

피로균열 발생수명에 대한 압입 잔류응력의 영향

이환우[#], 강태일^{*}

Effect of Indentation Residual Stresses on the Fatigue Crack Initiation Life

Hwan Woo Rhee[#], Tae Il Kang^{*}

ABSTRACT

Up to now, many crack repair techniques have been developed for inhibiting crack growth in structural components. However, the simplest way for inhibiting crack growth is to apply a indentation at the crack tip or at some distance ahead of the expected crack growth path so as to produce residual compressive stresses that can reduce the effective stresses around the crack tip. In spite of its importance to the aerospace industry, little attention has been devoted to evaluation of the indentation residual stress effect on the fatigue crack initiation life quantitatively. Therefore, in the present work, the magnitude and distribution of the indentation residual stresses were investigated in order to estimate the beneficial effect on fatigue crack initiation by using finite element method. Furthermore, to examine the validity of finite element analysis results, residual stress distribution in the indented specimen was measured by using X-ray diffraction technique, and fatigue crack behavior at fastener hole in aluminum alloy 7075-T6 before and after indentation processes was investigated.

Key Words : Indentation(압입), Residual stress(잔류응력), Finite element method(유한요소법), X-ray diffraction technique(X-선 회절법), Fatigue(피로), Crack initiation life(균열발생수명)

1. 서론

항공기와 선박 구조물에 일반적으로 적용되고 있는 리벳이나 볼트 이음법은 분해·조립이 용이하고, 부하능력이 큰 장점을 가지고 있는 반면에, 모재에 가공된 체결요소용 홀이 결함으로 거동하여 구조강도와 피로수명을 저하시키는 단점이 있다. 따라서 이와 같은 구조물의 체결요소용 홀을 강화시켜 피로특성을 개선하려는 노력이 오래 전부터 지속되어 왔으며, 현재 샷피닝(Shot-peening)¹

을 비롯한 압입법(Indentation Technique)², 홀 확장법(Hole Expansion Method)³ 및 균열 패칭법(Crack Patching Technique)⁴ 등이 개발되어 소기의 성과를 거두고 있다. 이중 본 연구에서 관심을 가지고 있는 압입법은, 체결요소용 홀이나 균열성장 예상경로에 적당한 크기의 압입을 가하여 압축 잔류응력을 유발시킴으로써, 결함주변의 유효응력(Effective Stress)을 저하시키고 궁극적으로 피로수명의 향상을 도모하는 손상-허용 개선대책의 일종으로서, 가공공정이 단순하여 현장 응용성이 큰 장점을 가

접수일: 2003년 6월 16일; 게재승인일: 2004년 3월 12일
 # 교신저자, 경남대학교 기계자동화공학부
 Email rhee@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2618
 * 경남대학교 기계자동화공학부 대학원

지고 있다. 그러나 압입법이 기계·구조물의 손상-허용능력 개선에 기여할 수 있는 현장기술로 정립되기 위해서는, 압입조건에 따른 잔류응력의 정량적인 평가와 이를 토대로 한 피로균열해석 등에 관한 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 생각되나, 지금까지 이에 관한 연구는 제한된 실험결과가 발표되고 있을 뿐,^{5,7} 거의가 압입법을 적용한 물성 해석에 치중되고 있다.⁸⁻¹¹ 따라서 일련의 본 연구에서는 피로균열발생 및 성장거동에 대한 압입 잔류응력의 영향을 검토하고 또한 최적의 압입조건을 설정해보기 위하여, 일차적으로 압입조건에 따른 잔류응력의 분포특성을 유한요소해석하고, 피로균열 발생수명에 대한 압입 잔류응력의 영향을 평가하였다.

