

# 형상봉의 모양이 홀확장 잔류응력 분포에 미치는 영향에 대한 유한요소해석

장재순<sup>#</sup>, 조명래<sup>\*</sup>, 양원호<sup>\*\*</sup>

## The Finite Element Analysis of the Mandrel Shape's Influence on the Residual Stress Distribution by Cold Expansion Method

Jang Jae Soon<sup>#</sup>, Cho Myoung Rae<sup>\*</sup> and Yang Won Ho<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

Cold expansion method is used to protect a fatigue fracture from fastener hole in the structure and aerospace industry. Cold expansion is that an oversized tapered mandrel goes through the hole and produces a compressive residual stress as well as plastic deformation around the hole. Here, mandrel shapes are one of the factors which are influenced on the residual stress distribution by cold expansion method. This paper, according to mandrel shapes (diameter of mandrel, length of mandrel and length of taper), we are performed a finite element analysis of residual stress distribution by cold expansion method. From this study, it has been found that diameter of mandrel and length of taper are an important factor which was generated a low compressive residual stress surround of fastener hole by cold expansion method.

**Key Words** : Cold expansion method (홀확장법), Residual stress (잔류응력), Mandrel (형상봉), Finite element analysis (유한요소해석)

### 1. 서론

일반적으로, 대부분의 부재에서는 외부에서 작용하는 정적 하중에 의해서 파괴를 일으키는 경우보다 부재의 항복응력에 비해 훨씬 낮은 응력이 반복작용으로 인해 작용했을 때 재료의 파괴가 쉽게 일어난다. 즉, 실제적인 파괴는 부재를 오랜 시간동안 사용함으로써 피로(Fatigue)에 의해 파괴되는 것이다. 일례로 비행부재에서 항공기 날개와 같은 부분은 구조적인 반복하중에 의해 결국 피로

파괴(Fatigue fracture)를 일으키는 결과를 초래한다. 항공기의 구조적 결합지인 체결구멍, 오픈홀(Open hole)등 구조물의 장착지점에 반복인장응력이 집중되어 피로파괴의 주원인이 되고 더 나아가 시간이 지남에 따라 구조물 전체로 전위되어 심각한 파괴를 야기시킨다. 그러므로 체결 홀에서의 피로파괴를 방지하기 위해, 쇼트피닝(Shot peening), 홀확장법(Cold expansion method), 억지끼워맞춤(Interference fit)등의 여러가지 연구들<sup>1-7</sup>이 진행되어 왔으며, 이를 바탕으로 실제 현장에서도 많이

