

홀확장법과 억지끼워맞춤의 잔류응력 비교를 위한 유한요소해석

장재순*·양원호**·김철***·고명훈****

The Finite Element Analysis for Comparison of Residual Stress at Cold Expansion Method and Interference Fit

Jae-soon Jang, Won-Ho Yang, Cheol Kim and Myung-Hoon Ko

Key Words: Cold Expansion Method(홀확장법), Interference Fit(억지끼워맞춤), Residual Stress(잔류응력), Fastener Hole(체결홀), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

The purpose of this study is comparing cold expansion method with interference fit. Cold expansion method and interference fit of fastener hole is using in the aerospace industry. These treatment lead to an improvement of fatigue life to the compressive residual stresses developed on the hole surface. But Research is nothing to about difference effect of between cold expansion method and interference fit. So In this paper, It is shown that Comparing cold expansion method with interference fit. and It is further shown that residual stress distribution according to plate thickness.

1. 서론

최근 자동차나 항공, 선박등에서 기계적 체결합시 부재의 체결홀(fastener hole)에 피로수명을 향상시키기 위해서 홀확장법(cold expansion method)을 많이 사용하고 있으며 특히, 70년대에 보잉사에서 도입한 이래 항공부분에서 활발히 이용되고 있다. 이것은 피로균열의 발생이 예상되는 지점에 국부적인 압축 잔류응력을 발생시켜 줌으로써 균열발생을 지연시키는 방법이다. Fig. 1은 홀확장법을 도식적으로 나타낸 것으로, 그림

에서와 같이 홀의 지름 보다 좀 더 지름이 큰 맨드릴을 홀에 삽입시켜 줌으로써 홀을 재료의 항복 강도 이상으로 팽창시키며, 그 후 맨드릴을 제거하여도 유효한 압축 잔류응력층이 홀주위에 접선방향으로 남아 하중으로부터 작용하는 인장 응력을 일부 상쇄시켜 균열의 생성 및 진전을 억제시키는 방법이다.

이와 유사한 방법으로 억지끼워맞춤(interference fit)이 있다. 이 방법은 현재 홀확장법과 더불어 항공기의 피로 수명을 향상시키는데 주로 사용되는 방법이다. Fig. 2와 같이 체결홀에 체결 홀보다 지름이 더 큰 볼트를 끼워 넣고 바로 체결하므로서 홀확장법보다 비교적 간단한 공정과 저렴한 비용으로 현장에서 많이 사용되고 있다. 지금까지 홀확장에 관한 연구는 실험^(1,2)과 유한요소 해석^(3,4)(finite element analysis ; FE)을 통한 많은 연구가 이루어졌으나, 억지끼워맞춤에 대한 연구는

* 성균관대학교 대학원
 ** 성균관대학교 기계공학부
 *** 성균관대학교 대학원
 **** 대림대학 산업기술경영과

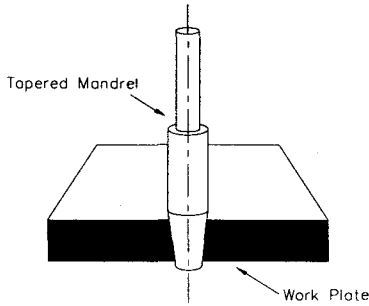


Fig. 1 Schematic of the Cold expansion Method

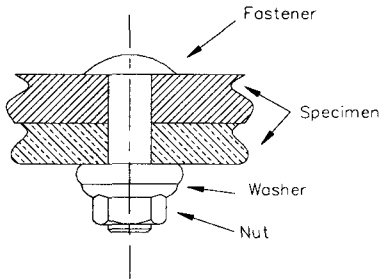


Fig. 2 Schematic of the Interference Fit

많이 이루어지지 않았을 뿐만 아니라, 기존 연구⁽⁵⁾는 피로 수명을 예측하였을 뿐, 두 방법에 의한 효과를 명확히 규명한 연구는 아직까지 이루어지지 않았다.

그러므로 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 홀 확장법과 억지끼워맞춤을 적용한 후 홀 주위에 생성된 잔류응력을 비교함으로써 두 방법의 성능의 차이를 규명하였다. 이때, 홀확장시 스트레인 게이지를 이용한 잔류변형률을 측정하여 해석결과와 비교함으로써 해석의 타당성을 입증하였으며, 해석 조건에서 평판의 두께에 대한 영향도 알아보았다.

