

예비압입에 의한 알루미늄 합금 판재의 균열성장 지연효과 및 금속조직 변화

Crack Growth Retardation Effect and Metallographic Observation of Aluminum Alloy Plate with Pre-Indentation

황 정 선* 조 환 기** 윤 용 인***
Hwang, Jungsun Cho, Hwankee Yoon, Young-In

ABSTRACT

Fatigue test is conducted to see the effect of pre-indentation on the fatigue crack retardation of Al5052-H18 plate. Metallographic observation is introduced to deduce the relationship between fatigue crack retardation and fracture appearance with indentation. The grain size of the specimen becomes smaller with the increase of indentation force and the plastic zone is formed with the decrease of grain size. The fatigue striations are appeared densely as the indentation force becomes higher. Metallographic observation and fatigue test results show that the indentation force has the limited value in improving fatigue crack retardation. Important point to retard the fatigue crack growth is that the crack growth path should pass through the indented area.

주요기술용어 : Pre-Indentation(예비압입), Fatigue Crack Retardation(피로균열 성장지연), Metallographic Observation(금속조직학적 관찰), Fatigue Striation(피로 줄무늬)

1. 머리말

장기간 운용하는 항공기 구조물에 균열이 발생하게 되면 이·착륙시 작용하는 하중이나 비행임무 수행에 따른 하중이 반복적으로 작용하게 됨으로써 작은 균열이 점차 성장하게 되고 어느 순간에 예기치 못한

큰 구조물의 파괴를 유발하게 되므로 균열을 조기에 발견하여 수리하기 위한 노력을 지속적으로 기울일 필요가 있다. 그러나 작은 균열을 발견하는 것이 그리 쉬운 일은 아니며 특히 외부로 노출되지 않은 내부 구조물에 발생하는 균열은 탐지가 더욱 어렵다. 이러한 상황에서 비록 균열이 발생하여 어느 정도 성장한다 하더라도 균열성장을 획기적으로 지연시킬 수 있다면 구조물을 운영하는데 훨씬 안정적이며, 이로 인해 수명연장을 도모할 수 있게 된다.

* 공군사관학교 기계공학과 교수
** 공군사관학교 항공우주공학과 교수
*** 공군 항공기술연구소 연구원

균열의 성장을 지연시키기 위한 방법으로는 과하중 (Overload or Underload)에 의한 소성영역의 형성, 균열성장경로 상의 압입(Indentation), 균열 전단에 만들어주는 Stop Hole 등의 방법이 적용될 수 있다.

Dawicke^[1]는 0.09inch 두께를 갖는 Al2024-T3 판재시편에 대한 피로시험에서 일정진폭 하중의 최대값을 기준으로 2배의 과하중을 매 2,500 사이클당 1회씩 적용하면 피로수명이 약 70배까지도 증가함을 보여주었으나, 실제 구조물의 운용 중에 실험조건과 유사한 과하중을 인위적으로 적용하는 것이 용이하지 않으므로 과하중에 의한 수명연장은 현실적인 대안으로서 한계를 갖는다. Van Leenwen *et al.*^[2]은 균열 끝에 원형구멍(Stop Hole)을 만들어주어 예리한 불연속점에 집중되는 응력을 완화시킴으로써 균열성장이 적절한 수준에서 지연됨을 보였다. 이 방법은 항공기 기체 표피와 같은 구조물에 적용하기에 적합해 보이지만 구멍 주위에 압축잔류응력을 생성시키기 위한 Cold Work 절차의 번거로움, 정확한 위치 선정의 어려움 및 새로운 취약부위의 생성 등과 같은 문제점을 가지고 있다. 압입에 의한 균열지연방법은 Stop Hole 방법과 매우 유사하여 균열 전단 주변에 압축잔류응력을 부가함으로써 피로수명의 연장을 도모하는 것으로, Song and Choi^[3]는 압입위치에 따른 균열 성장 지연효과 및 시편두께에 따른 영향을 시험하였으며, Yoshioka *et al.*^[4]은 Vickers 경도시험을 위한 Diamond Pyramid를 압입자(Intender)로 사용하여 압입을 균열전단 양면에 적용함으로써 균열성장이 효과적으로 지연됨을 보였다. Goto^[5-6]는 다양한 크기의 중앙노치를 갖는 시편에 대한 피로강도시험을 수행하여 압입효과를 확인하였다.

