

클래드 강판재에 의한 축대칭 디프드로잉의 탄소성 유한요소해석

류호연* · 김영은** · 김종호*** · 정완진***

(2001년 6월 12일 접수)

An Elasto-Plastic Finite Element Analysis on Deep Drawing of Clad Sheet Metal

H. Y. Ryu, Y. E. Kim, J. H. Kim and W. J. Chung

Abstract

A Comparative study on deep drawing of clad sheet is carried out to investigate the forming characteristics and the effectiveness of modified finite element analysis. An elasto-plastic finite element analysis is developed to analyze the forming of clad sheet using explicit scheme and layered shell. Axisymmetric deep drawing of stainless clad metal sheet is performed and thickness distribution is obtained. The corresponding finite element analysis shows good agreement with the results. Some disagreement can be explained by the assumption of shell element and the complexity of deformation of clad sheet.

Key Words : Clad Sheet, Explicit Scheme, Deep Drawing, Layered Shell

1. 서 론

자동차, 가전제품 및 일반 산업제품으로 생산되고 있는 금속판재는 열간 또는 냉간압연에 의하여 단일판재로 생산되어 드로잉성형용 재료로 많이 사용되었으나, 산업의 발달로 서로 다른 종류의 금속판재를 적층시켜 사용할 필요성이 대두⁽¹⁾되고 있다. 클래드 판재는 수명향상과 원가절감을 위하여 서로 성질이 다른 2종 이상의 단일금속 판재들을 각각의 장점을 서로 보강 할 수 있게 하는 특성을 지니도록 압연 및 압접 방법에 따라 2매판, 3매

판으로 제작⁽²⁾되어지고 있다. 자동차의 패널 및 주요부품, 가전제품이나 건축자재 제품에서 경량의 라미네이트(Laminate) 강판과 제진강판 등의 수지복합판재가 실용화⁽³⁾되고 있지만 금속 클래드 판재에 비하면 접합강도가 작아 성형에 어려움이 많으므로 클래드 판재의 성형성에 많은 관심을 갖게 된다.

적층판재의 성형성⁽⁴⁾에 관한 주요한 기계적 성질은 접합판재들간의 두께분포량과 접합강도가 서로 다르기 때문에 고기능의 형 재료로서 사용이 가능하다. 가전산업 분야에서는 내마모성이 좋은 철에 전기전도도가 우수한

* 단국대학교 대학원 기계공학과

** 단국대학교 기계공학과

*** 서울산업대학교 금형설계학과

은이나 황동을 접합하여 사용하기도 하고, 주방기기 산업분야에서는 우수한 내식성 및 기계적 성질을 가진 스테인리스강에 열전도도와 전기전도도가 우수한 알루미늄 소재를 서로 적층 적합시켜 클래드 판재를 제작하므로, 가벼우면서도 내구성과 내마모성이 우수한 소재로 사용되어지고 있다.

이러한 클래드 판재의 복합적인 성질을 이용하게 된다면 자동차의 경량화에도 기여할 수 있으므로 연비의 절감과 함께 배기가스에 의한 환경문제에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 예측된다.

Shinagawa등⁽⁵⁾은 스테인리스 304강판을 온간드로잉 가공으로 편치의 속도와 성형온도를 변화시키면서 한계드로잉비를 향상시키는 실험을 하여 이론해석과 비교 분석하였다. 일반적으로 스테인리스 강판의 드로잉가공은 상온에서 이루어지고 있으나 온간가공에서의 성형결과를 Kim등은 STS304 스테인리스 강판⁽⁶⁾과 A1050 알루미늄 판재⁽⁷⁾를 이용하여 원형킵과 정사각용기 드로잉에 있어서 온간과 상온에서의 한계드로잉비를 비교 분석하여 최적의 성형조건을 비교 분석하였고, 또한 스테인리스-알루미늄-스테인리스의 클래드 판재에 의한 원형킵 드로잉 실험⁽⁸⁾을 통해 상온보다 온간에서 클래드 판재의 한계드로잉비가 우수함을 확인하였다.