2. 유한요소해석

2.1 재료물성치

해석에서 사용한 재질은 항공기 부품으로 널리 사용되고 있는 Al6061-T6을 사용하였으며, 홀

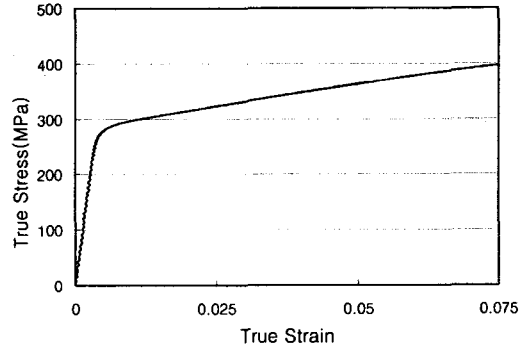


Fig. 3 True stress-strain relation of Al6061-T6

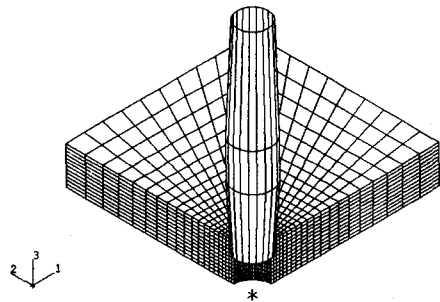


Fig. 4 FE modeling for cold expansion

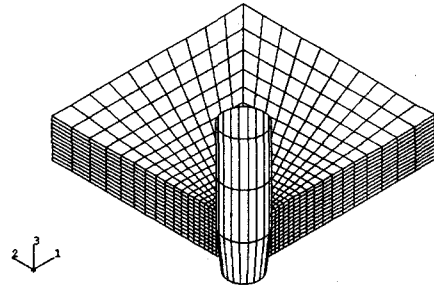


Fig. 5 FE modeling for interference fit

확장과 억지끼워맞춤 해석시 탄소성 해석을 적용하여야 하므로 재료의 인장 시험을 통하여 Fig 3 과 같은 진응력-진변형(true stress - true strain)선도를 구하여 이를 유한요소 해석에 적용하였다. 이때, 탄성계수(Young's modulus) E 는 72GPa 이고, 푸아송비(Poisson's ratio) ν 는 0.33을 적용하였다.

2.2 해석모델 및 방법

본 연구에서는 중앙에 지름 6mm의 홀이 있는 60×60mm인 정 사각형 평판에 홀확장법과 억지끼워맞춤을 적용하는 모델을 설정하였으며, 대칭성을 고려하여 1/4모델로 구성하였다. 실제 실험과 동일한 조건을 주기 위해 패스너(fastener)가 홀속으로 이동하도록 설정하였다. Fig. 4는 홀확장 해석을 위한 유한요소 망으로서, 맨드릴이 홀을 관통하도록 하였으며, 이때 총 증분변위를 80으로 하였고, 맨드릴을 강체(rigid body)로 보고 강체요소를 적용하였으며, 맨드릴의 회전 중심축에 기준 절점(reference node)을 설정하여 기준절점을 통해 맨드릴이 이동하도록 하였다. 또한 맨드릴과 맨드릴이 관통하는 홀 면에 접촉(contact) 처리를 통해 서로 파고들지 못하게 하였다. Fig. 5는 억지끼워맞춤을 위한 유한요소 망으로써 기본 해석 방법은 위의 홀확장법과 동일 하나, 홀확장 해석시 맨드릴이 홀을 완전히 관통하는 반면에 억지끼워맞춤 해석시에는 패스너가 홀에 삽입된 상태로 체결이 이루어지므로 이점을 고려하여 해석하였다. 그리고 동일조건에서 홀확장법과 억지끼워맞춤을 적용하므로서 발생하는 잔류응력에 관한 결과를 비교하였다. 또한, 평판의 두께를 다르게 해석하므로서 평판의 두께가 홀확장법이나 억지끼워맞춤의 적용시 생성되는 잔류응력에 미치는 영향에 대해서도 파악하였다.