☞ 접수일: 2006년 1월 17일; 게재승인일: 2006년 7월 11일

# 교신저자: 성균관대학교 기계공학과

E-mail cadian@skku.edu Tel. (02) 950-7526

\* 인덕대학 컴퓨터응용설계

\*\* 성균관대학교 기계공학과

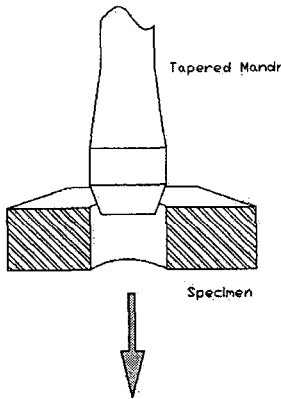


Fig. 1 Schematic of cold expansion method

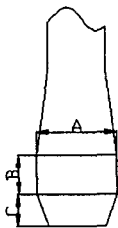


Fig. 2 Labels of the mandrel

사용되어 왔다. 그 중에 대표적인 방법이 홀확장 방법이다. 홀확장법은 Fig. 1 과 같이 부재에 부재의 지름보다 좀 더 지름이 큰 형상봉(mandrel)을 삽입하는 방법으로 홀주위에 유효한 압축잔류응력을 생성하는 방법이다. 기존의 선행 연구자들은 홀확장법 적용 후 부재에 발생하는 잔류응력의 정확한 해석을 위하여 많은 연구<sup>1-4</sup>를 실시 하였다. 그러나, 홀확장법 적용시에 좀 더 낮은 압축 잔류응력을 생성하기 위한 방법은 크게 제시하지 못했다. 그러므로, 홀확장법에 의한 압축잔류응력층 생성에 있어서 상대적으로 좀 더 낮은 압축잔류응력층을 생성하기 위한 연구가 필요하다. 특히, 형상봉은 홀확장법을 적용하는 도구로 그 모양의 변화에 따라서 잔류응력층의 분포가 달라질 것으로 예상됨에도 기존의 연구나 현장에서는 각자의 다양한 모양을 가진 형상봉을 이용하여 홀확장법을 적용하고 있다. 형상봉은 체결홀에 일시적인 팽창과 수축을 가해주기위해 대부분 Fig. 2 와 같은 모양을 하고 있다. 이런 형상봉의 모양에서 형상봉의 지

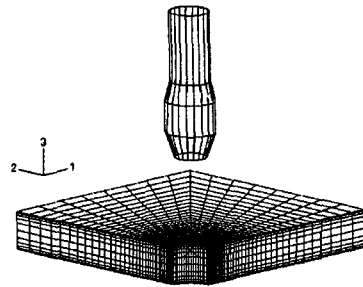


Fig. 3 FE modeling for cold expansion

름("A"), 형상봉의 랜드부("B"), 형상봉의 테이퍼부("C")의 변화에 따라 홀확장적용시 생성되는 잔류응력 분포를 유한요소 해석을 통하여 알아 보고, 이를 바탕으로 형상봉의 모양이 잔류응력 생성에 미치는 영향을 알아 보았다.

## 2. 유한요소 해석

유한요소 해석에 있어서 항공기 부품으로 사용되는 Al6061-T6 합금 모델을 사용하였으며, 잔류응력 생성의 정확한 해석을 위해 탄소성 물성(진응력-진변형률선도)<sup>3</sup>을 구하여 해석에 반영하였다. 또한, 탄성계수 (Young's modulus)  $E$  는  $72GPa$  을 사용하였다. 이때 포와송비( $\nu$ )와 항복응력( $\sigma_{ys}$ )은 0.33 과  $270MPa$  을 각각 사용하였다.

### 2.1 유한요소해석 절차와 검증

본 연구에서는 중앙에 지름 6mm 의 홀이 있는  $60 \times 60mm$  인 정사각형 평판에 홀확장법을 적용하는 모델을 설정하였으며, 유한요소해석 시간을 고려하여 대칭성을 적용한 1/4 모델로 구성하였다. 실제 상황과 동일한 조건을 주기 위해 패스너(fastener)가 홀 속으로 이동하도록 설정하였다. Fig. 3 은 홀확장 해석을 위한 유한 요소망으로써, 형상봉이 홀을 관통하도록 하였으며, 이때 형상봉이 홀을 완전히 관통하는데 총 변위를 80 번의 증분으로 나누어 해석하였고, 형상봉을 강체(rigid body)로 취급하여 강체요소(rigid element)를 적용하였으며, 형상봉의 회전 중심축에 기준 절점을 설정하여 기준절점을 통해 형상봉이 이동하도록 하였다. 또한 형상봉과 홀 면 사이에는 접촉(contact)

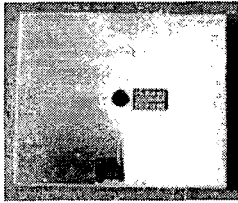


Fig. 4 Specimen for cold expansion process

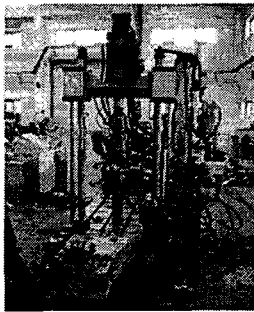


Fig. 5 Experimental instrument for cold expansion method

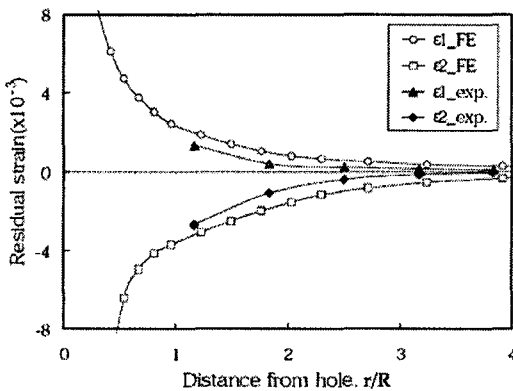


Fig. 6 Strain distribution after FE analysis & experimental analysis (CER=4%)