Yoshida⁽⁹⁾는 구리와 철, 철과 알루미늄의 2매판으로 적층된 재료를 가지고 원형 및 반구형 편치를 사용하여 한계드로잉비(LDR) 성형성을 실험과 수치해석에 의하여 비교 연구하였고, 吉田⁽¹⁰⁾는 스테인리스와 알루미늄의 2매판 클래드 재료의 인장굽힘에 의한 판 두께 변화를 실험과 이론적으로 비교 해석하였다. Liu⁽¹¹⁾는 적층복합재료의 디프드로잉 성형에 대한 강소성 FEM 시뮬레이션을 시도하고 가공경화성이 큰 재료를 외측에 배열함으로써 드로잉성이 향상된다는 것을 발표하였다.

정⁽¹²⁾은 박판 성형과정을 모사하기 위한 모델링 중 하나인 U-draw bending 공정을 외연적 시간적분법을 이용한 유한요소법으로 해석하여 내부 응력 상태 및 스프링 백 형상을 비교 연구하였다.

본 연구에서는 스테인리스 STS304와 알루미늄으로 제작된 3중 클래드 강판의 축대칭 디프 드로잉 공정을 실험하고 탄소성 유한요소법에 의한 해석을 수행하여 클래드 강판에 대한 성형성 및 변형을 분석하고 해석결과의 신뢰성에 대하여 검토하여 보았다. 종전의 클래드 강판 공정의 유한요소해석은 2차원 입방체 요소를 사용하여 일반적인 3차원 형상으로 확장하기 어렵고 이방성을 제대로 고려하기 어려웠다. 본 해석에서는 쉘 요소를 사용하여 실질적으로 3차원으로 확장 가능하도록 하였으며

적용의 유효성과 한계점에 대하여 분석 검토하였다.

2. 클래드 판재에 대한 탄소성 유한요소법

2.1 적층셀 요소

클래드 판재의 변형과정을 해석하기 위해서는 일반 쉘 요소로는 곤란하다. 적층 쉘 요소는 Fig. 1과 같이 각각의 층이 쌓여 있으며 절점에 부착된 수직벡터에 연결되어 있는 구조로써 클래드 판재의 형상을 적절하게 나타낼 수 있다.

단, 각 층은 식 (1)에 의하여 수직벡터에 연결되어 다른 층의 변형과 연계되므로 실제의 거동과는 다소 차이가 날 수 있으나 전체적인 변형거동은 큰 문제없이 묘사할 수 있다고 판단된다.

$$\chi(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{i=1}^4 N(\xi, \eta) \bar{\chi}_a + \sum_{i=1}^4 N(\xi, \eta) Z_a(\zeta) \hat{X}_a \quad (1)$$

여기서 Layer 상의 점 $\chi(\xi, \eta, \zeta)$ 는 절점좌표 $\bar{\chi}_a$ 와 절점 수직벡터 \hat{X}_a 에 의해 근사되는 것으로 $N(\xi, \eta)$ 는 형상함수, $Z_a(\zeta)$ 는 절점 수직벡터 상의 Layer의 위치를 각각 나타낸다.

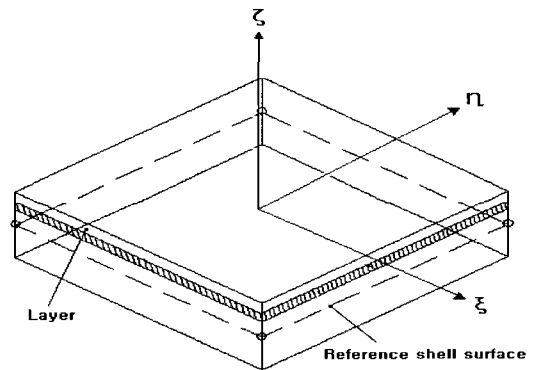


Fig. 1 Kinematics of layered shell

2.2 가상일 법칙에 의한 유한요소법 수식화

외력에 의해서 행해진 일(W^{ext})과 내력 및 관성력에 의하여 행해진 일(W^{int})은 같아야 한다는 일 평형으로부터 다음 식이 성립된다.

$$\int_v \delta x^T \Psi dv + \int_s \delta x^T \phi ds + \sum_i \delta x_i^T F_i$$

$$= \int_v (\delta \epsilon^T \sigma + \delta x^T \rho \ddot{x}) dv \quad (2)$$

여기서 δx 및 $\delta \epsilon$ 은 임의의 변위 및 임의의 변형을
을 각각 나타내고, Ψ 는 체적력, ϕ 는 표면력, F_i
는 집중 하중력, σ 는 내부 응력, ρ 는 밀도 그리고
 \ddot{x} 은 가속도 벡터를 의미한다.

