

# Steel D&I Can 의 Doming 및 Necking 공정의 FEM 해석

정성욱\* · 남재복\*\* · 유치상\* · 진영술\*\* · 한경섭\*

## FE Analysis on Doming & Necking Process of Steel D&I Can

S.W. Jung, J.B. Nam, C.S. You, Y.S. Jin and K.S. Han

**Key Words :** D&I Can, Doming, Necking, Stability test, Dome reversal pressure

### Abstract

The object of this study is to develop a reliable FEM simulation technique for the analysis of can making process using PAM-STAMP software. The processes consist of doming and necking in addition to drawing, redrawing. After body making process, this study analyzed the stability for internal pressure by simulating buckling test. Through these technique, we estimated the dome reversal pressure of steel D&I Can for various can profile and process conditions. From this study, we found the cause and mechanism of wrinkling during necking process. This mechanism is largely affected by can wall thickness and the clearance between knock out punch and necking die. The dome reversal pressure improves with increasing dome depth. These results validate the usefulness of the developed simulation technique for the analysis of body making process and optimization of the dome profile.

### 1. 서론

현재 음료 캔 시장에는 알루미늄 캔과 스틸 캔 사이의 경쟁이 심화되고 있다. 스틸은 알루미늄에 비해 강성 및 강도가 크며, 탄소와 같은 불순물을 첨가함으로써 기계적 특성을 조정하기 쉬우며 가격이 저렴하다. 스틸의 이러한 장점을 살려 알루미늄 캔을 대체하기 위한 소재개발이 대한 연구가 제철회사등에서 활발히 진행 중에 있다[1].

이러한 연구의 주요 목표는 소재의 두께를 얇게 하여 캔의 단가를 낮추는 일이다. 소재의 두께를 얇게 하는 일련의 연구를 캔의 경량화라고도 한다. 소재의 두께를 얇게 하기 위해서는 소재의 강도의 증가와 더불어 가공성이 확보되어야 한다. 소재에서 강도의 증가는 통상적으로 가공성을 저

하시키므로 소재의 개발과 더불어 가공성의 검증은 필수적이다[2].

가공성 검증은 실험을 통하는 것이 가장 신뢰성이 높으나 비용과 시간이 많이 요구되므로, FEM 해석과 같은 이론적 해석을 병행하는 것이 바람직하다[3,4].

본 연구는 개발된 소재에 대한 가공성과 안정성 평가를 위한 신뢰성 있는 FEM 해석기술을 확보하는 것을 목표로 한다. 상용 FEM 패키지(Pam-Stamp)를 사용하여 캔 가공의 제조공정의 각 단계를 해석하는 방법을 개발하여 소재에 따른 가공성을 이론적으로 파악할 수 있게 하였다. 해석에는 드로잉/리드로잉, 도밍(Doming)공정 시뮬레이션 결과로 제조된 캔에 대해서 내압강도 해석을 수행하고 각종 성형인자와 금형형상이 내압강도에 미치는 영향을 파악하였다

\* 포항공과대학교 기계공학과

\*\* 포항제철 기술연구소 박판연구그룹

## 2. 유한요소법의 적용

Table 1은 본 해석에 사용된 PAM-STAMP의 구성, 해석방법 및 소재와 금형에 대한 모델링의 기본특성을 나타낸다[5].

수치해석에서는 소재인 스틸박판과 금형(tool: drawing die, drawing punch, sheet holder, necking punch, necking die)에 대한 모델링을 위하여 다음의 재료를 사용하였다. Sheet에 대해서는 소재의 이방성을 도입하기 위하여 이방성 탄소성(anisotropic elastic-plastic)모델을, 금형은 강체(rigid body) 모델을 사용하였다. 해석에 이용된 요소는 4 변형 shell 요소로 소재의 두께 방향으로 5 개의 적분점을 취하였다. 또한 펀치나 다이 곡률부와 같이 성형공정 진행 중에 변형이 집중적으로 발생하는 부위에서 자동적으로 mesh를 생성해주는 remeshing 기능을 사용하였다.

