

국소 가열 방법을 이용한 2단계 축대칭 디프 드로잉 공정의 해석 및 설계

이 동 우*, 송 인 섭*, 양 동 열**

Finite Element Analysis and Design of Axisymmetric Deep Drawing Process by Local Heating

Dong-Woo Lee*, In-Seob Song*, Dong-Yol Yang**

ABSTRACT

The study is concerned with finite element analysis and design of axisymmetric deep drawing by local heating. When the bottom shape of a cup is not flat but in complex-shaped, i. e., hemispherical, the cup cannot be drawn in one or two processes in the conventional deep drawing process and the limit drawing ratio is limited as well. By introducing local heating selectively with regards to the heating position, the formability of the sheet metal can be greatly increased with the reduced number of processes. In the Process analysis the rigid-viscoplastic finite element method is employed and the temperature effect is incorporated. Bishop's step-wise decoupled method is employed to analyze the thermomechanical interaction between deformation and heat transfer. Axisymmetric deep drawing of a hemisphere-bottomed cup has been analyzed for various combinations of heat application in the punch and the die. At the first stage of deep drawing stretch forming is practically carried out by firmly pressing the blankholder with the punch and the die heated at various levels of temperature. Then at the second stage the same cup is drawn for the same or different combination of temperature. From the computation, it has thus been shown that the formability of a cup is greatly increased in two-stage deep drawing with increased limit drawing ratio.

Key Words : 국소가열방법(Local Heating Method), 2단계 축대칭 디프 드로잉(Two-Stage Axisymmetric Deep Drawing), 열변형해석(Thermal and Deformation Analysis)

1. 서 론

박관성형에서 금속 박관재료의 성형 한계는 여러가지 원인에 의한 변형의 국부화(Strain localization)와 그에 따른 재료의 파단에 의해 결정된다. 실제 공정에서 성형성의 향상을 위한 재료의 기계적 거동에 대한 많은

연구가 행해져 왔으며 재료 상수, 공정 변수 등이 변형의 국부화에 많은 영향을 끼친다는 것이 알려져 있다.

일반적으로 재료가 변형을 할때 변형에너지의 대부분은 열로 변화된다(1, 2). 이러한 열의 발생은 기존의 재료 실험 연구를 통해 재료 변형의 국부화에 큰 영향을 끼침을 보여주고 있다(3, 4). 재료의 국부적인 변형은 변

* 한국과학기술원 정밀공학과

** 한국과학기술원 정밀공학과(정회원)

형부위의 온도를 상승시키고 그 부위의 재료는 열의 영향으로 연성이 증가하여 변형의 국부화를 촉진시킴으로서 파단을 발생시킨다는 것이다. 재료실험시 재료내의 온도 구배는 재료의 변형을 균일하게 하지 못하므로 같은 응력상태에서 균일한 변형을 위해서는 온도의 분포가 균일해야함을 보여주었다.

실제 박판 금속의 디프드로잉 공정에서도 플랜지부의 가열을 통해 플랜지의 변형저항을 감소시킴으로서 한계 드로잉비가 향상됨이 실험에 의해 확인된 바 있다.

이와같은 국소 가열 가공 방법은 종래 사용되어온 온간, 열간 가공의 경우와는 달리 프레스 성형의 공정 변수, 열(온도)에 의한 재료 성질의 변화 등을 고려하여, 가공하는 박판의 필요부분을 선택적으로 가열, 냉각하거나 또는 두가지를 조합하여 처리하는 것이다.

이러한 온도 구배의 영향이 박판 성형의 공정에 많은 영향을 미침에도 불구하고 종래의 박판 성형 가공은 주로 열을 고려하지 않은 성형해석이 대부분이었고, 열을 고려하였더라도 대부분이 실험에 의존한 방법이었다(5).

그러나 실제의 공정 설계에서 실험만을 통한 공정 변수의 규명은 많은 노력과 시간을 필요로 하기 때문에 컴퓨터를 통한 시뮬레이션의 필요성이 대두되었다. 본 연구는 박판 축대칭 디프 드로잉 성형에 있어서 재료의 국소가열에 따른 온도 구배와 변형해석을 유한 요소법을 이용하여 해석하고 이를 실제 공정 설계에 적용할 수 있도록 도움을 주고자 하는 데에 있다.

