

# 인접홀에서 홀확장법과 체결력 고려시, 발생하는 잔류응력 분포에 대한 유한요소해석

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

## Finite Element Analysis of Residual Stress by Cold Expansion Method with Clamping Force in the Plate having Adjacent Holes

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

### ABSTRACT

The cold expansion method (CEM) is one of the widely used a method to improve the fatigue behavior of materials in aerospace industry. Such improvement is due to the compressive residual stress developed when a tapered mandrel goes through the fastener holes a little smaller than the mandrel. CEM is retarded of crack initiation due to the compressive residual stress developed on the hole surface. Many researchers are studied a finite element analysis of residual stress around fastener hole. But in case of real model, fastener hole has a clamping force after CE. Therefore, it is respected that residual stress distributions should be changed due to clamping forces. In this paper, it was performed finite element analysis of residual stress by clamping force after CE in the plate having adjacent holes. From this study, it has been found that compressive residual stress near the hole increases according to clamping force. Also, the more increase clamping force, the more increases compressive residual stress. However, tensile residual stress increase beyond clamping force area.

**Key Words** : Cold expansion method (홀확장법), Clamping force (체결력), Fastener hole (체결홀), Finite element method (유한요소법)

### 1. 서론

항공기 및 기계구조물의 체결함에 있어서 기계적 체결합 방법인 리벳팅이나 볼팅이 많이 사용된다. 그러나 이런 체결방식은 분해/조립이라는 측면에서 우수하지만, 오히려 홀주위에 응력 집중으로 인해 부재의 피로수명을 저해시키는 원인이 되

도 한다. 이런 이유에서 체결홀에서의 피로수명을 증가시키기 위해 체결홀에 국부적인 압축잔류응력을 발생시키는 홀확장 방법을 적용한다. 이런 홀확장법을 적용하였을 때, 체결홀 주위에서 발생하는 잔류응력 분포에 관한 연구<sup>1-7</sup>는 많이 진행되어왔다. 그러나 Fig.1 에서 처럼 실제로는 홀확장법을 적용하여 압축 잔류응력 층을 생성하고 그

☞ 접수일: 2005 년 9 월 1 일; 게재승인일: 2006 년 4 월 14 일

# 교신저자: 성균관 대학교 기계 공학과

E-mail cadian@skku.edu Tel. (031) 290-7949

\* 성균관 대학교 기계 공학과

\*\* 인덕대학 컴퓨터응용설계

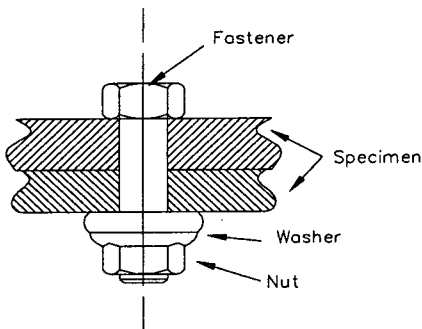


Fig. 1 Schematic of the fastening

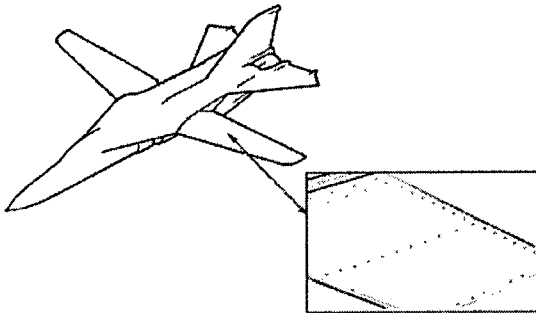


Fig. 2 Fastener holes in the wing plate of the aircraft

위에 리벳팅이나 볼팅 등을 통한 체결을 하기 때문에 홀확장만을 고려한 것 이외에 체결력(Clamping force: CF)을 고려한 해석이 반드시 필요하다. 즉, 실제로 항공기 표면에 적용되는 조건들을 정확히 고려함으로써 실제 분포 되는 잔류 응력분포를 파악 할 수 있을 것이다. Fig. 2에서는 항공기 날개의 체결홀을 나타내고 있다. 여기서 보이듯이 체결홀은 그 하나만 존재 하는 것이 아니고 서로 이웃하여 여러 체결홀이 존재 하게 된다. 이런 인접한 체결홀에서의 홀확장 적용과 체결력을 고려 하였을 때 부재에 최종적으로 남게 되는 잔류응력 분포를 알아볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 체결홀에서의 잔류응력 분포를 해석하고, 체결력을 고려하여 실제 조건에 가까운 상태로 재해석 하였다. 또한 인접한 홀에서의 체결력을 고려한 해석을 통하여 잔류응력분포도 알아 보았다.