형상 함수 N 을 도입하여 식(2)를 공간적으로 이산화
시킨 후 정리하면 다음과 같은 동적 힘 평형 방정식
(dynamic force balance equation)을 구할 수 있다.

$$M\ddot{x} = f^{ext} - f^{int} \quad (3)$$

여기서

$$f^{ext} = \int_v N^T \Psi dv + \int_s N^T \phi ds + \sum_i F_i \quad (4)$$

$$f^{int} = \int_v B^T \sigma dv \quad (5)$$

로서 각각 외력항과 내력항을 나타내며, B 는 변위-변
형율행렬(displacement-strain matrix)을 의미한다. 또한,

$$M = \int_v N^T \rho N dv \quad (6)$$

로서 일관 질량 행렬(consistent mass matrix)을 나타
내는데, 식(3)의 해를 축차(iteration)없이 외연적으로 구
할 수 있도록 다음과 같은 집중 질량 행렬(lumped
mass matrix)을 도입한다.

$$M = \sum_{i=1}^n m_i^e \quad (7a)$$

$$M_i^e = \begin{cases} \frac{1}{n} \int_v \rho dv : \text{대각요소} \\ 0 : \text{비대각요소} \end{cases} \quad (7b)$$

여기서 n 은 한 요소의 절점수이다.

2.3 감쇠법을 이용한 접촉처리

박판 성형 해석시 금형이 모델링 되어 해석에 사용되
므로 금형과 박판간의 접촉은 필연적이다. 외연적 유한
요소법의 경우 축차를 하지 않기 때문에 접촉 처리법으
로는 대부분 벌칙 함수법(penalty method)이 사용된다
(13).

Fig. 2의 (a)와 같이 박판에 속한 한 절점이 깊이 d
만큼 금형으로 침투했을 경우, 침투절점에 가해지는 접
촉력은 다음과 같다.

$$f^{contact} = dkn \quad (8)$$

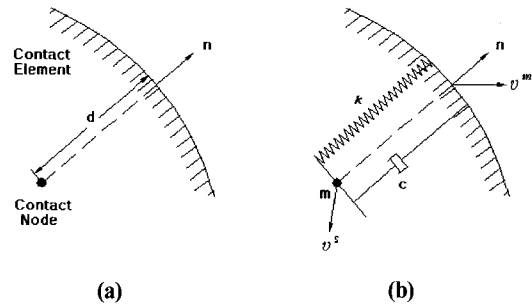


Fig. 2 Schematic illustration for modeling of the contact damping (a) Penetrated situation (b) One-degree-of-freedom vibration model

여기서 $d > 0$ 이고, n 은 침투 절점에 가장 가까운 금
형 요소의 한 점에서의 수직 단위 벡터이다. 또한 k 는
접촉강성(contact stiffness)으로서

$$k = \alpha K \frac{A^2}{V} \quad (9)$$

으로 계산된다(14). 이 때 α 는 척도 계수(scale factor),
 K 는 체적 탄성계수, A 는 요소면적 그리고 V 는
요소 체적을 각각 나타낸다.

그런데 식 (8)에서 d 의 절대값이 커지면 과도한 접촉
력이 접촉 절점에 가해지게 되어 접촉 상태가 불안정해
지고 이에 따른 잡음이 발생한다. 이로부터 박판 요소
내부에 불필요한 응력파(stress wave)가 발생하여 응력
완화(stress relaxation) 현상이 과도하게 일어나는 등 해

석 결과의 신뢰도가 떨어지는 문제점이 발생한다. 특히 블랭크 홀더와 다이와의 양면 접촉이 일어나는 제품의 플랜지 부분에서는 이같은 현상이 더욱 심하게 나타난다. 이러한 잡음 발생을 억제하기 위해 접촉 감쇠 모델을 도입한다. 즉, Fig. 2의 (b)처럼 접촉계를 일자유도(One degree of freedom) 진동계로 모델링한다. 이럴 때 감쇠력은 다음과 같다.

$$f^{damp} = c(v^r \cdot n)n \quad (10a)$$

$$v^r = v^s - v^m \quad (10b)$$

여기서 $v^r \cdot v^s \cdot v^m$ 은 각각 상대 속도, 접촉 절점 속도, 접촉 절점에 가까운 금형 요소의 속도를 나타낸다.