2. 이론 해석

변형과 온도의 해석은 계산 결과와 경제성이 만족되는 Bishop⁽¹⁰⁾의 비연계 방법(decoupled method)을 이용하였다. 이 방법은 주어진 짧은 시간대에 온도가 일정한 채로 재료변형과 열발생이 동시에 일어난다고 가정하여 변형만의 문제를 풀고, 연이어 다음 시간대에 재료의 변형이 없이 열전달만 일어나는 것으로 가정하여 문제를 분리하여 푸는 것이다.

2.1 변형 해석

박판 소성가공의 유한 요소해석을 위하여 Hill⁽⁷⁾이 제안한 2차 이방성 항복함수(Quadratic Anisotropic Yield Function)를 사용하였다. 2차 이방성 항복함수는 박판 금속의 이방성 특성을 잘 표현하면서도 계산이 간편하다는 장점이 있어서 널리 적용되고 있다. 이 식에

평면응력상태와 수직이방성을 가정하면

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 - \frac{2R}{1+R}\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

와 같은 유효응력식으로 표현된다.

박판 소성가공의 경우, 특히 일반적인 형상의 성형(Out-of-Plane Forming)의 경우에는 변형중에 기하학적인 대변위가 발생하게 되므로 형상 변화와 가공 경화를 고려한 축대칭 형상의 일반적인 박판 성형 공정의 해석에 적용할 수 있는 변분원리를 도입하였다(8). 즉 여러가지의 가능한 변형 모드들중에서 실제의 변형 모드는 다음의 범함수(Functional)를 최소화 시키는 것이다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_{V_0} \left\{ \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} + \frac{1}{2} H' (d\bar{\epsilon})^2 \right\} dV - \int_{A_0} T^T \cdot U dA \\ &= \Phi_1 - \Phi_2 \end{aligned} \quad (2)$$

본 논문에서는 박판의 열변형 해석을 위해 점 강소성(Rigid-Viscoplastic) 재료를 사용하였다.

이러한 점강소성 재료의 강소성 유한 요소 방법의 적용을 위하여 윗식을 다음과 같은 값으로 근사화시킨다.

가공경화지수(Work Hardening Rate)는 다음과 같은 식에 의해

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial U} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial U} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} \frac{\partial \dot{\bar{\epsilon}}}{\partial U} \quad \left(\frac{\partial \dot{\bar{\epsilon}}}{\partial U} = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial U} \right)$$

$$= \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial U} \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} \right) \quad (4.a)$$

$$H' = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} \quad (4.b)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\Delta t} \quad (4.c)$$

과 같이 근사적으로 표현된다. 여기서 Δt 는 유한요소 해석시 한 스텝(Step)의 시간을 말한다.

강소성 유한요소해석에서는 해석도중에 응력을 적분하지 않기 때문에 접촉점점이 공구에 대하여 점착(Sticking)되어 있는지 상대운동(Sliding)을 하는지를 결정하기 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해서 다음과

같은 변형된 마찰 법칙을 적용하였다.

$$T^f = F_x = -\frac{2}{\pi} \mu P_z \tan^{-1}(k |U_x|)$$

여기서, $U_x = U_r - (U_r \cdot e_z) e_z$ (5)

2.2 온도 해석

열역학 제 1, 2법칙을 이용하면 소성 변형을 하는 재료의 열 평형 방정식은

$$K_1 T_{,ii} - \rho c \dot{T} + k^* \nabla^2 \bar{\epsilon} = 0$$
 (6)

와 같이 표현되며 k^* 값의 범위는 0.85와 0.95 사이에 존재하는 것으로 알려져 있다⁽⁹⁾. 본 논문에서는 k^* 를 중간값인 0.9로 취했다.

