

스트레치포밍을 이용한 랜딩기어의 내면벽에 대한 공정설계

강범수* · 임중연** · 배진영***

(1997년 1월 28일 접수)

Process Sequence Design of the Inner Skin of Landing Gear Using Stretch Forming Process

Beom Soo Kang, Joong-Yeon Lim and Jin Young Bae

Abstract

This paper is concerned with the design of process sequence to form the inner skin of landing gear. The inner skin of landing gear is a part of airplane which is known to be difficult to form its shape. Our study investigates the production method of inner skin and examines the design criteria by three dimensional elastic-plastic finite element method. Based on the results of simulation, design strategy for improving the process sequence is developed using stretch forming process. The final product of inner skin is produced in multi-stage operations with annealing treatments to meet the required capacity of press. The numerical results show that the newly designed process can produce the required part successfully within the design criteria.

1. 서 론

박판금속을 성형하여 만들어 낼 수 있는 제품에는 많은 종류가 있고 또한 응용범위도 매우 넓지만 그 성형과정에 대한 해석을 하기 위하여는 많은 지식을 필요로 한다. 박판금속의 변형형태는 크게 굽힘, 스트레칭, 딥드로잉으로 나눌 수 있는데 일반적으로 한 두가지 변형형태가 우세하게 나타나고 박판성형 중 주로 발생하는 결함에는 파단과 주름이 있다.^(1,2) 박판금속의 해석에는 사용하는 요소의 종류에 따라 박막해석, 셸해석, 연속체해석등이 있는데 박막해석은 계산시간이 적게들지만 굽힘을 고려할 수 없다는 단점이 있고 연속체해석은 해석이 간단하다는 이점이 있지만 3차원 문제와 같은 해석에서는 계산시간이 너무 길다는 단점이 있다. 이에 반해 셸해석은 박막해석에 굽힘

효과를 추가하여 단점을 보완하고 연속체해석보다는 계산 시간을 줄일 수 있는 해석으로 광범위하게 이용되고 있다. Wang 과 Tang⁽³⁾ 셸굽힘요소를 발전시켜 축대칭문제와 평면 변형률 문제의 해석에 적용하였다. Tatenami⁽⁴⁾ 등은 유한요소법과 유한차분법을 혼합 사용하여 실린더 컵의 딥드로잉을 해석하였으며 펀치 곡률 부에서 굽힘 효과에 의해 두께가 급속히 감소하는 것을 고찰하였다. Zienkiewicz⁽⁵⁾는 점소성 유동이론을 이용하여 마찰과 이방성을 고려한 축대칭 스트레칭, 사각형 박판의 스트레칭을 해석하였다. Wagner 등⁽⁶⁾은 스트레칭과 딥드로잉 문제에 박막, 셸, 연속체요소를 각각 사용하여 그 결과를 비교하였다. Honecker와 Mattiasson⁽⁷⁾은 반구형 펀치 딥드로잉을 ABAQUS와 DYNA3D를 사용하여 해석하고 비교하였으며 H. B. Shim⁽⁸⁾은 Degenerated 셸요소를 이

* 부산대학교 항공우주공학과
** 동국대학교 기계공학과
*** 삼성항공 우주항공연구소

용하여 사각형캡과 실린더캡 모양의 드로잉을 해석하였다. 또한 Lim⁹⁾은 셀요소를 사용하여 다단계 박판 성형공정을 해석하고 개선된 공정을 제시하였다. 이외에 최근 박판성형에 대한 3차원 유한요소해석결과가 많이 있다.^{10,11)}

본 연구에서는 항공기 착륙장치의 대표적인 부분품의 하나인 난성형 내면벽의 공정설계에 대한 것을 다루었다. 최근 국내에서 차세대 항공기 제작사업(KFP)의 일환으로서 부품국산화를 하기 위한 노력이 계속되고 있으며 F-16 랜딩기어 도어부분의 내면벽도 그 개발 품목중의 하나이다. 하지만 형상이 복잡함과 동시에 박판금속이므로 성형 후에 탄성회복이 일어나고 금속성형의 한계성, 보유하고 있는 프레스용량의 한계 등을 동시에 고려해야 하므로 그 해석이 대단히 복잡하다. 두꺼운 판재를 예비성형체로서 사용한 내면벽(Inner skin)의 성형공정을 3차원 셀요소로 모델링한 후 탄소성 유한요소법을 적용하여 해석 및 설계를 하였다.

