘트  $M$ 이  $M_E$ 보다 작은 구간에서는 보의 단면 전체가 탄성범위에 있고 식(2)와 식(3)으로부터 식(4)와 (5)를 얻게 된다.

$$M = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x y dA = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E \epsilon y dA = \frac{EI}{\rho} \quad (4)$$

$$\sigma_x = E \epsilon = E \frac{y}{\rho} = \frac{M}{I} y \quad (5)$$

여기서  $I$ 는 단면 2차 모멘트이다. 이때의 응력분포도는 Fig.3(b)와 같고  $M$ 과  $\frac{1}{\rho}$ 은 비례관계에 있다. 단면의 최대 최소 응력은  $y = \pm \frac{h}{2}$ 에서 발생한다.

2.3. 탄소성(elastic-plastic) 상태

모멘트가 탄성 모멘트  $M_E$ 보다 커지면 소성역이 표면부터 보의 단면 내부로 퍼지고 탄성역은 줄어들는다. 탄성역의 높이를  $c$ 로 표시하면 탄성역의 응력  $|\sigma_x|$ 가  $Y$ 와 같아진다. Fig. 3(c)에서 나타나듯이 탄소성 경계면상  $\pm y = c/2$ 에서 탄성역의 응력  $|\sigma_x|$ 가  $Y$ 에 같아지므로 식(3)으로부터

$$Y = E \epsilon = \frac{E c}{2 \rho} \text{가 되므로 식(6)을 얻게 된다.}$$

$$c = \frac{2Y\rho}{E} \quad (6)$$

2.4 탄성회복에 의한 스프링 백

Fig.4에서와 같이 굽힘 변형을 준 후 가해진 모멘트를 제거하면 탄성회복에 의하여 곡률 반경이 모멘트를 가하고 있는 상태에 비하여 커지게 된다. 즉 굽힘 반경  $\rho$ 로 굽혀도 제하후 탄성회복에 의해 굽힘 반경은  $\rho_R (> \rho)$ 가 된다. 중심각도  $\theta$ 로부터  $\theta_R (< \theta)$ 로 변화한다. 금형 설계 시에 이 탄성 회복되는 양을 감안해 주어야 제품의 요구 곡률 반경 혹은 굽힘 각을 얻을 수 있게 된다.

곡률의 변화는 선형적이며 탄성회복에 의한 곡률

을  $\frac{1}{\rho_E}$ 로 표시해보면

$$\frac{1}{\rho_R} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_E} \quad (9)$$

여기서  $\frac{1}{\rho_E} = \frac{M}{EI}$ 이다.

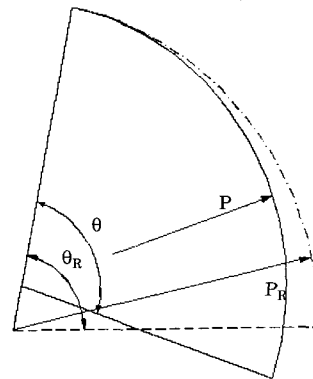


Fig. 4 Schematic diagram of elastic recovery

이를 이용해 스프링백 양  $\Delta\theta$ 을 구하면

$$\Delta\theta = \theta - \theta_R = \theta \left(1 - \frac{\rho}{\rho_R}\right) = \frac{M\rho}{EI} \theta \quad (10)$$

가 된다.

3. 금형 설계

3.1 응력과 변형을 곡선

재료의 물성치를 구하기 위해서 먼저 낚시 바늘

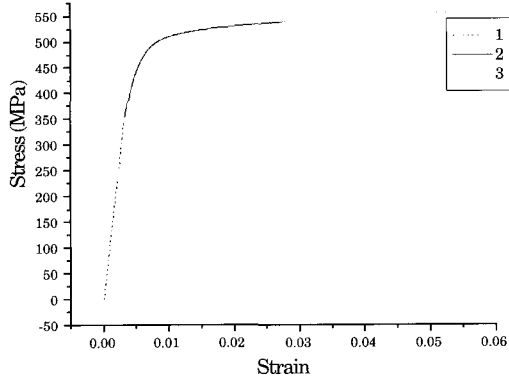


Fig. 5 S-S curve of hook material

의 소재인 직경 2.38mm의 저탄소강 연선을 사용하여 인장시험을 하였다. Fig.5와 같이 탄성구간, 비선형 가공경화구간, 선형가공경화구간의 3구간으로 나누었다.

