

유한요소법을 이용한 CT 시편의 홀확장 잔류응력 및 응력확대계수 해석

장재순* · 양원호** · 김철*** · 고명훈**** · 조명래*****

Analysis of the Residual Stress due to Cold Expansion and Stress Intensity Factor in CT specimen Using Finite Element Method

Jae-Soon Jang, Won-Ho Yang, Cheol Kim, Myung-Hoon Ko, Myoung-Rae Cho

Key Words : Cold Expansion Method (홀확장법), J Integral (J 적분법), Fastener Hole (체결홀), Stress Intensity Factor (응력확대계수), Residual Stress (잔류응력)

Abstract

Recently, cold expansion of fastener holes is commonly used in the aerospace industry to increase the fatigue endurance of airframes. Cold expansion process is used as the retardation of crack initiation in the hole. This treatment leads to an improvement of fatigue behavior due to the compressive residual stresses developed on the hole surface. The residual stress profile depends on the cold expansion ratio. In the present paper, it is shown that residual stress is redistributed due to the application of cold expansion process for CT specimen. It is further shown that residual stress increases in proportion to cold expansion ratio. It is thought that crack growth rate increases as cold expansion ratio.

1. 서론

항공기나 선박, 자동차의 구조물을 체결하는데 사용하는 볼트와 너트, 리벳 등의 기계적 결합이 폭 넓게 이용되고 있는데 이는 조립과 분해가 용이하며 구조물에 작용하는 하중을 분산시키는 장점이 있기 때문이다. 그러나 홀 체결부에서는 응력집중이 발생하여 균열이 발생하기 쉬워지고 이로 인해 부재의 피로수명은 감소하게 된다. 그러므로 접합부의 체결홀(fastener hole)을 강화시켜 줌으로써 부재들의 피로수명을 향상시켜 줄 수 있는 작업이 필요하다.

이런 체결홀에서의 피로수명을 향상 시키는 방

법으로 대표적인 두 가지 방법이 있는데 하나는 쇼트피닝(shot peening) 방법이고 또 다른 하나는 홀확장법(cold expansion method)이라 할 수 있다. 이 중 특히 항공기 분야에는 보다 적용이 용이한 홀확장법이 많이 사용되고 있다. 홀확장법은 Fig. 1 처럼 홀보다 조금 더 큰 테이퍼진 맨드릴(mandrel)을 홀에 삽입시켜 줌으로써 홀을 재료의 항복강도 이상으로 팽창시킨다. 이때 홀의 확장으로 인하여 홀주위에 소성변형이 일어나고 맨드릴을 제거하는 과정에서 홀과 근접한 부분에 압축잔류응력이 발생한다. 이 압축 잔류응력이 홀주위에 접선방향으로 분포됨으로서 부재가 반복하중을 받을 때 홀에서 발생하는 균열의 생성 및 진전을 억제시키는 방법이다.

홀확장법으로 인한 체결홀의 피로수명 개선은 많은 연구⁽¹⁻³⁾를 통해 그 효과를 입증한바 있다. Nadai⁽⁴⁾는 재료의 거동을 완전 소성이라 가정하고 이론적 해석을 통하여 잔류응력 분포를 연구한 바 있고, 최근에는 탄소성 유한요소해석을 통하여 잔류응력 분포나 변형형태를 예측한 연구⁽⁵⁻⁹⁾가 이루어

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

*** 성균관대학교 대학원

**** 대림대학 산업기술경영과

***** 인덕대학 컴퓨터응용기계 계열

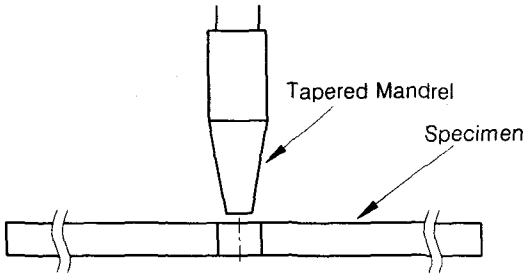


Fig. 1 Schematic of the cold expansion process

어지고 있다.

