

< 논문 >

## 인접홀에서 홀확장법 적용시, 유한요소법을 이용한 잔류응력해석

장재순<sup>†</sup> · 양원호\* · 조명래\*\*

(2005년 8월 24일 접수, 2006년 3월 10일 심사완료)

### Using the Finite Element Method, 3 Dimensional FE Analysis of Residual Stress by Cold Expansion Method in the Plate Having Adjacent Holes

Jae-Soon Jang, Won-Ho Yang and Myoung-Rae Cho

**Key Words :** Cold Expansion Method(홀확장법), Fastener Hole(체결홀), Finite Element Method(유한요소법)

#### Abstract

In the aerospace industry, Cold expansion has been used the most important method that is retarded of crack initiation from fastener hole surface. Cold expansion method(CEM) is that an oversized tapered mandrel goes through the hole in order to develop a compressive residual stress as the passing of the mandrel around the hole. Therefore, because of characteristic of mandrel inserting, Residual Stress Distributions(RSD) are differently generated from Entry, Mid and Exit position of the plate. Also, it is respected that RSD are changed as distances between holes. In this paper, It is performed a FE analysis of RSD by CEM and it is respectively shown RSD in the Entry, Mid and Exit position. It is compared residual stress results form the cold expansion in these two cases: the concurrent CEM and the sequential CEM. From this research, it has been found that compressive residual stress of Entry position is lower than other positions. Also, the concurrent CE of adjacent holes leads to much higher compressive residual stress than the sequential CE. In addition, in the sequential CE case, a compressive RSD of 1step's hole around is lower than compressive RSD of 2 step's hole around.

#### 1. 서론

일반적으로, 항공기 및 기계구조물은 기계적 결합 방법인 리벳이나 볼트 등으로 체결되어 있다. 이러한 체결 방법들은 접합강도나 조립, 분해 등의 측면에서 우수한 방법이지만, 체결홀 주위의 응력집중으로 인해 부재의 수명을 저하시키는 원인이 되기도 한다. 그러므로 이와 같은 체결 방법으로부터 안전성을 확보하기 위해 체결홀로부터 균열발생을 지연시켜 부재의 피로수명을 증가하기 위한 방법이 모색되었다. 지금까지

부재의 피로수명을 증가 시키기 위한 여러 가지 방법이 제안되어 왔으며 이중 널리 이용되는 방법이 홀확장법과 쇼트피닝 방법이다. 이 방법들은 균열발생이 예상되는 곳에 국부적인 압축잔류응력을 발생시켜 외력에 의한 응력을 완화 시킴으로써 균열발생을 지연시키는 방법이다. 이중, 특히, 홀확장법은 1970 년대에 보잉사에서 적용한 이래 체결홀에서의 균열발생을 지연시키기 위한 대표적인 방법이 되었다.

홀확장법은 Fig. 1 처럼 체결홀의 지름 보다 좀더 지름이 큰 맨드릴을 체결홀에 관통시키는 방법으로써, 맨드릴이 삽입될때 체결홀 주위에 소성변형이 일어나고 이후 맨드릴을 제거 하는 과정에서 홀과 근접한 부근에서 유효한 압축 잔류응력층이 생성되게 된다. 이 압축잔류응력이 홀주위에 접선방향으로 분포됨으로써 부재가 반복하중을 받을때 체결홀에서의 균열발생을

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : cadian@skku.edu

TEL : (02)950-7090 FAX : (031)290-5849

\* 회원, 성균관대학교 기계공학과

\*\* 인덕대학 컴퓨터응용설계

자연하게 되어 부재의 피로수명을 증대 하는 방법이다.

