

# AI합금의 사각용기 딥드로잉시 주름의 거동에 관한 연구

고 대 림\* · 정 동 원†

(2007년 11월 6일 접수, 2008년 10월 27일 수정, 2009년 2월 2일 심사완료)

## A Study on the Behavior of Wrinkling in the Square Cup Deep Drawing of Al Alloy

Dae Lim Ko and Dong Won Jung

**Key Words:** Wrinkling(주름), Wrinkling Parameter(주름인자), Drawing Ratio(드로잉비), Dynamic Explicit Finite Element Method(동적 외연적 유한요소법), Square Cup Deep Drawing(사각용기 딥드로잉)

### Abstract

Wrinkling in the flange and wall of a deep-drawn part is one of the major defects in sheet metal processes. Wrinkling is influenced by many factors, such as material properties, shape of the body, forming conditions, stress state and thickness, etc. It is difficult to analyze the wrinkling initiation and growth according to the factors because the effects of the factors are very complex and the wrinkling behavior may show wide variation even though small deviation of factors. In this study, the influence of wrinkling parameters, such as material properties (Al1050, Al5052), the blank holding force and the drawing depth on the wrinkling initiation and growth is investigated by using the experimental method and the dynamic explicit finite element analysis. From the results, it is shown that the dynamic explicit finite element method can be used effectively to prevent the wrinkling problems advancely in the deep drawing process. Also, there is a good agreement between the experimental result and the dynamic explicit finite element analysis.

---

### 기호 설명

### 1. 서 론

- $\sigma_{ij}$  : Cauchy 응력 텐서
- $\psi_i$  : 체적력 벡터(body force vector)
- $N_{ik}$  : 형상함수
- $M_{KL}$  : 질량행렬
- $C_{KL}$  : 감쇄행렬
- $\kappa_d$  : 감쇄상수
- $R_K^{int}$  : 내부힘 벡터
- $R_K^{ext}$  : 외부힘 벡터

판재의 프레스 성형에서 주된 불량현상으로는 주름, 파단, 스프링백 등이 있다. 주름의 발생은 판재가 압축응력을 받아서 판재면에 수직인 방향으로 휘어지는 현상으로 플랜지부위에 나타나는 플랜지주름과 용기의 측벽에 나타나는 보디주름으로 구별한다. 최근에는 자동차 내외 판넬을 비롯한 각종 판재가공부품의 소재두께는 점차 얇아지고, 강도가 증가하는 추세에서 주름 발생은 점차 중요한 결함요인이 되고 있다. 주름은 제품에서 외관상 결함과 조립시 정밀도 저하의 요인이기도 하고 제품 성형시 재료의 유입을 억제하여 성형성을 저하시키고 금형의 수명을 단축시키는 원인이다. 주름은 소재의 재질과 두께, 제품의 형상, 소재의 구속조건 및 공정조건 등의 복합적인