임계 감쇠비(fraction of critical damping) ζ_c 를 파라미터로 도입하면 감쇠 계수 c 는 일자유도 진동계에서 다음과 같이 표현한다⁽¹⁵⁾.

$$c = 2\zeta_c \omega_n m \quad (11a)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11b)$$

여기서 m 은 절점의 질량을 나타낸다. 따라서 식(3)은 접촉력 및 접촉감쇠력을 부가하여 다음과 같이 된다.

$$M\ddot{x} = f^{ext} - f^{int} + \{ dk - 2m\omega_n(v^r \cdot n)\zeta_c \}n \quad (12)$$

3. 실험

3.1 실험재료 및 인장실험

실험재료로는 주방용기에 사용되어지고 있는 클래드 판재로 열전도성이 우수한 STS304-A1050-ST304를 사용하였으며, Table 1에는 이들 단일판재들의 화학성분을 나타내고 있고, 실험용 판재는 풀립처리를 하지 않고, 압연방향에 따라 0°, 45°, 90° 방향으로 각각 인장시편을 3개씩 준비하여 인장시험을 하여 평균치를 구하였으며 이들에 대한 결과를 Table 2에 단일판재와 클래드

판재의 두께 및 기계적 물성치를 나타내었다.

클래드 판재로 사용되는 단일판재인 스테인리스 STS304 판재와 STS430 판재의 인장강도는 클래드 판재보다 높은 인장강도를 나타내고 있는 반면 알루미늄 A1050-O 판재의 경우엔 클래드 판재보다 낮은 인장강도 값을 나

Table 1 Chemical composition of test materials

Materials	Chemical composition (wt %)									
	Si	Fe	Cu	Mn	P	S	Ti	C	Cr	Ni
A1050-O	0.124	0.235	0.002	0.003	-	-	0.12	-	-	-
STS304	0.048	-	-	1.09	0.025	0.002	-	0.046	18.33	8.16

Table 2 Mechanical properties of test materials

Materials	STS 304	A1050-O	CLAD 304(inner) A1050-O 304(outer)
Thickness (mm)	0.4	2.0	0.39 1.22 0.39
Micro vickers hardness (Hv)	189	21.8	228.6 44.1 232.3
Tensile strength (MPa)	645.8	68.6	324.4
Elongation (%)	48.7	43	58.7
Yield stress (MPa)	271.5	27.5	147
Elastic modulus (MPa)	2.1E5	7.3E4	-
Poisson ratio	0.30	0.33	-
Specific gravity	7.83	2.77	-
Lankford value (R)	0.9125	0.535	-

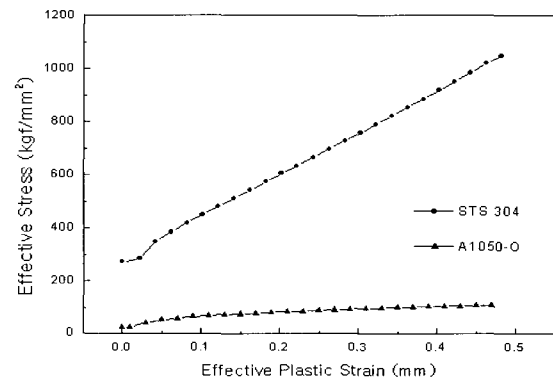


Fig. 3 Effective stress - effective plastic strain curves for STS304 and A1050 material

타내고 있고, 연신율은 단일판재보다 클래드 판재가 높게 나타나고 있다.

Fig. 3에는 인장시험에 의해서 구해진 응력-변형률 선도를 표시하였다.

Table 3 Size of die components in deep drawing

Parts	Material	Size (mm)	Rp (mm)	Rd (mm)	Clearance (mm)
Punch	STD 11	∅40	10	-	4
Die	STD 61	∅48	-	10	

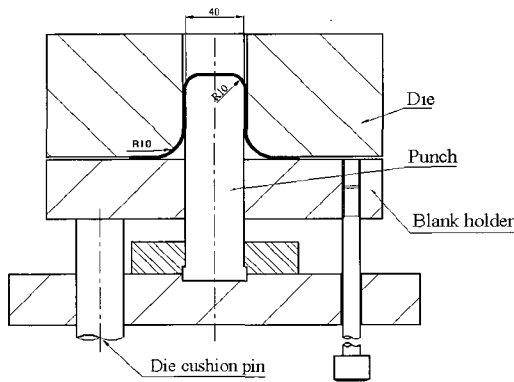


Fig. 4 Schematic view of drawing die

3.2 드로잉금형 및 주변장치

직경 40mm의 원형컵 성형을 위한 금형부품 설계기준이 Table 3에 나타나 있고, 이를 위한 조립단면도가 Fig. 4에 주어져 있다.