기존의 많은 연구들<sup>(1-4)</sup>이 홀확장법에 대해 부재의 중간 위치에서 잔류응력층을 비교 분석 하였다. 그러나 홀확장법 적용시, 맨드럴의 삽입이란 특성상, 맨드럴이 들어가는 면과 부재의 중간면 그리고 맨드럴이 빠져 나가는 면에서의 잔류응력층의 차이가 분명히 있을 것이라 예상된다. 또한, 일반적인 부재의 체결홀 들은 특정위치에 따라 체결홀과 그 인접한 체결홀들 사이의 거리가 매우 근접한 경우가 있다. 이런 체결홀들의 사이에선 홀확장법에 의해 생긴 잔류응력층의 분포가 일반적인 하나의 홀인 경우에 비해 변화가 있을 것으로 예상된다. 기존의 인접홀에 관한 연구들은 실제적인 맨드럴의 통과와 그에 의한 부재의 삽입면(Entry), 중간면(Mid), 출구면(Exit)에 대한 해석이 부족하였다.

따라서 본 연구에서는 3 차원 유한요소 해석을 통하여 홀확장법을 보다 실질적으로 묘사하였고 인접한 홀 사이에서 부재의 위치에 따른 잔류응력층을 비교 함으로써 좀더 정확한 응력분포 변화를 알아 보았다. 또한, 홀과 홀 사이의 거리 (b)를 다양하게 하여 유한요소 해석을 함으로써 홀 사이의 거리에 따른 잔류응력층 변화도 알아 보았다. 이때, 인접한 체결홀들에 동시적으로 홀확장 하는 방법(concurrent CEM)과 순차적으로 홀확장하는 방법(sequential CEM)에 의한 홀주위에서 잔류응력층의 변화도 알아 보았다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 재료 물성치

유한요소해석을 위해 항공기 부품으로 많이 사용되는 Al6061-T6 합금을 모델로 하였다. 잔류응력의 정확한 해석에 필요한 탄소성 물성을 얻기 위해 Fig. 2 와 같이 Al6061-T6 합금의 진응력-진변형률 값을 인장시험을 통해 얻은 후 유한요소 해석에 반영하였다. 이때, 탄성계수 (Young's modulus) E 는 72GPa 을 사용하였다. ( $\nu=0.33$ ,  $\sigma_{ys}=270MPa$ )

### 2.2 유한요소해석 절차와 검증

본 연구에서는 Fig. 3 과 같이 반지름(R)이 3mm 인 두 개의 홀이 어떤 거리만큼 떨어진 모델에 맨드럴을 관통시키는 방법으로 홀확장법을 적용하는 모델을 선정하였다.

이때, 인접한 홀 사이의 거리(b)를 홀 반지름(R)의 6~12 배로 다양하게 하여 홀 사이의 거리에 따른 영향도 살펴 보았다. Fig. 4 에서 보이듯이 유한요소망 구성은 해석시간의 단축을 고려하여 전체 모델의 1/2 을 해석대상영역으로 선정하여 모델링 하였으며, 실질적 홀확장법 적용을 위해 맨드럴이 홀을 이동하면서 관통하도록 하였다. 맨드럴은 홀의