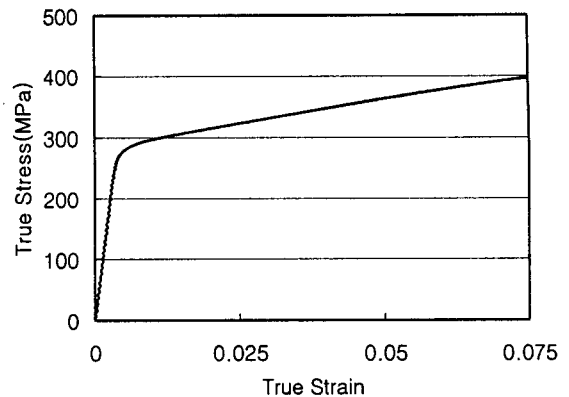


Fig. 3 True stress-strain relation of Al6061-T6

## 2. 유한요소해석

### 2.1 재료물성치

유한요소해석을 위해 항공기 부품으로 많이 사용되는 Al6061-T6 합금을 모델로 하였다. Fig. 3 과 같이 잔류응력의 정확한 해석에 필요한 탄소성 물성을 얻기 위해 Al6061-T6 합금의 진응력 진변형을 값인장시험을 통해 얻은 후 유한요소 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.

### 2.2 유한요소해석 방법과 절차

본 연구에서는 인접한 홀에서의 잔류응력을 비교하기 위하여 Fig. 4 와 같이 반지름(R)이 3mm 인 두 개의 홀이 일정거리(b) 만큼 떨어진 모델에 맨드럴을 관통시키는 방법으로 홀확장법을 적용하는 모델을 선정하였다.

이때, 인접한 홀 들 사이의 거리 (b)를 홀 반지름(R)의 6~12 배로 다양하게 하여 홀사이의 거리에 따른 영향도 살펴 보았다. Fig. 5 에서 보이듯이 유한요소망 구성은 해석시간의 단축을 고려하여 1/2 을 해석대상영역으로 선정하여 모델링하였으며 실질적 홀확장법 적용을 위해 맨드럴이 홀을 이동하면서 관통하도록 하였다. 맨드럴은 홀의 지름보다 4% 지름이 더 큰 맨드럴 모델을 사용하였으며, 맨드럴은 강체(rigid body) 요소를 사용하였고 맨드럴과 홀사이에 접촉처리(contact) 를 통하여

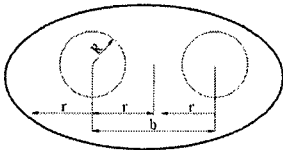
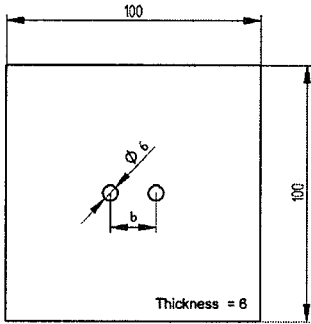


Fig. 4 Real model

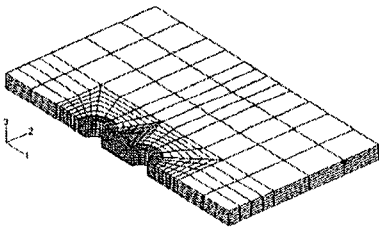


Fig. 5 Element modeling

서로 파고들지 못하게 하였다. 맨드렐이 홀을 통과하는 총 증분비를 80 으로 하였고 전체 모델의 절점 (node)수는 24000 개이고 요소(element) 수는 3000 개로 하였다. 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS, ver 6.4<sup>8</sup> 와 PATRAN 2005 를 사용하였다. 체결력을 고려한 해석에 있어서 해석에 적용한 체결력은 볼팅을 했다는 가정하에 KS 규격에 의한 M6 볼트에 실제 사용하는 볼트의 조임토크인 112.9Nm 를 적용하여 구하였다. 체결력과 조임토크 사이의 관계식은 식 (1)과 같다. 이때, T 는 조임토크이며, K 는 토크계수(torque coefficient; 0.15), Fi 는 초기인장력, d 는 볼트의 바깥지름이다.