2. 압입 잔류응력의 유한요소해석

2.1 해석 모델 및 방법

해석모델은 Fig. 1 과 같이 평판(두께 $t=6$ mm)의 중앙부에 존재하는 리벳 홀(직경 $d=5$ mm)에 직경 D 의 원통형 압입자를 이용한 압입공정을 모형화 하였으며, 유한요소해석은 대칭성을 고려하여 해석모델의 1/8 을 해석대상영역으로 선정한다. 선정된 해석대상영역에는 총 5,000 개의 사면체 요소로 분할된 유한요소망을 설정하였다. 또한 압입자는 리벳 홀이 가공된 모재에 비해 강성이 훨씬 크므로 강체로 가정하고, 홀 주변에는 미세변형을 감지할 수 있도록 요소의 밀도를 조밀하게 하여 미세요소를 배치하였으며, 압입자와 모재의 접촉면 마찰계수는 냉간가공 문제의 유한요소해석에서 일반적으로 적용되고 있는 일정 전단마찰계수 0.08 을 선정하였다.¹²

한편, 해석대상재료로는 항공기 구조용 재료로 널리 활용되고 있는 Al 7075-T6 합금판재를 선정하였으며, 압입가공된 리벳 홀 주변에는 소성변형

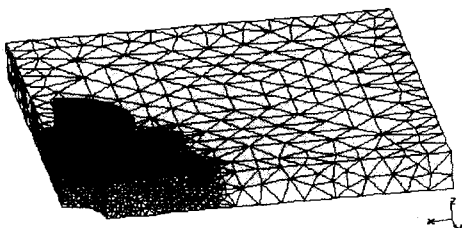


Fig. 1 Finite element model for indentation analysis

으로 인한 잔류응력이 유발되므로 탄소성 해석을 수행하기로 하고, 그에 필요한 입력 데이터를 얻기 위하여 해석대상 재료에 대한 압축시험을 수행하였다. Table 1 은 압축시험결과에서 얻어진 Al 합금의 기계적인 성질을 수록한 것이며, 해석시 이 재료의 포아송의 비에는 $\nu=0.33$ 을 적용하였다.

Table 1 Mechanical properties of Al 7075-T6

Crack Plane Orientations	Yield Strength (Mpa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)
T* - L**	463	72	35

T* : Long transverse of rectangular product forms such as plate
L** : Rolling Direction of rectangular product forms such as plate

또한, 압입 잔류응력의 유한요소해석은, 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D 를 이용하여 모재의 대칭축상에 있는 절점들은 대칭축에 수직방향 속도 구속조건을 0 으로 지정함으로써 축대칭 조건을 만족시키고, 모재의 하면은 z 방향의 속도 구속조건을 0 으로 지정하여 완전 구속시킨 다음, 일차적으로 압입 조건에 따라 선정된 직경 D 의 원통형 압입자를 모재에 서서히 강하시켜 지정된 크기만큼 압입(소성변형)된 모재의 응력분포를 해석하고, 이어서 압입자의 운동방향을 정반대로 재설정하여 서서히 상향 시킨 후 두 개체가 완전히 이격 되었을 때, 제하과정에서 탄성 회복된 모재에 잔류하는 압입 잔류응력분포를 해석하였다.

2.2 검증시험과 잔류응력의 측정

유한요소해석 결과의 타당성을 검토하기 위해 유한요소해석 모델과 동일한 형상과 크기를 갖는 시험편을 제작하여 압입시험을 수행하였으며, 압입조건은 지정된 크기의 원통형 압입자를 25 톤 용량의 INSTRON(Model 4206) 하중기구용 어댑터에 장착한 다음 - 유한요소해석시 지정된 압입속도와 동일하게 2 mm/min 의 속도로 - 변위제어하에서 요구되는 압입 변위만큼 압입하였다.

한편, 압입 가공된 리벳 홀 주변의 잔류응력 분포는 X-선 회절 시험장치(Philips, X'pert APD System)를 이용하여 홀 끝으로부터 반경방향의 표면을 따라 일정한 간격으로 측정하였으며, X-선 회절법을 이용한 압입 잔류응력의 측정조건을 요약하면 Table 2 와 같다.

