

항공기용 알루미늄 판재의 냉간가공 특성 연구

이동석*, 이준현**

A Study on Cold Working Properties of Aluminum Plates for Aircraft Structure

Dong-Suk Lee*, Joon-Hyun Lee**

ABSTRACT

In a structure, many components are fastened together using bolts, nuts and rivets through drilled holes. Not only do these fastened joints enable easy assembly and dismantling, they are also able to transfer as well as to distribute loads applied onto the structures. The major drawback of such connections, however, is that the fatigue life of the components is reduced by the presence of the hole since the stress concentration around the hole is increased. In addition, the hole drilling process itself may introduce defects or roughness at the surfaces of the hole that may cause further decrease in fatigue performance of the components. For applications where fatigue loadings are important, one way to compensate the decrease in fatigue life of the components is by introduction of beneficial compressive residual stress around the hole using cold working. The material used for this research were Al2024-T351 and Al7050-T7451 using the primary member of aircraft. We present, In this paper, the characteristics of coldworking by evaluation of the hole expansion ratio, residual stress distribution, and fatigue properties.

Key Words : Cold working(냉간가공), Residual stress(잔류응력), S-N curves(응력-반복수곡선)

1. 서론

산업현장에서의 구조물이나 기계부품 등은 운용중에 정적, 동적 및 반복하중 등을 받게 되며, 또한 온도, 습도 등의 주변환경적 요소들의 복합적인 요인에 의하여 운용중에 피로균열의 발생, 전파로 인하여 피로파괴를 일으키게 된다. 특히 산업의 발전과 더불어 많은 구조물들의 사용요건이 더욱 가혹해지고 대형화되어 가고 있어, 사고의 위험이 증가되고 있다. 실질적으로 대부분의 구조물들은 홀

을 가공한 후 볼트, 리벳 및 하이락 등의 패스너를 이용하여 체결되어 있다. 그러나 홀 주위가 응력집중부로 되거나 가공공정에서 미소한 결함발생과 홀 주위의 표면거칠기에 의하여 피로강도가 감소하게 된다. 이러한 체결부가 있는 구조물에서는 운용중에 재료의 기준강도를 국부적으로 초과하여 소성변형이 일어나게 되며, 결과적으로는 피로파괴 현상이 발생하게 된다.

한편 안전하고 효율적인 구조설계를 위하여 여러 가지 재료의 특성을 잘 알아야 하며, 구조의 각

†† 2002년 7월 29일 접수
* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 기계공학부

부분별 기능에 부합되는 효과적인 소재선택이 필요하다. 또한 피로하중이 작용하는 부위에서는 내구성향상을 위하여 기계적, 금속적 개선방법들에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 이루어져 왔다. 일반 항공기에서 가장 널리 사용되는 것이 Al2000 계열과 Al7000계열의 알루미늄 합금이다. 이중 Al2024는 피로 특성과 인장력이 주로 작용하는 부분에 사용되며, Al7050은 고강도와 동시에 내 부식성이 요구되는 부위에 사용된다. 또한 내구성향상을 위하여 홀에 강도가 높은 부싱(bushing)을 장착하여 응력을 감소시키는 방법과, 홀의 내부 표면에 샷피닝(shot peening)처리^{1,2}를 하여 압축잔류응력에 의해 내구성을 향상시키는 방법을 적용하고 있다. 또한 최근에 적용이 증가하고 있는 방법으로 맨드릴(mandrel) 및 스피릿 슬리브(split sleeve)를 이용하여 홀을 확장시킬 때 발생하는 압축잔류응력을 이용하는 냉간가공(cold working)방법³⁻⁸ 등이 있다.

