

<논문 >

홀확장법을 적용한 체결홀의 피로수명 개선을 위한 재 홀확장 효과에 대한 유한요소 해석

장재순[†] · 양원호* · 조명래**

(2006년 2월 23일 접수, 2006년 6월 8일 심사완료)

Finite Element Analysis of Re-Cold Expansion in Order to Improve the Fatigue Life of Fastener Hole that has been Cold Expanded Before

Jae Soon Jang, Won Ho Yang and Myoung Rea Cho

Key Words : Re Cold Expansion(재홀확장), Fatigue Life(피로수명), Finite Element Analysis(유한요소 해석), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

Cold expansion of fastener holes has been successfully used for many years to impart beneficial compressive residual stresses. Beneficial compressive residual stress of fastener hole that has been cold expanded before is reduced by using of materials for a long time. As a result, fatigue life of material is reduced. So, compressive residual stresses of material have to regenerate by re-cold expansion method. In this paper, it was carried out a finite element analysis about variation of residual stress due to tensile stress and residual stress distribution that was regenerated by re-cold expansion method in the fastener hole. Here, a diversity tensile stress was used. Also, it was performed a finite element analysis according to cold expansion rate of re cold expansion in order to obtain a beneficial compressive residual stress.

1. 서론

체결부(fastener joint)의 피로수명(fatigue life) 개선에 있어서 홀확장법(cold expansion method) 적용시 이로온 효과는 많이 알려져 있다. 일반적으로, 체결부재의 체결접합부에선 정적 하중으로 파괴(fracture)를 일으키는 경우 보다 부재의 항복응력에 비해 훨씬 낮은 응력의 반복작용이 가해졌을 때 재료의 파괴가 일어난다. 특히, 비행부재에서 항공기 날개와 같은 구조적 결합부에 반복인장응력이 집중되어 피로파괴의 주원인이 되고 더 나아가 시간이 지남에 따라 구조물 전체로 전이되어 심각한 파괴를 초래하는 것이다. 이런

체결부의 피로수명 증대를 위해 사용된 방법이 홀확장법이다. 홀확장법은 Fig. 1 처럼 체결홀 보다 좀 더 지름이 큰 형상봉(mandrel)을 체결홀에 관통시킴으로써 체결홀 주위에 국부적인 소성변형에 의해 잔류응력을 발생 시키고, 이렇게 발생된 잔류응력이 외부로부터의 인장력을 감소시켜 피로수명을 증대 시키는 방법이다. 이런, 홀확장법은 보잉사에서 개발된 이래 지난 40 여년간 사용되어 왔으며, 실험적 연구^(1-3,11,12)와 이론적 연구⁽⁴⁾ 그리고 컴퓨터수치해석적 연구⁽⁵⁻¹⁰⁾ 등을 통하여 그 효과가 입증되었다. Jang⁽⁶⁾은 외부로부터 진전 오는 균열에 홀확장 잔류응력이 미치는 영향에 대해 유한요소 해석을 통하여 연구하였으며, Papanikos⁽⁹⁾와 Kim⁽⁹⁾은 인접한 두 홀의 홀확장 잔류응력 평가에 대해 유한요소 해석과 동시적 홀확장방법 제시 한바 있다. 또한 Zhang⁽²⁾과 Ball⁽¹⁾은 실제 홀확장법 적용시 부재의 피로수명평가와 홀확장 적용시 잔류응력 측정 위한 실험적 연구를 수행하여 홀확장법의 효과를 입증하였다. 그러나, 이렇게 홀확장법을 이용하여 생성된 체결홀의 잔류응력은 일정시간 부재의

[†] 책임저자, 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과
E-mail : cadian@skku.edu
TEL : (02)950-7090 FAX : (031)290-5849