---

† 책임저자, 회원, 제주대학교 기계에너지시스템공학부

E-mail : jdwcheju@cheju.ac.kr

TEL : (064)754-3625 FAX : (064)756-3886

\* 울산대학교 대학원 기계자동차공학부

---

영향을 받아 발생함으로 어떤 변수에 대한 정의가 어렵다. 따라서 한정된 상황에서의 주름발생에 관한 이론적, 실험적 방법과 이를 바탕으로 한 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 연구가 진행되고 있다. 원통용기의 성형시 플랜지에 발생하는 주름을 억제하는 조건에 관해서는 Miyagawa,<sup>(1,2)</sup> Kawai<sup>(3-5)</sup> 등에 의해서 연구되었으며, 사각용기에서의 주름에 관한 연구는 Murata<sup>(6,7)</sup> 등에 의해 연구되었으며 Gotoh<sup>(8)</sup>는 여러 형상에서의 블랭크홀딩력에 관해서 연구하였다. 일반적으로 성형해석을 통해 주름 예측을 하는 경우는 두께분포와 변형형상을 통하여 주름을 판별하는 방법이 많이 이용되며, 이와 같은 방법은 기하학적 형상에 의한 주름의 계산 및 모양까지 예측 할 수 있으나 완벽한 묘사를 위해서는 많은 수의 요소가 필요하여 해석시간이 과다하게 소요된다. 이와 같은 성형해석을 이용한 주름에 대한 연구로서 국내에서는 김종봉<sup>(9)</sup> 등은 탄소성 응축셀 요소를 이용한 FEM 프로그램에 분기좌굴이론을 도입하여 주름발생에 대한 연구를 수행하였고, 손영진<sup>(10)</sup> 등은 이방성 재료에서의 주름발생 조건과 재료의 특성이 주름에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 황보원<sup>(11)</sup> 등은 면적의 영향을 고려한 주름영역과 판재의 좌굴식을 이용한 임계응력 및 예측에 관한 연구를 수행하였다. 국외에서는 Neale<sup>(12)</sup> 등은 요소에서 응력상태를 이용하여 주름발생을 판단할 수 있는 방법을 제안하였고, Gelin<sup>(13)</sup> 등은 성형해석을 상용 FEM 프로그램을 통해 수행하고 얻은 응력데이터를 바탕으로 소성 좌굴이론을 이용한 주름에 관한 연구를 수행하였다. 이와 같은 연구들은 주름의 억제방법에 관한 것으로서 실제 성형공정에서 발생한 미소주름(200 $\mu$ m이하)는 성형의 진행에 의해 소거되거나 감소되기도 한다. 따라서 성형초기에 미소 주름 발생을 인정하고 성형이 진행되는 동안 주름이 소거된다면 성형에 사용된 블랭크홀딩력의 영역이 넓어지고 편치력의 감소로 한계드로잉비가 증가하게 되어서 용기의 성형에 유리하게 된다.

따라서 본 연구에서는 두 종류의 알루미늄합금 판재(A11050, A15052)를 이용하여 사각용기 성형시 발생한 초기 주름의 진행 경향을 파악하기 위해 블랭크홀딩력의 변화와 성형 깊이에 따른 주름의 높이에 대한 실험과 비선형 동적 외연적 유한요소법을 이용하여 해석한 결과를 비교하여 타

당성을 검토하고자 한다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 동적하중(Dynamic Force)의 평형방정식

외력에 의해 행해진 일은 내력과 관성력 및 점성력에 의한 일과 같아야 한다는 일평형(work balance)으로부터 아래의 식 (1)과 같이 가상일의 원리(virtual work principle)로 표현된다.<sup>(14,15)</sup>

$$\int_b \psi_i \delta x_i dv + \int_x \phi \delta x_i ds + f_i \delta_i = \int_b (\sigma_{ij} \delta x_{i,j} + \rho \ddot{x}_i \delta x_i) dv \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{ij}$ 는 Cauchy stress tensor,  $\psi_i$ 는 체적력 벡터(body force vector),  $\rho$ 는 밀도,  $\dot{x}_i$ 과  $\ddot{x}_i$ 는  $x_i$ 에서 각각 평균속도와 가속도 벡터이다.

이산되어진 체적  $\bar{b}$ 에서  $b$ 의 물리적 양들을 나타내기 위해서 등변수 가정하에서 형상함수  $N_{ik}$ 를 도입하면 아래와 같이 표현된다.

$$x_i = N_{ik} \bar{x}_k, \quad \dot{x}_i = N_{ik} \dot{\bar{x}}_k, \quad \ddot{x}_i = N_{ik} \ddot{\bar{x}}_k \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하고, 감쇄(damping)가 부가적으로 고려된다면 아래의 동적 힘평형 방정식이 얻어진다.

$$M_{KL} \ddot{\bar{x}}_L + C_{KL} \dot{\bar{x}}_L + R_K^{int} = R_K^{ext} \quad (3)$$

여기서  $M_{KL}$ 과  $C_{KL}$ 는 질량행렬과 감쇄행렬을 각각 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$M_{KL} = \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\bar{b}^e} \rho N_{ik} N_{iL} dv \quad (4)$$

$$C_{KL} = \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\bar{b}^e} \kappa_d N_{ik} N_{iL} dv \quad (5)$$