소재의 인장시험결과 나타나는 가공경화특성은 Krupkowsky law를 사용하여 나타내었으며 식은 다음과 같이 표현된다[6].

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 강도계수,  $\epsilon_0$ 는 prestrain,  $n$ 은 가공경화지수이다. 본 해석에는 현재 출하되고 있는 고강도 D&I 캔용 소재(T-4, CA)의 응력-연신률 변형선도로부터 식(1)에 의하여 Table 2 과 같은 재질 특성치를 사용하였다.

Table 1. Characteristics of PAM-STAMP

Element Type	3D Shell
Analysis	Dynamic
Solution Scheme	Explicit Code
Material Model	Elasto-Plastic
Friction	Coulomb model

Table 2. Material Properties

Material	Y.S. (Mpa)	T.S. (Mpa)	$K$	$\epsilon_0$ (%)	$N$
As received	29.4	39.2	0.645	0.286	0.138
Ironed wall	72.9	79.6	0.670	4.206	0.010

## 3. 제조공정해석

캔은 다음 Fig.1에서 도시된 바와 같이 드로잉, 리드로잉, 아이어닝, 트리밍, 네킹공정으로 이루어진다. FEM 해석에서는 아이어닝공정을 생략하고 드로잉/리드로잉에 이어 도밍공정이 수행되

었으며 이 결과로부터 소재의 두께와 바닥부분의 형상에 따른 캔의 내압강도해석이 수행되었다.

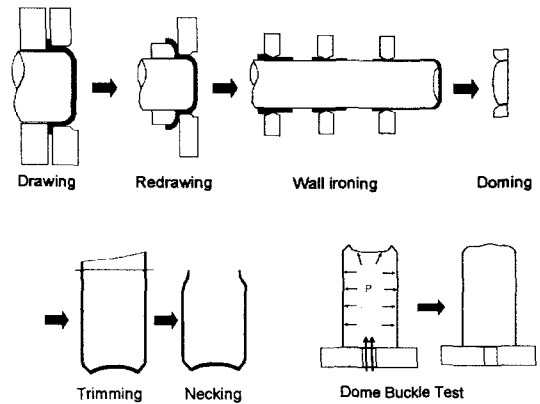


Fig.1. Bodymaking Process

아이어닝 공정은 캔의 벽면부를 가공하는 것으로 바닥부분의 두께에는 영향을 거의 미치지 않는다. 따라서 내압강도에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

본 해석에서 사용된 해석모델은 대칭성을 고려하여 1/4 모델로 수행하였으며 경계조건, 펀치의 하강 속도, 블랭크 홀더력(BHF) 및 마찰조건 등은 실제 생산라인에서 적용되는 값을 대입하여 모사하였다. 각 공정에서 펀치의 하강속도는 10m/ms, 블랭크 홀더력은 10kN을 대입하였으며 캔과 펀치 사이의 마찰계수는 0.25, 캔과 다이의 마찰계수는 0.15를 대입하였다.

드로잉/리드로잉 공정에 있어서 FEM 해석은 실험값과 비교를 통해 타당성을 확보하였다. Fig.2는 드로잉 공정후의 캔의 높이로 실험과 대체로 일치함을 알 수 있다. 리드로잉 컵에 대해서도 해석결과로 나오는 캔의 높이는 실험값과 3% 이내로 일치한다.