Table 2 Measuring conditions of residual stresses

X-ray diffraction	Measuring conditions	
	Target	Cr
X-ray source	Voltage	35.0 kV
	Current	1.5 mA
Effective focus	2.0 mm	
ψ	-15°, 0°, 15°	
Calculation method	2 θ - sin ² ψ	

Fig. 2는 압입될 리벳 홀의 직경(d)을 기준으로 한 압입자의 직경비 즉, 압입 직경비가 $D/d=1.4$ 이고, 압입 변위의 백분율이 6.6%인 모델의 반경방향 잔류응력분포에 대한 유한요소해석결과와 측정된 반경방향의 잔류응력분포를 비교한 것으로서, 여기서 압입 변위의 백분율이란 모재의 두께(t)를 기준으로 한 두께방향 변위 w의 비, w/t 를 백분율로 표시한 것이다. 이 결과에 의하면, 리벳 홀 주변의 반경방향 압입 잔류응력의 분포는 $x/r=1.6$ (여기서, x : 리벳 홀 끝으로부터 측정된 반경방향의 거리, r : 리벳 홀의 반경)을 변곡점으로 하여 그 크기가 점차 증가하다가 감소하는 양상을 보이고 있으며, 측정 결과와 유한요소해석 결과는 최대 16% 미만의 오차범위 내에서 서로 잘 일치하였다.

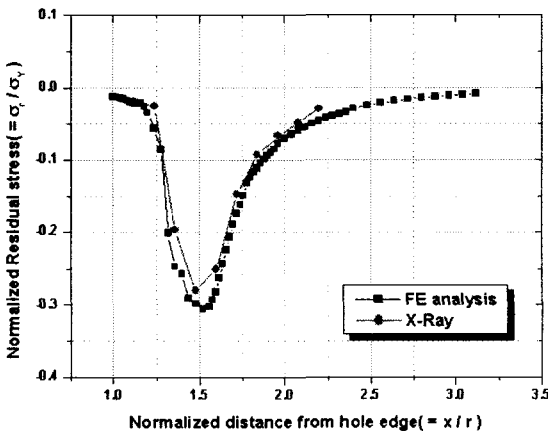


Fig. 2 Comparison of measured residual stresses and the 3D finite element analysis result

2.3 압입 잔류응력의 분포 특성

Fig. 3은, 반경방향의 잔류응력 분포에 대한 압입 변위의 영향을 검토하기 위하여, 모재의 두께

($t=6$ mm)를 기준으로 한 압입 변위의 백분율을 각각 1.6%, 3.3%, 5.0%, 6.6% 및 8.3%와 같이 5 단계로 변경 설정한 다음, 홀 주변의 잔류응력 분포를 해석하고 그 결과를 도시한 것이다. 이 결과에 의하면, 압입 변위가 커지면 최대 압축 잔류응력의 크기도 점차 커지다가, 압입 변위의 백분율이 6.6% 이상이 커지면 최대 압축 잔류응력의 크기가 오히려 감소하는 양상을 나타내었다.

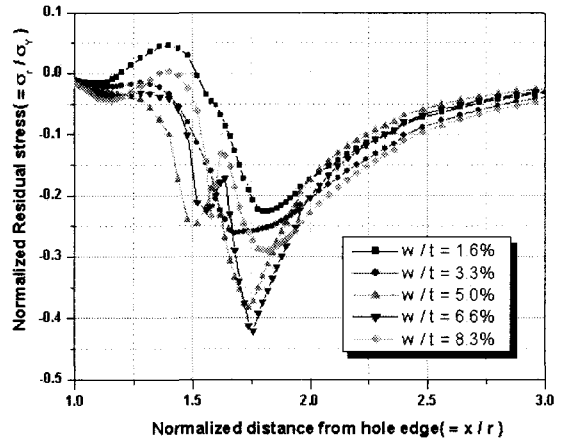


Fig. 3 Effect of indentation displacement on the residual stress distribution in the direction of radius

따라서 압입 가공에 의한 최대 압축 잔류응력의 크기가 크고 그 작용층이 표면 근방에 위치할수록 피로수명의 향상 정도도 클 것이므로, 최적 압입 변위의 백분율을 일단 6.6%로 선정하였다.

Fig. 4는 깊이방향의 잔류응력 분포에 대한 압입 변위의 영향을 검토하기 위하여, 리벳 홀의 직경에 대한 압입자의 직경비를 $D/d=1.6$ 으로 일정하게 하고 압입 변위의 백분율을 각각 1.6%, 3.3%, 5.0%, 6.6% 및 8.3%로 변화시켰을 때, 표면으로부터 깊이방향의 잔류응력 분포를 도시한 것으로서, 압입 잔류응력의 분포패턴은 반경방향의 경우와 달리 매우 복잡한 양상을 보이고 있으나, 최대 압축 잔류응력의 분포 특성에 주목할 경우, 최대 압축 잔류응력은 표면으로부터 무차원 깊이가 $z/t=0.32$ (여기서, z : 모재의 표면으로부터 측정된 두께방향의 거리)인 층에서 발생되었으며, 최적의 압입 변위조건은 반경방향의 경우에서와 마찬가지로 $w/t=6.6\%$ 가 됨을 알 수 있다.

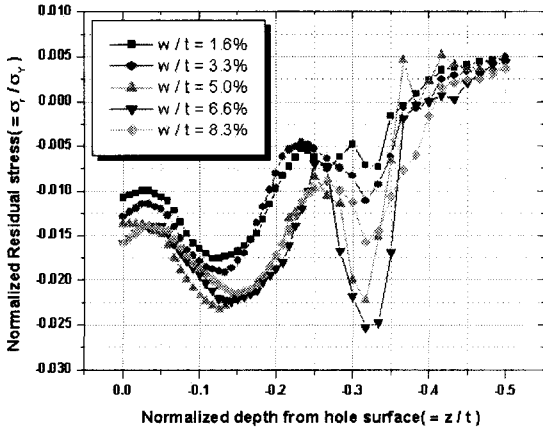


Fig. 4 Effect of indentation displacement on the residual stress distribution in the direction of depth

따라서 압입가공에 의한 피로수명의 향상거동은 반경방향과 깊이방향의 최대 압축 잔류응력의 크기가 크고 또한 그 작용층이 표면에 가까울수록 커질 것이므로, 이상과 같은 해석결과에서 최적의 압입 변위조건은 두께방향의 변위가 $w=0.2$ mm 일 때 즉, 압입 변위의 백분율이 $w/t=6.6\%$ 일 때라고 할 수 있겠다.

Fig. 5 는 반경방향의 잔류응력분포에 대한 압입 직경비의 영향을 검토하기 위하여, 압입 변위의 백분율을 $w/t=6.6\%$ 로 일정하게 하고 리벳 홀의 직경에 대한 압입자의 직경비를 각각 $D/d=1.4$, 1.6 및 1.8 와 같이 변경 설정한 다음, 반경방향의 잔류응력 분포를 해석하고 그 결과를 도시한 것이다. 이 결과에 의하면 압입 직경비가 증대되면 반경방향의 최대 압축 잔류응력의 크기가 커지며, 또한, 최대 압축 잔류응력의 작용위치가 리벳 홀 끝으로부터 먼 곳에 위치하였다.

Fig. 6 은 깊이방향의 잔류응력분포에 대한 압입 직경비의 영향을 검토하기 위하여, 반경방향의 경우에서와 마찬가지로, 압입 변위의 백분율을 최적조건으로 일정하게 하고 압입자의 직경비(D/d)를 3 단계로 변화시켜 표면으로부터 깊이방향의 잔류응력 분포를 해석하고 그 결과를 도시한 것이다. 이 결과에서 깊이방향의 잔류응력 분포는 반경방향에 비해 압축 잔류응력의 크기가 대체로 미소하고, 또한 압입 직경비가 $D/d=1.6$ 보다 커질 경우 최대 압축 잔류응력의 크기가 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

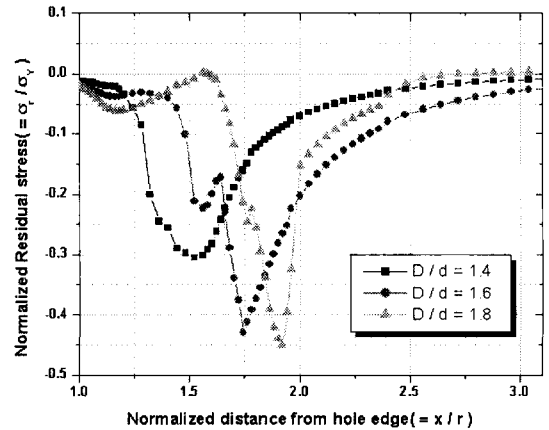


Fig. 5 Effect of indenter sizes on the residual stress distribution in the direction of radius

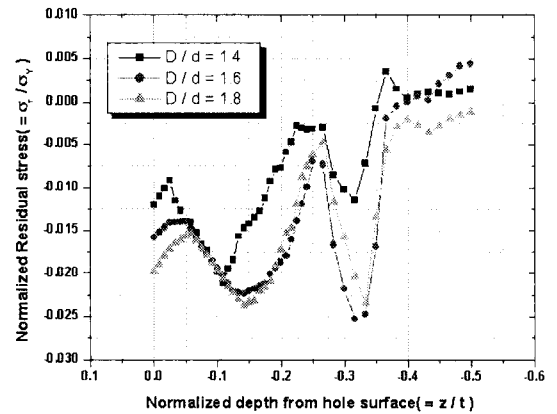


Fig. 6 Effect of indenter sizes on the residual stress distribution in the direction of depth

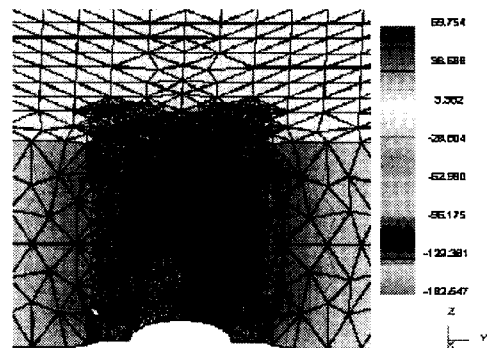


Fig. 7 Residual stress contour around a indented rivet hole

Fig. 7 은 압입 직경비가 $D/d=1.6$ 이고 압입 변위의 백분율이 6.6%일 때 모재의 변형 형상과 잔류응력분포를 예시한 것으로서, 전술된 바와 같이, 깊이방향의 잔류응력분포는 매우 복잡한 양상을 보이고 있으나, 반경방향의 압축 잔류응력은 리벳 홀 끝으로부터 측정된 무차원 거리 $x/r=1.75$ 에 이를 때까지는 그 크기가 점차 증가하다가, $x/r=1.75$ 를 상회하면 점차 감소하는 양상을 보이고 있다.

3. 압입재의 피로거동 해석

3.1 시험편 및 실험방법

비압입재의 피로실험에 사용된 시험편은 두께가 $t=6\text{ mm}$ 이고 폭이 $B=25\text{ mm}$ 인 Al 7075-T6 합금 판재의 중앙부에 직경 $d=5\text{ mm}$ 의 리벳 홀이 가공된 인장 시험편형으로 밀링 가공하였으며, 그 형상은 Fig. 8 과 같다. 또한, 압입재의 피로시험에 사용된 시험편의 압입 가공은, 2.2 절에 소개되어 있는 바와 같이, 리벳 홀이 가공된 피로 시험편의 전·후면에 요구되는 압입 직경비(D/d) 조건에 따라 선정된 원통형 압입자를 INSTRON(Model 4206) 하중기구용 어댑터에 장착시킨 다음, 변위제어하에서 요구되는 압입 변위의 백분율($w/t\%$)에 따라 지정된 압입 변위(w)만큼 소성변형이 유발될 때까지 압입하였으며, 균열성장 예상경로와 그 주변은 사포와 연마제(Al_2O_3)를 이용하여 균열거동을 관찰하는데 무리가 없을 만큼 세심하게 연마하였다.

피로시험에는 MTS 사에서 제작된 25 톤 용량의 컴퓨터 제어 유압식 피로시험기(Model 810)와 평판용 유압 그림을 사용하였다.