소성역에서는  $\sigma = f(\epsilon)$ 의 함수가 성립된다.

처음과 마지막 구간은 선형으로, 가운데 구간은 곡선 식으로 피팅하여 3구간으로 나누었다.

- 1) strain < 0.0032 ; 탄성구간  
 $\sigma_1 = E \cdot \epsilon = 212611.53 \cdot \epsilon$
- 2) 0.0032 < strain < 0.0275 ; 비선형구간  
 $\sigma_2 = 160.27 + 407.154(1 - e^{-\frac{\epsilon}{0.00831}})$
- 3) 0.0275 > strain ; 선형 가공경화구간  
 $\sigma_3 = 530.91 + 827.35 \cdot \epsilon$

### 3.2 원형 단면을 갖는 후크의 굽힘

Fig.6과 같이 굽힘 재료의 단면이 원형이므로 원형에 맞는 식을 구하고 3구간에 따른 모멘트를 수치적분으로 구하였다. 원형단면 보의 굽힘을 고려하면, 식(6)에 의해서

$$c_1 = \frac{2 \cdot 285.52 \cdot \rho}{212611.53} \quad : \text{탄성범위}$$

$$c_2 = \frac{2 \cdot Y_2 \cdot \rho}{E_2} + c_1 \quad : \text{비선형 가공경화범위}$$

$$c_3 = d \quad : \text{선형 가공경화 범위}$$

로 나누어진다.

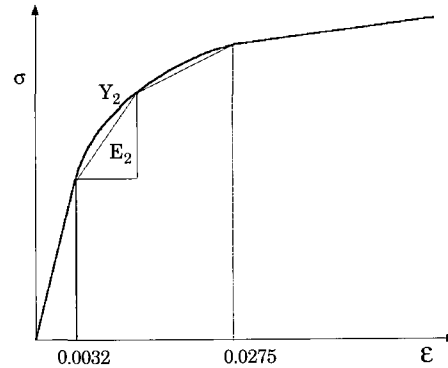


Fig. 6 S-S curve of hook material

비선형 가공경화 범위에서는 곡선을 여러개의 직선으로 나누어  $Y_2$ 와  $E_2$ 를 수치해석적으로 구해서 프로그램에 적용하였다.

원형단면 보이므로, 탄성높이  $c$ 의 값을 단면이 원형인  $\theta$ 로 바꾸어 탄성역의 높이를 결정해야한다.

$$\frac{c}{2} = r \sin \theta, \quad \theta = \sin^{-1}\left(\frac{c}{2 \cdot r}\right)$$

따라서 각 구간에 따른  $c$ 의 값을  $\theta$ 로 바꾼다.

각 구간에 따른 모멘트를 나타내면

$$M = \int_A \sigma_x y dA = \int_A \sigma_x \cdot y \cdot b dy \text{에서}$$

$$M = 4r^3 \int_0^{\theta_1} \left(212611.53 \cdot \frac{r \sin \theta}{\rho}\right) \cdot \sin \theta \cdot$$