2. 해석조건 및 설계방법

주 랜딩기어 도어의 내면벽에 대한 초기소재는 Al 1018로서 2.29 mm 두께를 갖는 두꺼운 판재를 사용하였다. Fig. 1에 주 랜딩기어 도어의 내면벽에 대한 3차원 도면을 나타내었다. 그림에서 보듯이 전체를 시뮬레이션 하는 것은 시간이 너무 많이 걸리므로 최종제품의 전체구간 중의 한 구간을 선택하여 해석하였고 재질의 특수처리 및 예비스트레치(pre-stretch)에 의한 소성변형으로 이방성의 영향을 줄였기 때문에 해석에서의 이방성 영향을 무시하였다. 선택된 제품의 Fig. 1의 A 부분에 대한 치수와

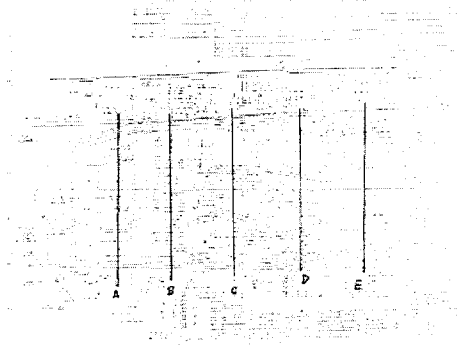
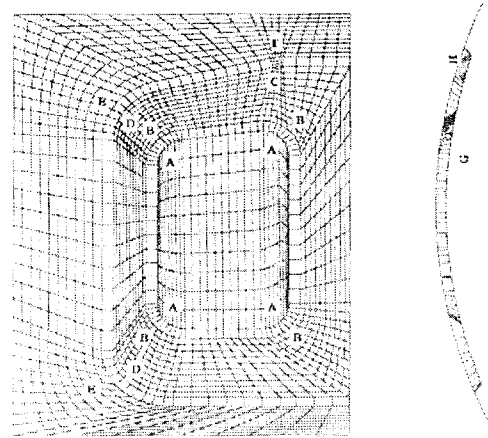


Fig. 1 The drawing of Inner Skin of Landing Gear



unit : cm

	A	B	C	D	E	F	G	H
폭	1.58	3.58	2.72	3.02	4.32	3.42	30.03	34.9

Fig. 2 The shape and dimension of region A

형상은 Fig. 2와 같다. 소재사이의 마찰조건에서 Al 합금의 내간공정에 쓰이는 마찰상수 m 이 0.05 ~ 0.15¹²⁾이므로 그 중간 값인 0.1을 사용하였으며 소재의 유효응력-변형률 관계는 $\bar{\sigma}/Y_0 = (1 + 50.0\bar{\epsilon})^{0.26}$ 를 사용하였다.

본 연구에서는 F-16의 주 랜딩기어 도어의 내면벽을 상용 유한요소 패키지인 Marc를 이용하여 3차원으로 해석하였다. 유한요소법을 활용한 2차원 해석프로그램은 이미 잘 정립되어 있고 이를 이용하여 셀 노우징, 블레이드, 차동 사이드 기어 등의 해석에 널리 사용되어 왔으며 주 랜딩기어 도어의 내면벽을 해석한 예도 있으나 대략적인 경향만 살펴본 것이므로 3차원 모델링기법을 이용하여 좀 더 실제에 가까운 현상을 알아내고자 한다.

3. 직접성형법에 의한 제작공정에 대한 해석

예비스트레치가 없는 기존의 판재성형에 의한 직접성형법에 사용된 다이와 소재의 3차원 형상은 Fig. 3과 같다. 전체제품에서 선택된 구간 A에서 B-B' 단면은 나머지 제품과 연결된 부분이므로 이에 알맞은 경계조건을 부여하였다. 즉 절단면의 법선방향변위를 고정시켰다. Fig. 4는 펀치를 최대 내렸을 때의 형상을 나타낸다. 소재의 변화를 잘 보기 위하여 다이를 그림에서 생략하였다. Fig. 4는 최종성형후 다이와 구속이 그대로 유지된 상태에서의 변형형상이고 Fig. 5는 양쪽다이와 구속조건을 제거하여 탄