* 성균관대학교 기계공학과

** 인덕대학 컴퓨터응용실제

사용에 의해 점차 소멸되어 결국 국부적인 인장응력에 의해 파괴가 일어날 것이다. 그러므로 부재의 사용에 따른 체결홀에 차후 조치가 필요할 것이다. 이런 차후 조치로 재 홀확장(re-cold expansion)을 들 수 있다. 즉, 비행부재나 구조물의 유지 보수 측면에서 재홀확장의 방법은 아주 유용한 방법이라 할 수 있다. 재홀확장은 일정시간 사용된 부재의 체결홀에 다시 한번 홀확장을 적용하여 사용 중에 소멸되었던 유효한 잔류응력을 다시 생성해 주는 방법이다. Bernard⁽¹²⁾는 재홀확장을 한 경우 재홀확장을 적용한 부재의 피로수명이 증가 하는 것을 피로실험을 통하여 입증 하기도 했다. 하지만 이런 유용한 방법임에도 불구하고 재홀확장시에 잔류응력의 분포를 정확히 파악하는 연구는 거의 이루어 지지 않았다. 그러므로 본 연구에서는 홀확장 적용홀이 외부조건에 의해 변형되는 잔류응력의 분포를 파악하고 재홀확장 적용시 재 생성되는 잔류응력의 상태를 유한요소 해석을 통하여 알아 보았다. 이때, 다른 변수를 고려하여 효과적인 재홀확장 방법을 제시하였다.

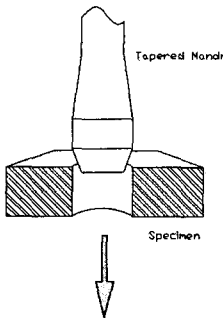


Fig. 1 Schematic of cold expansion method

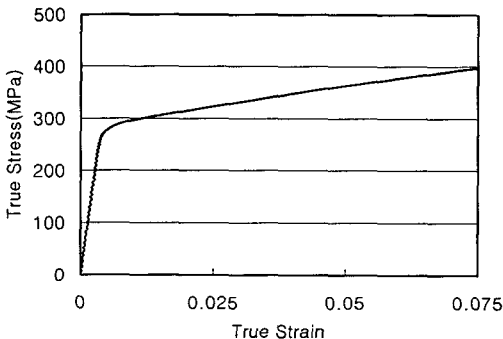


Fig. 2 True stress-strain relation of Al6061-T6

2. 유한요소해석

2.1 재료물성 및 유한요소해석모델

유한요소 해석에 있어서 항공기 부품으로 사용되는 Al6061-T6 합금 모델을 사용하였으며, 잔류응력 생성의 정확한 해석을 위해 인장시험을 통해 Fig. 2 와 같은 탄소성 물성 (진응력-진변형률 선도)을 구하여 해석에 반영하였다. 또한, 탄성계수 (Young's modulus) E는 72GPa 을 사용하였다. 이때 푸아송비(ν)와 항복응력(σ_{ys})은 0.33 과 270MPa 을 각각 사용하였다. 해석을 위한 유한요소망 구성은 Fig. 3 과 같이 중앙에 지름 6mm 의 홀이 있는 3 차원 부재 모델에 홀확장법 및 양끝에 인장응력을 적용하도록 설정하였으며, 유한요소 해석 시간을 고려하여 대칭성을 적용한 1/4 모델로 하였다.

2.2 유한요소해석 절차 및 방법

본 연구에서는 Fig. 4 에서처럼 3 단계로 해석을 수행하였다. 홀확장법을 적용한 후 평판의 양끝에 인장응력을 100MPa, 150MPa, 200MPa 을 각각 주고 다시 재홀확장을 하는 방법을 사용하였다. 홀확장 적용시, 실제 상황과 동일한 조건을 주기 위해 형상봉이 홀 속으로 이동하도록 설정하였다. 이때, 형상봉이 홀을 완전히 관통하는데 총 변위를 80 번의 증분으로 나누어서 해석 하였다. 또한, 형상봉을 강체(rigid body)로 취급하여 강체요소(rigid element)를 적용하였으며, 형상봉의 회전 중심축에 기준 절점을 설정하여 기준절점을 통해 형상봉이 이동하도록 하였다. 또한, 형상봉과 홀면 사이에는 접촉(contact)처리를 통해 서로 파괴되지 못하게 하였고 유한요소 해석을 위해 ABAQUS, ver 6.4⁽¹³⁾와 PATRAN 2005 를 사용하였다.