그러나 이러한 연구들은 응력집중부에서의 균열 생성을 지연시키기 위한 효과적인 잔류응력의 분포를 해석하기 위한 것이며, 일단 피로균열이 생성된 이후 균열이 성장할 때 인접한 홀주위의 잔류응력이 균열성장애 미치는 영향에 대한 연구보고는 거의 없었다. 항공기 구조물의 경우 홀 중심 사이의 간격이 20mm 에 불과한 경우도 있다. 이런 경우 홀에서 균열이 생성된 이후 인접한 홀 주위의 잔류응력분포에 의하여 피로균열 성장거동에 변화가 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 CT 시편에 대한 잔류응력분포를 해석하였다. 균열길이와 홀확장을 잔류응력분포에 미치는 영향을 조사하였고 홀확장 잔류응력하에서의 응력확대계수(Stress Intensity Factor ; SIF)를 해석하였다. 또한 홀확장법에 의한 두께 방향으로의 응력확대계수 변화를 검토하였다.

2. 유한요소해석

2.1 재료물성치

해석에 사용된 재료는 현재 항공기 부품으로 많이 사용되고 있는 Al6061-T6 을 사용하였다. 홀확장 해석은 홀에 홀보다 직경이 더 큰 맨드릴을 삽입 시킴으로서 홀 주위에 항복응력으로 인한 잔류응력을 생성시켜야 하므로 탄소성 해석을 수행하여야 한다. 탄소성 물성치를 얻기 위해서 Al6061-T6 의 인장시편을 Fig. 2 와 같이 KS 규격에 준하여 제작하였고 인장시험을 수행하였다. Table. 1 은 시험에서 얻은 강도 물성치들이고, Fig. 3 에는 진응력-진변형율(true stress-strain) 선도를 나타내었다. 이를 유한요소해석에 사용하였으며 탄성계수(Young's modulus) E 는 72GPa, 푸아송 비(Poisson's ratio) ν 는 0.33 을 적용하였다.

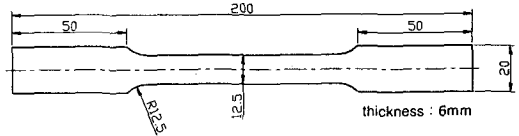


Fig. 2 Geometry of tension specimen

Table 1 Monotonic properties of Al6061-T6

Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Fracture stress (MPa)
270	300	398

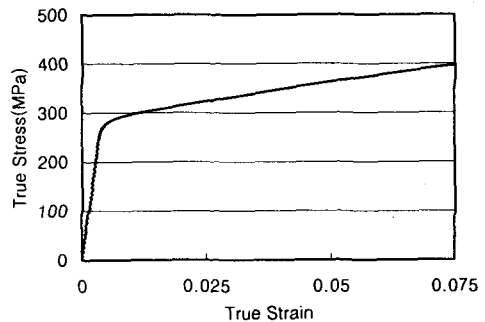


Fig. 3 True stress-strain relation of Al6061-T6

2.2 유한요소모델과 해석방법

본 연구에서는 Fig. 4 와 같이 노치(notch)로부터 22.5mm 떨어진 곳에 직경 6mm 의 홀이 있는 CT 시편에 홀확장법을 적용하는 모델을 설정하였다. 이때 대칭성을 고려하여 Fig. 5 와 같이 시편의 절반만을 유한요소 모델로 구성하였다. Fig. 6 은 홀확장 해석과 응력확대계수 해석을 위한 유한요소망이다. 해석을 2 개의 단계로 나누어 첫번째 단계에서는 홀확장 해석을 수행하고, 그 후 두번째 단계에서 응력확대계수해석을 수행함으로써 홀확장으로 인해 발생한 잔류응력이 피로균열에 미치는 영향을 평가하였다. 시편의 홀 직경보다 4% 더 큰 데이퍼진 맨드릴이 홀을 완전히 관통하는데 총 변위를 80 증분으로 하여 홀을 통과시켰다. 맨드릴을 강체(rigid body)로 보고 강체요소를 적용하였으며, 맨드릴의 회전 중심축에 기준절점(reference node)을 설정하여 기준절점을 따라 맨드릴이 이동하게 하였다. 이때, 맨드릴과 맨드릴이 관통하는 홀에 접촉(contact)처리를 통해 서로 파고들지 못하도록 하였다.