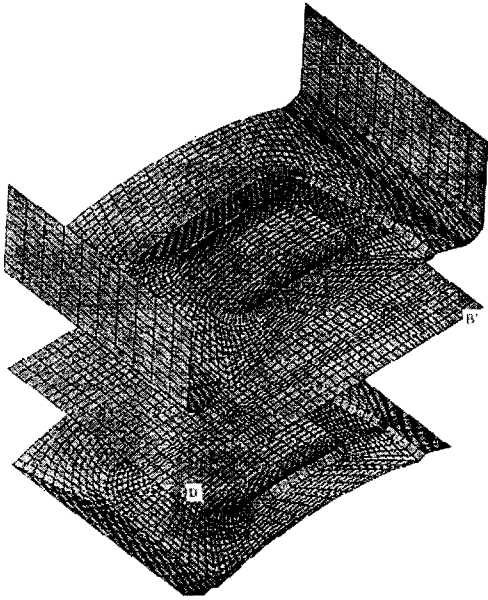


Fig. 3 3D modeling of workpiece and die for direct forming process

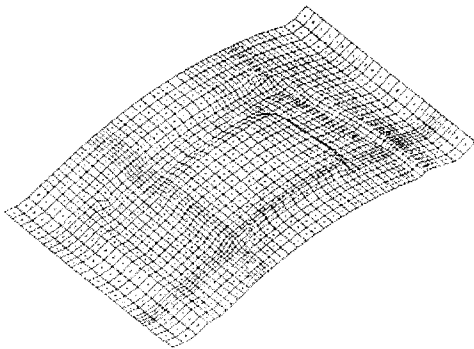


Fig. 4 The shape of workpiece after final forming stage

성회복이 일어난 후의 형상변화이다. 그러나 이 두 그림에서 탄성회복의 효과를 정확하게 알 수 없어서 Fig. 6과 같이 C-C 단면에서의 변형을 비교하여 Fig. 7에서 비교하였다. 박판성형은 형상의 변화가 크지만 재료가 받는 변형률은 그리 크지 않아서 성형과정에서 판의 두께와 표면적의 변화는 크지 않게 되므로 탄성변형에 기인하는 탄성복원이 중요한 설계변수가 된다. 탄성영역내에서 굽힘변형

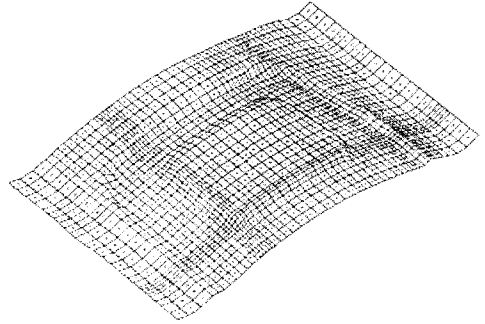


Fig. 5 The shape of workpiece after springback

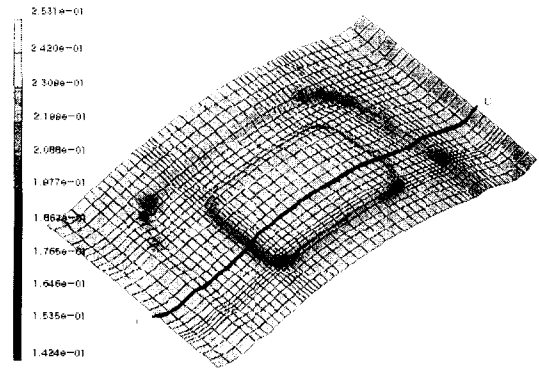


Fig. 6 The thickness distribution of final product and c-c' section

을 준 후, 가해진 모멘트를 제거하게 되면 굽힘곡률이 완전히 탄성회복하게 된다. 그리고, 소성영역까지 연장시킨 후 모멘트를 제거하면 탄성회복에 의하여 곡률반경이 모멘트를 가지고 있는 상태에 비하여 커지게 된다. 이러한 현상을 탄성회복이라 하며 이에 대해서는 1941년 Sturm과 Fletcher^[13]가 연구한 바 있고, 1942년 Chapmand^[14]이 탄성회복에 관한 기본개념을 정리하였다. 그 후 Gardiner^[15], Alexander^[16], Shaffer와 Ungar^[17], Duncan과 Bird등^[18]에 의해서 계속 연구되어 왔으며 최근에도 계속 연구되고 있다.^[19,20]

소재의 양쪽 끝이 위로 올라간 부분은 시뮬레이션의 편의상 윗 다이를 연장시킴으로 인하여 발생한 것으로 실제 공정에서는 발생하지 않음으로 무시한다. 탄성회복의 정도를 알아보기 위하여 소재의 중간단면 Fig. 6에 표시된

C-C'의 형상변화량을 Fig. 7에서 보여주고 있다. 끝부분을 무시하고 탄성변형 전후의 변화를 살펴보면 전체적인 곡률의 변화와 더불어 제품의 부분적인 곡률 부위에서도 탄성변화가 발생함을 알 수 있다. Fig. 8에서는 중간단면인 C-C'의 두께분포를 보여주고 있다. 초기의 2.3 mm의 두께에서 가장 감소가 심한 부분의 값이 1.8 mm이다. 실제 제품에서 요구하는 허용 최소두께가 1.90 mm임을 비추어 보면 두께 1.8 mm인 부분에서는 네킹이나 균열 등의 결함이 발생될 수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 불안정성결함이 성형과정에서 발생하므로 직접성형법으로는 주 랜딩기어 도어의 내면벽을 결함없이 성형할 수 없다는 것이 밝혀졌다.