2.3 유한요소해석의 타당성 검토

유한요소 해석의 타당성을 입증하기 위하여 홀확장 실험 후 X-ray diffraction (XRD)을 하여 해석

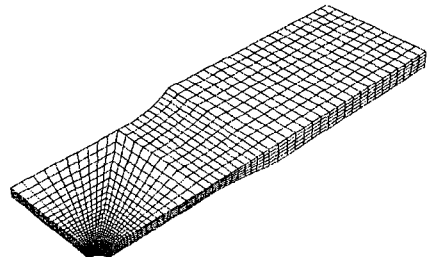


Fig. 3 ABAQUS FEA model of specimen

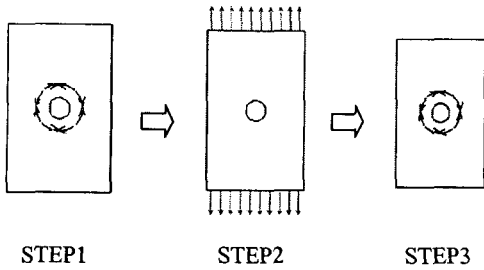


Fig. 4 Schematic of analysis produces

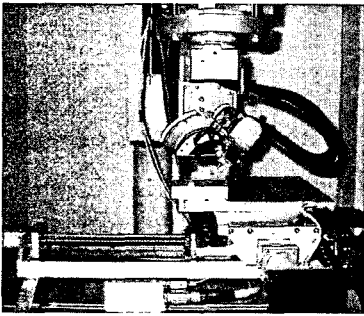


Fig. 5 X-ray diffraction equipment

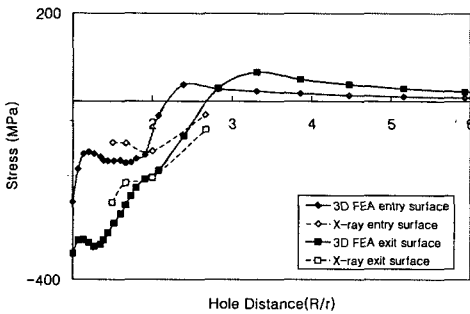


Fig. 6 Comparison of FEA results and experimental results

결과값과 비교하였다. Fig. 5 는 실제 잔류응력 측정실험 모습이다. 측정에 사용한 측정 장비는 Stresstech-Oy(핀란드)에서 제작한 XSTRESS3000 을 사용하여 시편에서의 입구면과 출구면에서 홀면으로 부터 1.5mm, 2mm, 3mm, 5mm 의 접선방향의 잔류응력을 측정하고 그 값을 홀 면으로부터의 거리 (R)를 홀의 지름(r)으로 나누어 무차원화하여 Fig. 6 에 나타내었다. 이때, 측정 방법은 ASTM E915-96⁽¹⁴⁾을 이용하였으며, 측정시 오차를 줄이기 위하여 3.0 mm 직경의 시준기(collimator)를 사용하였고 X-ray 조사시간은 15 초로 하였다. 전해 연마를 위

Table 1 Electrolyte

	Electrolyte	ml
A	Egtanol 65-85%, 2-Butoxyental 10-15% , water 5-15%	910
B	Perchloric acid 60%, water 40%	78

하여 사용한 전해연마액은 Table 1 의 A 용액과 B 용액을 혼합하여 제작하였으며, 전해 연마 깊이는 기계 가공에 의한 영향을 배제하기 위하여 5um 마다 깊이에 따른 잔류 응력을 측정하여 적정 전해 연마깊이를 25um 으로 결정하여 사용하였다. 알루미늄의 경우 결점립 입자가 상대적으로 커서 다른 재질에 비하여 측정 오차가 크다는 것을 감안하면 Fig. 6 의 유한요소 해석결과와 X-ray 측정결과값의 전반적으로 유사한 경향을 보이고 있다고 하겠다.