본 연구에서는 항공기 구조용으로 많이 사용되는 알루미늄 판재의 냉간가공 처리 후, 그 효과를 검토하기 위하여 Al2024-T351과 Al7050-T7451에 맨드릴 및 스피릿 슬리브를 이용하여 냉간가공 처리를 하였다. 또한 냉간가공 처리된 시험편을 X-선 회절법을 이용하여 잔류응력분포 특성을 평가하였으며, 피로시험을 통하여 피로강도 및 균열성장 특성을 분석하였다. 이러한 결과를 토대로 재질에 따른 최적의 홀 확장율, 냉간가공 특성 및 냉간가

공 방법을 제시하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 항공기 구조용으로 많이 사용되는 Al2024-T351과 Al7050-T7451이며, 기계적 성질은 Table 1과 같다. Table 2는 본 실험에서 사용된 냉간가공(coldworking ; CW)재와 미 냉간가공(non-coldworking ; NCW)재의 각 시험편 조건 및 치수를 보여주고 있다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 시험편의 형상이다. 시험편 채취방향은 균열진전방향이 이에 수직인 L-T방향이다. 시험편의 냉간가공은 Fig. 2에서와 같이 가공된 홀에 맨드릴 및 스피릿 슬리브 등을 이용하여 수행하였으며, 리머(reamer)를 이용하여 마감처리 하였다.

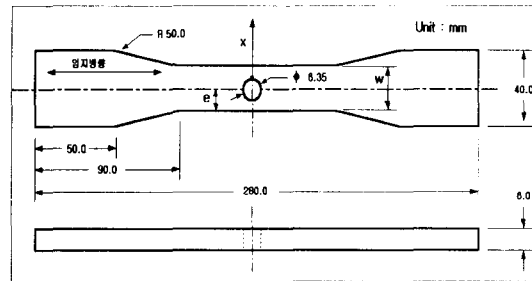


Fig. 1 Specimen configuration

Table 1 Mechanical properties of Al2024-T351 and Al7050-T7451

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio
Al2024-T351	289.7	441.4	73,798.7	12.0	0.33
Al7050-T7451	441.4	510.4	71,039.9	9.00	0.33

Table 2 Conditions and dimensions of test specimens

Specimen	Material	Width (W, mm)	Thickness (mm)	Hole Diameter (Ø, mm)	Treatment
2CW	Al2024-T351	25.40	6.00	6.35	Coldworking
2NCW	Al2024-T351	25.40	6.00	6.35	Non-Coldworking
7CW	Al7050-T7451	25.40	6.00	6.35	Coldworking
7NCW	Al7050-T7451	25.40	6.00	6.35	Non-Coldworking

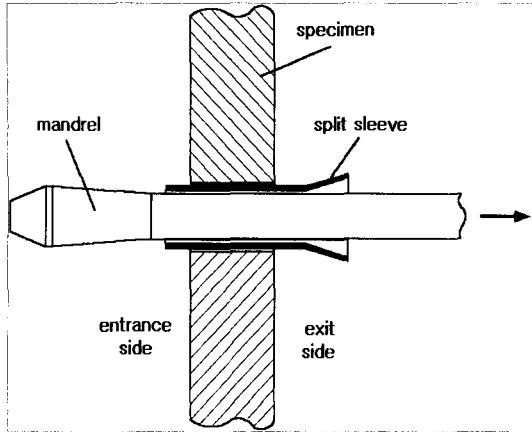


Fig. 2 Schematic representation of coldworking process of hole

2.2 실험방법

2.2.1 경도시험

냉간가공 처리에 따른 가공경화(work hardening)에 의한 경도치의 분포특성을 파악하기 위하여 마이크로 비커스 경도기(AKSASHI사, Model ; MVK-H1)를 사용하였으며, 측정은 냉간가공을 실시 및 미 실시한 시험편의 홀 끝단으로부터 폭 방향의 한쪽 끝단까지 일정간격으로 측정하였다.