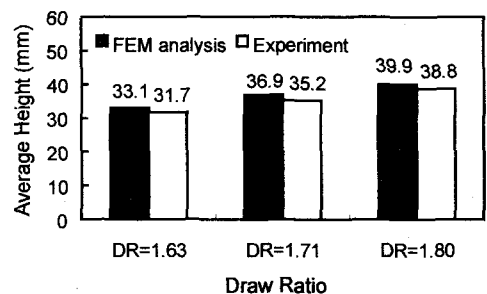


Fig. 2. Relation between draw ratio and can height

#### 4. 안정성 평가

제조된 캔에 대해서는 축방향 압축강도와 내압강도가 요구된다. 본 연구에서는 내압강도실험을 이론적으로 모델링하였다. 내압강도 실험은 Fig.1에 보여지는 바와 같이 캔의 윗 부분을 고정시키고 air pressure 를 점차로 가해서 버클링이 발생하는 압력을 찾는 것이다. 이러한 내압강도는 캔 바닥부분의 압력-변위 곡선으로부터 결정하며 Fig.3 은 버클링 발생을 단계적으로 보여준다. 이러한 버클링은 캔 바닥의 형상에 영향을 받는다.

##### 4.1. 소재 두께의 영향

Fig.4 는 소재의 두께가 내압강도에 미치는 영향을 보여주는 것이다. 이러한 두께에 따른 압력 해석은 기존 연구자들이 알루미늄 캔에 대해서 적용해온 다음의 실험식을 적용할 수 있다[7].

$$P = K_1 \cdot T_0^2 \cdot \sigma_p \quad (2)$$

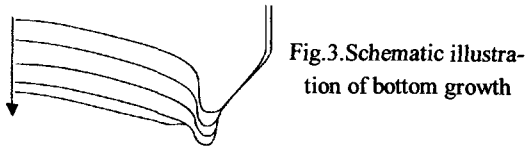


Fig.3. Schematic illustration of bottom growth

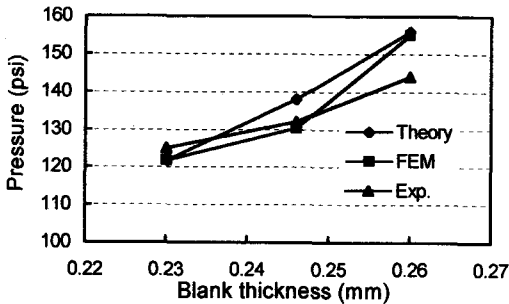


Fig.4. Dome reversal pressure vs. blank thickness

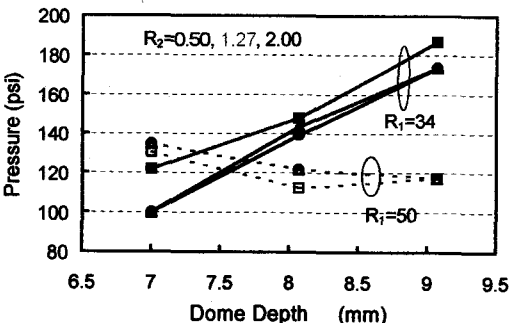


Fig.5. Dome reversal pressure vs. can profile

여기서  $P$  내압강도,  $K_1$ 는 상수,  $T_0$  두께,  $\sigma_p$  인장강도를 의미한다. Fig.4에서 Theory는 식(2)로부터, FEM은 본 연구에서 수행된 해석결과로부터, Exp.는 실험결과를 나타낸다. 이상의 해석결과들은 서로 잘 일치하고 있으므로 본 단계의 FEM 해석을 위해 수행된 각각의 단계 공정들 즉 드로잉, 리드로잉, 도밍, 버클링 FEM 해석들이 타당하게 수행되었음을 증명한다.

##### 4.2 캔 바닥부분 형상의 영향

해석에 수행된 캔의 바닥부분 형상은 Fig.6에 나타나 있으며 Fig.5는 이들 각각의 형상인자  $R_1$ ,  $R_2$ , 깊이  $H_1$ 가 내압특성에 미치는 영향을 보여준다. 돔의 반경  $R_1=34\text{mm}$ 에서는  $H_1$ 이 증가할수록 내압강도가 증가하나  $R_1=50\text{mm}$ 일 경우  $H_1$ 의 증가는 오히려 내압강도를 떨어뜨린다. 이러한 현상은 내압강도는 돔의 형상뿐 아니라 바닥부분의 두께와도 관련이 있음을 의미한다. 즉  $R_1=50\text{mm}$ 에서와 같이 돔의 반경이 클 경우 캔의 바닥의 안쪽 부분은 변형을 많이 받아 두께가 얇아지며 이론 인해 내압강도가 감소하게 된다.