식(6)을 약적분형(Weak Integral Form)을 이용하고 경계 부근에서 열 유량을 고려하면

$$\int_V K_1 T_{,ii} \delta T_{,ii} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_V k^* \nabla^2 \bar{\epsilon} \delta T dV - \int_{S_q} K_1 q_n dS = 0$$
 (7)

과 같고 식(7)을 등계수를 갖는 선형 요소에 대한 보간 함수 식을 사용하여 유한요소식화 하면 다음과 같은 간단한 벡터형으로 표현할 수 있다.

$$KT + CT - Q - Q_n = 0$$
 (8)

여기서 Q_n 은 경계조건을 나타내는 열유동 벡터이다. 온도장은 식(8)을 유한 차분 근사(Finite Difference Approximation)에 의해 선형화시켜서 구한다.

3. 결과 및 토론

3.1 국소 가열 스트레칭 해석

소성 변형과 열전달이 조합된 해석을 위해 ARMCO사의 박판 스트레칭(Stretching) 실험⁽¹¹⁾에 사용된 재료를 사용하였고 그 재료의 물적 성질은 Y. H. Kim⁽¹²⁾의 ARMCO 실험 비교 해석시 사용한 값들을 인용하였다.

재료의 물성치는 Table 1에 나타냈고 열적 성질은 Table 2에 나타냈다.

먼저 유한요소해석의 타당성을 검증하기 위하여 본 논문에서는 ARMCO사의 실험값과 본 논문의 계산 결과값을 비교하였다.

Fig.1은 ARMCO의 실험에 사용된 금형의 형상을

Table 1. Material property

MATERIAL	AK steel
K	581Mpa
ϵ	0.004
n	0.223
ϵ	1
m	0.0150
B	0.00151
R	1.755

Table 2. Thermal property

Thermal Coefficient	AK steel
K_1	0.054J/mm/s/C
ρ	0.00785g/mm ³
c	0.464J/g/C
h_d	0.01J/mm ³ /s/C
h_a	0.00002J/mm ³ /s/C

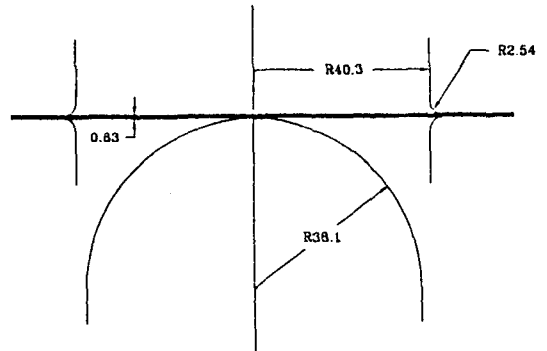


Fig.1 Schematic tool configuration for the experimental forming operation

나타낸다. 마찰계수는 0.25값을 사용하였고 펀치의 속도는 2.5mm/s로 하였다.

Fig. 2, Fig.3와 Fig.4은 펀치 온도가 각각 상온(25°C), 48.9°C, 60°C 일때 실험과의 비교값을 나타낸다.

다이 온도는 실온과 같은 25°C로 일정하다고 가정하였다.

실험에 의한 변형을 분포는 펀치 온도가 증가함에 따라 펀치중심 부위의 반경 방향 변형률이 증가하는 경향을 보이고 원주 방향 변형률은 전체적으로 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 계산식의 경향과 일치한다. 펀치부위의 변형을 증가는 펀치온도의 증가에 의한 변형저항의 감소에 그 원인이 있다.

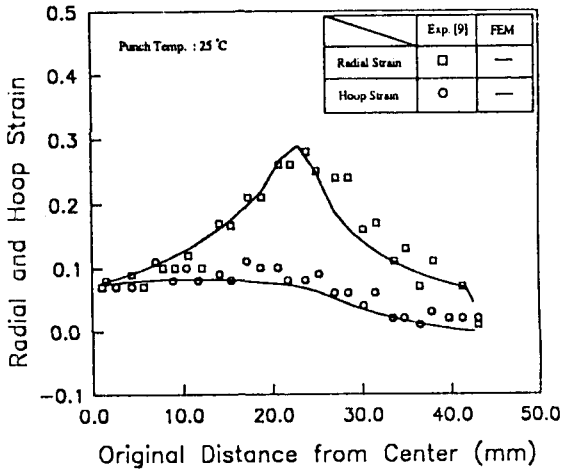


Fig. 2 Comparison of strain distribution between FEM computation and experiment : Punch height=22.5mm, punch temperature=25°C