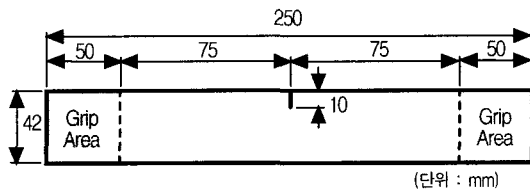
위와 같이 압입과 관련된 몇몇 연구결과들이 발표되고 있으나 압입시편에 대한 파단면 분석결과는 발

표되지 않고 있다. 본 연구에서는 구조물을 운용하기 전에 압입자국을 미리 형성시키는 예비압입(Pre-Indentation) 방법에 의한 균열성장지연 효과에 대한 분석과 피로 파괴된 단면의 금속조직학적인 관찰을 통하여 균열성장지연 현상과 금속조직의 변화 사이의 상관관계를 알아보려고 한다.

2. 실험 방법 및 절차

본 연구를 위해 사용된 피로시험 시편은 2.9mm 두께의 5052-H18 알루미늄 합금으로, 판재의 압연방향이 시편의 길이방향(Longitudinal Direction)과 일치되도록 절단하여 제작하였다. 시편의 외형형상은 Single-Edge Notch (SEN)를 갖도록 가공되었으며, 길이 10mm인 노치는 폭 0.2mm로 방전가공한 후 매끄럽게 처리하였으며, 균열측정을 용이하게 하기 위해서 시편 한쪽 면의 중앙 부분을 연마처리하였다(그림 1).

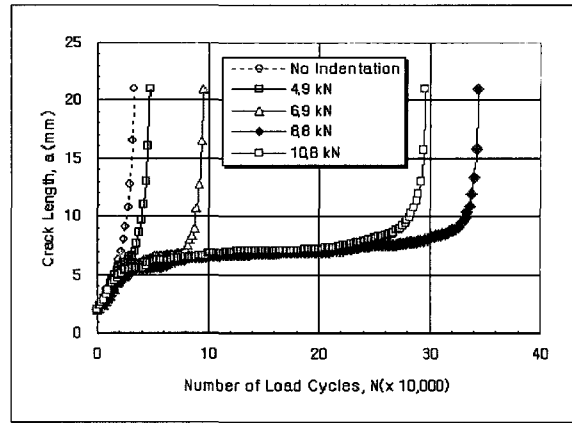
시편에는 ASTM E647-93^[5]에 의거하여 최대응력 46.8MPa, 응력비 $R=0.1$ 의 일정진폭 하중을 5Hz로 가하여 2mm의 예비균열(Pre-Cracking)을 만들어 준 후 본 실험을 진행하였다. 피로시험장비는 SATEC사의 피로시험기로 프레임의 최대하중은 10,000 lbs이며, Load cell은 200kN용을 사용하였다. 예비균열 이후에는 파단에 이르기까지 예비균열에서와 같은 하중으로



[그림 1] Specimen Configuration

$R=0.1$ 의 일정진폭 하중을 5Hz로 저주파실험을 수행하였다. 실험이 진행되는 동안 균열길이는 2,000 사이클마다 Zoom Video Microscope System을 사용하여 실시간으로 측정하였다.

본 실험에서 제안된 예비압입은 피로시험을 시작하기 전에 노치 선단으로부터 5mm 위치에 10mm 강구를 브리넬 경도계를 이용하여 시편 양쪽에 동시에 압입이 되도록 하였다.



