

홀확장법과 억지끼워맞춤에 의한 잔류응력 해석

장재순[†] · 양원호^{*} · 김철^{**}

(2001년 12월 14일 접수, 2002년 4월 17일 심사완료)

Analysis for the Residual Stress by Cold Expansion Method and Interference Fit

Jae-Soon Jang, Won-Ho Yang and Cheol Kim

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

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, this paper, it is shown that Comparing cold expansion method with interference fit using the finite element method. It is further shown that residual stress distribution according to plate thickness and clamping force.

1. 서론

최근 자동차나 항공기, 선박 등에서 기계적 체결합시 피로수명을 향상시키기 위해서 부재의 체결홀(fastener hole)에 홀확장법(cold expansion method)을 많이 사용하고 있으며 특히, 1970년대에 보잉사에서 홀확장법을 도입한 이래 항공분야에서 활발히 이용되고 있다. 이것은 피로균열의 발생이 예상되는 지점에 국부적인 압축 잔류응력을 발생시켜 줌으로써 균열발생을 지연시키는 방법이다. Fig. 1은 홀확장법을 도식적으로 나타낸

것으로 그림에서와 같이 홀의 지름 보다 좀 더 지름이 큰 맨드릴을 홀에 삽입시켜 줌으로써 홀을 재료의 항복강도 이상으로 팽창시키며, 그 후 맨드릴을 제거하여도 유효한 압축 잔류응력층이 홀 주위에 접선방향으로 남아 작용하는 인장응력을 일부 상쇄시켜 균열의 생성 및 진전을 억제시키는 방법이다.

이와 유사한 방법으로 억지끼워맞춤(interference fit)이 있다. 이 방법은 현재 홀확장법과 더불어 항공기 기계적 체결부의 피로 수명을 향상시키는 데 주로 사용되는 방법이다. Fig. 2와 같이 체결홀 지름보다 더 큰 볼트를 끼워 넣고 바로 체결하므로써 홀확장법 보다 비교적 간단한 공정과 저렴한 비용으로 현장에서 많이 사용되고 있다. 지금까지 홀확장에 관한 연구는 실험^(1,2)과 유한요소해석⁽³⁻¹⁰⁾(finite element analysis ; FEA)을 통한 많은 연구가 이루어졌으나, 억지끼워맞춤에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았을 뿐만 아니라, 기

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

E-mail : js3903@mail.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7496 FAX : (031)290-5849

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

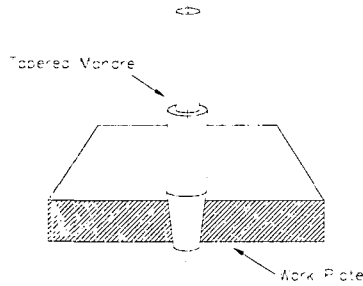


Fig. 1 Schematic diagram of the Cold expansion Method

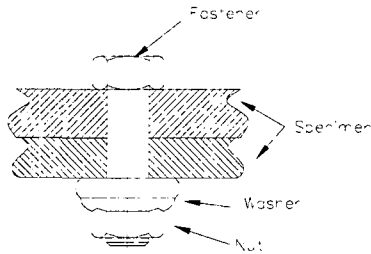


Fig. 2 Schematic diagram of the Interference Fit

존 연구⁽¹¹⁾는 피로 수명을 예측하였을 뿐, 두 방법에 의한 효과를 명확히 규명한 연구는 아직까지 이루어지지 않았다. 또한 체결홀에서의 실제 체결시 볼트머리로부터 가해지는 체결력(clamping force ; CF) 등의 체결조건을 고려하여 실제 부재에 최종적으로 남게되는 잔류응력분포에 대한 평가가 요구된다.