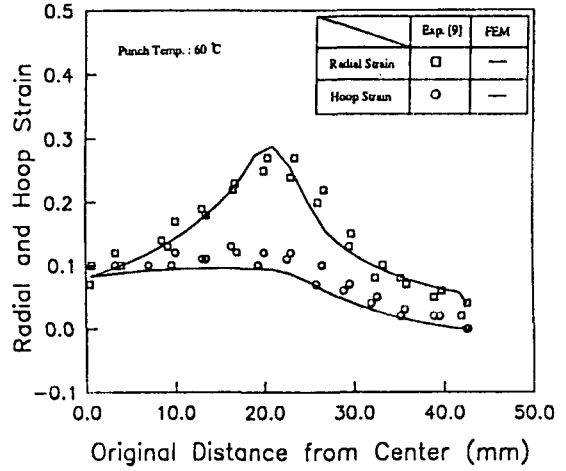


Fig. 4 Comparison of strain distribution between FEM computation and experiment : Punch height=22.5mm, punch temperature=60°C

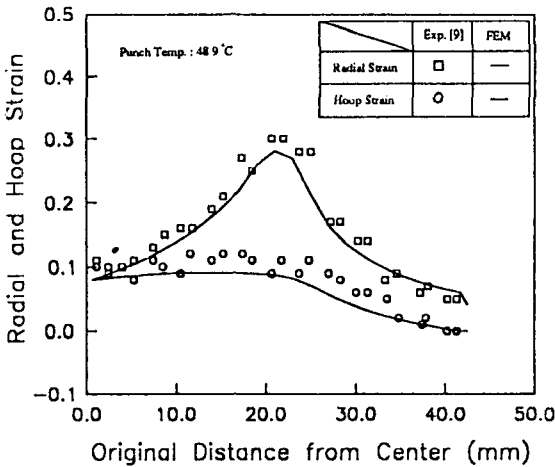


Fig. 3 Comparison of strain distribution between FEM computation and experiment : Punch height=22.5mm, punch temperature=48.9°C

해석 결과가 실험값과 잘 일치하므로 열을 고려한 분 유한요소 계산이 타당함을 보였다.

3.2 2단계 국소가열 디프 드로잉 공정해석

위와 같은 계산 방법으로 같은 재료에 같은 열적 상수를 이용하여 반구형 펀치에 의한 디프드로잉 공정을 열을 고려하여 2단계로 계산하였다.

(1) 1단계

1단계에서는 펀치와 다이의 온도를 서로 달리 변화시키면서 다음과 같은 3가지 경우에 대한 스트레칭 해석을 해 보았다.

- i) 펀치 가열, 다이 상온
- ii) 펀치 상온, 다이 가열
- iii) 펀치, 다이 동시 가열

1단계의 다이 형상은 Fig. 5에 나타내었다.

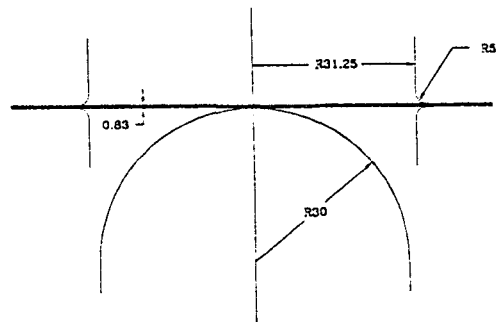


Fig. 5 Schematic tool configuration for the 1st stage

i) 펀치 가열, 다이 상온

Fig. 6은 펀치의 온도를 25°C, 45°C, 60°C로 가열하고 다이의 온도는 25°C로 하였을 때의 두께 방향 변형률 분포를 나타낸다.