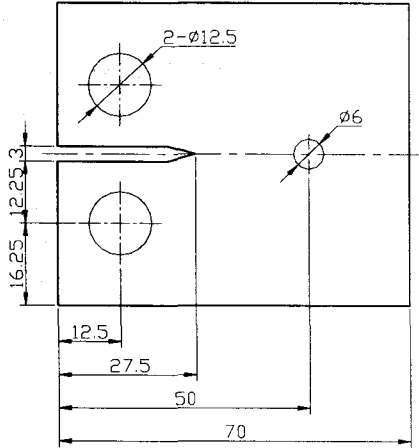


Fig. 4 Geometry of CT specimen

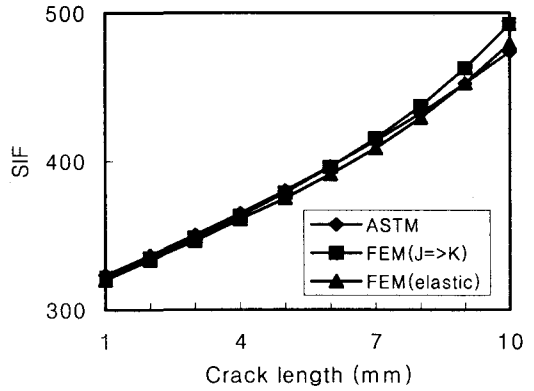


Fig. 7 Stress intensity factors for standard CT specimen

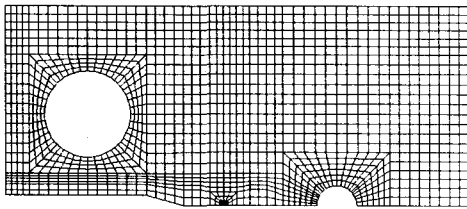


Fig. 5 Half modeling

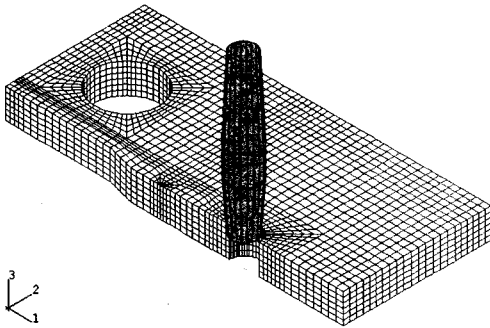


Fig. 6 Finite element model for cold expansion and stress intensity factor analysis

홀확장율을 2%와 6%로도 해석하여 홀확장율에 따른 잔류응력변화를 살펴 보았다. 응력확대계수 해석은 균열길이를 1mm 씩 증가시켜가면서 각 모델에 대해 해석을 수행하였다.

유한요소해석에서는 PATRAN Ver. 7.0 을 사용하여 총 8000 여개의 요소와 30000 여개의 절점으로 유한요소망을 구성하였으며 해석에는 ABAQUS Ver. 5.8 을 사용하였다.

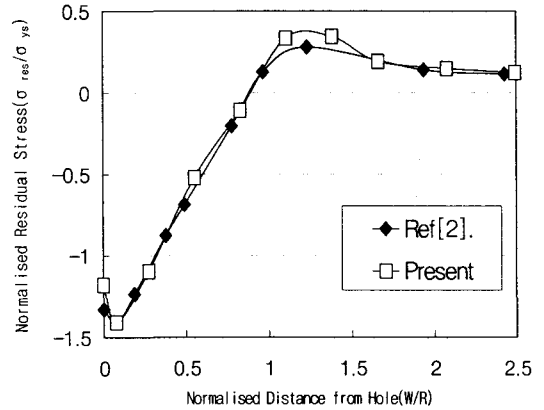


Fig. 8 Residual stress distribution at mid thickness in the case of 4% cold expansion

2.3 해석의 타당성 검토

해석의 타당성을 입증하기 위하여 홀확장을 적용하지 않은 표준 CT 시편에 대하여 식 (1)의 ASTM 이론식⁽¹⁰⁾을 사용하여 응력확대계수를 계산한 값과 유한요소해석을 통하여 구한 값을 비교하였다. Fig. 7 에서 앞서 언급된 두 결과가 오차범위 5% 이내로 잘 일치한바, 본 연구에서의 유한요소 해석이 타당함을 알 수 있다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.866 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (1)$$

