

Al-Alloy 7075-T651의 부식피로균열성장 거동에 관한 연구(II) -주기 하중 파형의 영향-

김봉철, 강봉수, 한지원*, 우홍식**
동국대 대학원, 호서대 기계공학과*, 동국대 안전공학과**

1. 서론

고강도 알루미늄 합금은 기술의 진보에 따라서 이용도가 높은 매우 중요한 재료로서, 잘 알려진 적용분야로서는 항공우주산업, 고속회전체, 항공기용재 등으로 많이 사용되고 있다. 고강도 알루미늄 합금은 Al-Cu-Mg(2000 series)를 기초로 둔것과 Al-Zn-Mg-Cu(7000 series)를 기초로 둔 것등이 있다.

이러한 합금들은 S.C.C.와 박리, 그리고 pitting의 영향을 받기가 쉬우므로, 이에 대한 보완책으로 일반적인 부식에 대한 환경적인 저항이 요구되는데, 응력부식과 부식피로 그리고 종종 파괴적인 참사를 초래하는 환경하에서 균열성장속도를 향상시키는 환경적인 영향을 억제하여야 한다¹⁾. 한편, 정하중과 저주기 피로 조건하에서의 균열성장속도에 대한 환경의 영향은 오랫동안 중요한 문제로 인식되어 왔다²⁾. Al-합금 7075-T6는 Cl⁻을 함유한 수용액환경에서는 피로에 대한 저항성이 현저히 감소하며 부식환경에서의 피로 거동은 대기환경에서의 피로거동과는 현저히 차이가 있음이 보고되고 있다.

지금까지의 부식피로에 관한 연구로서는 거시적으로 환경의 종류, 하중반복속도, 하중비의 영향 등이 연구되어 오고 있으나 주기하중파형의 변화가 피로균열성장 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 이에, 본 연구에서는 열처리의 특성상 부식환경에 매우 민감한 Al-Zn-Mg-Cu 합금 7075에 대하여 peak aged T651 tempering을 실시 한 Al-합금 7075-T651에 대하여 주기하중파형의 변화가 대기, 물, 해수에서의 부식피로균열성장거동에 미치는 영향을 비교, 고찰하여 구조물의 수명예측 및 안전성 평가에 기여할 수 있는 자료가 될 것으로 본다.

2. 실험

2.1 시험편 및 측정장치

본 실험에 사용된 시험편의 재료 및 측정장치는 김³⁾등의 이전의 연구와 동일하다.

2.2 피로시험

피로시험은 하중비($R=P_{min}/P_{max}$)는 0.3, 하중반복속도는 0.2Hz로 대기, 물, 해수 환경에서 각각 동일한 조건으로 주기하중반복파형(cyclic load wave-form)을 사

다리꼴과 삼각파형으로 하여 실시하였다. Fatigue pre-crack은 기계가공 notch로부터 2mm를 넣었으며 또한, 균열이 성장함에 따라 ΔK 가 증가하도록 ΔP -일정 피로시험을 실시하였다. 그리고, da/dN 관계는 secant법으로 ΔK 값은 ASTM E 647-95에 제시된 J.E. Srawley의 CT시험에 대한 계산식을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주기하중파형의 변화가 피로균열성장거동에 미치는 영향

불활성 환경(예 : 대기, argon 등)에서의 주기하중파형의 변화는 피로균열성장거동에 영향을 거의 주지 않으나, 부식환경에서의 피로균열성장거동은 주기하중파형에 상당히 큰 영향을 받는다고 알려지고 있다⁴⁾.

Barsom⁵⁾은 12Ni-5Cr-3Mo강에 대하여 대기 환경에서는 파형의 변화가 피로균열성장거동에 영향을 주지 않는다고 하였으며, 이는 본 연구 결과와도 일치한다.