그러므로 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 홀 확장법과 억지끼워맞춤을 적용한 후, 홀주위에 생성된 잔류응력을 비교함으로써 두 방법의 차이를 규명하였다. 이때, 홀확장시 스트레인 게이지를 이용한 잔류변형률을 측정하여 해석결과와 비교함으로써 해석의 타당성을 입증하였으며, 해석 조건에서 평판의 두께에 따른 영향도 알아보았다. 또한 실제 체결조건을 고려함으로써 체결합시에 부재에 최종적으로 남게 되는 잔류응력도 고찰하였으며, 이것은 체결 구조물의 설계에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

2. 유한요소해석

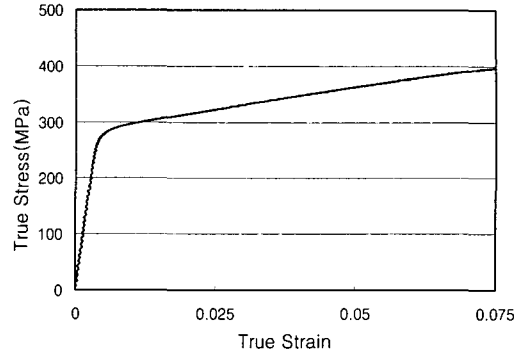


Fig. 3 True stress-strain relation of Al6061-T6

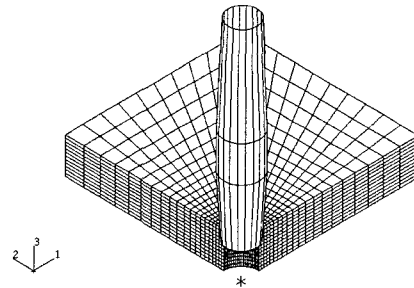


Fig. 4 FE modeling for cold expansion

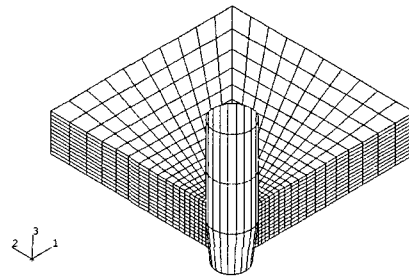


Fig. 5 FE modeling for interference fit

2.1 재료물성치

해석에서 사용한 재료는 항공기 부품으로 널리 사용되고 있는 Al6061-T6이며, 홀확장과 억지끼워맞춤 해석시 탄소성 해석을 적용하여야 하므로 재료의 인장 시험을 통하여 Fig 3과 같은 진응력-진변형률(true stress - true strain)선도를 구하여 이를 유한요소해석에 적용하였다. 이때, 탄성계수 (Young's modulus) E 는 72GPa 이고, 푸아송 비

(Poisson's ratio) ν 는 0.33을 적용하였다.

2.2 해석모델 및 방법

본 연구에서는 중앙에 지름 6mm의 홀이 있는 60×60mm인 정사각형 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 요소분할로써, 맨드릴이 홀을 관통하도록 하였으며, 이때 총 증분 변위를 80으로 하였고, 맨드릴을 강체로 취급하여 강제요소를 적용하였으며, 맨드릴의 회전 중심 축에 기준 절점을 설정하여 기준절점을 통해 맨드릴이 이동하도록 하였다. 또한 맨드릴과 홀면 사이에는 접촉처리를 통해 서로 파고들지 못하게 하였다.

Fig. 5는 억지끼워맞춤을 위한 유한요소 망으로써 기본 해석 방법은 위의 홀확장법과 동일하나, 홀확장 해석시 맨드릴이 홀을 완전히 관통하는 반면에 억지끼워맞춤 해석시에는 패스너가 홀에 삽입된 상태로 체결이 이루어지므로 이점을 고려하여 해석하였다. 그리고 동일조건에서 홀확장법과 억지끼워맞춤을 적용하므로써 발생하는 잔류응력에 관한 해석결과를 비교하였다. 또한, 평판의 두께를 변화시키며 해석하므로써 평판의 두께가 홀확장법이나 억지끼워맞춤의 적용시 생성되는 잔류응력에 미치는 영향에 대해서도 파악하였다.