처리를 통해 서로 파고들지 못하게 하였다. 형상봉의 형상을 Fig. 2의 라벨 “A”, “B”, “C” 조건의 변화별로 각각 모델링하여 해석에 적용하였다. 이때, 유한요소 해석 프로그램은 ABAQUS, ver 6.4<sup>8</sup>와 PATRAN 2005를 사용하였다.

유한요소 해석의 타당성을 입증하기 위하여 홀확장 실험을 하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 시

편이며, Fig. 5는 실험장치의 모습이다. Fig. 4와 같이 시편(60×60×6mm)을 제작하고 홀확장법을 통해 발생된 잔류변형률을 시편에 붙인 스트레인 게이지를 통해 측정하였다. 이때, 스트레인 게이지는 x/y 방향 변형율을 동시에 측정할 수 있는 TML사의 응력구배 측정용 FCV-1-11-005LE 모델을 사용하였다. 맨드릴이 들어가는 쪽 시편 표면의 반지름방향과 접선방향에서의 스트레인값을 측정하여 얻은 결과와 유한요소해석을 통하여 얻은 결과를 홀면으로 부터의 거리(R)를 홀의 지름(r)로 나누어 정리하여 그 값을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 홀확장 잔류변형률의 크기 및 경향이 전반적으로 일치하므로 해석의 타당성을 입증할 수 있겠다.

### 3. 결과

#### 3.1 “A” 길이(형상봉의 지름)의 변화에 따른 잔류응력분포 (홀확장률)

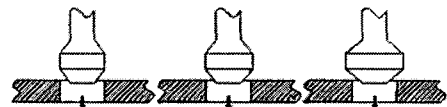
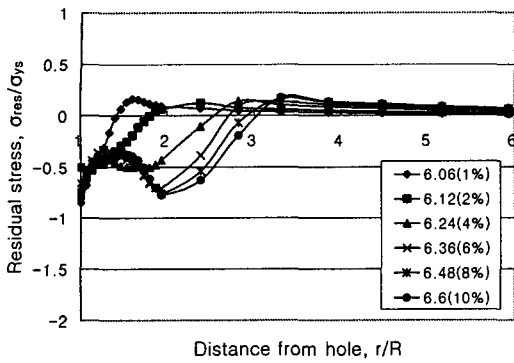


Fig. 7 Schematic of the mandrel as change “A” factor

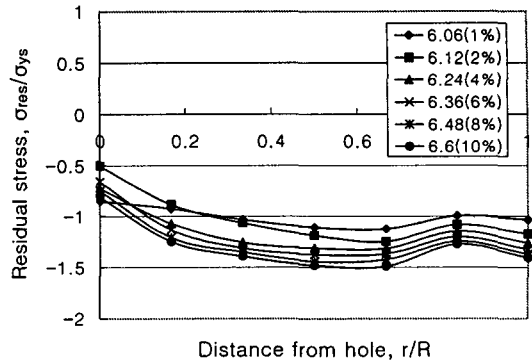
Fig. 2와 같이 형상봉의 모양 중에 “A” 길이를 홀의 지름(6mm)을 기준으로 1%~10%까지 다양하게 변화시켜 각각 유한요소해석을 함으로써, 형상봉의 “A” 크기에 따른 잔류응력 분포의 변화를 알아 보았다.

Fig. 8은 Fig. 7의 “A”(in Fig. 2) 길이에 의한 계략도와 같이 “A” 길이의 변화에 따라서 형상봉이 삽입되는 삽입면(Entry position), 부재의 중간면(Mid position), 형상봉이 빠져 나가는 출구면(Exit position)에서의 잔류응력 분포를 나타낸 것이다.