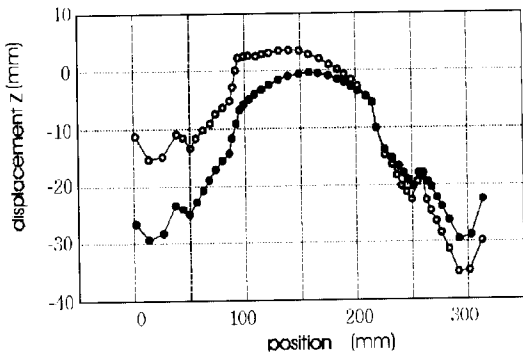


Fig. 7 The change of shape at c-c' section by springback (direct forming process)

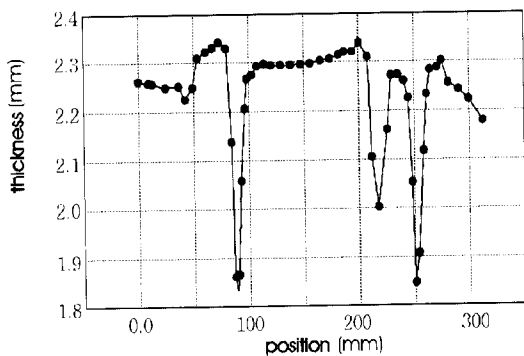


Fig. 8 The thickness distribution of c-c' section at region A (direct forming process)

4. 예비 스트레치성형을 포함한 공정설계

박판성형공정중에서 큰 곡률반경을 가진 곡면을 성형할

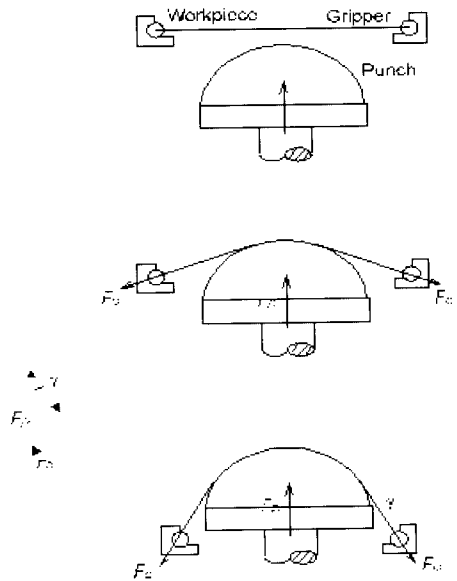


Fig. 9 Schematic diagram of stretch forming process

때는 굽힘작업만으로는 판재가 받는 변형상태가 대부분 탄성영역내에 있게 되므로 하중을 제거하면 원상으로 복귀하게 된다. 이것을 방지하기 위하여는 판재가 받는 변형상태를 소성영역으로 연장할 필요가 있으며 이를 위하여 스트레칭이 필요하게 된다. 즉 스트레칭은 Fig. 9에서와 같이 박판금속을 공구위에 놓고 양끝을 잡아당기면서 펀치를 밀어 올림으로써 성형하는 작업으로서 항공기 기체 부품의 가공에 널리 이용되고 있다. 굽힘이나 드로잉공정에서는 큰 두께 변화가 수반되지 않지만 스트레칭의 경우에는 판상의 두가지 주 응력이 인장방향으로 작용하기 때문에 필연적으로 두께감소가 일어난다. 따라서 드로잉공정에서는 주로 주름이 문제가 되는 반면에 스트레칭공정에서는 과단이 문제가 된다. 그러므로 직접성형법의 문제점을 보완한 스트레칭공정에서는 과단 문제도 함께 고려해야 한다. 또한 주 랜딩기어 도어의 내면벽 성형 공정설계를 위하여 필요한 프레스용량도 보유하고 있는 프레스의 한계용량(100 톤) 보다 초과하지 않도록 최대 성형하중에 대한 고려도 함께 하면서 공정을 설계하여야 한다.

3차원 탄소성 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션한 위치는 Fig. 1의 직접성형법에서 선택했던 구간 A와 같고 B-B' 단면은 단면의 법선방향 변위를 고정시켰다. 나머지 양쪽 끝부분은 스트레칭공정에 알맞도록 구속시켰다. 최종제품의 탄성회복을 방지하기 위하여 스트레칭성형에서