3.3 성형성 실험

실험은 램의 하강속도가 11.2mm/sec인 200톤 유압프레스에 드로잉 금형을 장착하고 틸새, 펀치코너반경(Rp) 및 다이코너반경(Rd), 블랭크홀딩력(3ton), 드로잉속도와 시편의 크기를 ∅90mm로 일정하게 고정시킨 후, 성형 깊이만을 4단계로 변화시키면서 드로잉 실험을 하였다. 드로잉 작업에서의 윤활제로는 내열성과 윤활성이 양호하고 마찰계수는 0.12인 테프론(Teflon) 필름¹⁶⁾을 시편의 양면에 고르게 접착하여 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 해석과정

해석은 외연적 유한요소법을 사용하여 개발된 박판성형해석 전용 프로그램인 Z-Stamp와 앞에서 수식화 된 적층셀요소를 채용하여 수행하였다.

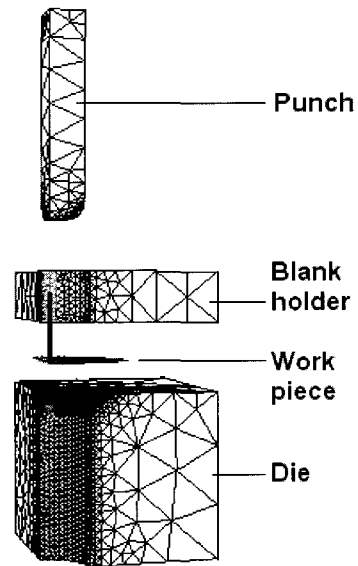


Fig. 5 Mesh for deep drawing of clad sheet

실험에서 4가지의 깊이에 대하여 결과를 분석하였으므로 해석에서도 이에 맞추어 해석결과를 도출하였다. 금형 및 소재의 형상을 CAD용 소프트웨어인 Pro-Engineer를 이용하여 생성한 뒤 Pro/Mesh로 메쉬를 생성하였으며, 이에 대한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 해석시에 펀치의 성형속도는 동적효과가 크게 영향을 주지 않도록 10m/sec의 속도로 수행하였으며 성형깊이가 가장 깊은 37.3mm의 경우에 펜티엄III컴퓨터 (P-III 800Hz) 시스템에서 약 10분정도의 해석시간이 소요되었으며, 해석 시스템에 인스 판재는 2개의 적분점을, 알루미늄판재는 3개의 적분점을 각각 사용하였다.

4.2 두께분포 결과

STS304-A1050-ST304 판재를 펀치의 성형 스트로크에 따라 성형 된 제품이 Fig. 6에 주어져 있다. STS304-A1050-ST304 클래드 제품의 두께변화를 편

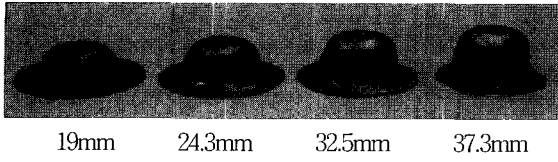


Fig. 6 Drawn cups at each forming stroke

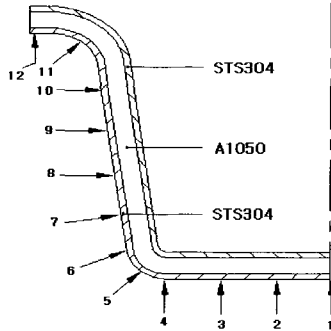
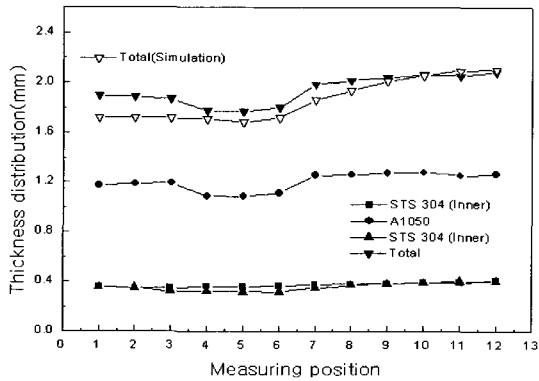
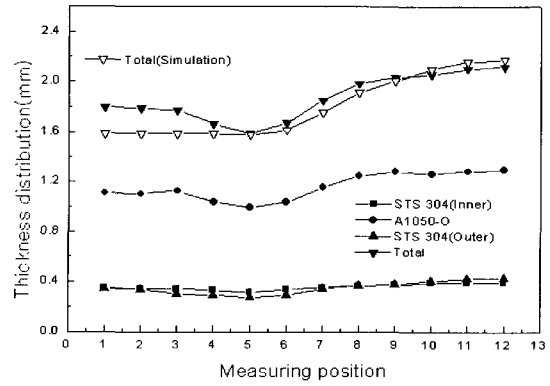