그러나 돔 반경  $R_1=34\text{mm}$ 로 작은 경우에는 도밍 가공시 도밍 펀치와 캔사이에서 캔의 변형의 흐름이 원활하게 되어 바닥부분의 두께가 상대적으로 더 두껍기 때문이다. 어깨 반경에 대해서는 현재 사용중인  $R_2=1.27\text{mm}$ 에서 최대의 내압강도를 보여주고 있으므로 현재 사용되고 있는 캔은 많은 부분에 있어서 최적화 되어 있음을 확인할 수 있다.

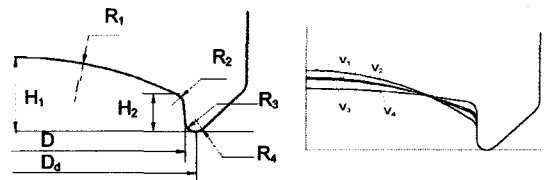


Fig.6. Base profile Can: (a)dimension, (b)several shapes

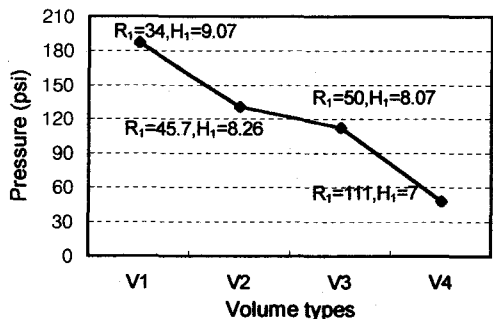


Fig.7. Dome reversal pressure vs. several base profile

### 4.3 부피일정한 캔의 형상 최적화

캔의 부피를 일정하게 하고 바닥부분의 형상을 내압강도에 대해 최적화시키는 것은 실제 적용에 있어서 매우 유리하다. 즉 기존의 공정 Tool 들을 그대로 사용하면서 도밍공정시 Doming Punch 만 교체하여 주면되기 때문이다. 본 연구에서는 돔의 곡률  $R_1$  을 변화시키면서 높이  $H_1$  과  $H_2$  를 조정하여 이에 대한 영향을 살펴보았다.  $H_1$  과  $H_2$  는 곡률  $R_1$  다에 의해 결정되는 값이며 이에 따른 4 종류의 캔의 바닥부분 형상은 Fig.6(b)에, 각각에 대한 해석 결과는 Fig.7에 표시되어 있다.

Fig.7 에서 캔의 돔의 곡률반경이 작아질수록 내압강도는 증가함을 보여주고 있다. 이와 같은 원인은 캔의 바닥부분에서 돔의 반경이 줄어들면 바닥부분이 반구형에 가까워지며, 구조적으로 이러한 구형 구조물에서 내압에 의한 응력집중이 현상이 가장 적기 때문이다. 그러나 도밍공정을 포함한 캔 성형시 바닥부분에서 두께변화를 수반하므로 구조적인 응력집중현상만으로는 내압특성을 일반화시킬 수는 없다. 따라서 각각의 경우의 캔 형상에 대해 본 연구와 같은 FEM 해석을 통해서 모든 실험을 해서 내압특성을 경우별로 해석하여야 한다.

## 5. 네킹공정 해석

### 5.1 FEM 해석방법

네킹공정은 캔을 고속으로 회전시키면서 Fig.8 과 같이 금형사이로 밀어넣어 가공한다. 이 공정은 금형의 곡률을 바꾸어서 단계에 걸쳐서 수행된다. Fig.9는 1차 네킹가공 금형과 2차 네킹가공의 금형의 형상을 보여주며 Fig.10 은 가공되는 부분에서 캔의 두께분포를 보여준다.