여기서  $\kappa_d$ 는 감쇄상수이다.  $R_K^{int}$ 와  $R_K^{ext}$ 는 내부 힘 벡터와 외부 힘 벡터로서 아래와 같다.

$$R_K^{int} = \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\bar{b}^e} N_{ik} \sigma_{ij} dv, \quad (6)$$

$$R_K^{ext} = \sum_{e=1}^{n_e} \left( \int_{\bar{b}^e} N_{ik} \psi_i dv + \int_{s^e} N_{ik} \phi_i ds \right) + f_K \quad (7)$$

**Table 1** Mechanical properties

	sheet	
	Al 1050	Al 5052
$\rho$ : density(kg/mm <sup>3</sup> )	2.71e-06	2.68e-06
E: Young's mod.(GPa)	70.303	74.035
e: elongation(%)	13	17
$\nu$ : Poison's ratio	0.33	0.32
K: strength coeff.(GPa)	0.160	0.362
n: hardening exp.	0.094	0.130
R: Lankford coeff.	0.578	0.765
thickness(mm)	1.2	1.2

2.2 구성방정식

본 논문에서는 동적 외연적 유한요소법을 사용하는 상용프로그램인 PAM-Stamp를 이용하여 성형해석을 수행하였으며, 전체 구성방정식은 아래 식과 같이 Hollomon law을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = K \cdot \bar{\epsilon}^n \tag{8}$$

여기서  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률, K는 강도계수, n은 가공 경화지수 이며 아래 Table 1은 Al합금의 기계적 물성치이다.

일반적인 판재의 성형해석에는 Hill의 항복이론식을 적용하지만 이는 알루미늄합금의 성형해석에는 오차가 발생한다고 알려져 있으므로 본 연구에서는 Barlat의 항복식을 사용하였다.

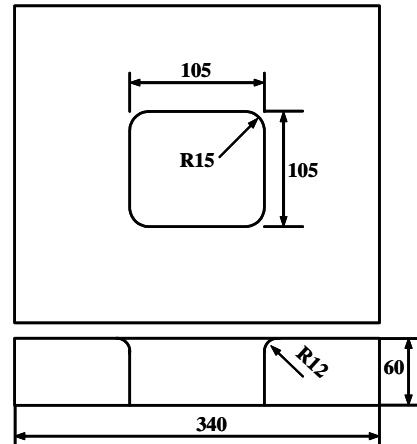
유한요소모델링에서 펀치와 다이 및 블랭크홀더는 성형중 변형이 없다고 가정하여 강체로 구성하였고 블랭크는 쉘요소(shell element)로 하였다. 블랭크 요소의 크기는 성형해석시간을 고려하여 0.5mm로 하였으며 적응세분화요소(adaptive mesh)를 적용하여 요소와 요소사이의 각도가 5도를 초과하면 최대 4회까지 분할되도록 하였다.

3. 실험장치 및 방법

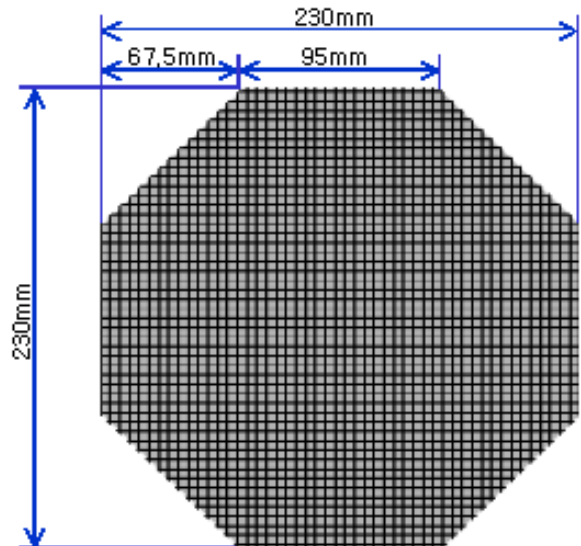
3.1 실험장치 및 조건

본 연구에 사용한 실험장치는 프레스(side frame type, PHD-250, 복동, 250ton, 120ton, 동성개발(주))에 펀치, 다이, 블랭크홀더, 로드셀 등을 설치하여 구성하였다.