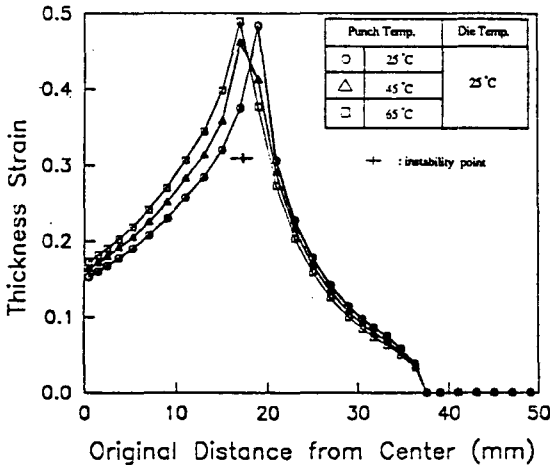


Fig. 6 Predicted thickness strain distribution at the punch height of 20mm for various punch temperature levels

각 온도를 비교한 그림을 보면 펀치의 온도가 증가함에 따라 중앙부쪽의 변형률 값들이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그와 함께 다이 방향의 변형률은 감소함을 볼 수 있다. 20mm 성형후의 결과값에 의하면 펀치만의 가열을 통한 스트레칭 공정은 이미 과단이 일어나고 펀치온도의 증가에 따라 최대 변형율의 값이 증가하는 경향을 보여 펀치의 전체 가열은 성형성의 향상에 크게 도움이 되지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 펀치의 온도증가가 성형시 펀치와 접촉하는 재료부위의 온도

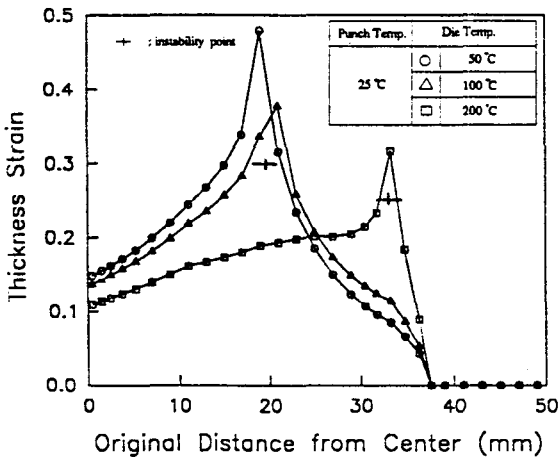


Fig. 7 Predicted thickness strain distribution at the punch height of 20mm for various die temperature levels

를 국소적으로 상승시켜 펀치와 접촉하는 재료부위의 변형저항을 감소시킨 결과이다. 즉 펀치의 가열은 재료의 변형을 중심쪽으로 이동시킨다는 결과를 보여준다.

ii) 펀치 상온, 다이 가열

Fig. 7은 다이를 가열한 두번째 경우의 결과값을 보여준다. 펀치 온도가 일정할때, 다이온도가 증가할수록 펀치 부위의 변형률은 작아지고 다이쪽의 변형률이 커짐과 동시에 최대 변형률이 다이쪽으로 옮겨지면서 줄어듦을 보여준다. 이와같은 결과는 1)에서와 마찬가지로 다이의 가열에 의한 재료의 열전달이 다이부위 재료의 변형저항을 감소시켜 변형을 다이부위로 이동시킨 결과이다.

iii) 펀치, 다이 동시 가열

Fig. 8은 3번째 경우의 결과값으로 다이의 온도가 200 °C로 일정하고 펀치의 온도를 45°C, 55°C, 65°C, 75°C로

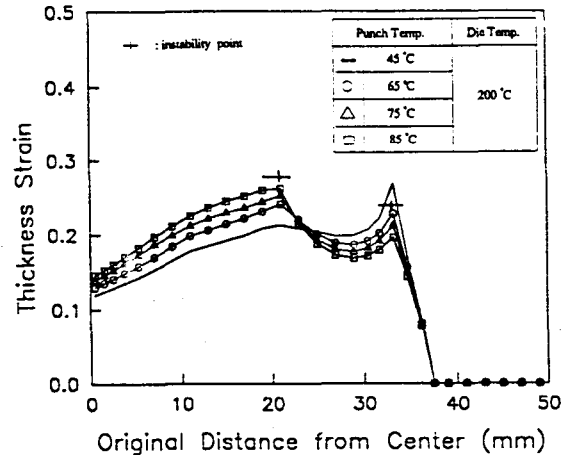


Fig. 8 Predicted thickness strain distribution at the punch height of 20mm for various punch and die temperature levels

가열하였을 때의 두께 방향 변형률 분포를 나타낸다.