또한, 홀확장법을 적용한 후에 응력확대계수 해석을 하여야 하므로 탄소성을 고려해서 해석하였고 J 적분 값을 구한 후 이를 식 (2)로 변환하여

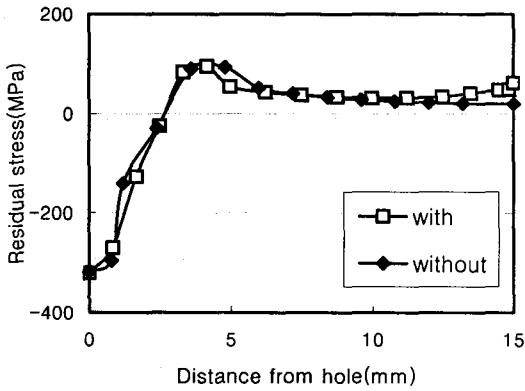


Fig. 9 Residual stress distribution by cold expansion for the specimen with crack and without crack

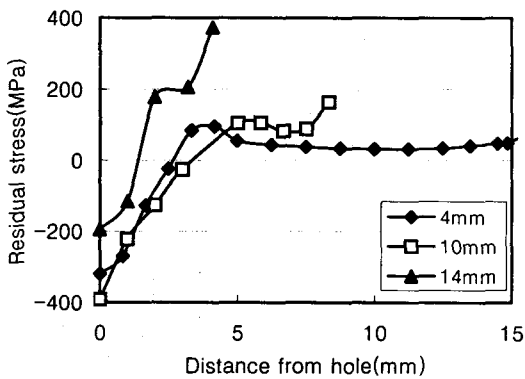


Fig. 10 Residual stress by cold expansion for different crack lengths

응력확대계수값을 얻었다.

$$K = \sqrt{JE} \quad (\text{Plane stress})$$

$$K = \sqrt{\frac{JE}{1-\nu^2}} \quad (\text{Plane strain}) \quad (2)$$

Fig. 7 에 앞에서 구한 응력확대계수와 소성을 고려하지 않고 탄성만을 고려하여 얻은 값을 비교하였는데 오차범위가 5%이내로 일치 했다. 이로써 균열길이에 따른 응력확대계수 해석에서 균열 선단에 발생한 응력을 소규모 항복이라 보고 이후의 해석에서 J 적분값을 응력확대계수로 변환하여 표시하였다.

Fig. 8 은 4% 홀확장을 한 경우 홀 중간위치에서의 잔류응력 분포를 본 연구의 해석 결과와 기존

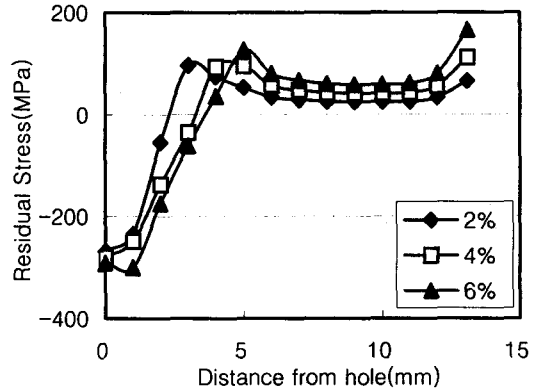


Fig. 11 Residual stress distribution according to cold expansion ratio

의 연구결과⁽²⁾를 비교한 것이다. 여기서, 잔류응력의 크기는 재료의 항복강도(σ_y)로 나누고, 홀로부터의 거리는 홀반경(R)으로 나누어 무차원화(normalization)하였다. 그림에서 잔류응력의 분포와 크기가 전반적으로 잘 일치 하고 있으므로 본 연구에서 설정한 유한요소망이 타당함을 입증할 수 있다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 홀확장 잔류응력

3.1.1 균열 유무에 따른 잔류응력 분포

동일 홀확장율을 적용하였을 때 균열이 존재하는 모델과 존재하지 않는 모델에서의 잔류응력 분포를 해석하였다. 이때, 균열길이는 4mm 로 하였다. 맨드럴이 들어가는 면(inlet)과 중간(mid) 그리고 나가는 면(outlet)에서의 잔류응력 분포 중, 홀에서 멀어질수록 가장 먼저 압축 잔류응력에서 인장 잔류응력으로 변화하며 인장 잔류응력 값이 가장 큰 중간 부분의 잔류응력을 비교하였다.