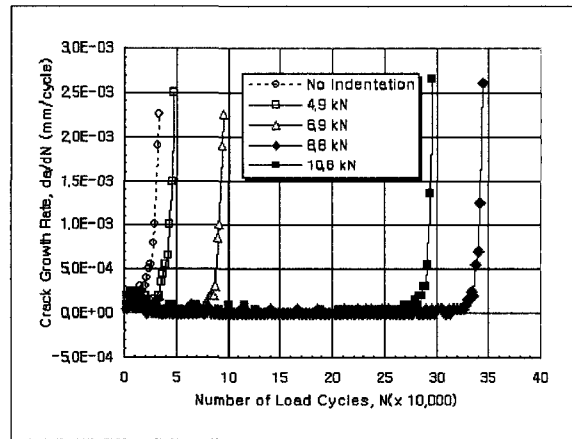
(a) Crack Length vs. Loading Cycles

3. 실험 및 파단면 관찰 결과

3.1 예비압입에 의한 균열성장지연 거동

그림 2는 압입력을 4.9kN부터 6.9kN, 8.8kN, 10.8kN까지 증가시키면서 압입한 각각의 시편에 대한 하중사이클과 균열길이의 관계 및 하중사이클과 균열성장률 관계를 나타낸 것으로, 예비압입에 의한 균열성장 거동 및 균열성장률의 변화를 관찰할 수 있다. 이 그림에서 균열은 압입에 도달하기 전까지 서서히 성장하다가 압입부에 들어서게 되면 성장률이 현저하게 감소하여 일정기간 동안 균열성장이 멈추게 되는 것을 알 수 있다. 예비압입을 적용하면 균열 진전경로가 압입자국에 도달하기 전부터 균열성장률이 예비압입을 하지 않았을 때와 비교하여 감소하기 시작하며, 압입자국의 중심에 이르기까지 지속된 후, 중심부에서는 최소 균열성장률에 이르게 되어 균열성장이 지속적으로 정체되고 일정한 사이클 동안 성장이 지연된다. 균열성장이 멈춘 후에 균열성장이 다시 회복하기 시작하면 균열이 급격하게 증가하여 파단에 이르게 되는 것을 볼 수 있다.

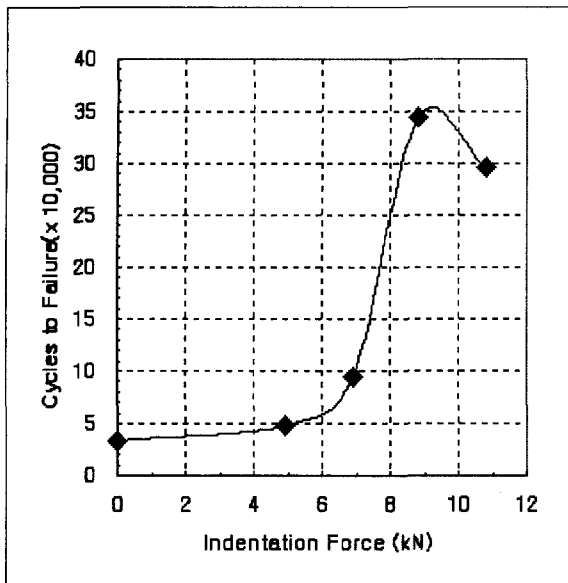
그림 3은 압입력의 크기에 따라 시편이 파단에 도달하게 되는 사이클수를 비교한 것으로, 압입력이



(b) Crack Growth Rates vs. Loading Cycles

[그림 2] The Behavior of Crack Growth to Loading Cycles for Different Pre-Indentation Forces

4.9kN일 때 파단사이클이 크게 증가하지 않지만 6.9kN 이상인 경우에는 뚜렷하게 증가하기 시작하고, 8.8kN 부근에서 최대값에 도달한 후 더 큰 압입력을 가할 경우에는 오히려 파단사이클이 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 8.8kN 이상의 압입력에 의해 여전히 균열성장이 지연되는 결과를 얻을 수 있지만 최대 효과는 기대할 수 없으며, 따라서 재료 및 시편형상에 따라 각각 다르겠지만 최적의 효과를 얻을 수 있는