그림을 보면 다이온도가 200°C일때 펀치의 온도가 증가함에 따라 최대 변형률의 값이 펀치부위로 이동함과 동시에 변형률 분포가 균일해짐을 알 수 있다.

펀치 부위의 변형 저항과 다이부위의 변형 저항 사이의 형상에 의한 역학적 관계를 가열을 통한 재료의 연성을 조절하여 균일한 변형이 일어나도록 유도함으로써 성형성을 향상시킨 결과이다. 위와 같은 결과로 볼때

온도의 조절로써 원하는 부위의 변형을 조절할 수 있다는 이론적 결과가 나온다.

(2) 2단계

2단계 공정에서는 1단계 스트레칭 공정후 두가지 경우에 대한 디프드로잉 공정을 한다. 첫째 경우는 1단계 공정후 블랭크 홀딩력(Blank holding force)만을 줄여 디프드로잉 공정을 하는 경우이고 둘째 경우는 펀치와 다이 온도를 1단계와 달리하여 해석하였다. 1단계의 결과에 의하면 다이의 가열은 다이부위의 최대 변형을 값의 증가를 보이므로 디프드로잉시 다이 가열에 의한 파단의 영향을 줄이기 위해 1단계 세제 경우 공정중 다이 부위의 최대 변형을 값이 가장 작은 경우를 선택하여 디프드로잉 공정을 하였다. 블랭크 홀딩력은 1000kgf (9810N)로 하였다.

1) Fig. 9은 디프드로잉이 시작될 때의 초기 형상을

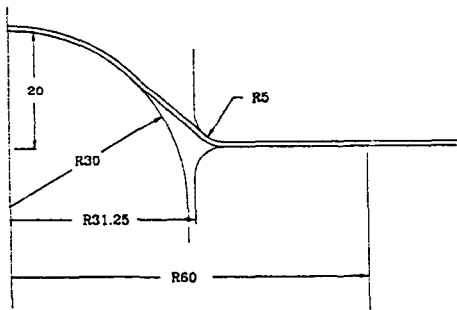


Fig. 9 Schematic tool configuration for deep drawing of a hemisphere-bottomed cup (Initial punch height=20mm)

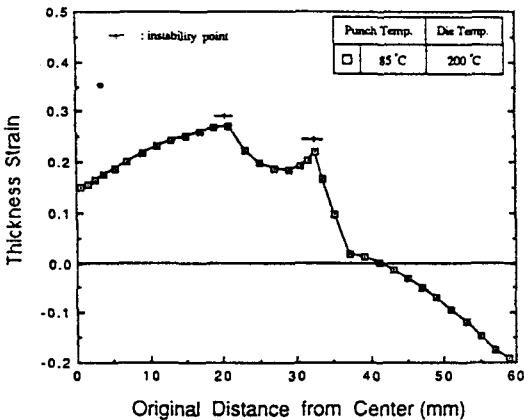


Fig. 10 Predicted thickness strain distribution at the punch height of 60mm after deep drawing

보여주고 Fig. 10은 2단계 디프드로잉 공정후 펀치 높이가 60mm일 때의 변형을 분포를 보여준다.

위의 결과를 보면 드로잉 비가 2.0일때 반구형 펀치에 의한 디프드로잉 공정은 펀치 85°C 가열과 다이 200°C 가열에 의해 블랭크 홀딩력만의 조절로 일반적인 디프드로잉 공정으로는 성형이 불가능한 공정을 2단계 공정으로 가능함을 보인다. 1단계에서 블랭크 홀딩력을 크게 주어 가열된 펀치와 다이로 20mm까지는 스트레칭 공정을, 20mm부터는 블랭크 홀딩력만을 작게 줌으로써 디프드로잉 공정이 이루어지게 한다. 이로써 한 공정에서 블랭크 홀딩력만의 조절로 디프드로잉 공정이 가능함을 알 수 있다.

II) 드로잉 비가 2.0 이상일 때는 플랜지 부분의 변형 저항 증가로 20mm 스트레칭 성형후의 디프드로잉은 불가능하다. 이 때는 1단계 성형의 높이를 낮추고 2단계 공정시의 펀치, 다이의 온도를 바꾸어야 한다.