Fig. 9 는 균열이 없는 모델과 균열이 노치로부터 4mm 존재하는 시편에서 홀확장율 4%를 적용하였을 때의 잔류응력분포를 나타낸 것이다. 홀로부터 압축 잔류응력이 발생하다가 인장 잔류응력으로 변화하는 것을 알 수 있다. 또한 홀확장법을 적용할 경우 균열의 존재는 홀확장 잔류응력 분포에서 인장 잔류응력의 크기를 증가시킨다. 이로써 균열이 존재할 경우에 균열선단의 응력집중으로 인하여 초기균열이 없을 때 보다 더 빠르게 균열진전이 될 것을 예상할 수 있다.

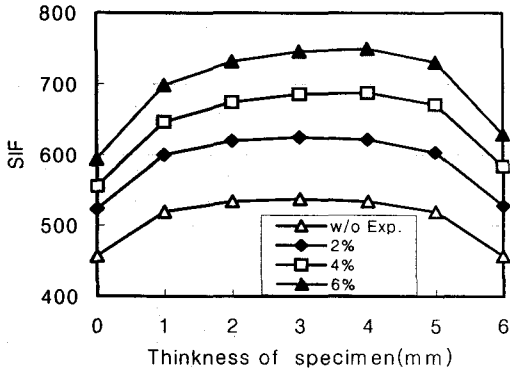


Fig. 12 SIF of thickness direction according to cold expansion ratio

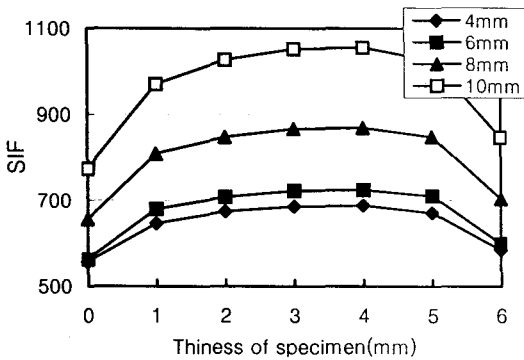


Fig. 13 SIF in the thickness direction according to crack length

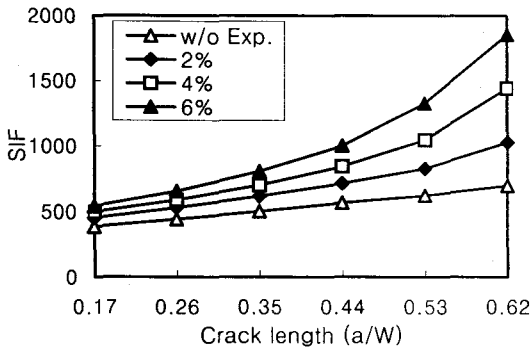


Fig. 14 SIF according to cold expansion ratio

3.1.2 균열길이에 따른 잔류응력장 비교

Fig. 10 은 홀확장율 4%에서 균열길이 4mm, 10mm, 14mm 일때의 잔류응력 분포를 나타낸 것으로, 여기서도 홀의 중간두께부분에서의 잔류응력만을 비교하였다. 그림에서 균열길이가 길어질수록 인장 잔류응력 값이 크게 증가함을 알 수 있

며, 이로부터 균열길이가 증가할수록 더욱더 균열진전은 빠르게 일어날 것임을 예측할 수 있다.

3.1.3 홀확장율에 따른 잔류응력분포

홀확장율을 다르게 적용하므로써 홀확장율이 잔류응력 분포에 미치는 영향을 평가 하였다. Fig. 11 은 균열길이 6mm 의 모델에서 홀확장율이 2%, 4%, 6%일 때 홀 중간두께위치에서의 잔류응력을 비교한 것이다. 그림에서 홀확장율이 증가할수록 압축 잔류응력의 영역이 넓어지나 인장 잔류응력도 증가함을 알 수 있다. 그러므로 홀에서 발생하는 균열에 대해서는 홀확장율의 증가가 유리하겠지만 외부에서 생성되어 홀쪽으로 진전해 오는 균열에 대해서는 균열성장을 가속화시킬 가능성이 있다.