“A” 길이는 형상봉의 가장 큰 바깥 지름을 나타낸 것으로 “A” 길이가 길어진다는 것은 홀확장을 하는 비율이 증가 하는 것이다. Fig. 8을 보면 (a) Entry position의 홀표면 부근에 불안정한 응력 분포를 제외하고 전반적으로 “A”의 길이가 길어질수록 즉, 홀확장 비율이 커질수록 홀 표면에서 낮은 압축잔류응력이 발생함을 알 수 있다.

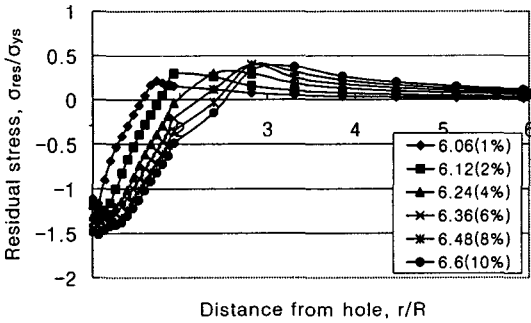


(a) Entry Position

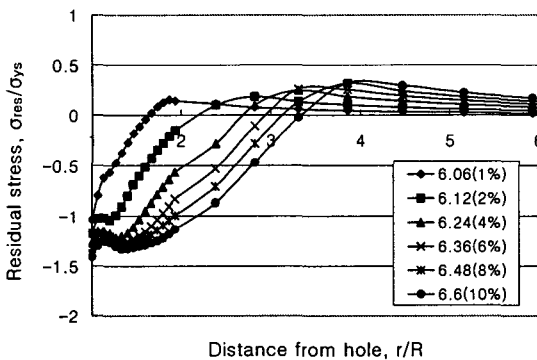


(d) Thickness direction

Fig. 8 Residual stress distribution according to "A"



(b) Mid position



(c) Exit position

그러나, 활확장률의 증가에 의해 활확장 적용 후 부재에 발생하게 되는 소성변형이 오히려 부재에 부정적 영향을 미칠 수 있으므로 이후, 활확장률은 기존<sup>14</sup>에 많이 사용되었던 4%의 기준을 근거로 사용하였다.

### 3.2 "B"길이의 변화에 따른 잔류응력분포 (홀 팽창 유지)

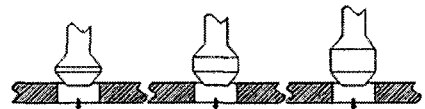
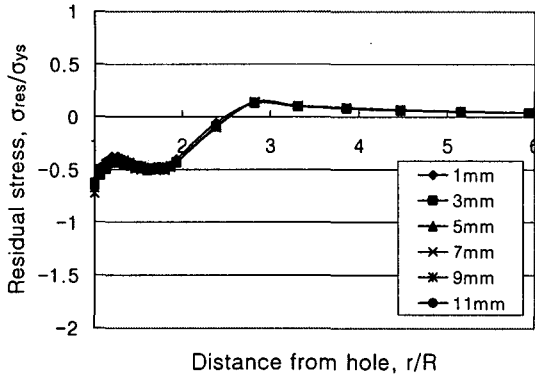


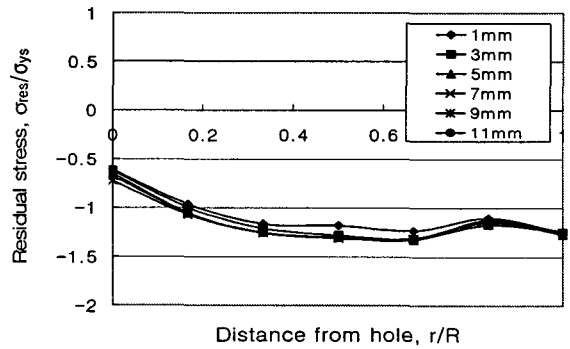
Fig. 9 Schematic of the mandrel as change "B" factor

"B"(in Fig 2) 길이를 변화 시키는 것은 홀팽창유지와 관계된다. Fig. 9의 "B" 변화에 의한 계략도와 같이 "B" 길이를 조절함으로써, 홀이 최대로 팽창되어 지속되는 상태에 따른 잔류응력 분포를 해석하였고, 이를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10을 보면 전반적으로 "B"의 길이에 따른 잔류응력 분포 변화는 미미한 것을 알 수 있다. 그러므로 형상봉의 "B"의 길이는 잔류응력 분포에 거의 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