실험에 사용된 판재의 재질은 알루미늄합금 Al1050과 Al5052이고 두께는 1.2mm이다. Fig. 1은 실험에 사용한 금형의 형상과 치수를 나타낸 것으로 한 변의 길이가 105mm인 정사각 단면이고,



**Fig. 1** Shape of die



**Fig. 2** Shape of corner cut blank

다이의 모서리 반경은 15mm이며 형상계수(shape factor, SF=모서리반경/한 변의 길이)는 0.14이다. 펀치와 다이 사이의 틈새는 판재 두께에 20%를 주었으며 펀치와 다이의 어깨반경은 각각 10mm와 12mm이다. 시험편에는 성형이 용이하게 되도록 유체 윤활제를 사용하였다.

3.2 실험방법

시험편의 형상은 정사각형 판재의 모서리를 코너컷한 팔각형이고, 성형된 용기의 표면적과 팔각형 소재의 표면적이 거의 같도록 정사각형 블랭크의 모서리를 코너컷하였다. 모서리부분을 코너컷한 이유는 사각컵의 성형성을 향상하기 위해 예비 실험을 통하여 최대 성형깊이가 40mm 이상 성형이 가능하도록 코너컷을 실시하였다. Fig. 2

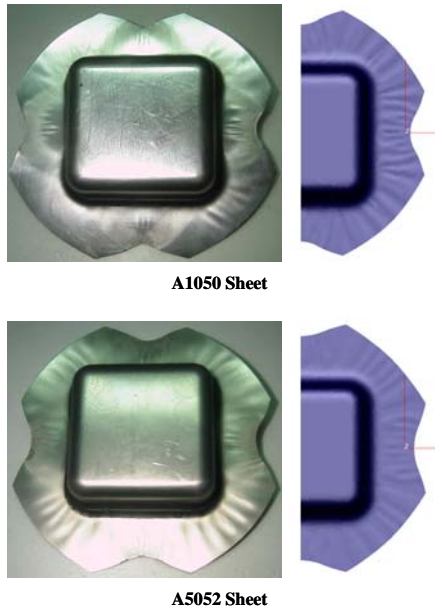


Fig. 3 Wrinkles of flange in FE simulation and experimental results (depth 40mm)

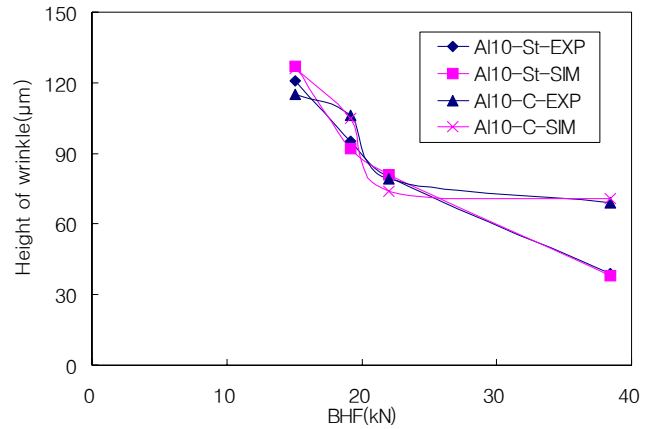
는 예비 실험을 통해 사각블랭크에서 코너컷한 블랭크의 크기를 나타낸 것이다. 용기의 성형 초기에 발생한 플랜지부의 주름을 직변부와 곡면부로 나누어서 전자 마이크로메타로 측정 한 후, 계속 성형하여 초기에 주름이 발생했던 플랜지부분이 용기 벽의 일부분이 되도록 하였다.