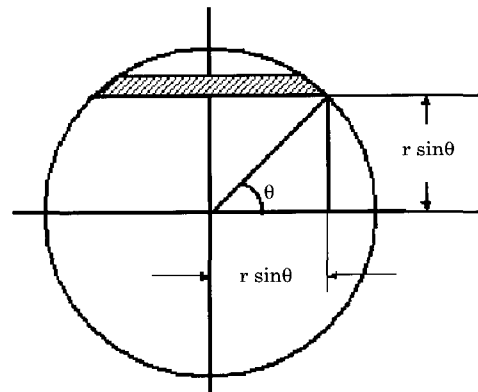


Fig. 6 Circular section beam

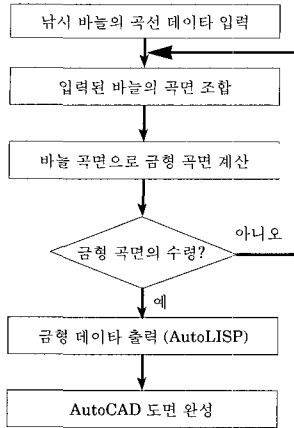


Fig. 7 Flow chart of die design

$$\cos^2\theta \cdot d\theta + 4r^3 \int_0^{\theta_2} (\sigma_2) \cdot \cos^2\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta + 4r^3 \int_0^{\theta_3} \left( 827.35 \cdot \frac{r \sin\theta}{\rho} + 530.91 \right) (\cos^2\theta \cdot \sin\theta) d\theta \quad (11)$$

모멘트가 구해지면 식(9)를 이용하여 탄성 회복된 곡률반경을 구할 수 있다.

### 3.3 설계 프로그램의 흐름도

Fig. 7은 설계 프로그램의 흐름도를 나타낸 것이다. 먼저 제품의 곡선 데이터로부터 스프링백을 고려해 곡률반경이 작은 금형을 가정한다. 이 금형에서 스프링백을 정확히 계산하여 제품의 곡면을 구해서 입력된 곡선 데이터와 비교한다. 계산된 곡면과 입력된 데이터의 차이가 없을 때까지 반복계산을 한다.

## 4. 예 제 해 석

Fig. 8은 Chinu 9호의 바늘 모양을 스캔한 것이다. 금형과 낚시바늘의 곡률반경은 AutoCAD에서 구했고 금형의 곡률반경을 이론적으로 계산하여 Visual Basic<sup>(8,9)</sup> 프로그램을 만들어 탄성회복된 곡률 반경을 얻었다.

Fig.9에서 AutoCAD에서 그린 Chinu 9호 바늘의 형상을 불러와 보여준다. Fig.10에서 바늘 철사

의 직경을 입력하면 Fig.11에서 입력된 바늘의 물성치를 보여준다. AutoCAD 파일을 부르지 않고 여기서 직접 입력도 가능하다. Fig.12, Fig.13에서 곡률반경을 계산, 최종 금형의 형상과 데이터가 출력된다. 이 금형의 형상 데이터는 와이어 컷 방전 가공기의 형상 데이터로 사용되어 즉시 가공이 가능하다.

Fig.14는 Chinu 9호 바늘의 경우 자동으로 설계

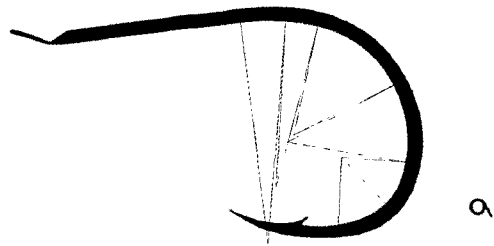


Fig. 8 Shape of hook Chinu 9

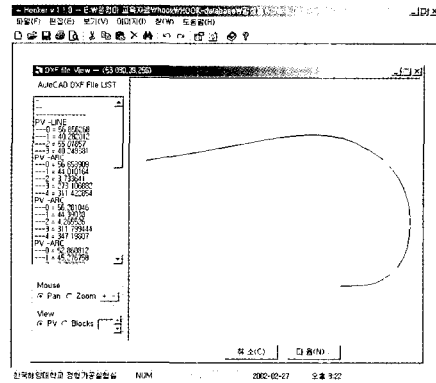


Fig. 9 Hook file of .dxf

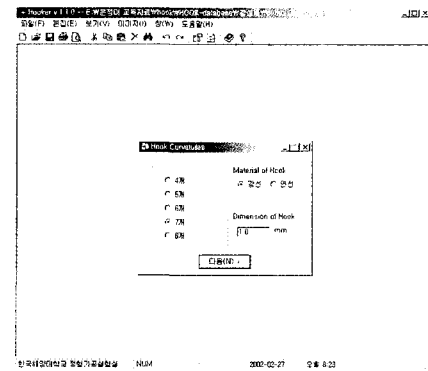


Fig. 10 Window for curvatures and dimension

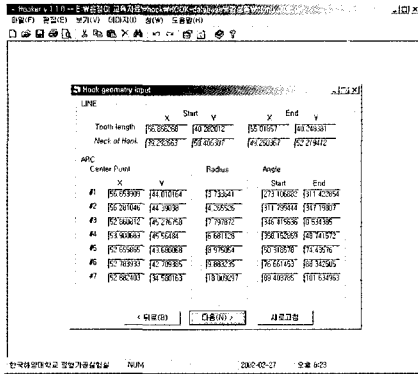


Fig. 11 Hook geometry of AutoCAD

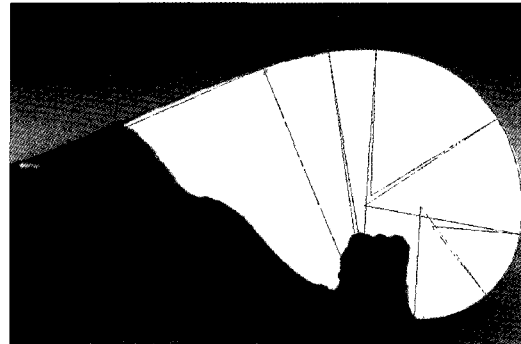


Fig. 14 Predicted die and used die

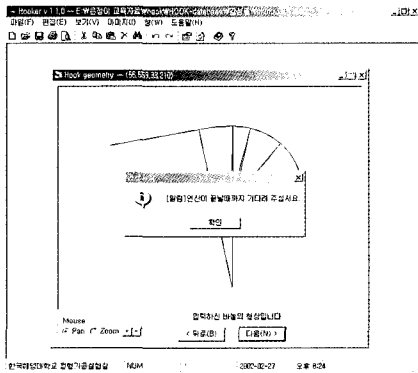


Fig. 12 Die curvatures calculate process

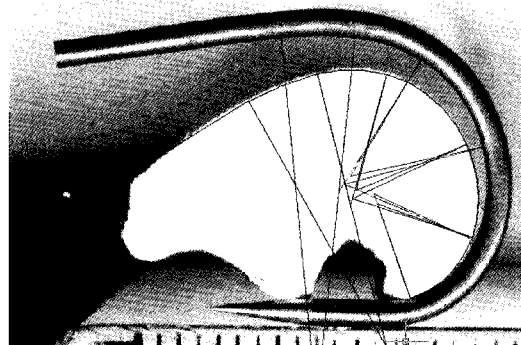


Fig. 15 Predicted die, used die and deformed hook for Chinu 10

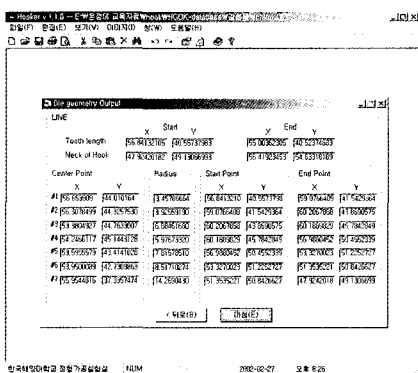


Fig. 13 Die and hook geometry for AutoCAD

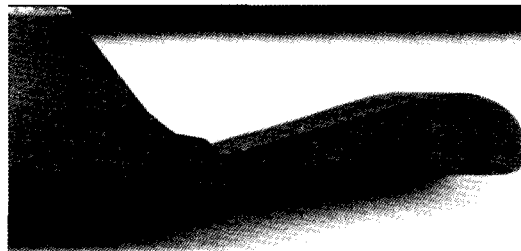


Fig. 16 Example of die after wire cut

된 금형의 형상과 실제 사용하고 있는 금형의 형상을 비교한 것으로 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig.15은 Chinu 10호 바늘의 경우로 실제 사용 중인 금형과 자동으로 설계된 금형, 성형된 바늘의 형상을 나타내고 있다. Chinu 9호와 Chinu 10호

의 예제해석으로 설계 프로그램의 신뢰성을 확인할 수 있다.

Fig.16에서 와이어 컷으로 제작된 금형을 나타내고 있다.

## 5. 결 론

재료의 응력-변형률 곡선을 선형화, 곡선 피팅하여 단순 굽힘 가공 이론을 바탕으로 원형인 단면적

의 탄성회복후의 곡률 반경을 구하였다. 그것을 역으로 적용하여 바늘의 곡률 반경에서 금형의 곡률 반경을 예측하였다.

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 곡률 반경이 클수록 탄성 회복량이 크기 때문에 곡률 반경이 큰바늘일수록 금형의 곡률반경은 더 작아진다.
2. 바늘의 형상을 알고 있을 때 그 바늘의 형상을 만들기 위한 금형 설계를 경험에 의존하지 않고 이론을 바탕으로 전산화하였다.
3. 설계된 금형의 형상은 기존 사용중인 금형의 형상과 잘 일치하고 있으므로 프로그램의 신뢰성을 확인하였다.