3.2 두께방향으로의 응력확대계수

홀의 지름보다 2%, 4%, 6% 더 큰 맨드릴을 삽입하여 홀확장법을 적용하였을 때 모델의 두께방향에 따른 응력확대계수를 해석하였다. Fig. 12 는 균열길이 4mm 의 모델에 대해 홀확장율을 변화하면서 해석한 결과이다. 홀확장법을 적용하지 않았을 때의 응력확대계수 값은 맨드릴이 들어가는 면과 나가는 면의 중심부를 기준으로 대칭을 이루고 있으나, 홀확장법을 적용하였을 때는 맨드릴이 들어가는 면보다 나가는 면의 응력확대계수가 커지며 홀확장율이 커지면 그 차이가 더 커짐을 알 수 있다.

Fig. 13 은 홀확장율에 대하여 서로 다른 균열길이에 대한 해석결과이다. 그림에서 같은 홀확장율에서 균열 길이가 길어짐에 따라 맨드릴이 들어가는 면보다 나가는 면의 응력확대계수 값의 크기가 더 커짐을 볼 수 있다. 이는 홀확장을 하였을 때, 맨드릴이 들어가는 면과 중간 그리고 나가는 면에 생성되는 잔류응력 분포가 서로 다르기 때문이다.

3.3 균열길이 및 홀확장율에 따른 응력확대계수

Fig. 14 는 균열길이(a)를 시편의 노치로부터 홀까지의 거리(W)로 무차원화한 균열길이에 대하여 홀확장율에 따른 응력확대계수를 나타낸 것이다. 홀확장율이 증가할수록 또는 균열길이가 길어질수록 응력확대계수가 증가함을 알 수 있다. 그러므로 홀확장을 적용할 경우 홀확장을 적용한 홀에서의 균열 발생은 지연시킬 수 있겠으나 홀외부에 있는 균열의 진전속도는 오히려 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 홀확장을 기계적 체결부에 적용할 때 이 점을 분명히 고려하여 적용하여야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 CT 시편에서 균열길이와 홀확장율이 잔류응력분포에 미치는 영향을 조사하였고 홀확장 잔류응력하에서의 응력확대계수를 해석하였다. 또한 홀확장법에 의한 두께 방향으로의 응력확대계수 변화를 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 홀확장법을 적용할 경우 균열의 존재는 인장 잔류응력의 크기를 증가시킨다.

(2) 동일한 균열길이에서는 홀확장율이 증가할수록 인장 잔류응력이 증가하며, 동일한 홀확장율에서는 균열길이가 길어질수록 인장 잔류응력이 증가한다.

(3) 홀확장법을 적용하면 두께방향으로의 응력확대계수분포가 일반적인 대칭분포를 나타내지 않는다.

(4) 홀확장법을 적용할 경우 균열길이나 홀확장율이 증가할수록 균열선단의 응력확대계수는 증가한다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 송정훈, 유진상, 임원균, 1998, "홀확장 및 링압 인된 홀의 피로균열성장에 대한 실험적연구," *한국항공우주학회*, Vol. 26, pp. 72~78.
- (4) Nadai, A., 1943, "Theory of the Expanding of Boiler and Condenser Tube Joints Through Rolling," *Trans. ASTM*, Vol. 65, pp. 865~880.
- (5) 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.
- (6) Papanikos, P. and Meguid, S. A., 1997, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Cold

Expansion of Adjacent Holes," *Int. J Mech. Sci.* Vol. 40, No. 10, pp. 1019~1028.

- (7) 김 철, 양원호, 고명훈, 허성필, 현철승, 2000, "홀확장 잔류응력 예측을 위한 유한요소해석," *대한기계학회 추계학술대회논문집 A*, pp. 470~474.
- (8) Ozdemir, A. T. and Dwards, 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.
- (9) Ozdemir, A. T. and Dwards, L. E., 1997, "Relaxation of Residual Stresses at Cold-Worked Fastener Holes due to Fatigue Loading," *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* Vol. 20, No. 10, pp. 1443~1451.
- (10) "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", 1993, ASTM E 647-93.