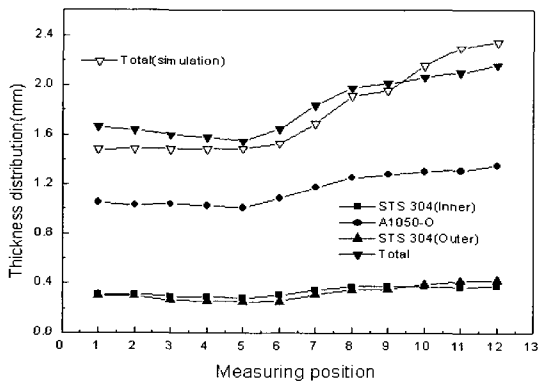
Fig. 7 Thickness measuring position of drawn circular cup



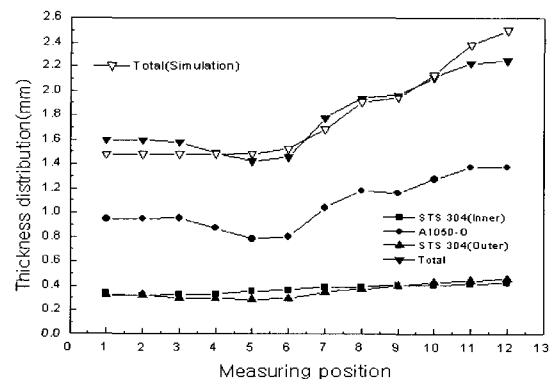
(a) When stroke is 19mm



(b) When stroke is 24.3mm



(c) When stroke is 32.5mm



(d) When stroke is 37.3mm

Fig. 8 Thickness distribution of circular cups at each forming stroke

치 스트로크 변화에 따라 Fig. 7에서와 같이 컵 밑면을 원점으로 하여 5mm 간격으로 두께를 측정하였을 때의 결과가 Fig. 8에 주어져 있다.

그림에서 검은 점은 클래드재 각각의 소재 두께와 전체 두께를 표시하는 것이고 흰색의 삼각형은 클래드재 전체 두께의 이론 해석 결과를 나타내고 있다.

펀치 바닥부에서 제품의 두께는 성형단계가 깊어짐에 따라 점점 얇아지며, 측벽부와 플랜지부로 올라갈수록 두께가 두꺼워 짐을 알 수 있다. 펀치코너 반경부에서의 두께변화는 스테인리스소재보다 알루미늄의 소재에서 크게 얇아졌으며 스테인리스의 두께변화는 성형 깊이에 대해 거의 변화가 없지만 플랜지 부위는 두꺼워지고 있다.

전체적으로 클래드 제품의 두께를 살펴보면 중간층의 알루미늄 소재의 두께 변화 폭이 크게 변화하였다. 대체적으로 클래드판재 전체 두께분포는 스트로크 위치에 관계없이 이론과 실험이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

전체적으로 드로잉 하중과 두께분포를 비교 할 때 이론 해석 결과와 실험결과는 대체적으로 좋은 일치를 보여 주고 있으나 일부 차이점도 나타나고 있다.

실제 플랜지 부위에서는 블랭크 압력에 의해 두께가 줄어들는데 해석에서는 셀요소를 사용할 때 수직응력이 영으로 가정하였으므로 두께가 실제보다 두꺼워지게 된다. 또한 적층 셀요소에서 부여된 층간의 구속조건이 실제 변형에서는 층간의 상대 유동이 다소 발생하면서 특히 편치 밀면부에서는 이론적으로 더 얇아져서 실제와 차이가 나게 되는 한 원인이 된다.