체결력을 고려한 해석에 있어서 해석에 적용한 체결력은 KS규격에 의한 M6볼트에 실제 사용하는 볼트의 조임 토크인 112.9N·m를 적용하여 구하였다. 체결력과 조임토크사이의 관계식은 식 (1)과 같다. 이때, T 는 조임 토크이며, K 는 토크계수, F_i 는 초기 인장력, d 는 볼트의 바깥지름이다.

$$T = K F_i d \tag{1}$$

볼트 체결에 있어서 실제적으로 와셔를 볼트와 부재 사이에 끼워 넣으므로 식 (1)에서 조임 토크로부터 체결력을 구하여 와셔의 전체면적으로 나누는 방법으로 체결시의 압력을 구하였다. 이렇게 구한 볼트의 체결압을 홀확장법 해석 이후에 2-step으로 와셔 면적에 균일 압력을 가하여

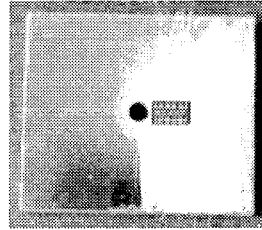


Fig. 6 Specimen for cold expansion process

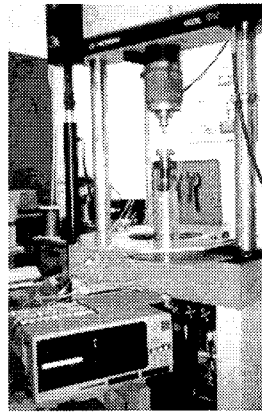


Fig. 7 Experimental setup for measuring residual strain in cold expansion method

해석하였다. 또한, 체결력의 크기에 따른 잔류응력의 변화를 알아보기 위하여 식 (1)을 통해 계산한 체결력에 0.5배 한 값(0.5CF)과 2배 한 값(2CF)을 각각 적용하여 유한요소해석을 수행하였다.

요소분할 구성에서는 PATRAN Ver. 7.0을 사용하여 총 4000여개의 요소와 6000여개의 절점으로 요소분할을 구성하였고 해석에서는 ABAQUS Ver. 5.8⁽¹²⁾을 사용하였다.

2.3 실험을 통한 유한요소해석의 타당성 검토

유한요소 해석의 타당성을 입증하기 위하여 홀확장 실험을 하였다. Fig. 6은 실험에 사용된 시편이며, Fig. 7은 실험장치의 모습이다. Fig. 6과 같이 시편(60×60×6mm)을 제작하고 홀확장법을 통해 발생된 잔류변형률을 시편에 붙인 스트레인 게이지를 통해 측정하였다. 이때, 스트레인 게이지는 x, y 방향 변형률을 동시에 측정할 수 있는

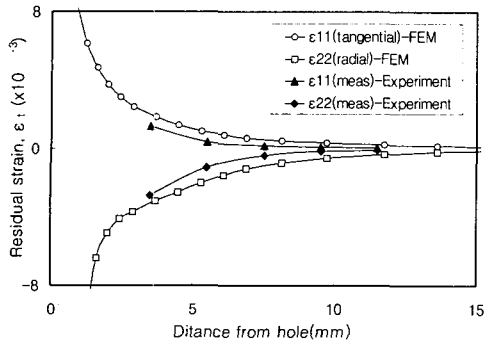


Fig. 8 Strain distribution after FE analysis & experimental analysis

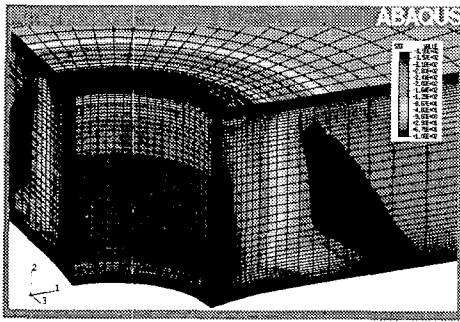


Fig. 9 Residual stress contour(s33) after cold expansion

TML사의 응력구배 측정용 FCV-1-11-005LE 모델로서 길이 2mm인 스트레인 게이지가 연속으로 5개 배치되어 있는 구조이다. 스트레인 게이지는 홀확장 시 소성변형의 영향을 줄이기 위하여 홀경계에서 2.5mm 떨어진 위치에 부착하였으며, 정적 스트레인 측정기(UCAM-70A, KYOWA)를 연결하고 유압시험기를 이용하여 시편에 맨드럴을 통과시킨 후 잔류변형률을 측정하였다.

맨드럴이 들어가는 쪽 시편 표면의 반지름방향 (ϵ_r)과 접선방향 (ϵ_t)에서의 변형률을 측정하여 동일 조건으로 유한요소 해석한 결과와 비교하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 홀확장 잔류변형률의 크기 및 경향이 전반적으로 일치하므로 해석의 타당성을 입증할 수 있겠다.