Fig. 11은 1단계 17.5mm 스트레칭 공정후 재료를 상온으로 식히고 상온의 펀치와 다이로 상온으로 했을 때와 가열했을 두가지 경우의 디프드로잉후 변형률의 비교를 보여준다.

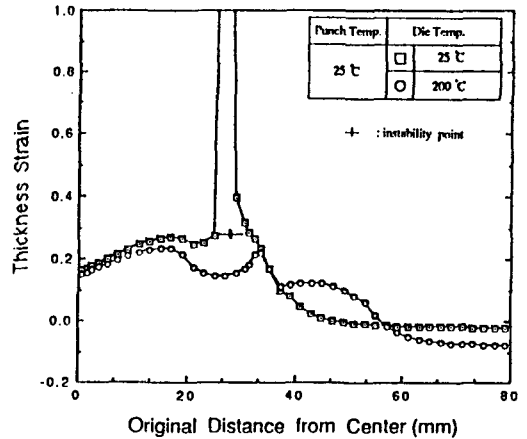


Fig. 11 Predicted thickness strain distribution at the punch height of 60mm after deep drawing

드로잉 비가 클때 펀치부위의 가열은 1단계 해석시 보였던 스트레칭 공정과 같은 경향을 보이므로 펀치는 식히고 다이로 가열하는 것이 유리함을 알 수 있다.

4. 결 론

이상과 같은 해석 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 판재 금속의 열을 고려한 스트레칭 유한 요소 해석의 경우 기존 실험과의 비교를 통해 타당함을 보였다.
- 2) 스트레칭 공정시 편치와 다이의 가열방법에 의해 성형성이 향상됨을 보였고 드로잉 비가 2.0일때 적절한 가열 온도 선택시 블랭크 홀딩력의 조절만으로 한 공정에 의해서 디프드로잉 공정이 가능했으며 여타의 경우에도 2단계 국소 가열 성형에 의해 주어진 형상의 성형이 가능하였다.
- 3) 디프드로잉 공정시 다이의 가열에 의해 일반적으로 한계 드로잉비의 향상이 가능함을 보였다.

참고문헌

1. Farren, W. S. and Taylor, G. I., "The Heat Developed During Plastic Extension of Metals", Proc. Roy. Soc. A, Vol. 107, pp. 422~451, 1925
2. Zener, C. and Hollomon, J. H., "Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steel", J. Appl. Phys., Vol. 15, pp. 22~32, 1944
3. Ayres, R. A., "Thermal Gradients, Strain-Rate, and Ductility in Sheet Steel Tensile Specimens", Metall. Trans. A., Vol. 16A, pp. 37~43, 1985
4. Kim, Y. H. and Wagoner, R. H., "The Role of Deformation Heating in Tensile Testing of Aluminum-Killed Steed", Scr. Metall., Vol. 21, pp. 223~228, 1987
5. Machida, T., "Application of Local Heating to Sheet Forming", Memoirs of Faculty of Eng., Tanagawa Univ., Tokyo, Vol. 13, pp. 23~39, 1977
6. Granzow, W. G., "The Influence of Tooling Temperature on the Formability of Stainless Steel Sheets", Formability of Metallic Materials 2000 A. D., ASTM STP-753, J. R. Newby and B. A. Niemeiereds., ASTM, Philadelphia, PA, pp. 137~146, 1982
7. Hill, R., 1950, "Mathematical theory of plasticity" Oxford Univ. Press, 1950
8. Kim, J. H., "Numerical Analysis of Sheet Metal Forming", Ph. D. Dissertation, Univ. California, Berkeley, 1977
9. Greenfield, P. and Bever, M. B., Acta Met, Vol. 4, pp. 443, 1956
10. Bishop, J. F. P., "An Approximate Method for Determining the Temperature Reached in Steady Motion Problems of Plane Plastic Strain". Quart. J. Mech. Math., Vol. 9, pp. 236~246, 1956
11. Siles, J. L., ARMCO Research & Technology, Middletown OH., 1988
12. Latreille, S., Kim, Y. H., Siles, J. L. and Wagoner, R. H., "Non-isothermal Sheet Forming Analysis", ERC/NSM-S-89-17, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, Columbus, OH., 1989