가공중의 캔의 운동은 회전운동과 이송운동으로 분류된다. 회전운동은 원심력으로 인해 Necking 공정시 캔의 벽면으로 가공력이 골고루 작용하게 하고, 벽면의 마찰력을 고르게 하여 응력집중을 방지함으로써 캔 벽에서 축방향으로 Buckling 이 발생하는 것을 방지한다.

그러나 FEM 해석에 이러한 회전운동을 모델링하기는 힘들므로 해석에서는 이송운동만으로 모델링하였다. 네킹공정 해석은 통상 이러한 이송운동만으로 해석이 수행되고 있다. FEM 을 사용한 이론적 해석은 이동 운동만으로도 캔 벽에 대해서 회전운동을 하는 실제와 마찬가지로 가공력을 골고루 분산시켜주며 벽면의 마찰저항을 일정하게 할 수 있다. 이 때 마찰저항을 결정하는 벽면과 Tool 사이의 마찰상수에 대해서는 실험적 측정이 어려우므로 0.01로 가정하였다.

FEM 해석모델은 Fig.8 에서 보여지는 바와 같이 Can, Necking Die, Knock Out Punch 의 세 부분으로 구성되어 있다. 대칭성을 고려하여 캔의 Wall 일부분에 대한 1/4 모델을 정의하였으며 직사각형 Shell Element 를 사용하였다.

경계조건은 캔의 바닥부분 Node 에 대해 Clamp 조건을 주었으며, Die 와 Punch 는 수직 방향으로만 자유도가 있고, 2mm/ms 의 동일한 속도로 하강하는 것으로 하였다.

캔의 벽 부분은 Fig.10 에서 보이는 바와 같이 상단 부분이 가운데 부분보다 2 배정도 두껍게 성형되어 있으며 아이어닝 공정과 열처리 등을 통해서 초기와는 매우 다른 성질을 가진다. 따라서 재료의 값들은 캔 벽에 대해서 시편을 채취하여 인장실험을 통해 얻은 Table2 의 값들로 해석을 수행하였다. 또한 캔 벽의 두께에 대해서는 두께가 가장 두꺼운 부분인  $t=0.137\text{mm}$  값을 대입하여 해석하였다.

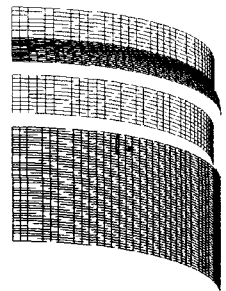
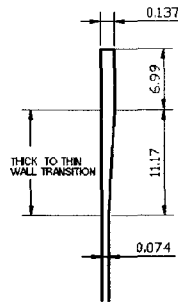
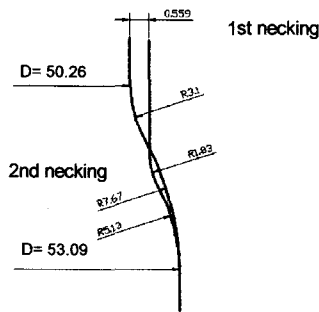
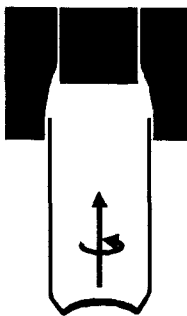


Fig.8. Necking Process Fig.9. Profile of necking Die

Fig.10. Wall thickness of edge

Fig.11. FEM model

## 5.2 주름발생 기구

네킹공정에서 일어나는 주요 불량원인은 캔 벽에서의 주름의 발생이다. FEM 해석에 있어서 이러한 주름발생여부는 시각적으로 확인할 수 있다. Fig.12 는 캔에서 주름이 생기는 단계를 순차적으로 보여주고 있다.