3. 해석결과 및 고찰

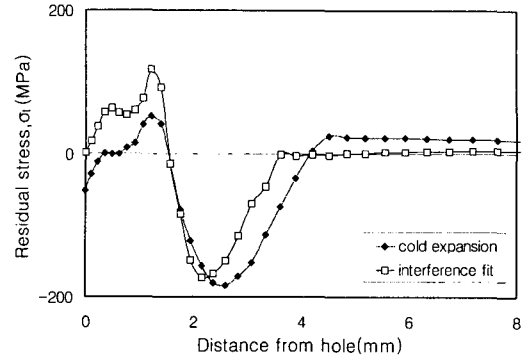


Fig. 10 Residual stress distribution at entry surface by cold expansion method and interference fit

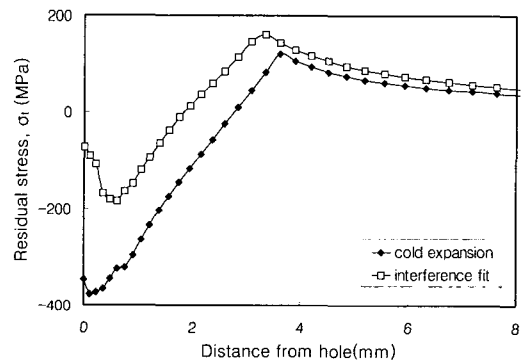


Fig. 11 Residual stress distribution at mid thickness plane by cold expansion method and interference fit

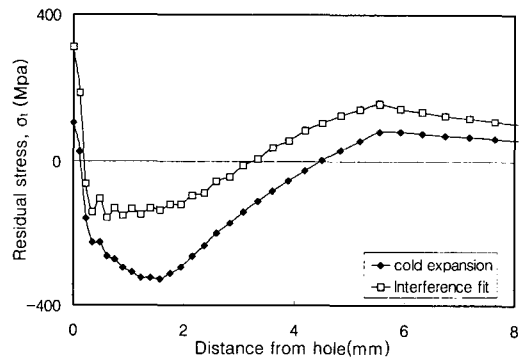


Fig. 12 Residual stress distribution at exit surface by cold expansion method and interference fit

3.1 홀확장법과 억지끼워맞춤에 의한 잔류응력 비교

홀확장률을 4%로 하여 홀확장법에 의해 맨드릴이 홀면을 관통 후에 생성된 잔류응력과 동일한 홀확장률을 적용한 억지끼워맞춤에서의 패스너가 홀면에 삽입되며 생성된 잔류응력을 유한요소 해석으로 구하였다. 맨드릴이나 패스너가 들어가는 쪽 평판표면(입구표면, entry surface)과 평판의 두께 중앙면(두께 중앙면, mid thickness plane) 그리고 맨드릴이나 패스너가 나가는 쪽 평판표면(출구표면, exit surface)으로 나누어 잔류응력을 비교하였다. 이때, 잔류응력은 홀면의 균열 생성에 직접적인 영향을 미치는 접선방향 잔류응력 (σ_t)을 평가하였다. Fig. 9는 홀확장법 적용시 홀면 주위에 생성된 잔류응력의 분포를 나타낸 그림으로써 홀면에서 생성된 압축 잔류응력이 홀면에서 멀어지면 인장 잔류응력으로 변했다가 점차 응력이 소멸되는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 맨드릴 또는 패스너가 들어가는 쪽 평판표면에서의 홀확장 및 억지끼워맞춤의 경우에 더 큰 인장잔류응력 층이 나타남을 알 수 있다. Fig. 11은 판재두께의 중앙면에 나타나는 잔류응력을 보인 것으로, 홀확장법에 의한 압축 잔류응력이 억지끼워맞춤의 경우보다 약 2배 더 크게 나타나고 또 압축 잔류응력의 영역도 홀확장법에서 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 12는 맨드릴 또는 패스너의 출구쪽 평판표면에서의 잔류응력을 비교한 것으로 전반적으로 홀확장의 경우가 억지끼워맞춤에 의한 잔류응력 보다 더 낮게 나타나고 있다. 따라서 억지끼워맞춤 보다는 홀확장법이 홀주위에 더 큰 압축 잔류응력장을 형성하므로, 피로수명 면에서 더 유효한 방법이라 할 수 있다.