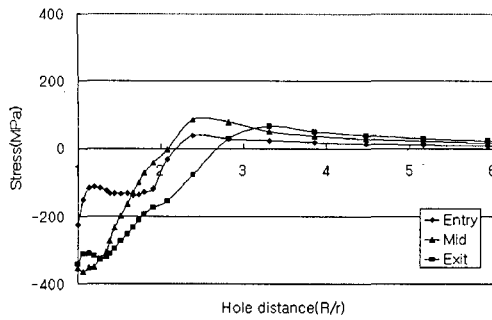
3. 결과

3.1 인장응력에 따른 잔류응력분포

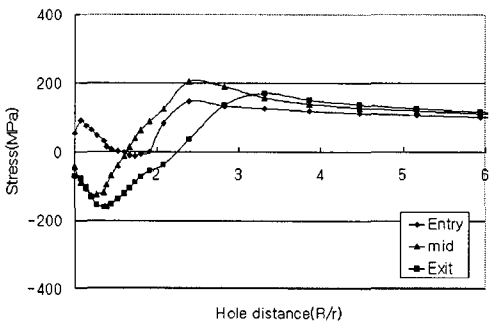
Fig. 7(a)은 체결홀에 4% 홀확장을 적용한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 홀확장법을 적용하면 홀확장법 적용특성상 형상봉이 들어 가는 방향 (Entry), 부재의 중간부분(Mid) 그리고 형상봉이 빠져 나가는 출구부(Exit)에서 홀면으로 부터의 잔류 응력 분포가 다르게 나타난다. 중간부와 출구부에 비해 상대적으로 입구부에 낮은 잔류응력이 분포한다. Fig. 7은 홀확장된 홀이 있는 부재의 양끝에 0~200MPa 의 인장응력을 주었을 때 부재에 변화된 잔류응력 분포를 해석한 결과이다. 그림에서 나타나듯, 외부의 인장응력이 커질수록 홀면의 압축잔류응력층은 점차 소멸되고 높은 인장응력을 나타낸다. 인장응력이 100MPa 을 넘어가면서 부재의 홀면에서 입구면, 중간면, 출구면의 잔류응력이 인장응력으로 모두 변화하였으며, 200MPa 이상부터는 입구면, 중간면, 출구면의 홀면 잔류응력의 값의 크기 차이가 거의 없어 진다.

3.2 재홀확장 적용시 잔류응력분포

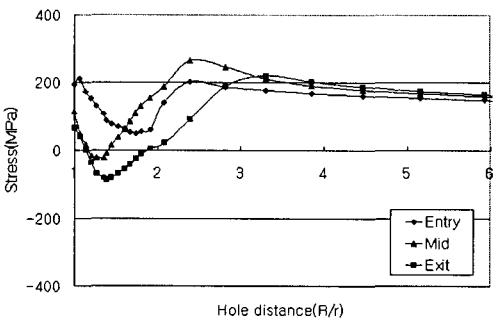
Fig. 8 은 홀확장률 4%로 홀확장을 적용한 홀에 크기를 달리한 인장력을 적용한 후, 다시 홀확장률을 4%로 재홀확장 했을때의 부재에 생성된 잔류응력 분포를 나타낸다. 홀확장이 적용된 홀에 100MPa 의 인장력을 적용한 후, 재홀확장 적용시 발생한 잔류응력분포인 Fig. 8(a)와 재홀확장 적