[그림 3] Cycles of Failure with Increasing Indentation Forces

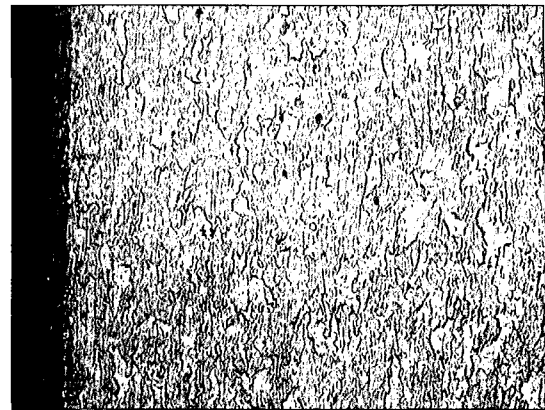
압입력이 존재함을 의미한다.

각각의 압입력에 대한 시험결과에서 최종균열길이인 21mm에 도달하는 사이클수 N_{21} 을 기준으로 할 때 압입되지 않은 시편의 최종 파괴 사이클수보다 압입력에 따라 최소 44.5%에서 최대 94%까지 균열성장 지연효과가 있음을 알 수 있다.

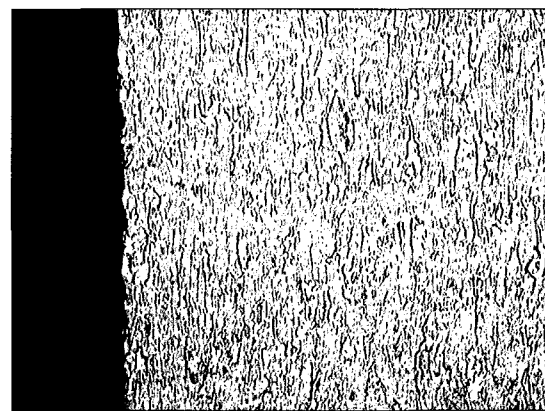
3.2 Metallographic Observation

시편의 재결정 상태 및 균열성장 지연효과를 관찰하기 위해 압입 부위 및 균열성장 부위에 대해 광학현미경과 SEM을 사용하여 파단면을 관찰하였다.

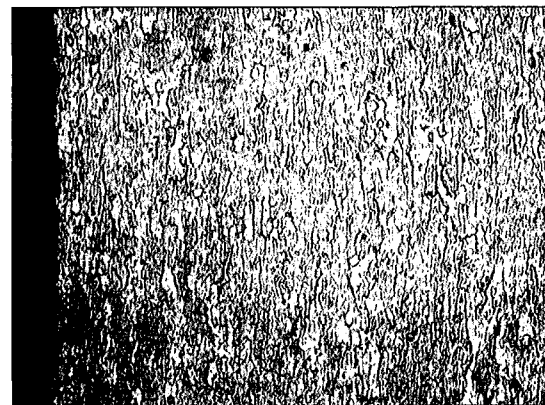
정상시편과 압입된 시편에 대한 파단 양상을 거시적으로 관찰한 결과, 정상시편 및 압입시편 모두 Shear Lip이 관찰되었다. Shear Lip의 발생위치는 정상시편의 경우에는 노치의 시작점(Pre-Crack 지점)에서 발생되었으며, 압입된 시편은 노치 시작점으로부터 약 2~3mm 정도 떨어진 파단면 위치에서 관찰되었