$$T = K F_i d \quad (1)$$

홀확장한 체결홀에 체결압을 적용하는 유한요소 해석은 홀확장을 적용하는 1 단계 (1-step)와 그 후 체결압을 적용하는 2 단계(2-step)로 나누어

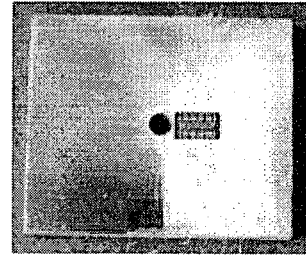


Fig. 6 Specimen for cold expansion process



Fig. 7 Experimental instrument for cold expansion method

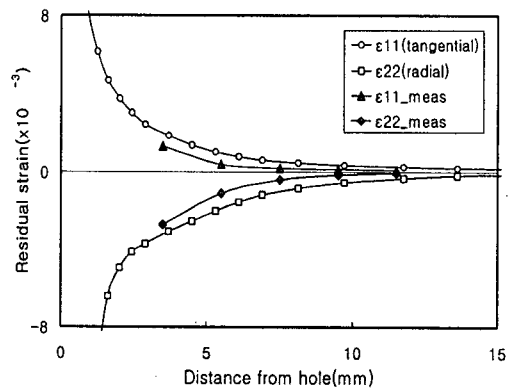


Fig. 8 Strain distribution after FE analysis & experimental analysis

해석함으로써 실제와 동일한 상황을 고려 하여 해석 하였다.

볼트 체결에 있어서 실제로와 와서를 볼트와

부재 사이에 끼워 넣으므로 식 (1)의 조임토크로부터 체결력을 구하여 와서의 전체면적으로 나누는 방법으로 체결시의 압력을 구하였다.

이렇게 얻은 볼트의 체결압을 홀확장 해석 후 와서 면적에 균일압력을 가하여 체결압에 대한 잔류응력 분포를 알아 보았다. 또한, 체결력의 크기에 따른 잔류응력의 변화를 알아보기 위하여 식 (1)을 통해 계산한 체결력에 0.5 배 한 값( $w/0.5CF$ )과 2 배 한 값( $w/2CF$ )을 각각 적용하여 유한요소해석을 수행하였다.

### 2.3 실험을 통한 유한요소해석의 타당성 검토

유한요소 해석의 타당성을 입증하기 위하여 홀확장 실험을 하였다. Fig. 6 은 실험에 사용된 시편이며, Fig. 7 은 실험장치의 모습이다. Fig. 6 과 같이 시편( $60 \times 60 \times 6mm$ )을 제작하고 홀확장법을 통해 발생된 잔류변형률을 시편에 붙인 스트레인 게이지를 통해 측정하였다. 이때, 스트레인 게이지는 x/y 방향 변형율을 동시에 측정 할 수 있는 TML사의 응력구배 측정용 FCV-1- 11-005LE 모델을 사용하였다. 맨드릴이 들어가는 쪽 시편 표면의 반지름방향과 접선방향에서의 스트레인값을 측정하여  $b/R=10$  이상의 인접홀의 영향이 거의 없는 모델에 한쪽홀에만 홀확장한후 인접홀이 있는 방향의 반대방향에서 홀면으로 부터의 유한요소해석을 통한 잔류응력분포와 비교하여 Fig. 8 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 홀확장 잔류변형률의 크기 및 경향이 전반적으로 일치하므로 해석의 타당성을 입증할 수 있겠다.

## 3. 해석결과

### 3.1 체결력에 따른 잔류응력분포

두개의 인접한 홀이 있을 때 동시에 홀확장을 하는 방식(concurrent cold expansion method)<sup>3</sup>으로 홀확장을 한 후 체결력을 고려 하였다. Fig. 9 는 홀의 반지름(R)으로 인접한 홀사이의 거리(b)를 나눈 값이 6 인 경우 ( $b/R=6$ ), 홀확장 한 후의 응력장의 분포를 나타낸 것이고 Fig.10 은 홀확장 적용 후 체결력을 고려하여 2-step 으로 해석한 결과의 응력분포를 나타내었다. 두 그림을 비교 하여 보면, 홀 주위에 분포한 응력이 변화하는 것을 볼 수 있으며