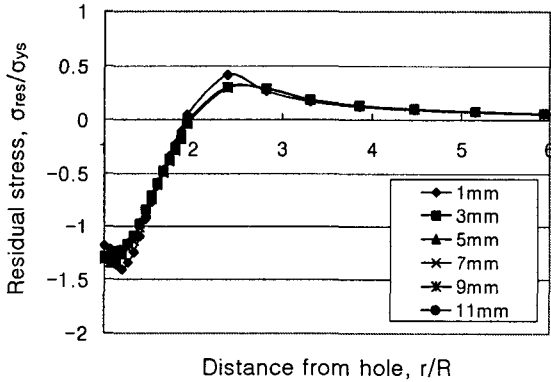


(a) Entry position

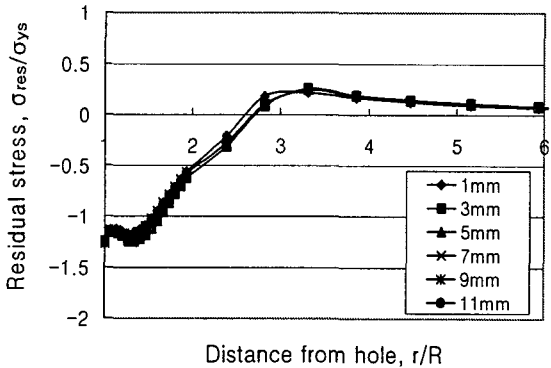


(d) Thickness direction

Fig. 10 Residual stress distribution according to "B"



(b) Mid position



(c) End position

### 3.3 "C" 길이의 변화에 따른 잔류응력분포 (taper의 길이)

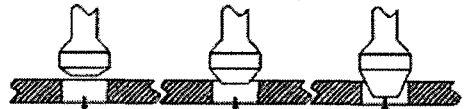
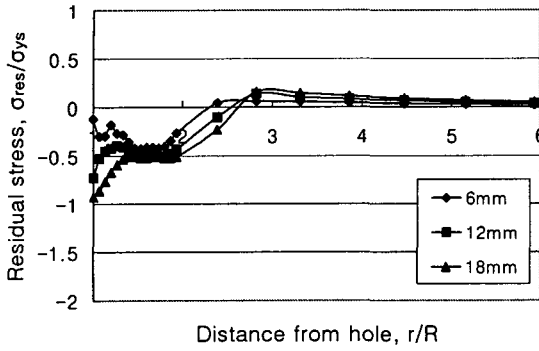
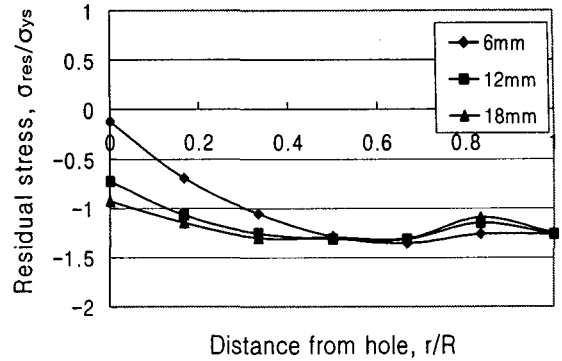