유한요소 망 구성에서는 PATRAN Ver. 7.0을 사용하여 총 4000개의 요소와 6000개의 절점으로 유한요소망을 구성하였고 해석에서는 ABAQUS⁽⁶⁾ Ver. 5.8을 사용하여 해석하였다.

2.3. 실험을 통한 유한요소해석의 타당성 검토

유한요소 해석의 타당성을 입증하기 위하여 다음과 같은 홀확장 실험을 하였다. Fig. 6은 실험에 사용된 시편이며, Fig. 7은 실험장치의 모습이다. Fig. 6과 같이 시편(60×60×6mm)을 제작하고 홀확장법을 통해 발생한 잔류변형률을 시편에 붙인 스트레인 게이지를 통해 측정하였다. 이때, 스트레인 게이지는 x/y 방향이 동시에 측정 가능한 TML사의 응력구배 측정용 FCV-1-11-005LE 모델

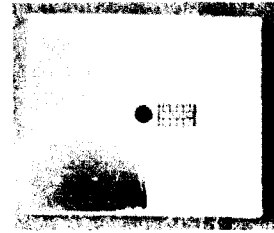


Fig. 6 Specimen for cold expansion process

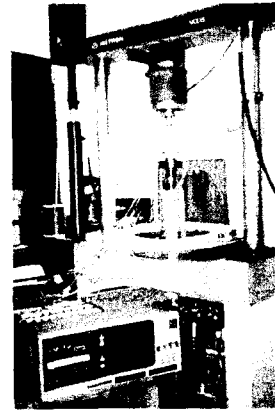


Fig. 7 Experimental Instrument for cold expansion method

을 사용하였다. 홀확장 실험 결과, 맨드릴이 들어가는 면의 반경방향과 접선방향에서의 스트레인값을 측정하여 동일 조건으로 유한요소 해석한 결과에서 맨드릴이 들어가는 부분의 스트레인값과 비교하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 크기 및 경향이 전반적으로 일치하므로 해석의 타당성을 입증할 수 있겠다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 홀확장법과 억지끼워맞춤에 의한 잔류응력 비교

홀확장율을 4%로 하여 홀확장법에 의해 맨드릴이 홀면을 관통하면서 생성되는 잔류응력과 동

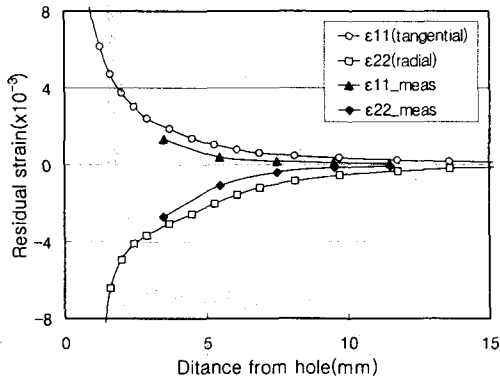


Fig. 8 Strain distribution after FE analysis & experimental analysis

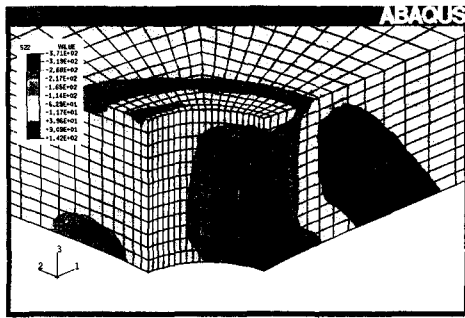


Fig. 9 Residual stress contour(s22) after cold expansion

일 홀확장율을 적용한 억지끼워맞춤에서의 패스너가 홀면에 삽입되며 생성된 잔류응력을 유한요소 해석으로 구하고, 맨드릴이나 패스너가 평판에 들어가는 부분(in position)과 중간 부분(mid position) 그리고 나가는 부분(out position)으로 나누어 잔류응력을 비교하였다. Fig. 9는 홀확장법 적용시 홀면에 생성된 잔류응력의 분포를 나타낸 그림으로써 홀면에서 생성된 압축 잔류응력이 홀면에서 멀어 질수록 인장 잔류응력으로 변했다가 점차 응력이 소멸되는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 맨드릴이나 패스너가 들어가는 부분에 대한 비교를 나타낸 것이며, Fig. 11은 중간부분에서, 그리고 Fig. 12는 나가는 부분에서의 잔류응력을 비교한 것이다. Fig. 10을 보면 홀면에서 억지끼워맞춤에 의한 잔류 응력 값이 홀확장법에 의해 생성된 잔류응력 값보다 더 큰 인장 응력으로 분포함을 알 수 있다.