블랭크홀딩력은 Gotoh의 식에서의 산출한 값을 근거로 15.1, 19.2, 22.0, 38.4kN을 성형깊이는 35, 40mm에 대해서 각각 실험을 수행하였다.

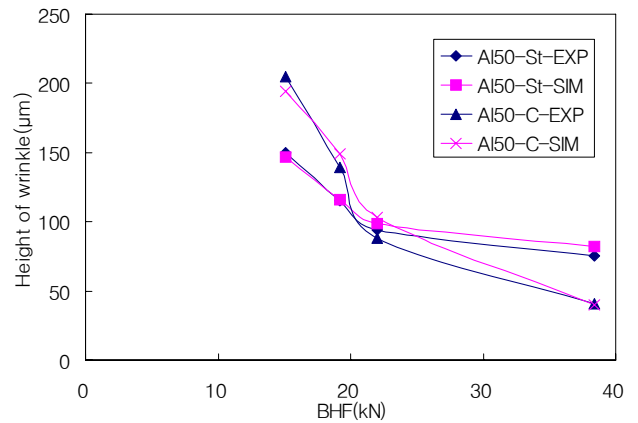
#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 실험과 시뮬레이션을 통해 얻은 최종 형상을 나타낸 것으로 주름발생의 위치 및 모양, 그리고 경향이 유사하게 나옴을 알 수 있었다. 이는 성형해석에서 사용된 두께분포와 변형형상을 통한 주름예측 방법이 알루미늄 합금판재에서도 유용하다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 성형해석을 이용한 주름의 예측은 주름의 발생초기의 경향은 유사하게 나온다고 알려져 있다.

Fig. 4는 A11050판재와 A15052판재의 최종 성형 단계인 성형깊이 40mm에서의 주름높이를 나타낸 것이다. 위의 실험결과 블랭크홀딩력이 크면 주름의 높이가 감소하였으며, 성형용기에서 주름의 높이는 직변부 보다 코너부에서 높게 나타났다.



(a) A11050

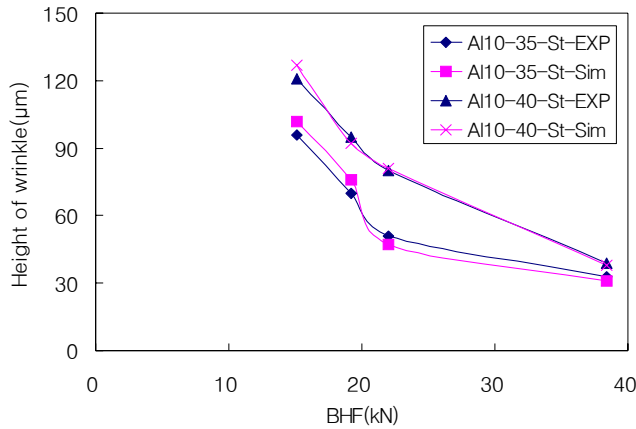


(b) A15052

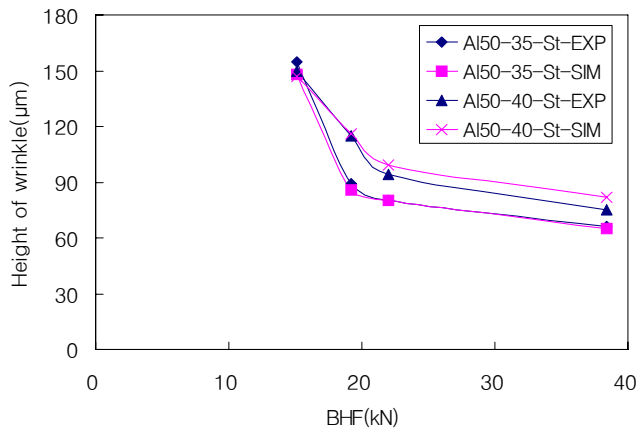
Fig. 4 Comparison of wrinkles-height between FE simulation and experimental results(depth 40mm)

또한 두 종류의 판재에 대한 성형해석결과도 실험과 유사하게 나타났으나, A11050 판재의 성형에서 블랭크홀딩력이 15.1kN에서 나타나는 실험과 성형해석의 오차는 실험에서 낮은 블랭크홀딩력으로 성형을 하면, 성형 후 플랜지부에서의 프로파일이 큰 파도 모양의 휨 현상이 나타나는데 여기서 나타나는 측정 오차라고 판단된다.