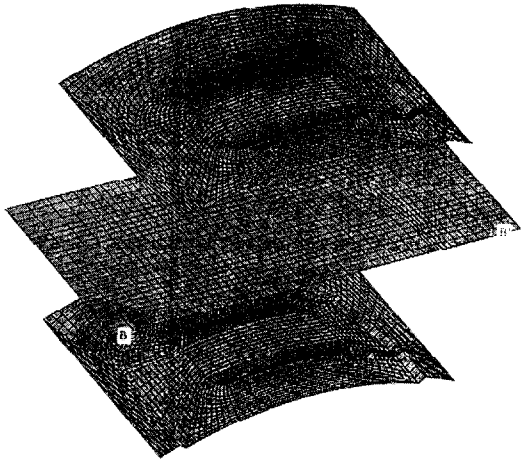


Fig. 10 3D modeling of workpiece and die for stretch forming process

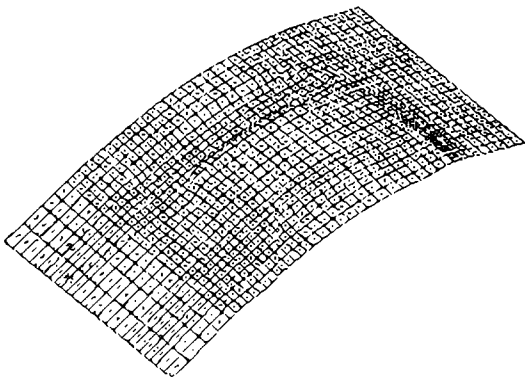


Fig. 11 The shape of workpiece after stretch forming process

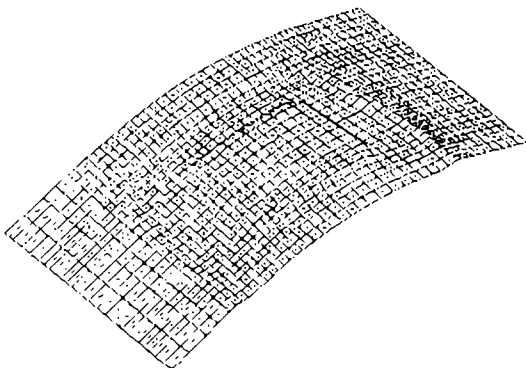


Fig. 12 The shape of workpiece after final forming stage

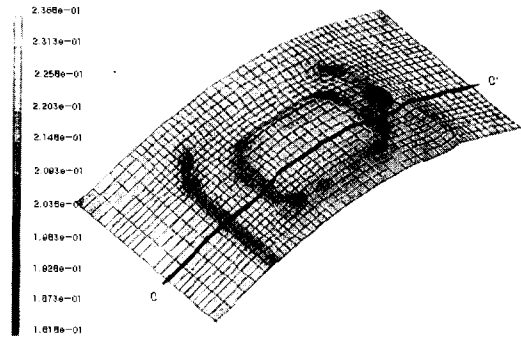


Fig. 13 The thickness distribution of final product by stretch forming process

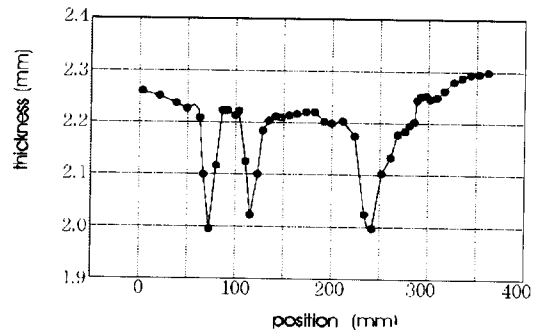


Fig. 14 The thickness distribution of c-c' section at region A (stretch forming process)

예비성형량을 조절하여야 하므로 적절한 스트레치량을 찾아내기 위하여 동일 재질의 시편으로 인장시험을 수행하였다. 그 결과로서 예비스트레치량은 50.8 mm(2% 소성 변형량)로 정하였다.

Fig. 10은 스트레치 성형법에서의 소재와 다이를 모델링한 결과이다. Fig. 11은 예비스트레치량만큼 미리 스트레치 시킨 후의 소재의 형상을 보여주고 있다. 스트레칭으로 응력상태를 소성영역까지 연장시킨 후 위 다이를 내려 최종성형한 모습이 Fig. 12이다. 역시 그림에서 소재의 변형이 잘 나타나도록 다이는 생략하였다. Fig. 13은 최종제품의 두께분포를 나타내고 있다. 응력의 분포가 곡률부위에서는 약간 큰 값을 가지고 다른 부분에서는 거의 균일한 상태라는 것을 알 수 있다. 또한 두께변화도 비대칭 부분의 곡률부위에서 2.0 mm로 가장 적은 값을 가지며 나머지 부분은 대체적으로 균일한 두께분포를 보인다. Fig. 13에서 표시한 C-C' 단면의 두께분포를 Fig. 14에 나타내었다. 최소허용두께는 1.9 mm 이므로 여기서 스

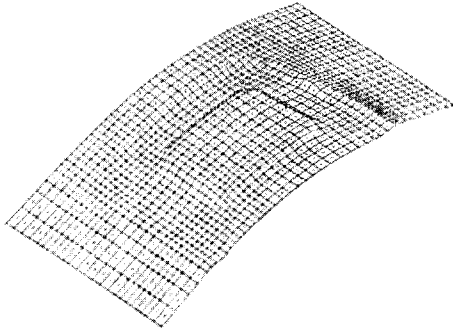


Fig. 15 The shape of workpiece after springback

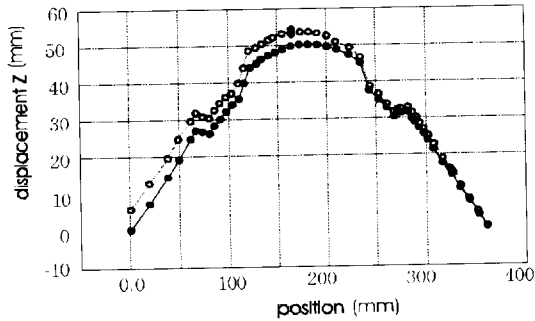


Fig. 16 The change of shape at c-c' section by springback (stretch forming process)