2.2.2 잔류응력측정

재질 변화에 따라 냉간가공 실시 후, 시험편 표면의 잔류응력을 측정하기 위하여 X-선 회절법을 이용한 잔류응력측정기(TEC사, Model ; 1603-3)를 사용하였다. X-선 회절장비의 측정조건은 Table 3 과 같다. 측정은 홀 끝단으로부터 시험편 폭 방향의 한쪽 끝단까지, 홀의 반직경 및 접선방향에 대하여 일정간격을 측정하였다.

Table 3 Measuring condition of residual stress

X-Ray diffraction	Condition	
X-Ray source	Target	Cr
	Voltage	35.0kV
	Current	1.5mA
Effective focus	ø 2.0mm	
Ψ	-15°, 0°, 15°	
Calculation method	$2\theta - \sin^2\Psi$	

2.2.3 피로시험

본 실험에서 사용한 피로시험기는 최대용량이 25Ton인 유압식 재료시험기(MTS사, Model ; 810)이다. 시험은 주파수 10Hz, 응력비 R=0.01인 사인파 형태의 하중제어 방식으로 시험을 수행하였다. 균열길이는 0.01mm까지 측정 가능한 이동현미경(PIKA사, Model ; PRM-D2XY)을 이용하였다.

Al2024-T351과 Al7050-T7451의 재질변화에 따른 냉간가공후의 피로강도 효과를 분석하기 위한 S-N시험은 동일한 응력에서 3개의 시험편을 사용하였다. 초기균열은 홀 끝단에서 발생한 균열을 시험편의 전, 후면을 동시에 측정하여 그 평균값이 0.25mm일 때를 초기균열로 가정하였다. 또한 최종 파단 사이클을 획득하여 응력-반복수곡선(S-N curves)을 작성하였다. 한편 냉간가공에 따른 압축잔류응력이 존재하는 시험편에서의 피로균열 전파거동을 분석하기 위하여, Fig. 1의 시험편 형상에서 Al2024-T351 및 Al7050-T7451의 시험편을 홀 및 폭의 에지(edge) 기준으로 절단하였다. ASTM E 647-83에 따라 예비균열을 생성시킨 후, 본 시험을 수행하였다. 이때 예비균열은 최대압축잔류응력이 존재하는 절단 전의, 홀 에지부위에 편측노치를 이용하여 생성시켰다. 균열길이 측정은 시험편 전, 후면을 동시에 측정하여 그 평균값을 균열길이로 취하였으며, ASTM E 647-83에 제안된 Secant Method를 이용하여 da/dN을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도 분포특성

냉간가공 실시에 따른 시험편 표면의 경도를 측정한 결과는 Fig. 3과 같다. Al2024-T351의 미 냉간가공재의 경도는 약 137.6Hv로 나타났으며, 냉간가공에 따라 홀 부위에서 폭의 끝단까지의 전 부위가 다소 증가하였으며, 폭의 끝단으로 갈수록 미소한 감소를 보였다. 그러나 Al7050-T7451의 경도는 약 158.9Hv로써 냉간가공에 따른 경도변화는 거의 없었다.

3.2 잔류응력 분포특성

재질 변화에 따라 맨드릴 및 스포릿 슬리브를 이용하여 냉간가공 수행에 따라 시험편의 홀 직경의 변화를 Table 4에 나타냈다. 홀 확장율은 재질에

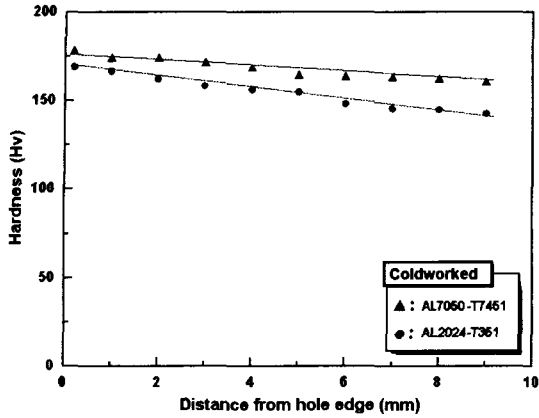


Fig. 3 Hardness distribution produced by coldworking

따라 다소 차이를 보였으며, 이러한 홀 확장에 따라 압축잔류응력이 형성되며 냉간가공효과에 직접적인 영향을 주게된다. 실제 가장 효과적인 홀 확장율을 4% 정도로 볼 때⁹, Al7050-T7451은 효과적인 냉간가공을 위한 홀 확장율에 비하여 다소 작다고 할 수 있다.