(a) Without Indentation



(b) Indentation Force of 8.8kN

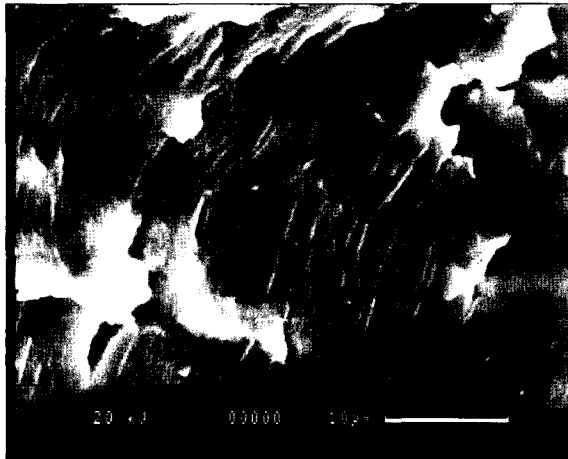


(c) Indentation Force of 10.8kN

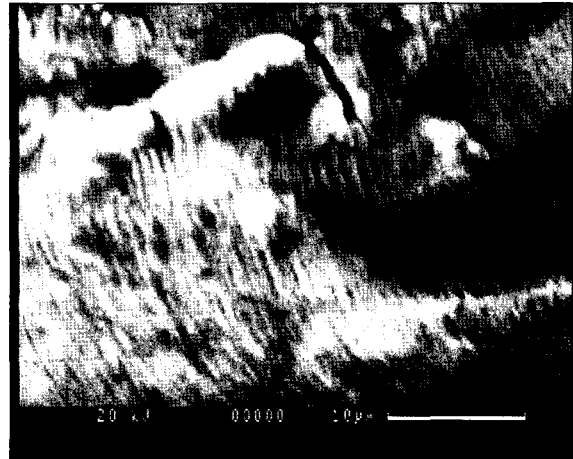
[그림 4] Failure Cycles with Increasing Indentation Forces

다. Shear Lip의 발생은 균열회전과 관계가 있는데, 균열회전은 일반적으로 균열선단의 응력상태가 3축상태에서 평면응력상태로 이동(Shift)될 때 소성영역(Plastic Zone)의 증가로 발생될 수 있다. 따라서, 압입된 시편의 파단면 관찰에서 압입부분에 나타난 Shear Lip은 압입시 균열성장을 지연시키는 효과와 밀접한 관계가 있는 것으로 볼 수 있다.

피로시험시편의 파단면에 대한 미세조직 관찰은 압입시 조직의 재결정 상태를 관찰하기 위해 반드시 필요한 것이며, 이를 관찰하기 위해서 파단면을 광택(Polishing)내어 에칭하였다. 파단면의 미세조직 관찰 결과 압입력의 크기 변화에 따라 결정립의 크기가 변화되었음이 관찰되었다. 그림 4의 (a)~(c)에서와 같이 예비압입된 시편의 미세조직으로부터 관찰된 결정



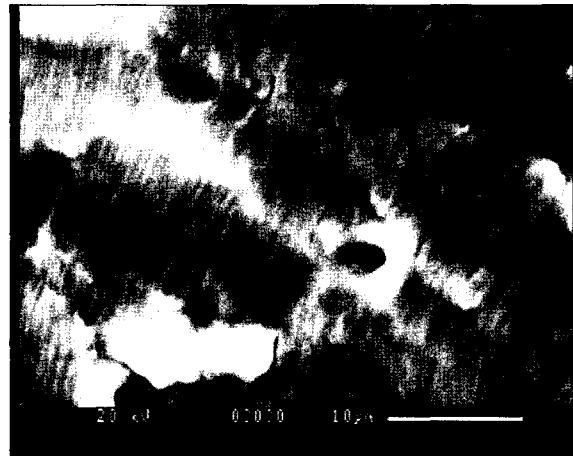
(a) Baseline Specimen



(b) 4.9kN



(c) 6.9kN



(d) 8.8kN

[그림 5] Fatigue Striations in the Baseline and Indented Specimens($\times 2,900$)

크기가 작아지지만 압입력 10.8kN을 가한 시편은 결립의 크기는 압입을 가하지 않은 시편에 비해 작은 것으로 관찰되었으며, 압입력이 커짐에 따라 결정립의 정립의 크기가 8.8kN의 압입력을 가한 시편보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 재료의 국부적인 파괴에 의한 것으로 생각되며, 이러한 결정립의 파괴는 그림 3의 결과에서처럼 10.8kN을 가한 시편에서의 파단사이클이 8.8kN의 압입력을 가한 시편의 파단사이클보다 감소하는 원인으로 작용한 것으로 보인다.