본 연구는 2000년도 컨소시엄 사업과 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

### 참 고 문 헌

- (1) Shiro Kobayashi, Soo-Ik Oh, and Taylan Altan, Metal Forming and The Finite-Element Method, Oxford University Press, 1989.
- (2) 전기찬, 박관 금속의 성형, 반도출판사, 1993.
- (3) 양동열, 이상욱, 윤정환, 유동진 박관성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용, 한국과학기술원, 제2회 박관성형심포지엄 논문집, pp.1-8, 1998.
- (4) 조진우, 정완진, 판재성형의 탄성복원해석에 대하여, 한국소성가공학회지, 6권 5호, pp.386-394, 1997.
- (5) 박정완, 금속판재의 스프링백 특성에 관한 실험적 연구, 1998
- (6) 김 동 원, 소성학, 청문각, 1997.
- (7) 임 상 전, 재료역학, 문운당, 1995.
- (8) 주경민, 박성완, 김민호, Visual Basic Programming Bible, 영진출판사, 2000.
- (9) Rod Stephens, Inside Secrets Programming VB Graphics, 삼각형프레스, 1998.

### 저 자 소 개



#### 조은정(曹恩精)

1978년 2월생. 2000년 한국해양대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 한국해양대학교 공과대학 기계공학과 졸업(석사). 현재 (주)PESSCO 근무.



#### 정호승(鄭互勝)

1972년 4월생. 1999년 한국해양대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 한국해양대학교 공과대학기계공학과 졸업(석사). 현재 한국해양대학교 공과대학 기계공학과 박사 과정.



#### 정철우(鄭喆宇)

1978년 2월생. 현재 한국해양대학교 공과대학 기계공학과 재학.



#### 조종래(趙琮來)

1959년 3월생. 1982년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 한국과학기술원 정밀공학과 졸업(박사). 1984~1995 한국중공업(주) 기술연구원 구조강도연구실. 현재 한국해양대학교 부교수.



#### 최일동(崔日東)

1956년 4월생. 1979년 서울대학교 공과대학 금속공학과 졸업. 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). Colorado School of Mines(박사). 1979~1985 현대강관(주) 연구개발실. 현재 한국해양대학교 부교수.