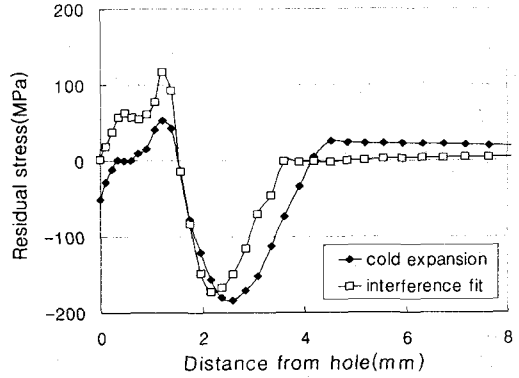


Fig. 10 Residual stress distribution at in position by cold expansion method and interference fit

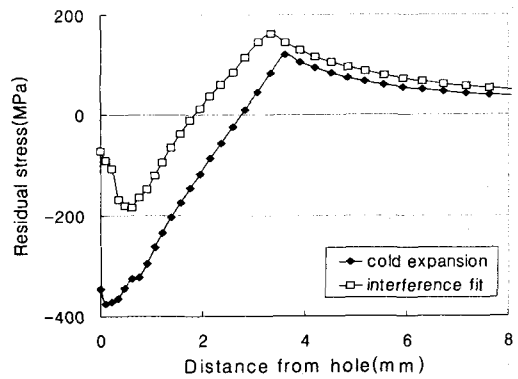


Fig. 11 Residual stress distribution at mid position by cold expansion method and interference fit

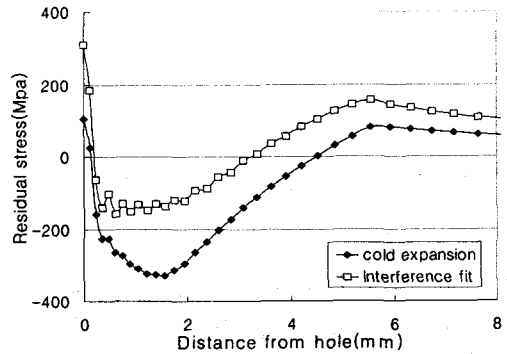


Fig. 12 Residual stress distribution at out position by cold expansion method and interference fit

홀의 중간 부분인 Fig. 11에서는 전체적으로 홀면에 유효한 압축 잔류응력이 일정 거리까지 분포함을 알 수 있으며, 홀확장법에 의해 생성된 압축잔류응력이 억지끼워맞춤에 의해 생성된 압

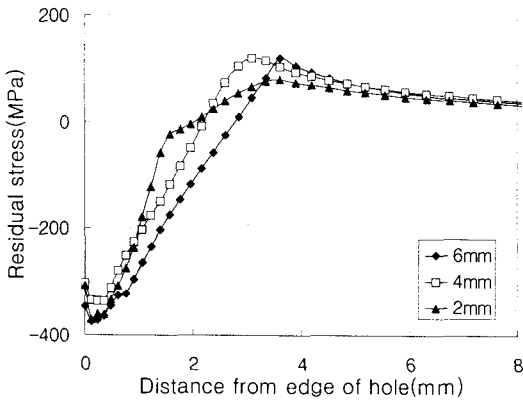


Fig. 13 Residual stress distribution at mid by cold expansion according to plate thickness

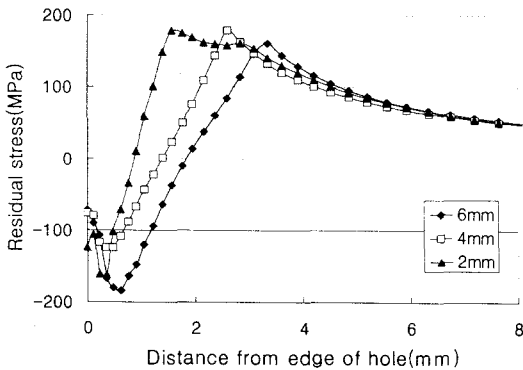


Fig. 14 Residual stress distribution at mid by interference fit according to plate thickness