초기상태에서 금형이 하강하여 Fig.12(a)와 같이 다이와 캔 가장자리 부분이 만난다. 이 단계에서 FEM 요소의 모델링이 중요하다. 즉 요소의 크기가 일정면서 충분히 작게 하지 않으면 해석상의 에러가 발생하여 해석을 진행시킬 수 없게 된다. Fig.12(b) 단계에서 가장자리와 금형간의 접촉시 캔의 상단에서부터 주름이 발생하여 Fig.12(c)와 같이 아래쪽으로 진행하게 된다. Fig.12(d) 에서부터는 주름의 생성이 멈추어 neck 의 윗부분에는 주름이 있으며 아래부분은 정상적으로 가공된 상태가 된다. 네킹공정에서는 이러한 주름 발생이 여부로 재료의 가공성을 나타낸다.

## 5.3 불량발생 원인

네킹가공시 주름이 발생하는 원인을 분석하기 위하여 소재의 기계적 특성, 금형의 형상, 벽과 캔 사이의 마찰계수를 영향을 살펴보았다. 소재의 특성은 Table 2 에서 나타난 바와 같이 가공 전과 후 값을 각각 도입하여 해석하였다. 해석결과 소재의 물성 차이는 캔 벽면부분의 잔류응력에서 차이를 발생시켰으나 주름발생에 대해서는 영향이 미미한 것으로 나타났다. 또한 마찰계수의 차이도 주름발생에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 주름 발생은 금형의 Gap 과 소재의 두께에는 영향을 받고 있는 것으로 판명되었다.

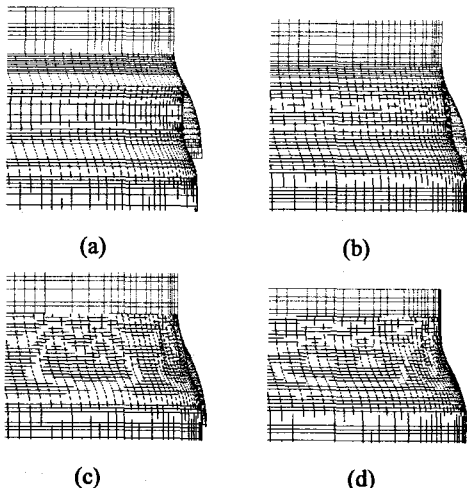


Fig.12. Wrinkling mechanism

### 5.3.1 소재의 두께의 영향

앞서 언급한 바와 같이 캔의 두께는 Fig.10 과 같이 캔 가장자리가 두꺼워져 있어서 가공성을 좋게 하고 있다. 본 연구의 궁극적인 목적중의 하나가 캔의 두께를 얇게 하는데 있으므로 벽면의 몇 단계 바꾸어서 그에 따른 영향을 파악하였다. 본 연구에서는 현재 상용중인 두께  $t=0.137\text{mm}$  를 기준으로,  $t=0.10\text{mm}$ ,  $t=0.11\text{mm}$ ,  $t=0.12\text{mm}$ ,  $t=0.13\text{mm}$  에 대해서 해석을 수행하였다. 해석결과 현재 사  $t=0.137\text{mm}$  에서는 주름의 생기지 않았으나  $t=0.120\text{mm}$  이하에서는 주름이 생겼다. 이 결과는 두께가 얇을수록 주름이 쉽게 발생함을 의미한다.