Table 4 Condition of cold working for test specimen

Material	Hole Diameter(mm)		
	Initial	After coldworking	Expansion ratio(%)
Al2024-T351	5.71	5.92	3.68
Al7050-T7451	5.71	5.86	2.63

Fig. 4와 5는 각각 Al2024-T351과 Al7050-T7451의 냉간가공후의 초기잔류응력 상태를 보여주고 있다. 그림에서와 같이, 반경방향의 초기잔류응력은 두 재질 모두, 홀 끝단에서 약 3.0mm($x/r \approx 1.0$)에서 최대압축잔류응력이 나타났으며, 시험편의 끝단으로 갈수록 압축잔류응력의 감소를 보였다. 홀에 대한 접선방향의 잔류응력 또한 두 재질 모두, 거의 홀 끝단 부위인 약 1.0mm($x/r \approx 0.3$)에서 최대압축잔류응력을 보였다. Al2024-T351의 접선방향의 잔류응력은 항복강도의 약 1.6배정도 높은 압축잔류응력이 나타났으나, Al7050-T7451은 약 0.7배 정도로 상대적으로 낮게 나타났다. 냉간가공은 가공재의 재질, 형상, 가공기법 등에 따라 그 효과가 결정된다. 최근 냉간가공에 있어 적용기법을 맨드릴 및

스프릿 슬리브를 이용한 방법과 스프릿 슬리브가 필요 없는 스프릿 맨드릴(split mandrel)법의 결과가 보고되고 있다. 스프릿 맨드릴방법은 일반적으로 홀 직경이 12.70mm이상의 다소 큰 홀과 Al7000계열의 알루미늄 합금에서 보다 효과적인 냉간가공 효과를 얻을 수 있다고 보고 되고있다^{10,11}. Fig. 6은 Al2024-T351의 반복하중에 의한 잔류응력거동을 분석하기 위하여, 냉간가공후의 초기상태와 0.25mm의 초기균열이 발생한 사이클에서의 잔류응력을 측정 한 결과이다. 잔류응력의 변화는 반경방향에 비하여 접선방향의 잔류응력 이완이 크게 나타났다. 이것으로 접선방향의 잔류응력이 피로강도에 지배적인 영향을 미치는 것임을 알 수 있다.