5. 결 론

지금까지 클래드 판재의 가공에 대한 연구는 주로 실험적인 연구가 주로 수행되었으며 이론적인 연구는 클래드재의 복잡한 변형특성 때문에 제한적으로 이루어져 왔다. 본 논문에서는 클래드재의 축대칭 디프 드로잉공정에 대하여 실험 및 유한요소법에 의한 해석을 수행함으로써 변형 특성에 대한 종합적인 고찰 및 이론적인 해석 방법의 유효성에 대하여 연구하였다.

적층셀을 이용한 외연적유한요소법에 의한 3차원 해석 방법을 개발하여 클래드재의 변형해석에 적용하였다. 본 연구에서 적용한 유한요소법 해석은 대체적으로 판재의 변형을 잘 표현하였으나 클래드재의 복잡한 변형특성 및 셀 요소 자체의 한계로 인해 부분적으로 정확도가 부족한 것을 파악하였다.

앞으로 이러한 점을 개선하고 복잡한 형상을 가진 성형해석에 적용하여 본 방법에 대한 유효성이심도 있게 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 川並高雄, 2001, “クラッド材の製造技術の現況と展望”, 塑性と加工, 第42卷, 第482號, pp. 168~172.
- (2) 木内學, 杉山澄雄, 2001, “半熔融壓延・壓接法による積層型粒子強化複合板材の製造”, 塑性と加工, 第42卷, 第482號, pp. 173~178.
- (3) S. Imatani, K. Yamaguchi, N. Takakura, T. Kawaguchi and C. Y. Yin, 1993, “Mechanical response of laminated sheet metals”, Advanced Technology of Plasticity, Proceeding of the 4th Int. Conference on Technology of Plasticity, Beijing, China, pp. 1691~1694.
- (4) 木村秀途, 2001, “クラッド厚鋼板の製造技術”, 塑性と加工, 第42卷, 第482號, pp. 211~217.
- (5) K. Shinagawa, T. Takeoka, K. I. Mori and K. Osakada, 1993, “Finite element simulation of warm deep drawing of type 304 stainless steel sheet with deformation induced transformation”, Journal of the JSTP, vol 34, no 390, pp. 794~799.
- (6) J. H. Kim, C. S. Choi, B. Y. Jeong and G. H. Lee, 1993, “Deep drawing of stainless steel in warm working condition using a single crank press”, Advanced Technology of Plasticity, Proceeding of the 4th Int. Conference on Technology of Plasticity, Beijing, China, pp. 1691~1694.
- (7) 류호연, 배원택, 김종호, 김성민, 구본영, 금영탁, 1999, “알루미늄 합금박판 비등온 성형공정의 유한요소 해석 및 실험적 연구(제1부 실험)”, 한국소성가공학회지, 제8권, 제2호, pp. 152~159.
- (8) 류호연, 김영은, 김종호, 2000, “스테인리스-알루미늄 클래드 강판재의 원형킵 온간 성형성 연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제1호, pp. 87~93.
- (9) Yoshida, F., Mori, K., Ohmori, M. and Okada, T., 1993, “Deep Drawing of Copper/Steel Sheet Metal Laminate,” 4th ICTP, pp. 1657~1662.
- (10) 吉田總仁, 1998, “積層板のプレス加工,” 塑性と加工 (日本塑性加工學會誌), 第39卷, 第454號, pp. 1102~1106.
- (11) Liu, J., Yamaguchi, K., Imatani, S. and Takakura, N., 1996, “Investigation on Variation of Drawability of Laminated Sheet Metals Using FEM Simulations,” 5th ICTP. pp. 699~702.
- (12) 이상욱, 양동렬, 정완진, 1999, “접촉감쇠의 식화 및 외연적 유한요소법에의 적용”, 한국소성가공학회지, 제8권, 제3호, pp. 306~312.
- (13) R. D. Cook, D. S. Malkus and M. E. Plesha, 1989. Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 3rd ed., John Wiley & Sons. New York
- (14) J. O. Hallquist, G. L. Goudreau and D. J. Benson. 1985. “Sliding Interfaces with Contact-Impact in Large-Scale Lagrangian Computations”. Compu. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 51. pp.107~137.
- (15) F. S. Tse, I. E. Morse and R. T. Hinkle, 1987. Mechanical Vibrations. 2nd ed., Allyn and Bacon Inc., Boston
- (16) (주) 진양, 2001, Teflon 기술자료, 종합카다로그