압입력에 따른 파단면의 파괴거동을 관찰하기 위해 Cambridge Scanning Electron Microscope가 사용되었으며, 압입을 가하지 않은 파단면과 압입된 시편들에 대한 미세파단 거동을 비교 평가하기 위해 파단면을 분석하였다. 그림 5는 압입력이 균열성장지연에 미치는 영향을 평가하기 위해 압입부 주변의 피로균열이 진전된 부위에 대한 미세파단 거동을 관찰한 것으로, 압입된 시편 파단면에서 관찰된 피로줄무늬(그림 5(b)~(d))가 압입하지 않은 시편의 파단면(그림 5(a))과 비교해볼 때 조밀하게 형성되어 있으며, 압입력이 상대적으로 큰 시편에서 관찰된 피로 줄무늬 간격은 조밀하였다. 이는 미세조직을 관찰하면서 언급한 바와 같이 결정립이 압축되면서 균열성장을 지연시킨 것으로 판단된다.

위의 결과를 종합해 보면 예비압입된 시편 파단면으로부터 압입부에서 관찰된 Shear Lip은 압입시 균열성장을 지연시키는 효과와 밀접한 관계가 있으며, 미세조직 관찰을 통하여 일반적으로 압입양이 커질수록 결정립의 크기가 상대적으로 작게 나타난 것으로 미루어 볼 때 압입시 발생하는 결정립의 축소가 소성 변형을 야기시켜 균열성장을 지연시키는 역할을 하는 것으로 판단되며, 이러한 예비압입의 효과는 파단면에 서관찰된 피로줄무늬 간격의 비교를 통해 입증되었다.

4. 맺음말

본 연구에서는 실제 구조물에 적용할 수 있는 균열 성장 지연방법으로서, 예비압입에 의한 균열성장지연 효과 및 시편의 피로 파단면에 대한 금속조직학적인 관찰을 통하여 예비압입과 균열성장거동과의 관련성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 예비압입은 균열성장을 지연시키기 위한 효과적인 방법이며, 압입력의 크기를 적절하게 선택함으로써 균열성장지연 효과를 최적화할 수 있다.

둘째, 압입력이 증가하면 금속의 결정립의 크기가 작아져 소성영역을 형성하게 되므로 균열성장지연 효과가 커지지만 압입력의 크기는 일정한 수준에서 제한적이며, 압입의 효과가 지속적으로 증가하지 않음을 확인하였다.

예비압입은 압입과 다르게 구조물의 제작시부터 적용할 수 있다는 장점이 있지만 균열의 성장이 압입위치를 지나야만 최상의 효과를 거둘 수 있다는 한계점을 가지고 있다. 그러므로 피로수명 증가를 완전하게 보장하기 위해서는 균열성장경로를 미리 예측하여 압입부가 균열을 포위할 수 있도록 해주어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. S. Dawicke, "Overload and Underload Effects on the Fatigue Crack Growth Behavior of the 2024-T3 Aluminum Alloy", NASA Contractor Report 201668, March 1997.
- [2] H. P. Van Leenwen *et al.*, "The Repair of Fatigue Cracks in Low-Alloy Steel Sheet",

- National Aerospace Institute, Amsterdam, Rept. TR 70029, 1970.
- [3] Sam-Hong Song and Jin-Ho Choi, "Fatigue Crack Retardation by Indentation", *Proceedings of Asian Pacific Conference for Fracture and Strength '96*, 1996, pp. 57~61.
- [4] Naoto Yoshioka and Masato Yoshioka, "Dynamic Observation of Indentation Process", *Geo-physical Research Letters*, Vol. 22, Jan. 1995, pp. 113~116.
- [5] ASME E647-93, "Standard Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", American Society of Testing and Materials, 1993, Philadelphia.