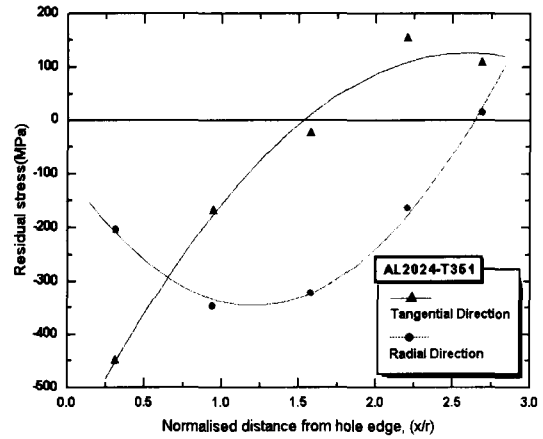


Fig. 4 Residual stress distribution produced by cold working

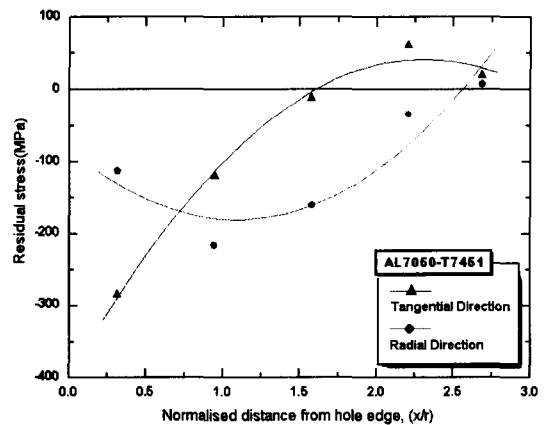


Fig. 5 Residual stress distribution produced by coldworking

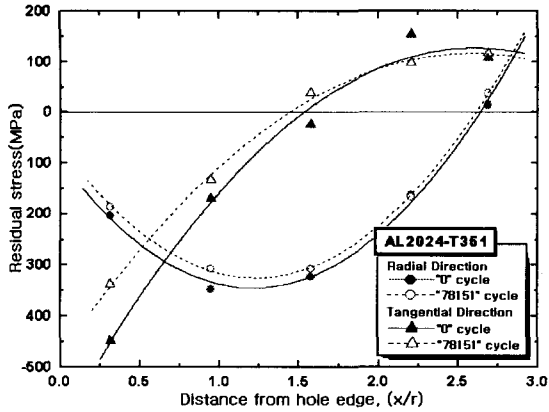


Fig. 6 Residual stress redistribution of cold working fatigue test specimen

3.3 S-N선도 특성

Fig. 7은 Al2024-T351의 S-N 시험결과이며, Fig. 8은 Al7050-T7451의 S-N 시험결과이다. 그림에서와 같이 냉간가공을 실시하지 않은 경우, Al2024-T351에 비하여 Al7050-T7451의 피로강도는 172MPa의 동일 작용응력에서 약 2.3배 높게 나타났다. 피로한도는 Al2024-T351이 약 113MPa였으며, Al7050-T7451은 129MPa로써 약 1.2배 정도 높게 나타났다. 그러나 냉간가공 적용 후, Al2024-T351에 비하여 Al7050-T7451의 피로강도가 작용응력 172MPa에서 약 0.9배의 감소를 보였으며, 피로한도는 147MPa로써 Al2024-T351과 Al7050-T7451의 냉간가공재는 거의 동일하였다. 본 시험결과에서 Al2024-T351의 경우 냉간가공 실시에 따라 피로한도는 약 31% 증가를 하였으나, Al7050-T7451은 약 12% 정도의 증가를 보였다. 본 시험결과에서 스프릿 슬리브 및 맨드럴을 이용한 냉간가공에서 Al2024-T351은 Al7050-T7451에 비하여, 상대적으로 피로강도의 큰 증가를 보였다. 총 피로수명에서 균열발생수명은 Al2024-T351과 Al7050-T7451 모두 비슷한 경향으로써 작용응력에 따라 냉간가공을 실시하지 않은 경우는 약 53%-82%, 냉간가공을 실시한 경우는 약 26%-73% 였다. 또한 동일하게 작용응력이 낮을수록 냉간가공의 효과는 높아졌으며, 총피로수명에서 균열진전수명의 비율이 높아졌다.

본 실험결과에서 스프릿 슬리브 및 맨드럴을 이용한 가공법의 냉간가공에서는 Al2024-T351은 적절한 홀 확장율에 따라, 높은 압축잔류응력이 형성