트레칭에 의한 파단은 발생하지 않았음을 알 수 있다. Fig. 15는 탄성회복 효과를 보기 위하여 양쪽다이스와 구속 조건을 제거한 것이다. Fig. 12와 비교해서 전체적인 큰 변화는 보이지 않는다. 좀 더 정확한 양상을 보기 위하여 소재의 C-C'의 단면에서 발생한 최종성형 후와 탄성회복 이후의 형상변화를 Fig. 16에 나타내었다. 전체 곡물은 약간의 변형이 있었으나 주안점을 두고 있는 부분적 곡물 부위에서는 변화가 거의 없었다. 그러므로 실험으로부터 구한 예비 스트레치량이 적절하여 탄성회복이 일어나지 않았음을 알 수 있었다. 하지만 구간 A의 최대성형하중이 15.6톤 이므로 전체제품을 100톤의 한계용량을 가진 프레스로 성형하기 위해서는 구간 A의 최대성형하중이 10톤 이내 이어야 하므로 새로운 공정설계가 요구된다. 이 같은 결과는 2차원 유한요소 해석에 의한 결과와도 일치하는데 Fig. 17은 주 랜딩기어 도어의 내면벽의 최종제품을 A ~ E 다섯구간으로 나눈 것 중(Fig. 1 참조) B 구간에 대하여 2차원 시뮬레이션한 결과를 나타내

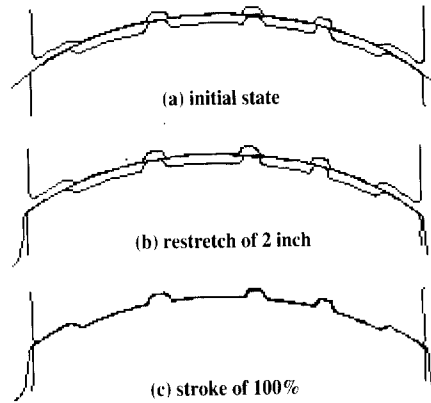


Fig. 17 Two dimensional simulation of stretch forming process

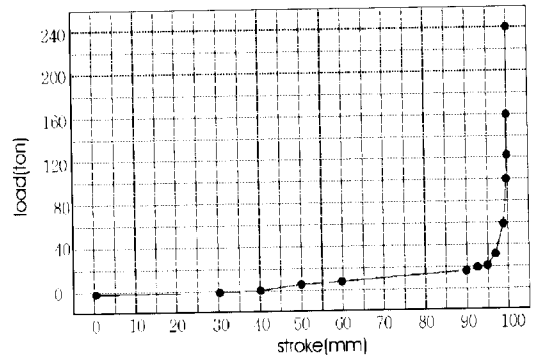


Fig. 18 Maximum forming load of two dimensional simulation

고 있다. 다이에는 미 충전 부위없이 제품의 성형이 잘 이루어졌고 Fig. 16에서와 같이 전체곡물에서 탄성회복현상이 약간 발생하였다. 여기서 각 단면의 2차원의 하중은 단위 폭당의 값이므로 각각의 폭을 곱하여 전체제품 성형에 대한 하중으로 환산하면 Fig. 18에 나타나 있듯이 240톤의 최대성형하중이 계산되어 나온다. 따라서 2차원, 3차원 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이 현재의 성형법으로는 보유하고 있는 100톤 프레스의 한계용량을 초과하므로 다단계 공정으로 주 랜딩기어 도어의 내면벽을 성형하도록 설계하였다.

5. 다단계공정에 의한 최종설계

일반적으로 다단계 공정이란 여러 개의 공정이 복합되어 각기 다른 다이를 사용한 공정이지만 여기서는 열처리

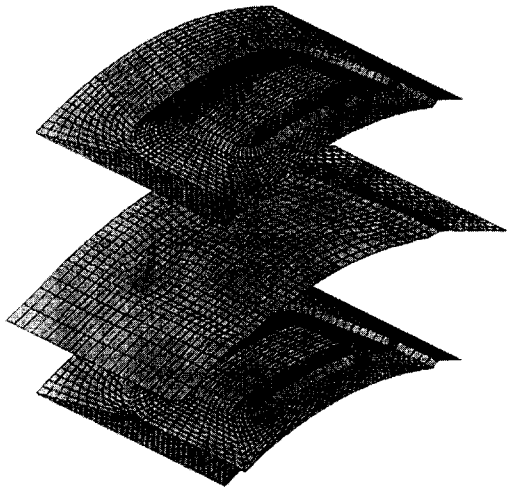


Fig. 19 3D modeling of workpiece and die after heat treatment process

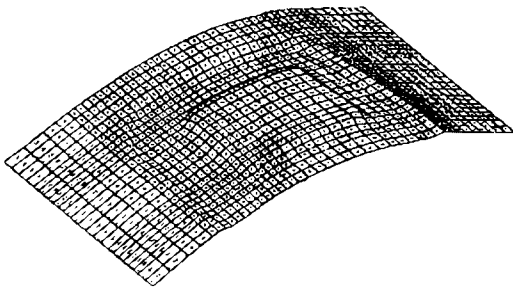


Fig. 20 The shape of workpiece after final forming stage

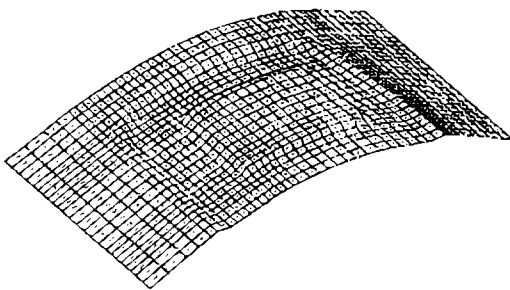


Fig. 21 The shape of workpiece after springback

공정을 포함하여 동일한 다이로 여러번 성형함으로써 프레스 한계용량의 부족을 해결하고 정형의 제품을 생산하도록 설계하였다. 다이와 소재의 3차원 모델링은 Fig. 10

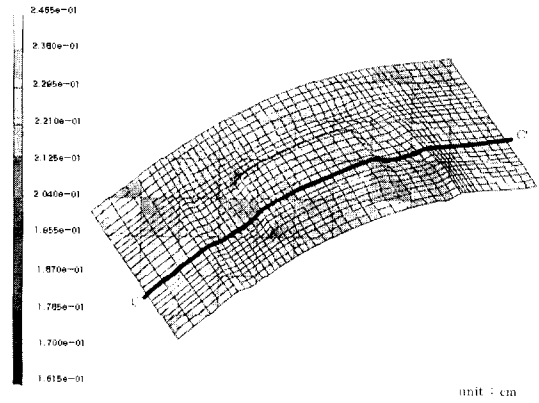


Fig. 22 The thickness distribution of final product

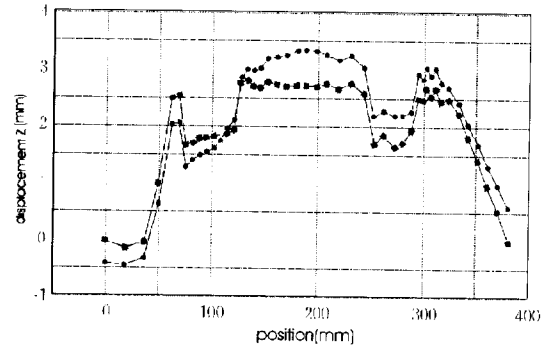


Fig. 23 The change of shape at c-c' section by springback (multistage forming process)

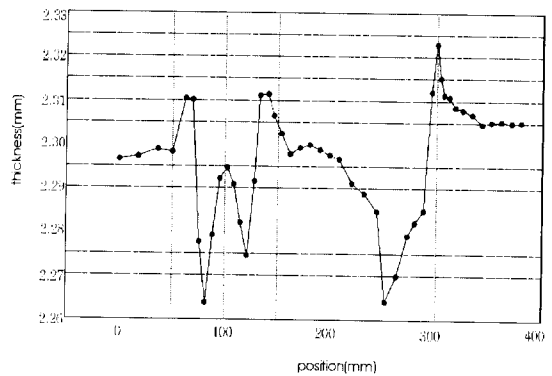


Fig. 24 The thickness distributim of c-c' section at region A (multistage forming process)

에서와 같고 예비 스트레치도 50.8 mm 까지 시켰다. 또한 최대성형하중이 한계하중보다 작은 9.6 톤이 될 때까지 성형한 후 소재를 다이에서 꺼내어 열처리를 행하여 소

재의 잔류응력을 제거하였다. 이러한 소재를 다시 모델링한 것이 Fig. 19에 나타나 있다. Fig. 20는 최종성형후의 형상을 보여주며 Fig. 21은 탄성회복 후의 형상을 각각 보여준다. 앞에서와 마찬가지로 C-C' 단면을 따라 탄성회복정도를 나타낸 Fig. 22를 보면 스트레치성형법보다는 탄성회복이 약간 크게 일어남을 알 수 있다. Fig. 23에 최종제품의 두께분포를 나타내었고 Fig. 24는 구간 A의 C-C' 단면에서의 두께분포를 나타낸 것이다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 예비 스트레치를 포함한 다단계 성형법은 곡률부위의 급격한 두께감소만 피할 수 있다면 제한된 프레스하중 이내로 최종제품을 성공적으로 성형해 낼 수 있는 것이다.

6. 결 론

난성형 항공기 부품의 하나인 주 랜딩기어 도어의 내면 벽에 대한 제작공정 대하여 두께 2.29 mm의 판재를 예비성형체로 선택하여 탄소성 유한요소법을 이용한 해석 및 설계를 수행하였다. 2차원 시뮬레이션 결과로는 예측하기 힘든 복잡한 3차원 곡률부위의 성형정도를 3차원 시뮬레이션을 통하여 살펴볼 수 있었고 먼저 직접성형법에 의한 공정을 시뮬레이션 해 봄으로써 탄성회복과 두께감소 등이 주요한 설계변수임을 알아 낼 수 있었다. 이에 예비 스트레치 성형법을 적용하여 실험을 통한 적절한 스트레치량을 줌으로써 탄성회복의 효과도 방지하고 두께의 분포도 균일한 결과를 얻을 수 있었으나 프레스용량이 초과하는 문제점이 발생하였다. 따라서 직접성형법과 스트레치성형법의 시뮬레이션결과를 바탕으로 열처리 공정이 포함된 다단계 성형공정을 최종적으로 설계할 수 있었고 최대 성형하중이 프레스용량에서 초과하지 않으면서 제품 성형이 가능한 공정을 제시하였다. 이러한 예비 스트레치 공정을 포함한 다단계 성형법은 곡률부위의 급격한 두께감소에만 주의한다면 주어진 설계조건을 만족시키면서 정형에 가까운 최종제품을 생산할 수 있다.

참고문헌

- (1) K. Yoshida, 1959, "Classification and Systemization of Sheet Metal Press-forming Process", Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research, vol. 53, p.126.
- (2) W. Johnson and A. G. Mamalis, 1978, "Aspects of the Plasticity Mechanics of Some Sheet Metal Forming Processes", Hellenic Steel Publications, Thessaloniki, Greece.
- (3) N. M. Wang and S. C. Tang, 1986, "Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations", Proc. NUMIFORM '86 Conf., Gothenberg, Sweden, pp.71~76.
- (4) T. Y. Tatenami, Y. Nakamura and K. Sato, 1982, "An Analysis of Deep Drawing Processes Combined with Bending, in Numerical Method in Industrial Forming Processes", Edited by Pittman, J.F.T., Pineridge Press, Swanses, pp.687~696.
- (5) E. Onate and O. C. Zienkiewicz, 1983, "A Viscous shell Formation for the Analysis of Thin Sheet Metal Forming", Int. J. Mech. Sci., vol. 25, pp.305~335.
- (6) J. Hambrecht, S. Choudhry, J. K. Lee and R. H. Wagoner, 1989, "Numerical Study of two-dimensional Sheet Forming Processes using Bending, Membrane, and Solid Finite Element Models", Proc. NUMIFORM '89, pp.451~456.
- (7) A. Honecker and K. Mattiasson, 1986, "Finite Element Procedures for 3D sheet forming simulation", Proc. NUMIFORM '89, pp.457~463.
- (8) H. B. Shim, 1989, "An Elastic-plastic Finite Element Formulation of Single and Multi-Layered Degenerated Shells with Application to Sheet Metal Forming", Ph.D. Thesis, KAIST.
- (9) J. Y. Lim, 1993, "Process Sequence Design in Metal Forming by the Finite Element Method", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- (10) 이승연, 금명탁, 정관수, 박진무, 1994, "평면 이방성 박판성형공정의 3차원 유한요소해석", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제8호, pp.2113~2122.
- (11) 금명탁, 이승열, 안덕찬, 1995, "자동차판별 스텝핑 공정의 3차원 유한요소 시뮬레이션" KSAE 논문집, 3권 4호, pp.48~58.
- (12) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press.

- (13) R. G. Sturm and B. J. Fletcher, 1941, "Determining Springback", Product Engineering, vol. 12, pp.526~528.
- (14) F. B. Chapman, T. H. Hazlett and W. Schroeder, 1942, "Springback in Flanging", Product Engineering, vol. 13, pp.382~383.
- (15) F. Gardiner, 1957, "The Springback of Metals", Trans. ASME, vol. 79, pp.1~9.
- (16) J. M. Alexander, 1959, "An Analysis of the Plastic Bending of Wide Plate and the Effect of Stretching on Transverse Residual Stresses", Proc. Inst. Mech. Engrs., vol. 173, p.73.
- (17) W. Shaffer and E. E. Ungar, 1960, "Mechanics of Sheet-Bending Processes", J. Appl. Mech., Trans. ASME, p.34.
- (18) J. L. Duncan and X. Bird, 1978, "Sheet Metals Industries", p.1015 .
- (19) W. Johnson and T. X. Yu, 1981, "Springback After the Biaxial Elastic-plastic Pure Bending of a Rectangular Plate", Int. J. Mech. Sci., vol. 23, pp.619~630.
- (20) 이영규, 양동열, 이재진, 김석관, 1995 "정밀 전자부품의 성형 및 탄성회복의 유한요소해석에 의한 제품 정밀도 예측", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 (I), pp.427~431.