3.2 평판의 두께가 잔류응력에 미치는 영향

평판의 두께가 홀확장법이나 억지끼워맞춤에 의한 잔류응력에 미치는 영향을 파악하고자 평판의 두께를 2mm, 4mm, 6mm로 하여 각각 유한요소 해석을 수행하고 잔류응력 해석 결과를 비교하였다. Fig. 13은 홀확장법 적용시 평판두께에 따른 잔류응력 분포를 나타낸 것으로, 홀면에서의 압축 잔류응력과 최대 압축응력이 두께가 증가함에 따라 약간 증가하며, 압축 잔류응력이 나타나

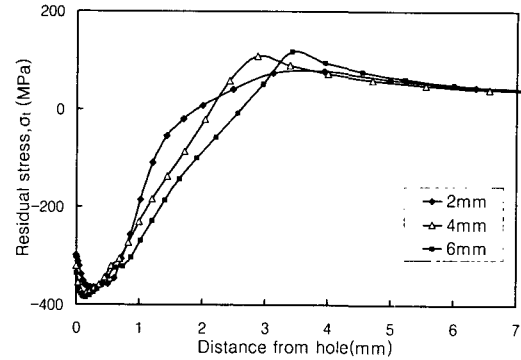


Fig. 13 Residual stress distribution at mid thickness plane by cold expansion according to plate thickness

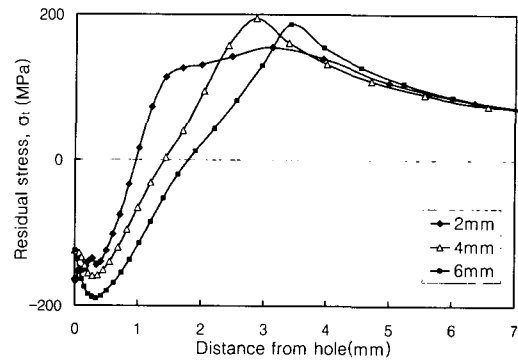


Fig. 14 Residual stress distribution at mid thickness plane by interference fit according to plate thickness

는 영역도 평판 두께가 증가함에 따라 커지는 것을 볼 수 있다. Fig. 14는 억지끼워맞춤 적용시 평판의 두께변화에 따른 잔류응력 분포를 나타낸 것으로, 최대 압축 잔류응력과 압축 잔류응력이 나타나는 영역이 평판의 두께가 커짐에 따라 증가하며, 홀확장시 보다 억지끼워맞춤의 경우가 평판두께의 영향을 상대적으로 더 크게 받는 것을 알 수 있다.

3.3 체결력을 고려한 잔류응력해석

Figs. 15~18은 홀확장법 적용시 체결력을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때(NonCF)의 잔류응력 분포를 나타낸 것이며 Figs. 19~21은 억지끼워맞춤 적용시에 체결력을 고려하였을때의 잔

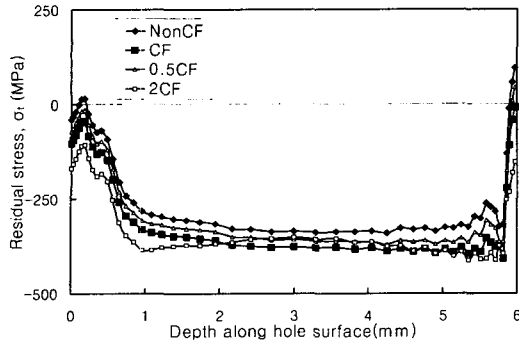


Fig. 15 Residual stress distribution by cold expansion method according to Fastening force at hole surface

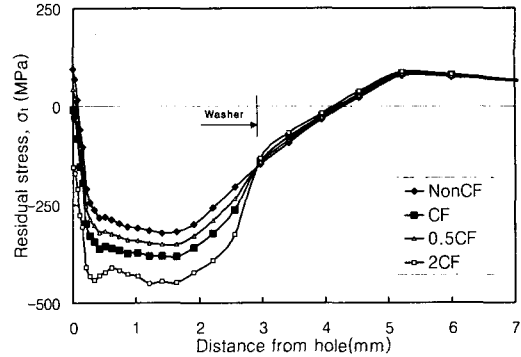


Fig. 18 Residual stress distribution by cold expansion method according to Fastening force at exit surface