또한 실험과 성형해석 결과, 최대오차는 성형해석이 실험보다 약 15% 정도 낮게 나왔으며 최대 오차를 보인 부분은 두 판재 모두 주름의 높이가 급격하게 변하는 구간(BHF : 19~22kN)에서 나타남을 알 수 있었다. 이는 주름의 높이가 급격하게 변하는 구간에서 판재의 요소 크기와 관련이 있는 것으로 판단된다.



(a) Al1050

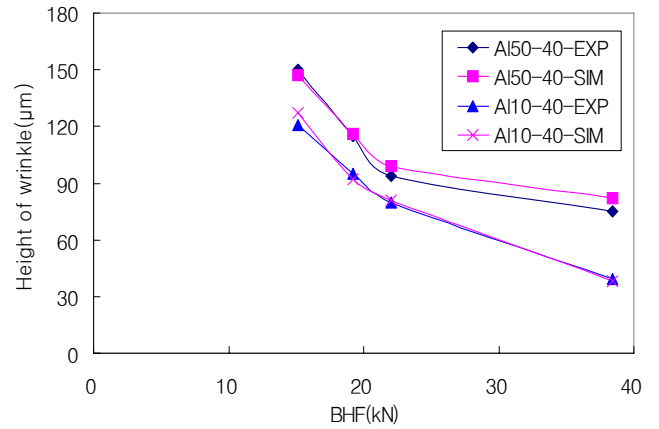


(b) Al5052

**Fig. 5** Comparison of wrinkles-height with respect to the drawing depth(35mm, 40mm)

Fig. 5는 성형깊이가 35mm와 40mm일때 직변부에서의 주름높이를 나타낸 그림이다. Al 1050과 Al 5052 두 종류의 판재에서 성형깊이가 깊어짐에 따라 주름의 개수는 동일하나, 주름의 높이는 모두 증가하는 현상이 나타났으며 이는 성형깊이가 깊어지면 판재의 유입으로 인해 플랜지부에 압축응력이 크게 작용하기 때문이라고 판단된다.

Fig. 6은 성형깊이가 40mm인 사각용기의 직변부에서 Al 1050판재와 Al 5052판재의 주름높이를 비교한 것으로 동일한 조건인 경우 Al 5052가 Al 1050보다 주름의 높이가 높게 나타남을 알 수 있었으며, 또한 블랭크홀딩력이 증가하면 두 판재 모두 주름의 높이가 감소함을 알 수 있다. 그러나 주름의 감소 경향을 살펴보면 Al 1050판재는 비교적 선형적으로 감소하는 추세를 보이지만, Al 5052판재에서는 블랭크홀딩력의 증가비 보다



**Fig. 6** Comparison of wrinkles-height between Al1050 and Al5052

주름의 높이 감소비가 적게 나타난다. 이는 Al 5052판재의 강도가 Al1050판재 보다 강하고 가공경화지수 n이 크기 때문에 동일한 블랭크 홀딩력에서 주름 발생이 크게 나타나고 또한 발생한 주름을 제거하기 위해 큰 힘이 작용함을 알 수 있다. 따라서 재료의 강도와 가공경화지수가 크면 주름을 억제하는데 소모되는 블랭크홀딩력도 높아야 하며, 또한 성형시 주름의 소거도 쉽게 되지 않는다는 것을 알 수 있었다.

사각용기의 성형시 주름의 높이 측면에서 위의 결과들을 종합해 보면 Al합금 판재에서는 주름의 높이를 크게 감소시키는 임계의 블랭크홀딩력이 존재함을 알 수 있었다.