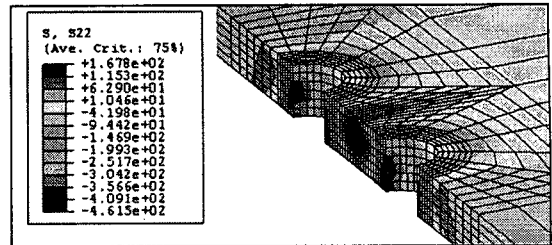


Fig. 9 Residual stress distribution by CEM ( $b/R=6$ )

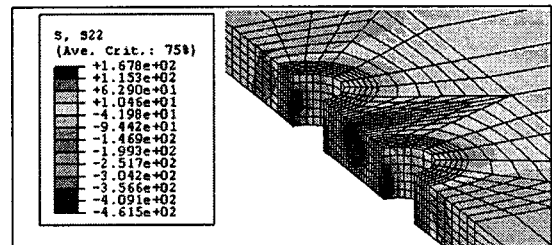


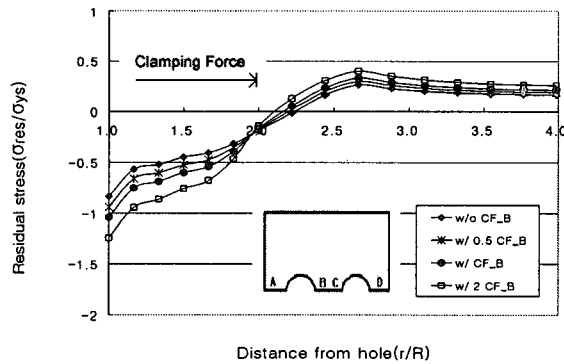
Fig. 10 Residual stress distribution by CEM w/ CF ( $b/R=6$ )

전체적으로 부재내의 위치에 따라 응력이 다양하게 분포함을 알 수 있다. Fig. 11 은 체결력을 고려하지 않았을 때와 체결력을 0.5 배, 1 배, 2 배 적용하여 해석한 결과이다.

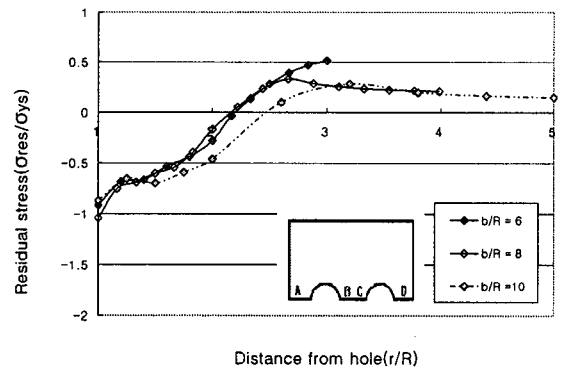
이때, Fig.11 (a)는 두 개의 홀 사이 영역("B")에서 맨드릴이 삽입되는 삽입면 (Entry)의 잔류응력을 비교한 것이고 (b)는 부재의 중간면 (Mid), (c)는 맨드릴의 출구면 (Exit)에 대한 잔류응력 분포를 나타내었다. 여기서, 체결력이 고려될 때, 체결력이 작용하는 범위에서는 체결력이 증가함에 따라 압축잔류응력도 증가하고 이 범위를 벗어나면 인장잔류응력이 약간 증가함을 알 수 있다.

### 3.2 체결력을 고려할 때 인접한 홀사이의 거리에 따른 잔류응력분포

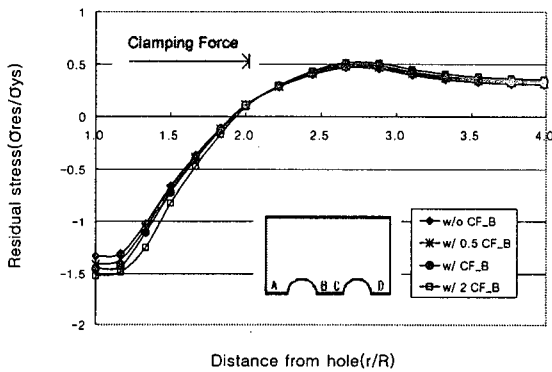
Fig. 12 는 체결력을 고려 하였을 때 인접한 홀사이의 거리( $b/R$ ) 값이 6, 8, 10 일때 각각 위치별로 비교하였다. Fig. 11(a)는 맨드릴의 삽입면이고 (b)는 부재의 중간면, (c)는 맨드릴의 출구면이다. 그림에 알 수 있듯이 홀이 이웃하여 있을 경우 맨드릴의 삽입면에서 압축잔류응력이 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다.