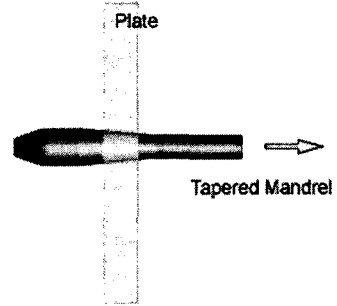


Fig. 1 Schematic of the cold expansion process

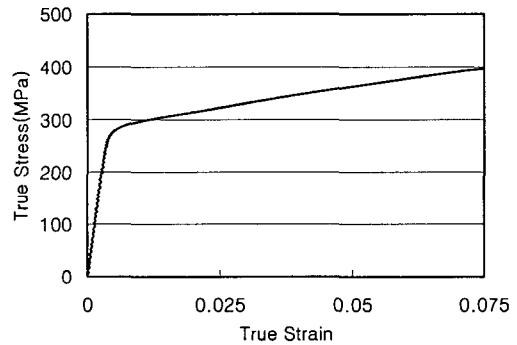


Fig. 2 True stress-strain relation of Al6061-T6

지름 보다 4% 지름이 더 큰 맨드럴 모델을 사용 하였다. 이때 맨드럴은 강체(rigid body) 요소를 사용하였고 맨드럴과 홀사이에 contact 처리를 통하여 서로 파고들지 못하게 하였으며, 평판 바깥의 절점을 맨드럴의 이동방향으로 이동하지 못하게 구속하였다. 맨드럴이 홀을 완전히 관통하는 동안의 총변위를 78 번의 증분으로 나누어 해석 하였고 전체 모델의 절점(node)수는 24000 개이고 요소 수(element)는 3000 개로 하였다. 맨드럴이 두 개의 인접한 홀을 동시에 관통하는 동시적 홀확장법과 순차적으로 관통하는 순차적 홀확장법으로 각각 나누어 해석을 수행 하였다. 이때 FE 해석 프로그램은 ABAQUS, ver 6.4<sup>(9)</sup>와 PATRAN 2005 를 사용 하였다.

유한요소 해석의 타당성을 입증하기 위하여 홀확장 실험을 하였다. Fig. 5 는 홀확장실험의 실험 장치 모습이다. 홀확장실험을 통해 발생된 잔류 변형률을 시편에 붙인 스트레인 게이지를 통해 측정하였다. 이때, 스트레인 게이지는 x/y 방향 변형율을 동시에 측정 할 수 있는 TML 사의 응력구배

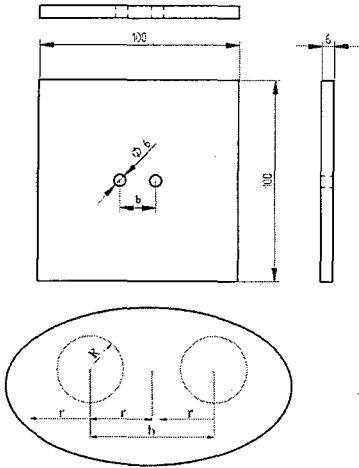


Fig. 3 Real model

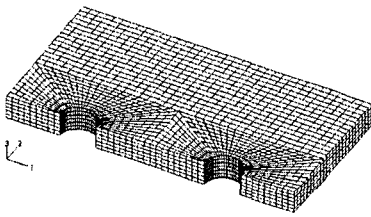


Fig. 4 FE modeling (b/R=6)

측정용 FCV-1-11-005LE 모델을 사용하였다. 맨드릴이 들어가는 쪽 시편 표면의 반지름방향과 접선 방향에서의 스트레인값을 측정하여 해석한 결과를 비교 하여 Fig. 6 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 홀확장 잔류변형률의 크기 및 경향이 전반적으로 일치하므로 해석의 타당성을 입증할 수 있겠다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 잔류응력분포

Fig. 7 은 맨드릴의 삽입면, 중간면, 출구면에서 각 위치의 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 7 처럼 홀확장 방법을 적용하여 생긴 압축잔류응력 층의 생성은 홀확장법의 특성상, 부재의 맨드릴 삽입면, 중간 부분, 출구면에서 분명 다른 잔류응력 층을 나타낸다. 부재의 중간부분과 출구부분에 발생하는 압축 잔류응력은 서로 비슷한 응력 크기