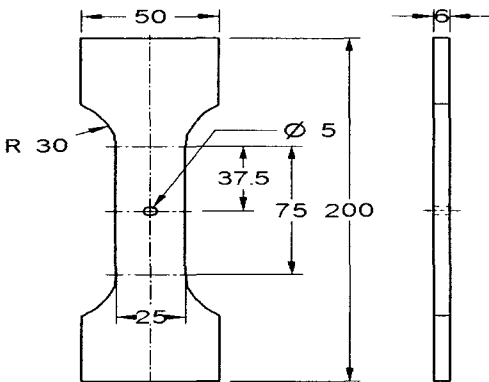


Fig. 8 Specimen configuration for fatigue test

피로시험 방법은 ASTM E 647 의 ΔP -일정 피로 시험법에 준하여 인장-인장형 하중 제어 방식으로 수행하였으며, 하중 사이클은 20 Hz 정현파형으로 설정하였다. 또한 하중비는 $R=(P_{\max}/P_{\min})=0.1$ 로 고정하고, P_{\max} 의 설정에는 ASTM E-647 의 관련 규정과 하중설정을 위한 예비실험 결과를 참조하였으며, 균열거동의 관찰과 측정에는 0.01 mm 의 정밀도를 갖는 이동식 현미경(PIKA, Model PRM-D2XY 형)을 이용하였다.

3.2 피로시험 결과 및 고찰

피로균열 발생수명에 대한 압입조건인 영향을 검토하기 위하여, 피로균열 발생조건을 Glinka 와 Stephens¹³ 의 연구결과에서와 같이, 시험편의 중심부에 가공된 리벳 홀 끝으로부터 파생된 균열이 $a=0.25\text{ mm}$ 에 도달할 때까지 부가된 하중 반복수 N 으로 정의한 다음, 압입재와 비압입재의 피로거동을 비교하였다.

Fig. 9 는 압입 변위의 백분율이 6.6%이고 압입 직경비가 각각 $D/d=1.4, 1.6$ 및 1.8 인 압입재의 피로균열 발생수명에 대한 압입 직경비의 영향을 검토한 것으로서, 피로균열발생에 소요되는 하중 반복수를 직접 비교할 경우, 대체로 압입재가 비압입재에 비해 최소 21% 이상 큰 값을 가졌으며, 최적의 압입 직경비에 상응하는 $D/d=1.6$ 의 경우에는 비압입재에 비해 피로균열 발생수명이 25% 정도 향상되는 거동을 나타내었다. 이와 같은 거동은 압입 잔류응력의 분포특성에 관한 유한요소 해석 결과에서 알 수 있듯이, 압입 직경비가 $D/d=1.6$ 일 때 깊이방향 압축 잔류응력이 최대가 될 뿐만 아니라, 압입 직경비가 $D/d=1.6$ 보다 적거나 커지면 깊이방향 최대 압축 잔류응력의 크기가 상대적으로 감소하기 때문이라고 할 수 있다.

Crack Initiation Lives ($a = 0.25\text{mm}$)			
Diameter Ratios	Number of Cycles		
Non-indentation	170400		
$D/d = 1.4$	207000		
$D/d = 1.6$	213000		
$D/d = 1.8$	206000		

Fig. 9 Effect of indenter size on fatigue crack initiation life

Fig. 10 은 압입 직경비가 $D/d=1.6$ 이고 압입 변위의 백분율이 각각 5.0%, 6.6%, 8.3% 및 10.0%일 때, 피로균열 발생수명에 대한 압입 변위의 영향을 검토한 것으로서, 이 결과에서도 피로균열 발생수명은 최적의 압입 변위에 상당하는 $w/t=6.6\%$ 에서 가장 큰 값을 가지나, 압입 변위의 백분율이 8.3% 이상 커질 경우 피로균열 발생수명의 향상 정도가 점차 감소하는 양상을 보이고 있다. 또한 이와 같은 거동은 유한요소해석 결과에서 예상할 수 있는 바와 같이, 압입재에 가해진 압입 변위의 백분율이 6.6% 이상 커질 경우 반경방향과 깊이 방향의 최대 압축 잔류응력이 급격하게 감소되기 때문이라고 할 수 있겠다.