Fig. 11 Schematic of the mandrel as change "C" factor

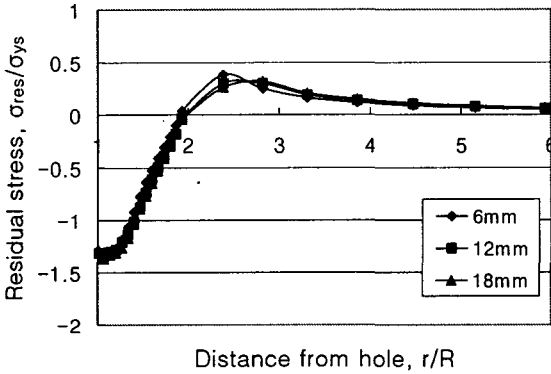
Fig. 11 과 같이 형상봉의 "C"(in Fig. 2)의 길이 변화는 부재에서 홀이 팽창을 되는 속도와의 관계 되므로 중요한 요소라 볼 수 있고, 이 길이에 따른 잔류응력분포의 변화를 알아 보기 위해 유한 요소해석을 하여 그 결과를 Fig. 12 에 나타내었다. Fig. 12 에서 보면 부재의 중간면과 출구면에서는 큰 영향은 없으나, (a) Entry Position 과 (d) Thickness direction 에서 알 수 있듯이 형상봉의 삽입면 근처에서의 홀확장 잔류응력 분포가 "C"의 길이가 길어 질수록 상대적으로 더 낮은 압축잔류응력층이 발생함을 알 수 있다.



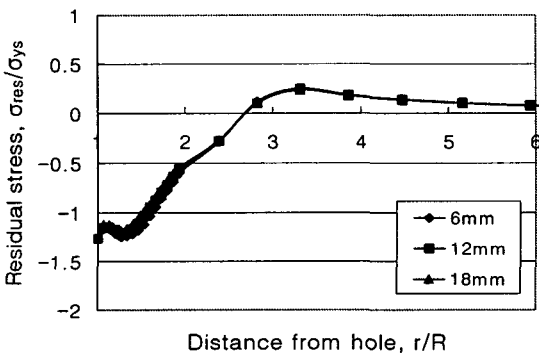
(a) Entry Position



(d) Thickness direction



(b) Mid position



(c) Exit position

Fig. 12 Residual stress distribution according to "C"

#### 4. 결론

이번 연구에서는 형상봉의 모양이 홀확장법 적용 후 발생하는 잔류응력에 미치는 영향을 유한요소 해석을 통하여 알아 보았고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 형상봉 "A" 의 길이(홀확장률)가 길어 길수록 홀 표면으로부터 더 낮은 압축 잔류응력이 발생한다.
- 2) 형상봉 "B" 의 길이(홀팽창 유지 시간)는 전체 생성되는 잔류응력분포에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 3) 형상봉 "C" 의 길이(홀확장 속도)가 길어질수록 맨드럴의 삽입면 부근에서 더 유효한 잔류응력이 발생한다.
- 4) 위에 결과들을 고려하여 최적의 홀확장 잔류응력 분포를 위한 형상봉의 모양을 설계 할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. Pavier, M. J., "A finite element simulation of the cold working process for fastener holes," J. Strain Anal., Vol. 32, pp. 287-300, 1997.
2. Papanikos, P. and Mequid, S. A., "Elasto-plastic finite element analysis of the cold expansion of

- adjacent fastener holes," J. Mater. Process. Technol., Vol. 89-90, pp. 424-428, 1999.
3. Jang, J. S., Yang, W. H. and Kim, C., "Analysis for the residual stress by cold expansion method and interference fit," J. Korea. Soc. of Mech. Eng., Vol. 26, No. 8, pp. 1615-1622, 2002.
  4. Kim, C., Kim, D. J., Seok, C. S. and Yang, W. H., "Finite element analysis of the residual stress by cold expansion method under the influence of adjacent holes," J. Mater. Process. Technol., Vol. 153-154, pp. 986-991, 2004.
  5. Chakherlou, T. N. and Vogwell, J., "The effect of cold expansion on improving the fatigue life of fastener holes," Eng. Fail. Analy., Vol. 10, pp. 13-24, 2003.
  6. Yoo, J. S., Choi, S. Y., Song, J. H., Song, C. H. and Lim, W. K., "Fatigue Crack Retardation by Concurrent Cold-Expansion and Ring-indentation," J. Korea. Soc. of Mech. Eng., Vol. 21(A), No. 2, pp. 305-316, 2002.
  7. Lee, H. W. and Park, Y. S., "Distribution Characteristics of Residual Compressive Stresses Induced by Shot-peening in the Aircraft Structural Material," J. Korean Soc. Precision Eng., Vol. 21, No. 5, pp. 149-157, 2004.
  8. ABAQUS User's Manual, Ver. 6.4, HKS Inc., USA.