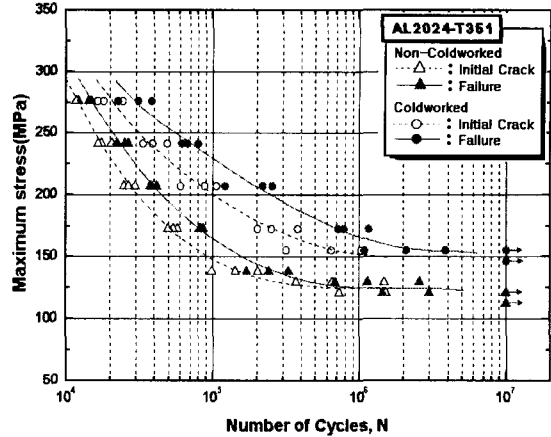


Fig. 7 S-N curve of 2CW and 2NCW

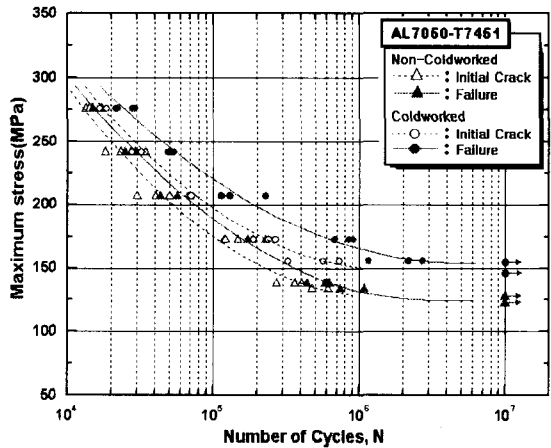


Fig. 8 S-N curve of 7CW and 7NCW

되어 피로강도의 큰 증가를 보였다. 그러나 Al7050-T7451에서는 적절한 홀 확장율을 이루지 못하여 낮은 압축잔류응력의 형성으로 인하여 다소 낮은 피로강도향상을 보였다. Leon¹⁰의 연구결과에서와 같이 Al7000계열등의 고강도에서는 스프릿 슬리브가 없는 스프릿 맨드럴 방법의 적용이 보다 효과적 인 냉간가공법이라 판단된다.

3.4 피로균열의 전파특성

Fig. 9와 10은 Al2024-T351 및 Al7050-T351의 미 냉간가공 및 냉간가공에 따른 균열진전속도를 보여 주고 있다.

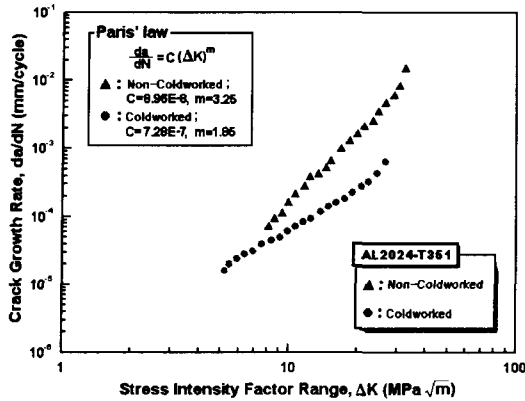


Fig. 9 da/dN-ΔK curve of 2CW and 2NCW

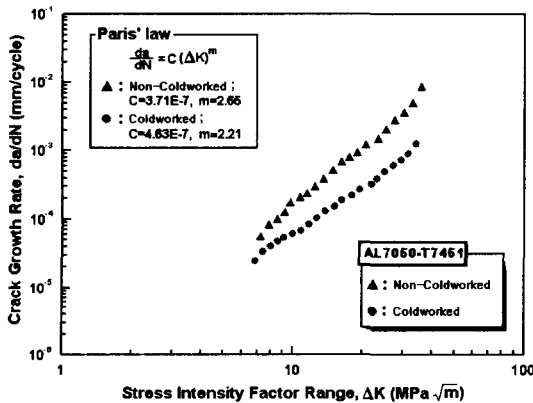


Fig. 10 da/dN-ΔK curve of 7CW and 7NCW

Fig. 9와 10에서 Al2024-T351과 Al7050-T7451 모두 냉간가공 실시에 따라 냉간가공을 실시하지 않은 각 모재에 비하여, 균열진전속도가 낮게 나타났다. 냉간가공에 따라 Paris의 법칙에서의 실험상수 C는 Al2024-T351은 다소 증가하였으나 Al7050-T7451은 거의 변화가 없었다. 또한 균열성장률과 직접적인 관계를 가지는 지수 m은 Al2024-T351에서는 큰 감소를 보였으나, Al7050-T7451은 미소한 감소를 보였다. 이것은 Al2024-T351은 효과적인 냉간가공 처리가 되었으나, Al7050-T7451은 되지 않은 것을 보여주고 있다.