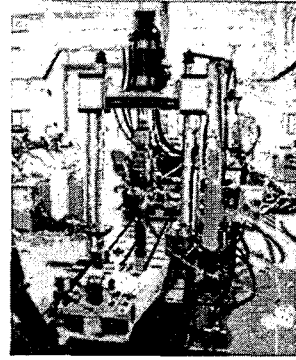


Fig. 5 Experimental instrument for cold expansion method

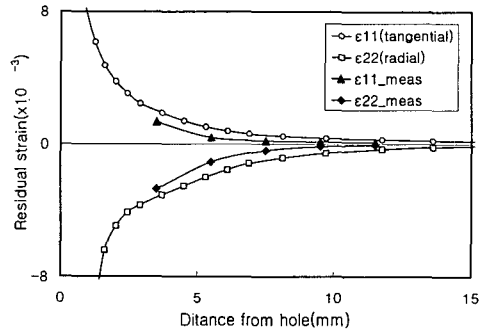


Fig. 6 Strain distribution after FE analysis & experimental analysis

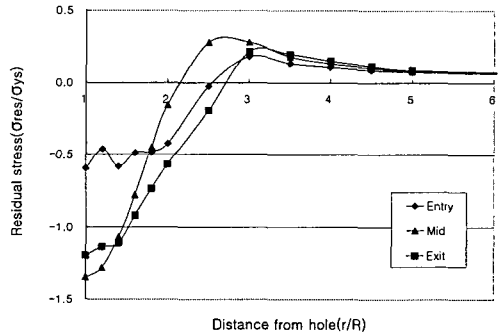


Fig. 7 Residual stress distribution

를 보이지만 맨드릴 삽입면에 발생한 잔류응력 분포는 중간과 출구부분에 발생한 잔류응력보다 더 작은 압축잔류응력이 분포하고 있음을 알 수 있다. 결국, 홀에서 균열이 발생한다면, 그 위치가 삽입 표면에서 더 쉽게 발생할 것으로 예상되며 이런 이유로 맨드릴 삽입부분의 잔류응력 분포를 관찰 할 필요가 있다.

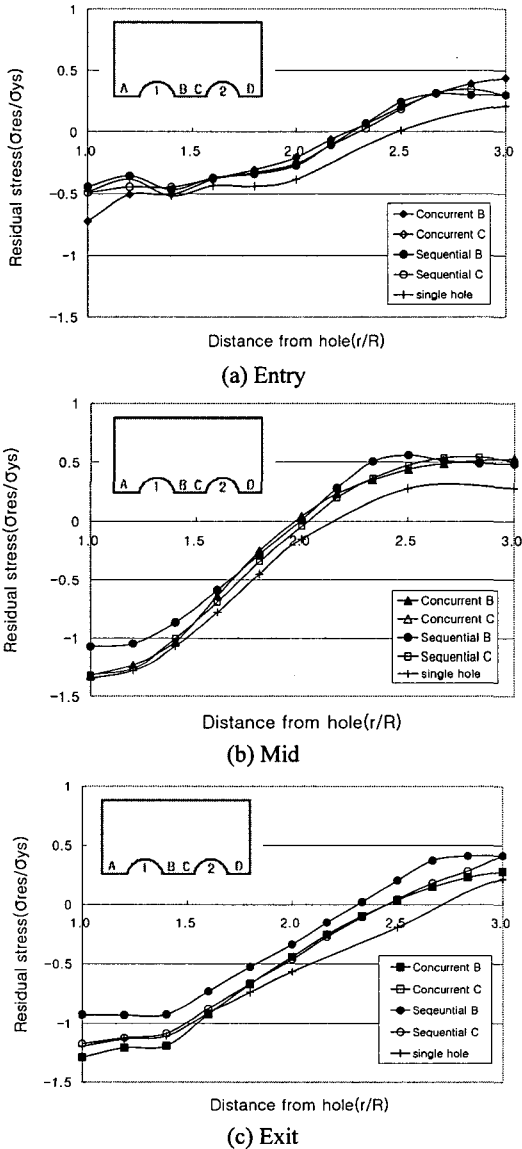


Fig. 8 Compare Concurrent with Sequential CE(b/R=6)