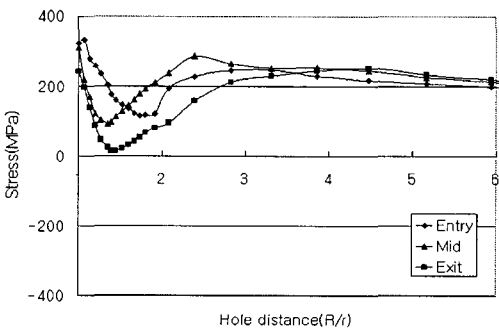
(a) $\sigma = 0Mpa$



(b) $\sigma = 100Mpa$

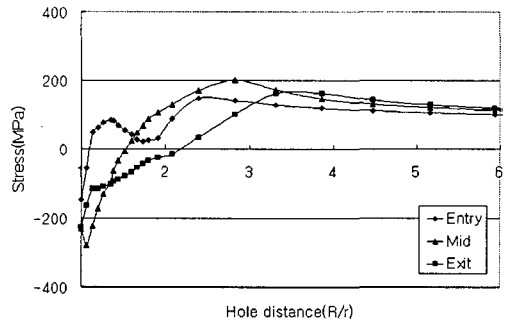


(c) $\sigma = 150Mpa$

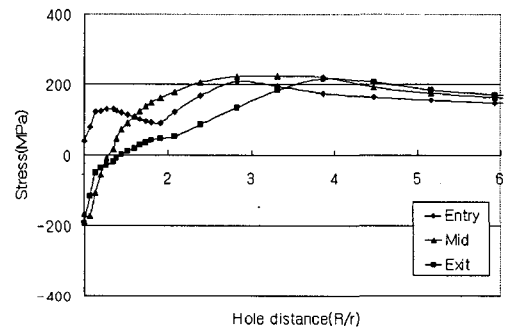


(d) $\sigma = 200Mpa$

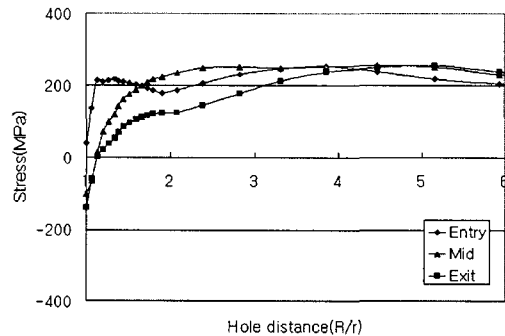
Fig. 7 Residual stress distributions according to tensile stress



(a) $\sigma = 100Mpa$



(b) $\sigma = 150Mpa$



(c) $\sigma = 200Mpa$

Fig. 8 Residual stress distributions of the re-cold expansion (cold expansion ratio 4%)

용건의 Fig. 7(b) 결과를 비교하여 보면, 재홀확장을 적용하였을 때 압축잔류응력이 다시 생성되는 것을 알 수 있다. 그러나 부재의 중간면과 출구면에선 비교적 큰 압축력이 발생한 반면에 입구면에선 홀면으로부터 조금만 벗어나면 바로 인장력이 분포하는 상대적으로 낮은 잔류응력이 발생함을 알 수 있다. Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)를 보면 인장응력 값이 커질수록 재홀확장을 통한 유효잔류응력 생성이 잘 되지 않는 것을 알 수 있다. 특히, 입구면에서의 압축잔류응력의 미생성으로 입구면에서의 피

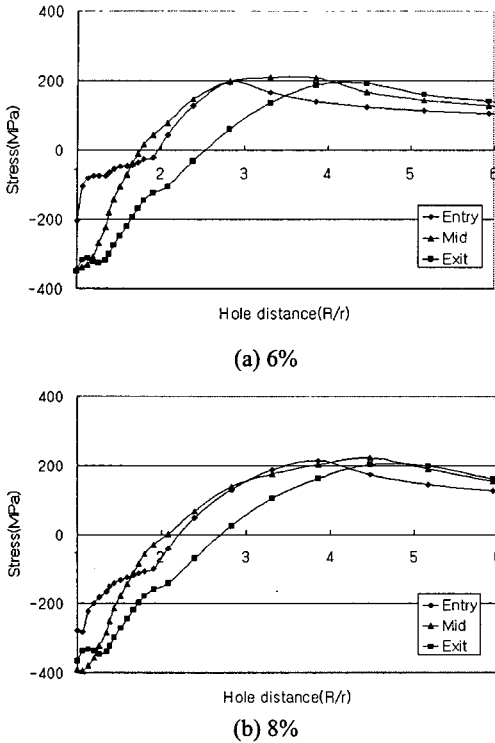


Fig. 9 Residual stress distributions according to cold expansion rate in the re-cold expansion

로 파괴가 예측된다. 그러므로, 재확장 생성시 기존 압축잔류응력보다 큰 압축응력을 생성하기 위한 방법이 모색되어야 한다.

3.3 재확장률을 고려한 잔류응력분포

일반적으로, 보다 유효한 압축력을 생성하는 방법중에 가장 쉽게 적용할 수 있는 방법이 확장을 조절하는 방법이다. Kim⁽¹⁰⁾ 등은 확장을 변화에 따라서 압축 잔류응력의 크기와 홀면으로부터의 범위가 증가하는 것을 2-D 유한요소 해석을 통하여 입증 한바 있다. 확장이 증가할수록 더욱더 낮은 압축잔류응력 분포를 생성하지만, 확장이 8% 초과하면 체결홀에 소성변형을 일으키기 때문에 4~6%의 확장을 많이 적용하고 있다. 따라서, 본 장에선 재확장 비율을 6% 와 8%로 하여 확장에 따른 재확장 잔류응력의 변화를 알아 보았다. Fig. 9 는 인장력 100MPa 을 적용한 확장에 홀에 확장을 6%와 8%로 재확장 하였을 때 발생한 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 6%로 확장을 적용한 재확장 결과는 인장력을 가하지 않은 4%로 확장을 적용한 Fig. 7(a)와 비슷한 분포로 잔류응력