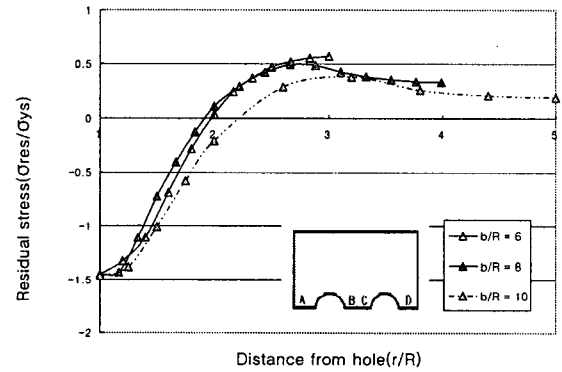
(a) Entry



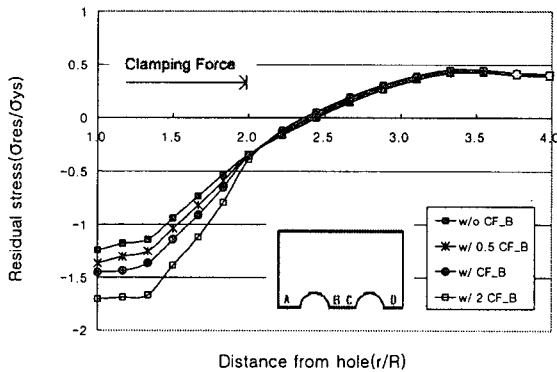
(a) Entry



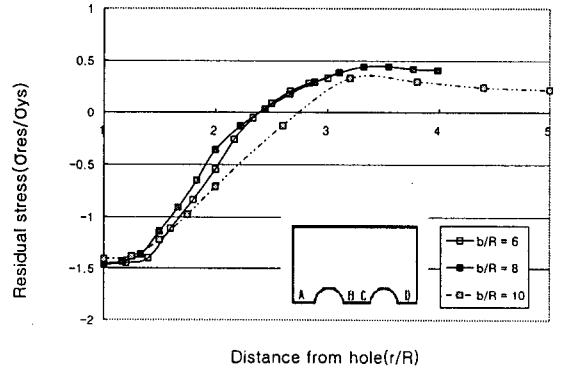
(b) Mid



(b) Mid



(c) Exit



(c) Exit

- w/o CF : without clamping force
- w/0.5 CF: with 0.5 X nominal clamping force
- w/ CF: with nominal clamping force
- w/2 CF: with 2 X nominal clamping force

Fig. 11 Residual stress distribution according to clamping force in "B" position

Fig. 12 Residual stress distribution with clamping force

#### 4. 결론

이번 연구에서는 인접한 홀에서 동시적 홀확장법에 의한 잔류응력 분포 후, 실제 체결력을 고려하여 부재에 최종적으로 남게 되는 잔류응력층을 구해 냈다. 그리고 체결력과 이웃홀 사이의 간격을 변화시켜 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일반적인 홀확장법에서 생긴 잔류응력분포에 실제 체결력을 고려하면, 체결력이 주어지는 범위내에선 더 낮은 압축 잔류응력이 발생하나, 이 범위를 벗어나면 인장잔류응력이 약간 증가한다.
- 2) 체결력의 크기가 증가 할수록, 체결범위 내의 압축잔류응력도 증가한다.
- 3) 인접한 홀에 체결력 고려시 맨드럴 삽입면에 분포한 잔류응력층이 상대적으로 취약함을 알 수 있다.

#### 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. 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.
4. Kim, C., Yang, W. H., Sung, G. D. and Go, M. H., "Analysis of residual stresses induced by shot peening using finite element method," J. Korean Soc. Automotive Eng., Vol. 9, pp. 198-204, 2001.
5. Lee, D. S. and Lee, J. H., "A Study on the Prediction of Fatigue Crack Initiation Life of Hole Expansion Plate," J. Korean Soc. Precision Eng., Vol. 20, No. 2, pp. 129-135, 2003.
6. Ball, D. L., "Elastic-plastic stress-analysis of cold expanded fastener holes," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 18, No. 1, pp. 47-63, 1995.
7. Kang, J., Johnson, W. S. and Clarck, D. A., "Three-dimensional finite element analysis of the cold expansion of fastener holes in two aluminium alloys," Journal of Engineering materials and Technol., Vol. 124, pp. 140-145, 2002.
8. ABAQUS User's Manual, Ver. 6.4, HKS Inc., USA.