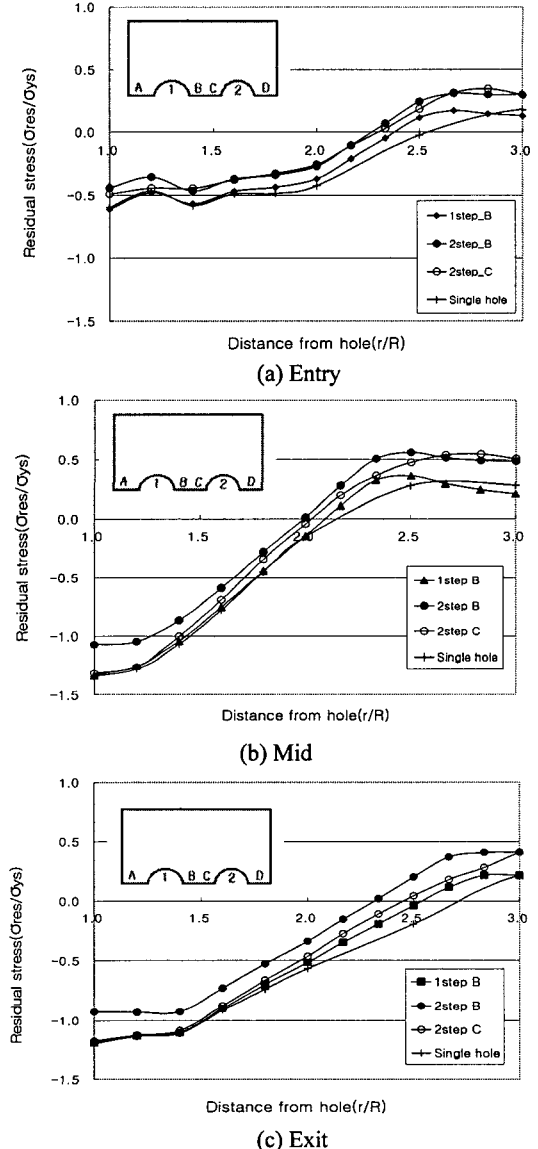


Fig. 9 Sequential Cold Expansion Method(b/R=6)

3.2 동시적 홀확장법과 순차적 홀확장법

부재의 체결부에선 경우에 따라 홀과 그 인접한 홀 사이의 거리가 20mm 미만인 경우도 존재한다. 즉, 두 개의 인접한 홀이 있을 때, 첫 번째 홀에 우선적인 홀확장으로 인해 발생한 잔류응력은 나머지 이웃하는 홀에도 영향을 미칠 것이며, 인접한 홀에 홀 확장을 적용하면 두 개의 홀에서 발생하는 잔류응력층은 분명 차이가 날 것이다. 또한, 이 방법은 두 개의 인접한 홀의 사이 거리에 따라 차이가 날 것이며, 두 개의 인접한 홀을 동시에 홀확장하는 방법과 순차적으로 홀확장 하는 홀

확장 적용 방법에 따라서 다른 결과를 나타낼 것이다.

Fig. 8 은 홀과 그 인접한 홀의 사이거리(b)를 홀의 반경(R)인 3mm 로 나눈 값(b/R=6)이 6 인 모델에 동시적 홀확장법과 순차적 홀확장법을 각각 적용하였을 때의 결과를 위치 별로 나타낸 것이다. 이때, 부재내 홀주위의 "B"위치와 "C"위치는 순차적 홀확장 적용시 먼저 홀확장을 적용하는 1 번째 홀과 그 후 홀확장을 적용하는 2 번째 홀 주위의 위치를 나타내며, 순차적 홀확장을 적용 하였을 때 그 순서에 따른 위치적 잔류응력층의 변화를 비교 하였다 Fig. 8 에서 보면 두홀에 동시 홀확장이 이루어진

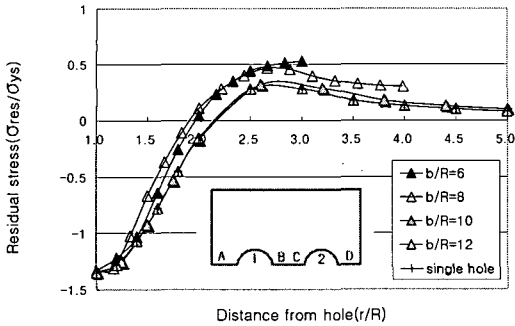


Fig. 10 As between distance, residual stress distributions in mid position of plate

경우에는 Fig. 8 의 (a),(b),(c) 모두에서 “B” 위치와 “C” 위치에서의 잔류응력분포 (concurrent B 및 concurrent C)가 예견한 바와 같이 일치했으며, (a)와 (c)에서 보면 인접홀의 영향에 의해 홀 근접부에서 압축잔류응력이 단일 홀확장인 경우보다 약간 증가 했으며 홀에서 멀어짐에 따라 급격히 압축응력이 감소해 감을 알 수 있다. 순차적확장 경우는 두번째 확장을 시행한 2 번째 주위의 응력분포 (sequential C)가 홀접근부를 제외하면 위의 동시 확장인 경우와 거의 일치하고 있으나 첫번째 확장을 시행한 1 번째 주위(sequential B)의 압축응력은 두번째 확장 때문에 상당히 완화 되는 걸 알 수 있다.