Crack Initiation Lives ($a = 0.25\text{mm}$)			
Percent Indentation Displacement	Number of Cycles		
Non-indentation	170400		
$w/t = 5.0\%$	221000		
$w/t = 6.6\%$	227000		
$w/t = 8.3\%$	213000		
$w/t = 10.0\%$	185000		

Fig. 10 Effect of indentation displacement on fatigue crack initiation life

Fig. 11 은 압입 변위의 백분율이 일정($w/t=6.6\%$)한 반면에 압입 직경비가 각각 $D/d=1.4, 1.6$ 및 1.8 인 압입재의 균열성장거동을 비압입재의 경우와 함께 비교한 것으로서, 압입재의 피로균열성장곡선은 비압입재의 경우와 마찬가지로 피로하중 작용의 누적과 더불어 균열성장거동이 점차 가속되는 양상을 보이고 있으나, 비압입재에 비해 그 기울기가 대체로 완만한 것으로 보아, 리벳 홀에 적용된 압입 가공이 균열 발생수명과 성장수명의 향상에 도 기여함을 알 수 있다. 또한 압입 직경비가 증가하면 균열성장거동이 점차 둔화되다가, 최적의 압입조건에 상당하는 $D/d=1.6$ 이상이 되면 균열성장둔화거동이 거의 일정해지는 양상을 나타내었다.

Fig. 12 는 피로균열성장거동에 대한 압입 변위의 영향을 검토하기 위하여, 압입 직경비가 $D/d=1.6$ 이고 압입 변위의 백분율이 각각 5.0%, 6.6%, 8.3% 및 10.0%인 압입재의 피로균열성장거동을 비압입재의 경우와 함께 비교한 것이다.

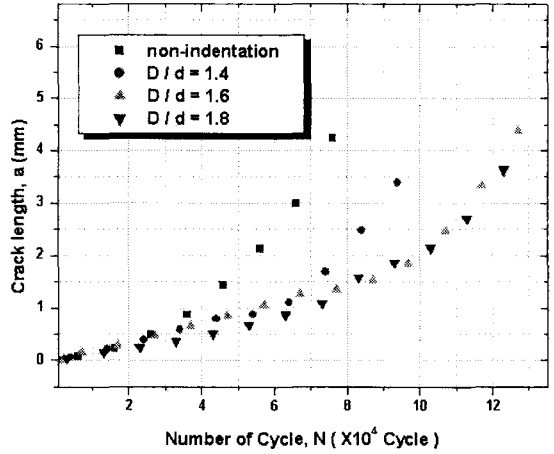


Fig. 11 Effect of indenter diameters on fatigue crack growth

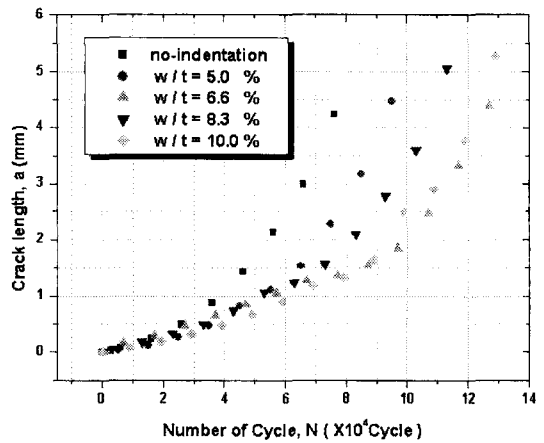


Fig. 12 Effect of indentation displacement on fatigue crack growth

이 결과에서도 압입재의 균열성장거동은 피로하중 작용이 누적됨에 따라 균열성장거동이 점차 가속되는 양상을 보이고 있으나, 비압입재에 비해 그 기울기가 대체로 완만한 것으로 보아 압입 가공에 의해 균열성장이 둔화된 것을 알 수 있다. 또한 압입 변위가 커지면 균열성장거동이 점차 둔화되다가 최적의 압입 변위에 상당하는 6.6% 보다 커지면 균열성장거동이 점차 급격해지는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 압입 잔류응력의 분포 특성에 대한 압입 변위의 영향을 조사한

Fig.3 과 Fig.4 에서 알 수 있는 바와 같이, 압입 변위가 $w/t=6.6\%$ 를 상회하게 되면 반경방향과 깊이 방향의 최대 압축 잔류응력이 점차 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