### 5. 결 론

본 논문은 Al합금의 사각컵 성형시 발생하는 주름의 높이 및 경향을 알아보기 위해 실험을 실시하고 이를 바탕으로 성형해석을 수행한 결과와 비교하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일 조건에서는 Al5052판재가 Al1050판재보다 주름의 높이가 높게 나타났다.
- (2) 성형된 사각용기에서 주름의 개수 및 주름 높이는 직변부보다 코너부에서 높게 나타났다.
- (3) Al합금의 용기 성형시 주름의 높이를 크게 감소시키는 임계의 블랭크홀딩력이 존재함을 알 수 있었다.
- (4) 주름의 발생 경향과 높이는 실험과 성형해석이 유사하게 나옴을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Matsuo Miyagawa, 1957, "Mechanism of Wrinkling in Deep Drawing of Sheet Metals, 1st Report," *J. of JSME*, Vol. 23, No. 130, pp. 390~398.
- (2) Matsuo Miyagawa, 1957, "Mechanism of Wrinkling in Deep Drawing of Sheet Metals, 2nd Report," *J. of JSME*, Vol. 23, No. 130, pp. 399~407.
- (3) Nozomu Kawai, 1960, "Critical Conditions of Wrinkling in Deep Drawing of Sheet Metals, 1st Report," *J. of JSME*, Vol. 26, No. 166, pp. 850~857.
- (4) Nozomu Kawai, 1960, "Critical Conditions of Wrinkling in Deep Drawing of Sheet Metals, 2nd Report," *J. of JSME*, Vol. 26, No. 166, pp. 857~863.
- (5) Nozomu Kawai, 1960, "Critical Conditions of Wrinkling in Deep Drawing of Sheet Metals, 3rd Report," *J. of JSME*, Vol. 26, No. 166, pp. 864~873.
- (6) Ahmetoglu M. et al., 1995, "Control of Blank Holder Force to Eliminate Wrinkling and Fracture in Deep Drawing Rectangular Parts," *CIRP 44*, pp. 347~350.
- (7) Murata A., Ebine Y. and Matsui M., 1992, "Effect of Blank Holding Force Control on Deep Drawability of Square Shell," *J. of JSTP*, Vol. 33, No. 375, pp. 411~416.
- (8) Gotoh M. and Lim, C. R., 1992, "Conditions for Flange Wrinkling Prevention in the Drawing Process of Circular and Square Shells from Irregularly Shaped Blanks," *J. of JSME(c)*, Vol. 58, No. 556, pp. 299~306.
- (9) Kim J. B. and Yang D. Y., 1998, "Finite Element Analysis of the Wrinkling Initiation and Growth in Modified Yosida Buckling Test," *Metals and Materials*, Vol. 4, No. 4, pp. 640~647.
- (10) Son Y. J., Park K. Y. and Kim Y. S., 1998, "Analysis of Wrinkling Formation of Anisotropic Sheet Metal," *Proceedings of Spring Conference on the Korean Society for Technology of Plasticity*, pp. 21~27.
- (11) Hwang B. W. and Keum Y. T., 2001, "Study on the Wrinkling Prediction in Sheet Metal Stamping Processes," *Transactions of The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 9, No. 3, pp. 131~142.
- (12) K.W. Neale and P. Tugcu, 1990, "A Numerical Analysis of Wrinkle Formation Tendencies in Sheet Metals," *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol.30, pp. 1595~1608.
- (13) J. C. Genlin, P. Paquier and N. Boudeau, 1998, "Prediction of Necking and Wrinkling in Sheet Metal Forming from the Analysis of Local Equilibrium Conditions," *Simulation of Materials Processing*, pp. 875~880.
- (14) Jung D. W., 1995, "Rigid-plastic Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes Using Explicit Time Integration Scheme," Ph.D. KAIST, KOREA.
- (15) Jung D. W., Yoo D. J. and Yang D. Y., 1995, "A Dynamic Explicit/Rigid-Plastic Finite Element Formulation and Its Application to Sheet Metal Forming Processes," *Engineering Computations*, Vol.12, pp. 707~722.