축 잔류잔류응력보다 최대 217% 크게 나타나는 결과를 보이고 있다. Fig. 12는 맨드릴이 나가는 부분을 비교한 것으로서 맨드릴이나 패스너가 들어오는 부분과 중간부분에서의 잔류응력 분포에 비해 큰 인장잔류 응력분포를 보이고 있다. 여기서 위 그림의 결과들과 마찬가지로 억지끼워맞춤에 의해 생성된 잔류응력이 홀확장법에 의해 생성된 잔류응력 보다 더 안 좋은 결과를 보이고 있다. 이로 인해 억지끼워맞춤 보다 홀확장법이 더 유용한 잔류응력층을 생성함을 알 수 있다.

3.2 평판의 두께에 의한 잔류응력의 영향

평판의 두께가 홀확장법이나 억지끼워맞춤에 의한 잔류응력 생성에 미치는 영향에 대해 파악

하고자 평판의 두께를 2mm, 4mm, 6mm로 각각 유한요소망을 만들어 해석하여 얻은 잔류응력의 결과를 비교하였다. Fig. 13은 홀확장법 적용시 평판 두께에 따른 잔류 응력값을 비교한 것이고, Fig. 14는 억지끼워맞춤 적용시 평판의 두께에 따른 잔류 응력값의 비교를 나타낸 것이다. 이때, 인장잔류응력이 가장 큰 중간 부분에서의 잔류응력 값만 비교 하였다. Fig. 13에서 보면 홀확장법의 적용시 평판의 두께가 얇을수록 홀면에서 가까운 거리의 인장 잔류응력이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 14에서 억지끼워맞춤을 적용하였을 때도 홀면에서 일정 거리안에서의 압축 잔류응력의 범위가 줄어들며 크기도 줄어드는 것을 볼 수 있으며 홀확장법에서 보다 억지끼워맞춤에서 평판두께의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 홀확장 과정에 대한 유한요소해석을 수행하고 홀확장 실험을 통해 해석의 타당성을 검토하였으며 억지끼워맞춤과 홀확장법에 의해 생성된 잔류응력을 비교하였다. 또한, 평판의 두께가 잔류응력 생성에 미치는 영향에 대해서도 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 억지끼워맞춤과 홀확장법 중에서 홀확장법이 홀면에서의 유효한 압축잔류응력을 생성하는데 더 유리하다.
- (2) 홀확장법 적용시 평판의 두께가 얇아짐에 따라 홀 근방에서의 인장응력이 증가하며 압축 잔류응력이 감소한다.
- (3) 억지끼워맞춤 적용시 평판의 두께가 감소함에 따라 압축 잔류응력층의 범위가 좁아지며 크기도 줄어든다.

후기

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

참고문헌

- (1) Pavier. M. J, 1997, "A Finite Element Simulation of the Cold Working Process for Fastener Holes," *Journal of strain analysis*, Vol. 32, No. A, pp. 287~300.
- (2) Poussard, C. G. C, Pavier M. J. and Smith D. J., 1994, "Prediction of Residual Stresses in cold Worked Fastener Holes using the Finite Element Method," *Engineering systems design and analysis*, Vol. 8, part A. pp.
- (3) Ozdemir, A. T. and Dward, L. E., 1996, "Measurement of the Three-Dimensional Residual Stress Distribution Around Spilt-Sleeve Cold Expansion Holes," *Journal of strain analysis* Vol. 31, No. 6.
- (4) 장재순, 양원호, 김 철, 고명훈, 조명래., 2001, "유한요소법을 이용한 CT시편의 홀확장 잔류응력 및 응력확대계수 해석," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A., pp. 603~608.
- (5) D. Duprat, D. Campassens, M. Balzano and R. Boudett., 1996, "Fatigue Life Prediction of Interference Fit Fastener and Cold Worked Holes," *Journal of Fatigue* Vol. 18, No. 8, pp. 515~521.
- (6) ABAQUS User's Manual, Ver.5.8, HKS, Inc., USA