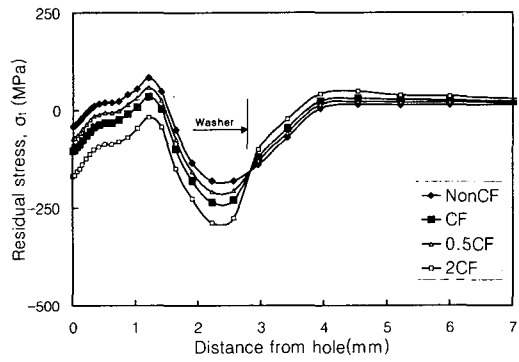


Fig. 16 Residual stress distribution by cold expansion method according to Fastening force at entry surface

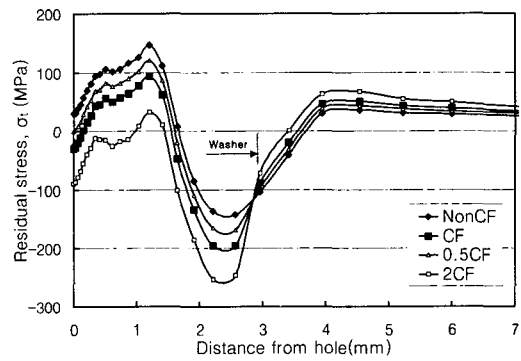


Fig. 19 Residual stress distribution by interference fit according to Fastening force at entry surface

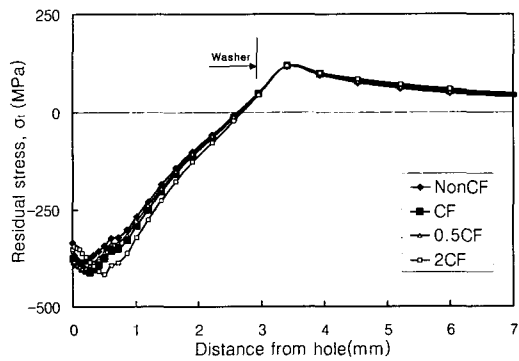


Fig. 17 Residual stress distribution by cold expansion method according to Fastening force at mid thickness plane

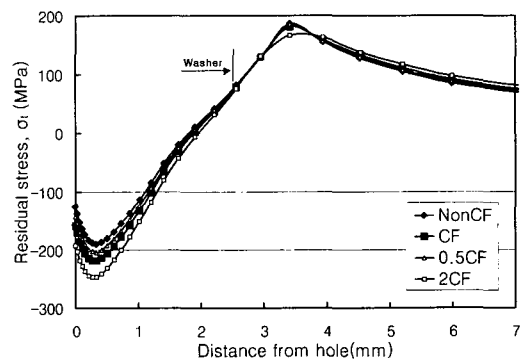


Fig. 20 Residual stress distribution by interference fit according to Fastening force at mid thickness plane

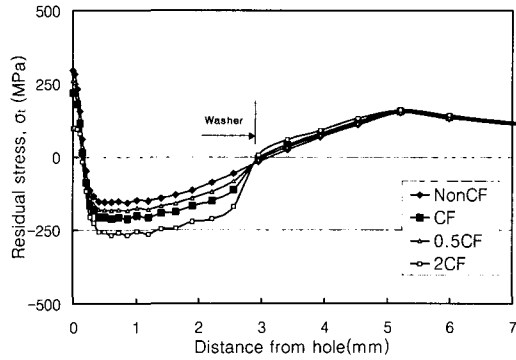


Fig. 21 Residual stress distribution by interference fit according to Fastening force at exit surface