4. 결론

항공기 구조용 재료로 많이 사용되는 Al2024-

T351과 Al7050-T7451의 스프릿 슬리브 및 맨드럴을 이용한 냉간가공에 따른 피로특성을 평가하기 위하여, 홀 확장율, 잔류응력 및 피로시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

(1) 냉간가공에 의한 압축잔류응력은 홀에 대하여 반경방향보다는 접선방향의 잔류응력이 피로수명의 증가에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

(2) 냉간가공 실시에 따라 Al2024-T351의 홀 확장율은 약 3.68%로 최대압축잔류응력은 홀에 대하여 접선방향으로 항복응력의 약 1.6배 정도 나타났다. 반면에 Al7050-T7451에서는 홀 확장율이 약 2.63%로써 최대압축잔류응력은 홀에 대하여 접선방향으로 항복응력의 약 0.7배 정도로써 냉간가공에 따른 압축잔류응력 형성은 홀 확장율에 지배적임을 알 수 있었다. 또한 효과적인 냉간가공을 위해서는 홀 확장율이 최소 약 3.6%이상으로 판단된다.

(3) 스프릿 슬리브 및 맨드럴을 이용한 냉간가공에 따라 Al2024-T351의 피로한도는 약 30.7% 증가하였으나, Al7050-T7451의 피로한도는 약 13.3%의 증가로 상대적으로 낮게 나타났다. 또한 균열성장률 시험에서 두 재질 모두 Paris 상수 c값은 미소한 증가를 보였으나, 지수 m은 Al7050-T7451에 비하여 Al2024-T351은 큰 감소를 보였다.

참고문헌

1. Al-Obaid, Y. F., "A Rudimentary Analysis of Improving Fatigue Life of Metals by Shot Peening," ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 57, pp. 307-312, 1990.
2. Almen, T. O. and Black, P. M., "Residual Stress and Fatigue in Metals," McGraw-Hill, New York, 1981.
3. 송삼홍, 주동호, 양윤진, "3중 점용접재의 균열 단 열림각(CTOD)을 이용한 피로균열거동," 한국정밀공학회지, 제18권, 제5호, pp. 148-157, 2001.
4. Toor, P. M., "Cracks Emanating from Precracked Cold-Worked Holes," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 8, pp. 391-395, 1978.
5. Chandawanich, Nopporn, "An Experimental Study

- of Fatigue Crack Initiation and Growth from Coldworked Holes,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, pp. 609-620, 1979.
6. 이동석, 이준현, “항공기 구조용 냉간가공재 Edge 변화에 따른 피로특성 연구,” *대한기계학회 제2차 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집*, pp. 259-264, 2001.
 7. Poolsuk, S. and Sharpe Jr., W. W., “Measurement of Elastic-Plastic Boundary around Cold Worked Fastener Hole,” *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 515-520. 1978.
 8. 유진상, 최승룡, 송정훈, 송치훈, 임원균, “홀확장과 링압인 동시적용에 의한 피로균열지연,” *대한기계학회논문집*, 제21권, 제2호, pp. 305-316, 1997.
 9. M. J. Pavier, C.G.C Poussard, D.J. Smith, “Effect of Residual Stress around Cold worked Holes on Fracture under Superimposed Mechanical Load,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 63, pp. 751-773, 1999.
 10. A. Leon, “Benefits of Split Mandrel Coldworking,” *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-8, 1998.
 11. 함현욱, 김병민, 조훈, 조형호, “Mg, Zn, Si 성분이 7xxx계 알루미늄 합금의 압출성에 미치는 영향,” *한국정밀공학회지*, 제16권, 제11호, pp. 148-157, 1999.