### 5.3.2 Punch와 Die의 Gap의 영향

본 연구에서는 네킹 공정시 주름 발생은 앞서 살펴본 캔 벽면부분의 두께의 영향 외에 Knock out Punch와 Die 사이의 gap에 의한 영향을 받는다. 캔의 두께가 얇아지면 결과적으로 Tool 사이의 Gap 이 커지는 효과가 있으므로 캔의 벽면부 두께의 감소는 두께가 일정한 캔에 대해서는 Tool Gap의 증가를 의미한다. Gap의 증가는 1차 네킹가공후 캔의 가장자리 부분의 곡률을 Fig.13와 같이 만들어 2차 공정시 Die와 캔의 접촉각을 증가시켜 가공성을 떨어뜨린다. 이와 같이 Gap의 영향이 나타나는 것은 본 해석이 탄소성 모델을 사용하므로 가장자리 부분에서 캔은 탄성력을 받기 때문이다. 현재 상용되고 있는 캔의 금형간의 Gap은  $0.161\text{mm}$  이며 이를 기준으로  $0.18\text{mm}$ ,  $0.20\text{mm}$ ,  $0.22\text{mm}$  와 같이 단계적으로  $0.02\text{mm}$  씩 Gap을 증가시켜 해석을 수행하였다. 해석결과 Gap이 커질수록 주름이 크고 선명하게 나타나며, 주름의 발생되기 시작하는 Gap은  $0.22\text{mm}$  이상으로 나타났다.

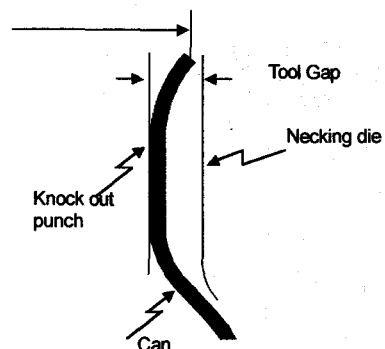


Fig.13. Can profile of neck after 1<sup>st</sup> necking process

## 6. 결론

이상에서 본 연구는 도밍공정에 이은 내압강도 해석과 네킹공정을 중심으로 해석을 수행되었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 캔 제조시 도밍, 네킹공정 및 캔의 내압 안정성을 평가하는 해석프로그램을 개발하였다. 이를 통해 각종 형상인자와 재질특성에 따른 내압강도 해석을 수행하여 본 프로그램의 유용성을 확보하였다.
2. 캔에서 내압강도는 블랭크 시트의 두께의 제곱에 비례하며 캔의 바닥 돔부분의 곡률작고 깊어질수록 증가한다.
3. 네킹 가공 해석시 캔 벽면에 대한 재질특성으로 초기 소재의 값과 캔 벽면에 대한 실험값이 사용될 수 있으나 이러한 재질의 차이는 가공성 해석에 큰 영향을 미치지 않는다. 또한 다이와 캔 벽면부분의 마찰력 역시 가공성에 큰 영향을 못 미친다.
4. 네킹공정시 주름발생은 캔의 네킹 부분의 벽면 두께가 얇아질수록, Necking die 와 Knock out punch 의 Gap 이 커질수록 쉽게 발생한다. 주름의 발생은 1 차 네킹가공시 캔의 가장자리부분의 직경증가에 영향을 받는다.

## 후 기

본 연구는 1999 년도 포항제철의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 남재복, 정기조, “D&I Can 의 아이어닝공정에서의 reduction 배분에 따른 가공특성 연구”, POSCO 연구보고서, 1999.
2. Hideki Utsunomiya, Hisashi Nishimura, “Effect of base profile of a DI beverage can and material properties on the dome reversal pressure”, J. Materials Processing Technology, pp. 54-60, 2000.
3. A.M. Zaky, A.B. Nassr, M.G. El-Sebaie, Optimum blank shape of cylindrical cups in deep drawing of anisotropic sheet metals” J. Materials Processing Technology, pp.203-211, 1998.
4. M. Schunemann, M.A. Ahmetoglu & T. Altan “ Prediction of process conditions in drawing and ironing of cans”, J. Materials Processing Technology, pp.1-9, 1996.
5. PAM-STAMP user manual, version, 1998.
6. 정기조, 남재복, “박강판 가공 기술 매뉴얼”, POSCO 기술연구소, 1995.
7. ALCOA: Aluminum Drawn and Ironed Can Manual, 1975.