류응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 15는 평판 두께 방향으로의 홀면에 따른 잔류응력분포를 보인 것으로, 홀면에는 맨드릴의 입구부와 출구부를 제외하면 각 경우에 거의 균일한 압축 잔류응력이 분포하며 체결력이 증가함에 따라 압축 잔류응력이 약간 증가하는데, 맨드릴의 입구부와 출구부에서 체결력에 의한 압축 잔류응력의 증가가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 16과 Fig. 19는 홀확장법 및 억지끼워맞춤 적용시 입구표면에서의 잔류응력 분포를, 체결력을 고려하여 해석한 결과이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 홀면에서 와서 지름에 해당하는 부분까지는 체결압력에 의하여 압축 잔류응력이 증가해가며, 와서 지름을 벗어나는 범위에서는 오히려 압축 잔류응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 체결력이 증가할수록 압축 잔류응력은 더욱더 크게 발생하며 와서 범위 밖의 압축 잔류응력은 체결력이 증가할수록 더 많이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 17과 Fig. 20은 평판의 두께 중앙면에서 체결력을 고려하여 해석한 잔류응력을 나타낸 그림이다. 여기서는 체결력을 고려하지 않은 상태에서의 잔류응력과 체결력을 고려한 경우의 잔류응력들 간에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. Fig. 18과 Fig. 21은 출구표면에서의 체결력에 따른 잔류응력을 해석한 것이다. 여기서도 와서 지름에 해당되는 부분까지는 체결압력에 의하여 압축 잔류응력이 증가함을 알 수 있으며, 와서지름을 벗어나는 범위에서의 압축 잔류응력의 감소함을 알 수 있다. 또한 체결력이 커질수록 압축 잔류응력

또한 커지며, 와서 지름 밖의 압축 잔류응력의 감소도 커진다.

따라서, 실제적으로 체결력을 가하였을 때는 단순 홀확장법과 억지끼워맞춤을 적용한 상태보다 더 유용한 잔류응력층이 생성됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 홀확장 과정에 대한 유한요소해석을 수행하고 억지끼워맞춤과 홀확장법에 의해 생성된 잔류응력을 비교하였다. 그리고 평판의 두께가 잔류응력 생성에 미치는 영향과 실제 체결 조건을 고려하여 체결 후의 잔류응력분포에 관하여 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 억지끼워맞춤과 홀확장법 중에서 홀확장법이 홀면에서의 유효한 압축 잔류응력을 생성시키는데 더 유리하다.
- (2) 홀확장법 적용시 평판의 두께가 얇아짐에 따라 홀 주위의 압축 잔류응력이 약간 감소한다.
- (3) 억지끼워맞춤 적용시 평판의 두께가 감소함에 따라 압축 잔류응력층의 범위가 좁아지며 그 크기도 감소한다.
- (4) 홀확장법과 억지끼워맞춤시 실제 체결함을 하면 더욱 유용한 압축 잔류응력층이 생성되며, 체결력이 커지면 압축 잔류응력도 커진다.

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. 47~53.
- (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) Jae-Soon Jang, Won-Ho Yang, Cheol Kim, Myung-Hoon Ko and Myoung-Rae Cho., 2001, "Analysis of the Residual stress due to Cold Expansion and Stress Intensity Factor in CT specimen Using Finite Element Method," *Proceedings of the KSME 2001 Spring Annual Meeting A.*, pp. 603~608.
- (5) Brombolich, L. J., 14 June 1972, "Elastic-plastic Analysis of Stresses near Fastener Holes," McDonnell Aircraft Company Report MDC A1769.
- (6) Papanikos, P. and Meguid S. A., 1998, "Three-dimensional Finite Element Analysis of Cold Expansion of Adjacent Holes," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 40, No. 10, pp. 1019~1028.
- (7) Papanikos P. and 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) Cheol Kim, Won-Ho Yang, Myung-Hoon Ko, Sung-Pil Heo and Cheol-Seung Hyun., 2000, "The Finite Element Analysis for Prediction of Residual Stresses Induced by Cold Expansion," *Proceedings of the KSME 2000 Fall Annual Meeting A.*, pp. 470~474.
- (9) Ball D. L. and Lowry D. R., 1998, "Experimental Investigation on the Effects of Cold Expansion of Fastener Holes," *Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures*, Vol. 21, pp. 17~34.
- (10) Özdemiş, A. T. and Edwards, L., 1997, "Relaxation of Residual Stress at Cold-Worked Fastener Holes due to Fatigue Loading," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 20, No. 10, pp. 1443~1451.
- (11) 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.
- (12) ABAQUS User's Manual, Ver.5.8, HKS, Inc., USA.