### 3.3 순차적 확장작업시 홀주위의 잔류응력 분포

Fig. 9 에선, 순차적 확장 적용에 있어서 첫 번째로 확장 (1 step) 하는 홀과 두 번째로 확장 (2 step)하는 홀에 의해 그 주위의 잔류응력 분포의 차이점을 비교 하여 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 9 를 보면 순차적으로 2 번째 확장을 적용한 경우 첫번째 확장을 적용했던 홀의 주변인 “B” 영역에서 발생한 잔류응력이 다른 곳에서 발생한 잔류응력에 비해 낮은 압축잔류응력이 나타남을 볼 수 있다. 이것으로 확장 적용시 먼저 확장을 적용한 인접한 홀에 유해한 영향을 미침을 알 수 있다.

### 3.4 인접한 홀과의 거리 별 잔류응력비교

Fig. 10 은 인접한 홀과의 사이 거리에 따른 잔류응력값을 비교한 것이다. 이때, 인접한 홀들에 동시적 확장방법을 적용하였으며, 부재의 “B” 위치의 잔류응력분포 중 중간부분(Mid) 값을 비교하였다.

Fig. 10 에서  $b/R$  이 6~12 사이의 값과 홀이 하나만 존재할 경우 (single hole)의 값을 비교 하였는

데,  $b/R = 10$  이상일 때, 하나의 홀에 확장한 잔류응력과 거의 근접한 값을 보였다. 그러므로, 두개의 인접한 홀이  $b/R = 10$  이상 떨어졌을 때는 다른 홀의 확장이 인접한 홀에 미치는 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

이번 논문에서는 인접한 홀에서의 확장방법 적용시에 맨드릴이 삽입되는 면과 부재의 중간면 그리고 맨드릴의 출구면에서 발생한 잔류응력분포를 각각 비교하였다. 또한 확장방법 적용시 인접한 두 홀에 동시적 확장을 적용하는 방법과 순차적으로 확장을 적용하는 방법에 의해 발생한 잔류응력을 비교하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 확장방법 적용시 맨드릴이 삽입 되는 면에서의 잔류응력 분포가 중간부분과 출구부분에의 잔류응력 분포보다 더 낮은 압축잔류응력을 분포한다.
- (2) 동시적 확장방법이 순차적 확장방법 보다 전반적으로 낮은 압축 잔류응력층을 생성한다.
- (3) 인접한 홀사이의 거리가 작을 경우( $b/R < 10$ ), 순차적 확장방법 적용시, 첫번째 확장을 적용한 홀의 주변에서 발생했던 압축잔류응력은 인접한 홀의 확장시 완화되는 현상을 보인다.
- (4) 인접한 홀 사이의 거리가  $b/R = 10$  이상이면 인접한 홀의 확장방법 영향을 거의 받지 않는다.

## 참고문헌

- (1) Pavier, M. J., Poussard, C. G. C. and Smith, D. J., 1997, “A Finite Element Simulation of the Cold Working Process for Fastener Holes,” *J. Strain Anal.* 32, pp. 287~300.
- (2) Papanikos, P. and Mequid, S. A., 1999, “Elasto-Plastic Finite Element Analysis of the Cold Expansion of Adjacent Fastener Holes,” *J. Mater. Process. Technol.* 89-90, pp. 424~428.
- (3) Jang, J. S., Yang, W. H. and Kim, C., 2002, “Analysis for the Residual Stress by Cold Expansion Method and Interference Fit,” *Korea. Soc. of Mech. Eng. A*, Vol. 26, No. 8, pp. 1615~1622.
- (4) Kim, C., Kim, D. J., Seok, C. S. and Yang, W. H., 2004, “Finite Element Analysis of the Residual Stress by Cold Expansion Method Under the Influence of Adjacent Holes,” *J. Mater. Process. Technol.* 153~154, pp. 986~991.
- (5) ABAQUS User’s Manual, Ver. 6.4, HKS Inc., USA.