압입 조건에 따른 잔류응력의 분포특성을 유한요소해석하고, 그 결과를 토대로 하여 피로균열 거동에 대한 압입 조건의 영향을 검토하였으며, 주요 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 잔류응력분포에 대한 압입 변위의 영향은, 대체로 압입 변위가 클수록 최대 압축 잔류응력의 크기도 커지나, 판 두께에 대한 압입 변위의 백분율이 6.6% 이상 커질 경우 최대 압축 잔류응력의 크기가 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.
2. 잔류응력분포에 대한 압입 직경비의 영향은, 대체로 D/d 가 클수록 반경방향과 깊이방향의 최대 압축 잔류응력의 크기도 커지며, 또한 최대 압축 잔류응력의 작용위치가 리벳 홀 끝으로부터 먼 곳에 위치하였다
3. 피로균열 발생수명에 대한 압입 조건의 영향은 압입 잔류응력의 유한요소해석 결과에서 설정된 최적의 압입 조건($w/t=6.6\%$, $D/d=1.6$)을 정점으로 하여 균열발생에 소요되는 반복 하중수가 증감하는 경향을 나타내었으며, 또한 최적의 압입조건하에서 피로균열 발생수명은 비압입재에 비해 약 25% 정도 향상되는 것을 알 수 있었다

후 기

본 연구는 경남대학교 학술 장려금의 지원으로 수행된 연구결과의 일부이며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Meguid, S.A., Shagal, G., Stranart, J.C., Daly, J., "Three-dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Shot-peening Induced Residual Stresses," Finite Elements in Analysis and Design,

Vol. 31, pp. 179-191, 1999.

2. Goto, M., Nisitani, H., Miyagawa, H., Miura, A., Imado, K., "Effect of Indentation on the Fatigue Strength of Plate Specimens with a Central Notch," Transactions of JSME(Series A), Vol. 57, No. 544, pp. 2873-2878, 1991.
3. Pavier, M.J., Poussard, C.G.C., Smith, D.J., "Effect of Residual Stress around Cold Worked Holes on Fracture under Superimposed Mechanical Load," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 63, pp. 751-773, 1999.
4. Baker, A.A., "Fibre Composite Repair of Cracked Metallic Aircraft Components-Practical and Basic Aspects," Composites, Vol. 18, No. 4, pp. 293-308, 1987.
5. Song, S.H., Choi, B.H. and Kim, B.S., "Indentations near Crack Tip in Al-5086 and Characteristics of Fatigue Crack Propagation," Proceeding of the KSPE 2000 Spring Annual Meeting, pp. 447-480, 2000.
6. Lim, Won-Kyun, Yoo, Jin-Sang and Choi, Seung-yong, "The Effect of Concurrent Cold-expansion and ring-indentation on the Growth of fatigue cracks Emanating from Circular Holes," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 59, No. 5, pp. 643-653, 1998.
7. Goto, M., Miygawa, H. and Nisitani, H., "Crack Growth Arresting Property of a Hole and Brinell-type Dimple," Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 19, No. 1, pp. 39-49, 1996.
8. Byun, T.S., Hong, j.H., Haggag, F.M., Farrell, K. and Lee, E.H., "Measurement of Through-the-Thickness Variations of Mechanical Properties in SA508 Gr.3 Pressure Vessel Steels using Ball Indentation Test Technique," Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 74, pp. 231-238, 1997.
9. Yamamoto, T., Kurishita, H., Matsushima, T., Kayano, H., "Development of Innovative Indentation System and Its Application to Cyclic Ball Indentation Test for Small-sized Specimens," Journal of Nuclear Materials, Vol. 239 pp. 219-227, 1996.
10. Lee, Hyungvil and Lee, Jin Haeng, "An Indentation Theory Based on FEA Solutions for Property Evaluation," Transactions of the KSME(Series A),

Vol. 25, No. 11, pp. 1685-1696, 2001.

11. Seok, Chang-Sung, Kim, Jeong Pyo and Ahn, Ha Neul, "A Study on the Evaluation of Material Degradation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel using Ball Indentation Method," J. of KSPE, Vol. 18, No. 4, pp. 151-159, 2001.
12. Kobayashi, Shiro, Oh, Soo-Ik, Taylan, Altan, "Matal Forming and the Finite-Element Method," Oxford University Press, pp. 30-33, 1989.
13. Glinka, G. and Stephens, R. I., "Total Fatigue Life Calculations in Notched SAE 0030 Cast Steel Under Variable Loading Spectra," ASTM STP 791, pp. I-427-I-445, 1983.