이 생성됨을 알 수 있다. 또한 8%로 재확장한 Fig. 9(b)는 더욱 낮은 압축 잔류응력을 생성함을 알 수 있다. 그러므로, 재확장을 적용할때에는 본래 적용한 확률비율보다 더 큰 확장을 적용하여 재확장을 실시하여야 보다 유효한 잔류응력을 생성할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 확률 적용 홀의 잔류응력분포가 외부의 인장력 크기에 의해 어떻게 재분포 되는지를 파악 하고 재확장시 재 생성되는 잔류응력 분포를 파악하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 확률법 적용시, 형상봉이 들어 가는 방향 (Entry), 부재의 중간부분(Mid) 그리고 형상봉이 빠져 나가는 출구부(Exit)에서 홀면으로 부터의 잔류응력 분포가 다르게 나타난다.
- (2) 외부의 인장응력이 100MPa 이상이면 홀면의 압축잔류응력층은 소멸되고 외부의 인장응력이 커질수록 부재 내부응력도 인장응력을 변화한다.
- (3) 4%확률 적용홀에 동일 확률로 재확장 하였을 경우, 부재의 중간면과 출구면에선 비교적 많은 압축력이 발생한 반면에 입구면에선 상대적으로 낮은 압축 잔류응력이 발생한다.
- (4) 외부로부터의 인장응력 값이 커질수록 재확장을 통한 유효잔류응력 생성이 잘 되지 않는다.
- (5) 재확장을 적용할때에는 본래 적용한 확률비율보다 더 높은 확률비를 적용하여 재확장을 실시하여야 보다 큰 압축 잔류응력을 생성할 수 있다.

참고문헌

- (1) Ball, D. L. and Lowry, D. R., 1998, "Experimental Investigation on the Effectiveness of Cold Expansion of Fastener Holes," *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, Vol. 21, pp. 17~34.
- (2) Zhang, X. and Wang, Z., 2003, "Fatigue Life Improvement in Fatigue-aged Fastener Holes Using the Cold Expansion Technique," *Inter. Jour. of Fatigue*, Vol. 25, pp. 1249~1257.
- (3) Lim, W. K., Yoo, J. S. and Choi, S. Y., 1998, "The Effects of Concurrent Cold-Expansion and Ring-Indentation of the Growth of Fatigue Cracks Emanating from Circular Holes," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 59, No. 5, pp. 643~653.
- (4) Nadai A., 1943, "Theory of the Expanding of Boiler and Condenser Tube joints Through Rolling," *Trans. ASTM*, Vol. 65, pp. 865~880.

- (5) Kang, J. D., Johnson, W. S. and Clark, D. A., 2002, "Three Dimensional Finite Element Analysis of the Fastener Holes in Two Aluminum Alloys," *jour. of Eng. Material and Tech.*, Vol. 124, pp. 140~145.
- (6) Jang, J. S., Yang, W. H., Kim C. and Cho, M. R., 2002, "Analysis of the Residual Stress due to Cold Expansion and Stress Intensity Factor in CT Specimen Using Finite Element Method," *J. Korean Soc. Precision Eng (A)*, Vol. 26, pp. 890~895.
- (7) 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.*, Vol. 32, pp. 287~300.
- (8) Papanikos, P. and Mequid, S. A., 1999, "Elasto-Plastic Finite Element Analysis of the Cold Expansion of Adjacent Fastener Holes," *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 89-90, pp. 424~428.
- (9) Kim, C., Kim, D., J., Seok, C. S. and Yang, Y. H., 2004, "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.
- (10) Kim, C., 2002, "Analysis of Residual Stresses Induced by Cold Expansion Using Finite Element Method," *J. Korean society for aeronautical & space sciences*, Vol. 30, No .2, pp. 46~51.
- (11) Ball, D.L., 1995, "Elastic-Plastic Stress Analysis of Cold Expanded Fastener Holes," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, Vol. 18, pp. 47~63.
- (12) Bernard, M., Bui-Quoc, T. and Burlat, M., 1995, "Effect of Re-Cold Working on Fatigue Life Enhancement of a Fastener Hole," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, Vol. 18, pp.765~775.
- (13) ABAQUS User's Manual, Ver. 6.4, HKS Inc., USA.
- (14) ASTM E915-96(2002) Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement.