

## 홀확장 잔류응력 예측을 위한 유한요소해석

김 철\*·양원호\*\*·고명훈\*\*\*·허성필\*\*\*\*·현철승\*\*\*\*\*

### The Finite Element Analysis for Prediction of Residual Stresses Induced by Cold Expansion

Cheol Kim, Won-Ho Yang, Myung-Hoon Ko, Sung-Pil Heo and Cheol-Seung Hyun

**Key Words:** Cold Expansion(홀확장), Finite Element Analysis(유한요소해석), Residual Stress(잔류응력), Fastener Holes(체결홀)

#### Abstract

Cold expansion of fastener holes is a mechanical process widely used in the aerospace industry. This treatment leads to an improvement of fatigue behavior due to the developed compressive residual stresses on the hole surface. The residual stress profile depends on the parameters of cold expansion, which are, expanding rate, inserting direction of mandrel, material properties etc. and the method to confirm this profile is only measurement by X-ray diffractometer. Despite its importance to aerospace industries, little attention has been devoted to the accurate modelling of the process. In this paper, Two-dimensional axisymmetric finite element simulations have been conducted for the cold expansion in an aluminium plate in order to predict the magnitude and distribution of the residual stress and plastic deformation. Maximum compressive residual stress could be increase about 7 percent using the 2-step cold expansion method.

#### 1. 서 론

볼트와 너트 또는 리벳을 이용한 기계적인 결합은 항공기, 자동차, 선박 등에서 각 구조물들을 체결하는데 폭넓게 이용되고 있다. 이들 체결기구들은 조립과 분해가 용이할 뿐만 아니라 구조물에 작용하는 하중을 분산하거나 전달하여 주는 작용도 하게 된다. 그러나 이와 같은 체결방법은 결합을 위하여 가공된 홀 주위에서 응력집중 현상이 발생하여 부재의 피로수명을 감소시키는 단점이 있다.

이와 같이 피로하중이 작용하는 부재에 있어서 피로수명을 증대시키기 위한 여러 가지 방법이 제안되어 왔는데 대표적인 것이 쇼트피닝(shot peening)과 홀확장법(cold expansion method)이다. 이들 방법은 피로균열 발생이 예상되는 부위에 국부적으로 압축잔류응력을 발생시켜서 균열발생을 지연시키는 방법으로서 특히, 홀확장법은 70년대 초반 보잉사에서 도입한 이래 홀에서의 균열발생을 지연시키기 위한 방법으로 널리 이용되고 있다. 이 방법은 Fig. 1에 나타낸 것처럼 가공된 홀보다 조금 더 큰 테이퍼진 맨드렐(mandrel)을 홀에 삽입시켜, 홀을 재료의 항복강도 이상으로 팽창시켜줌으로써 맨드렐 제거 후 홀 주위에 유효한 압축잔류응력층을 생성시키는 방법이다. 이때 홀 주위의 잔류응력은 홀 주위에서 접선방향으로 압축상태로 남아있기 때문에 이것이 홀로부터 떨어져 작용하는 인장응력을 감소시키는 역할을 하여 부재가 반복하중을 받을 때 균열의 생

\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

\*\*\* 대림대학 산업기술경영과

\*\*\*\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*\*\* 성균관대학교 대학원 기계설계학과

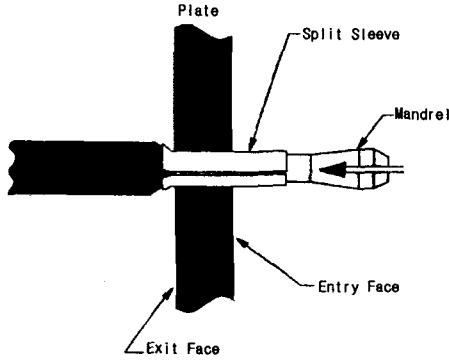


Fig. 1 Cold expansion process overview

성과 미소균열의 성장을 지연시킨다.

지금까지 여러 연구자들에 의해 홀확장 잔류응력 분포에 대한 이론해석<sup>(1,2)</sup>과 실험해석<sup>(3,4)</sup>을 수행하였는데, 이론해석에서는 재료의 거동을 완전소성으로 보는 등의 가정이 포함되어 실제적이지 못한 단점이 있으며, 실험적인 방법으로 홀 반경의 2배 정도의 깊이까지 잔류응력을 정확히 측정하는 것도 매우 어려운 일이다. 특히, 홀면에서의 잔류응력을 측정하기 위해서는 시험편을 부분적으로 절단해야하기 때문에 측정치에 대한 신뢰도도 저하될 수 있다. 이에 따라, 근래에는 여러 가지 잔류응력 발생기구들에 대한 탄소성 유한요소 해석을 통하여 잔류응력 분포나 변형형태를 예측하기 위한 연구<sup>(5~7)</sup>가 이루어지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 평판에서의 홀확장 과정에 대한 유한요소해석을 수행하고, 여러 가지 홀확장 파라미터 중에서 비교적 쉽게 변경 적용이 가능한 홀확장율과 2단 홀확장법이 잔류응력 분포에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 재료물성치

평판에 사용된 재질은 항공기부품에서 널리 사용되고 있는 Al6061-T6를 선정하였다. 홀확장법은 맨드릴이 홀을 통과할 때 홀 주위에서 발생하는 항복으로 인하여 잔류응력이 생성되므로 유한요소해석 시 탄소성해석을 수행해야 한다. 따라서, 해석하고자 하는 재질의 진응력-변형률 특성을 구하여 유한요소해석의 입력 데이터로 사용하

Table 1 Monotonic properties of Al6061-T6

| Yield stress (MPa) | Tensile stress (MPa) | Fracture stress (MPa) |
|--------------------|----------------------|-----------------------|
| 270                | 300                  | 398                   |

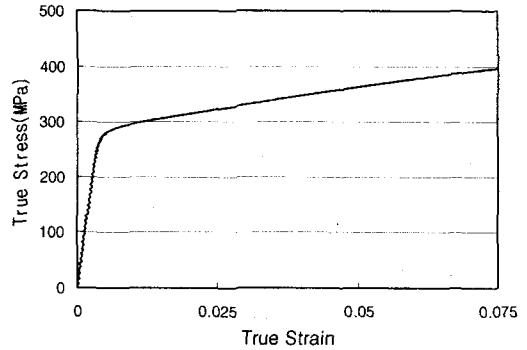


Fig. 2 True stress-strain relation of Al6061-T6

였다. 인장시험 결과를 Table 1과 Fig. 2에 나타내었으며, Fig. 2에 나타난 진응력-변형률 선도의 값을 해석에 적용하였다. 또한, 탄성계수(Young's modulus)  $E$ 는 72000MPa, 푸아송 비(Poisson's ratio)  $\nu$ 는 0.33을 적용하였다.

### 2.2 해석모델 및 방법

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 직경이 50mm인 원형 평판의 중앙 홀( $\Phi 6\text{mm}$ )에 맨드릴을 관통시키는 방법으로 홀확장법을 적용하는 모델을 설정하였다. 해석시간 단축을 위하여 원형 평판과 맨드릴은 축대칭 유한요소망으로 구성하였으며, 실제 모델과 동일하게 맨드릴이 홀을 이동하면서 관통하도록 하였다. Fig. 4는 본 연구에서 일반 홀확장법을 해석하기 위한 유한요소망을 나타낸 것이며, Fig. 5는 맨드릴의 두께 변화를 2단으로 하여 2단 홀확장법(2-step cold expansion)을 해석하기 위한 유한요소망으로서 전체 요소 수는 축대칭 요소(axisymmetric element) 1770개, 절점 수는 1907개를 적용하였다. 이때, 맨드릴은 평판재질에 비하여 강도가 매우 크기 때문에 강체요소(rigid element)를 적용하였으며, 맨드릴의 회전중심축에 기준절점(reference node)을 설정하고 이 기준절점에 따라 강체요소가 이동하도록 하였다. 또한, 맨드릴과 홀면이 직접 접촉하여 수직방향의 힘 성분이 발생하지 않도록 맨드릴과 홀 사이

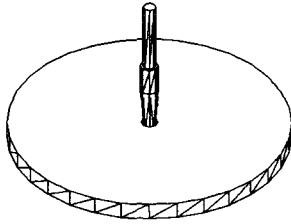


Fig. 3 Model configuration for cold expansion

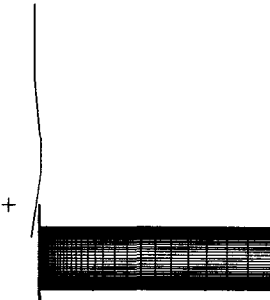


Fig. 4 Axisymmetric finite element model for 1-step cold expansion analysis

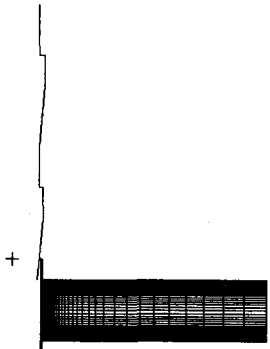


Fig. 5 Axisymmetric finite element model for 2-step cold expansion analysis

에 슬리브를 적용하였으며, 각각은 서로의 물체에 파고들지 못하도록 접촉(contact) 처리를 하였다. 이 상태에서 평판의 바깥부 절점과 슬리브 상단 절점을 y방향으로 이동하지 못하도록 구속하고 기준절점을 수직 이동시켜 맨드릴이 홀을 관통하도록 하였다.

본 연구에 사용한 프로그램으로는 모델링에 PATRAN Ver. 7.0을, 유한요소해석에 ABAQUS Ver. 5.8을 사용하였다. 한편, 맨드릴이 홀을 완전히 관통하는 데는 총 변위를 380번의 증분으로 나누어서 해석이 수행되었다.

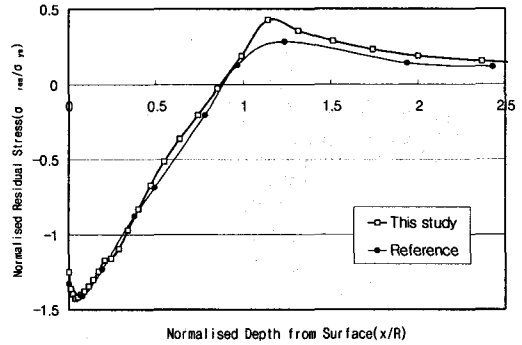


Fig. 6 Residual stress distribution at mid thickness in case of 4% cold expansion

Fig. 6은 4% 홀확장을 한 경우에 홀 중간위치에서의 잔류응력 분포를 본 연구의 해석 결과와 기존 연구결과<sup>(8)</sup>를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서, 잔류응력의 크기는 재료의 항복강도( $\sigma_{ys}$ )로 나누고, 표면에서의 깊이는 홀반경( $R$ )으로 나누는 방법으로 무차원화하여 결과를 비교하였는데, 잔류응력의 크기와 분포가 전반적으로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서 설정한 홀확장법에 대한 유한요소망이 타당함을 입증할 수 있다.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 홀확장 잔류응력 분포

맨드릴이 홀을 관통하는 동안 홀면에서의 잔류응력 생성과정에 대하여 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 맨드릴이 완전히 홀을 관통한 상태인 증분비(increment ratio) 1이 되면 홀 표면에는 일정한 크기의 잔류응력이 분포하며, 그 크기는 맨드릴의 삽입 위치에 따라 다른 것을 알 수 있다. 즉, 홀의 입구(entry)와 중간(mid) 위치에는 유효한 압축잔류응력이 형성되었으나, 출구부(exit) 홀면에는 유해한 인장잔류응력이 발생하였다. Fig. 8은 맨드릴이 관통한 후 홀부근의 잔류응력 분포를 나타낸 것으로서 홀면에는 전체적으로 압축잔류응력이 분포하며 내부로 들어갈수록 그 크기가 점차 줄어들면서 인장잔류응력으로 변하고 있다.

Fig. 9는 4% 홀확장을 한 경우 입구, 중간 및 출구에서의 깊이에 따른 잔류응력 분포를 나타낸

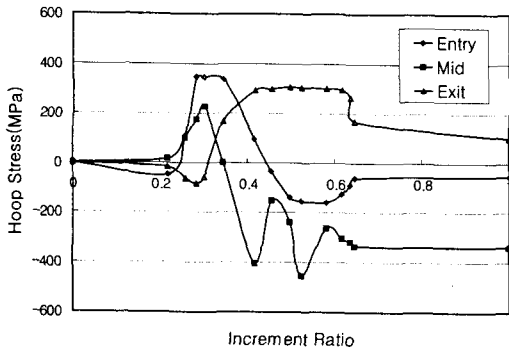


Fig. 7 The time history of hoop stress at the hole surface in case of 4% cold expansion

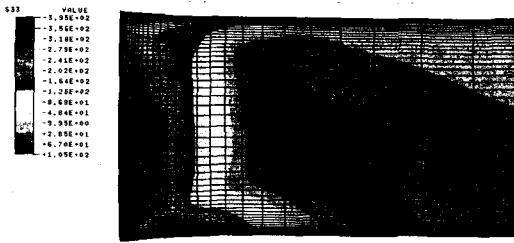


Fig. 8 Residual stress contour around the hole after 4% cold expansion

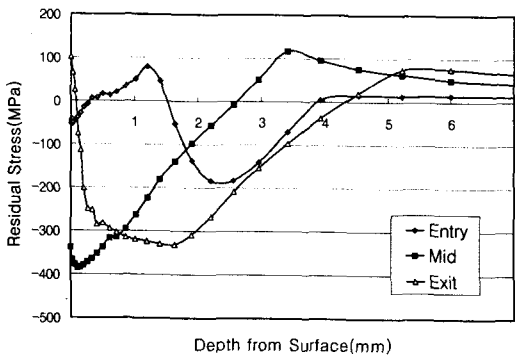


Fig. 9 Residual stress distribution through the plate thickness in case of 4% cold expansion

것이다. 그림에서 홀 중간위치에서는 안정적이면서 유효한 압축잔류응력이 일정 깊이까지 분포하지만, 입구와 출구 위치에서는 상대적으로 불안정한 잔류응력이 분포하며 특히, 출구 표면에는 인장잔류응력이 생성되어 홀확장법 적용 후 리밍 등의 후처리 작업이 필요하다 하겠다.

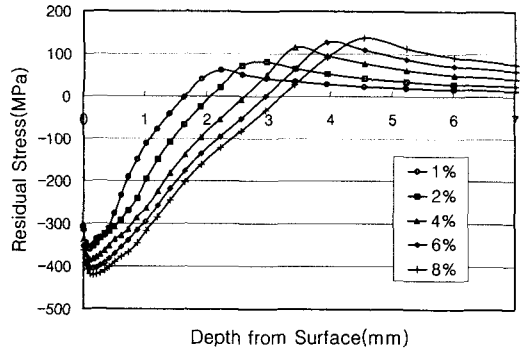


Fig. 10 Effect of cold expansion degree on residual stress distribution at mid thickness

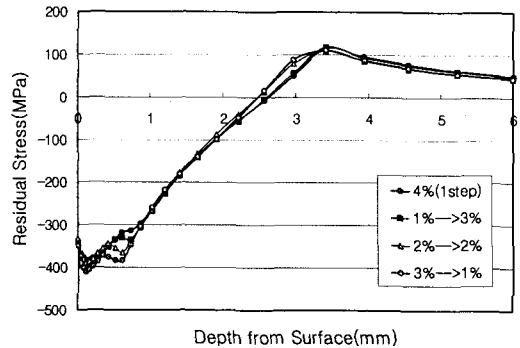


Fig. 11 Residual stress distribution at mid thickness in case of 4% and 2-step cold expansion

### 3.2 홀확장을 및 2단 홀확장의 영향

여러 가지 홀확장 파라미터 중에서 홀확장과 2단 홀확장법은 비교적 쉽게 제어할 수 있다. 따라서, 이에 대한 영향을 파악하기 위한 해석을 수행하였는데, Fig. 10은 홀확장율의 변화에 따른 홀 중간위치에서의 잔류응력 분포를 해석한 결과이다. 그림에서 홀확장율이 증가함에 따라 최대 압축잔류응력의 크기 및 압축잔류응력층의 깊이가 증가하지만, 내부에서의 인장잔류응력도 홀확장율의 증가에 따라 커짐을 알 수 있다.

Figs. 11~12는 2단 홀확장을 적용한 경우의 해석결과로서 최종 홀확장율이 Fig. 11은 4%, Fig. 12는 6%인 경우에 홀 중간위치에서의 잔류응력 분포를 보인 것이다. Fig. 11에서, 4% 홀확장을 일시에 가하는 경우에 비해서 2단으로 나누어서 홀확장을 하는 경우가 최대 압축잔류응력이 증가하므로 더 유리한 잔류응력 분포를 얻을 수 있

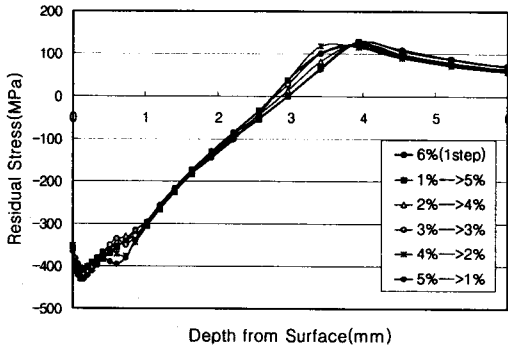


Fig. 12 Residual stress distribution at mid thickness in case of 6% and 2-step cold expansion

다. 특히, 3% 홀확장 후 1% 홀확장을 하는 경우가 가장 효과적으로서, 1단으로 홀확장을 한 경우에 비하여 최대 압축잔류응력이 6.8% 더 증가하였다. Fig. 12는 최종 홀확장율이 6%인 경우에 대한 2단 홀확장 적용 결과로서, 이 경우에도 5% 홀확장 후 1% 홀확장을 하는 경우에, 최대 압축잔류응력이 6.6% 증가하는 잔류응력 분포를 얻었다. 따라서, 1단으로 홀확장을 하는 것보다 2단으로 나누어서 홀확장을 하는 것이 유리한 잔류응력 분포를 얻을 수 있는 방법이라 할 수 있겠다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 홀확장 과정에 대한 유한요소해석을 수행하고 홀확장율과 2단 홀확장법이 잔류응력 분포에 미치는 영향을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 홀확장법에 의한 잔류응력은 맨드럴의 삽입 방향에 따라 차이가 크게 나타난다.
- (2) 홀확장율이 커질수록 최대 압축잔류응력의 크기가 증가하며 내부에서의 인장잔류응력 또한 커진다.
- (3) 2단 홀확장법을 적용할 경우 1단 홀확장법에 비하여 최대 압축잔류응력의 크기가 약 7% 향상되는 유리한 잔류응력 분포를 얻을 수 있다.
- (4) 축대칭 모델을 이용한 본 연구의 해석방법 및 결과는 여러 가지 홀확장 파라미터의 영향을 파악하는데 유사하게 적용시킬 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Nadai, A., 1943, "Theory of the Expanding of Boiler and Condenser Tube Joints through Rolling," *Trans. ASTM*, Vol. 65, pp. 865~880.
- (2) Rich, D. L., Impellizzeri, L. F., 1977, "Fatigue Analysis of Cold-Worked and Interference Fit Fastener Holes," *ASTM STP 637*, pp. 153~175.
- (3) Ball, D. L., Lowry, D. R., 1998, "Experimental Investigation on the Effects of Cold Expansion of Fastener Holes," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 21, pp. 17~34.
- (4) 유진상, 임원균 외, 1997, "홀확장과 링압인 동시적용에 의한 피로균열지연," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제2호, pp. 305~316.
- (5) Bachorski, A., Painter, M. J., 1999, "Finite Element Prediction of Distortion during Gas Metal Arc Welding using the Shrinkage Volume Approach," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, pp. 405~409.
- (6) Fathallah, R., Inglebert, G., Castex, L., 1998, "Prediction of Plastic Deformation and Residual Stresses induced in Metallic Parts by Shot Peening," *Materials Science and Technology*, Vol. 14, pp. 631~639.
- (7) Meguid, S. A., 1999, "Elasto-plastic Finite Element Analysis of the Cold Expansion of Adjacent Fastener Holes," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, pp. 424~428.
- (8) Pavier, M. J., 1997, "A Finite element Simulation of the Cold Working Process for Fastener Holes," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 32, No. 4, pp. 287~300.