Barsom은 부식환경에서는 정현파형, 삼각파형, 양의 톱니파형(M)은 대기에서의 데이터와 비교하여 3배정도 부식피로균열성장 속도가 빠르게 나타났으나, 사각파형 및 음의 톱니파형(N)은 대기중의 피로균열성장거동과 비슷하게 나타났으며, 이의 주된 원인으로서는 하중상승시간의 영향이라 하였다.

그러나, 鯉洋⁶⁾등은 0.3% 탄소강의 평활재에 대한 S-N실험에서 동일한 응력의 진폭을 가하였을 때 삼각파, 정현파, 사각파형의 순서로 파단시간이 길게 나타난다고 하였다.

그러나, 본 연구에서의 사다리꼴 파형과 삼각파형을 비교하면, 사다리꼴 파형이 삼각파형에 비교하여 하중 상승시간이 짧으나, 최대하중지연시간이 복합되어서 사다리꼴 파형이 삼각파형보다 피로균열성장 속도가 빠르게 나타난 것으로 추정된다.

3.2 각 환경에서의 II영역 특성의 연구

Fig. 1은 사다리꼴파형에 대한 $da/dN - \Delta K$ 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 균열의 안정성장구간인 II영역에서는 $da/dN = C\Delta K^m$ 관계가 잘 나타내고 있다. 이때 물, 해수환경의 m값은 각각 3.7, 3.5 그리고, 대기환경에서는 3.5로 비슷하게 계산되었다. 그러나, II영역의 전 구간에 걸쳐서 해수, 물, 대기 순으로 피로균열성장속도가 일정하게 빠르게 나타났으며, 안정성장구간의 중간부분인 $\Delta K = 25\text{MPa}\sqrt{m}$ 부근에서 해수, 물 환경에서의 피로균열성장속도는 대기환경에 비교하여 약 2.7, 1.7배로 나타났다.

Fig. 2는 삼각파형에 대한 $da/dN - \Delta K$ 관계를 나타낸 것이다. ΔK 가 $25\text{MPa}\sqrt{m}$ 이하에서는 사다리꼴파형과 같은 양상을 보여주나, 국부적으로 ΔK 가 $30\text{MPa}\sqrt{m}$ 이상에서는 대기환경에서의 피로균열성장속도가 급격한 증가상태를 나타내고 있다. 이는, 균열의 초기진전단계에서는 부식환경의 영향에 의해 물, 해수

환경의 피로균열성장속도가 빠르나, 고 ΔK 영역에서는 주기하중파형의 영향인지는 추후에 연구를 더 진행하여야 할 필요성이 있다.

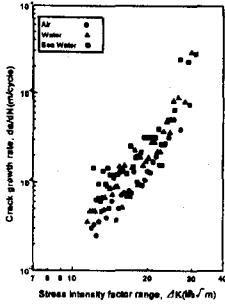


Fig. 1 da/dN - ΔK relations in trapezoid wave-form

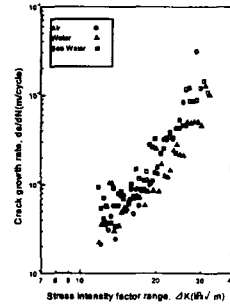


Fig. 2 da/dN - ΔK relations in triangular wave-form

3.3 파면형상의 해석

SEM 사진에 의한 파면형상의 분석은 파괴의 미세구조의 통찰을 제공해주며 부식피로의 과정에서 부식파면과 부식환경이 결합하는 동안 환경의 영향이 표면 특성에 미치는 영향을 규명해 준다. 고강도 Al-합금 7075-T651은 사다리꼴 파형과 삼각파형의 각 환경에서의 파괴는 상이한 파단표면 특징을 나타낸다.

Fig. 3은 전자식 주사현미경에 의한 사다리꼴 파형과 삼각파형의 각 환경에서의 피로파면의 형상을 나타낸 것이다. 대기환경에서의 저 ΔK 영역(사다리꼴 파형)은 균열성장방향으로 늘어난 포물선 형상의 신장딴이를 나타내며(Fig. 3(a)), 균열의 안정성장영역인 고 ΔK 영역에서는 파단표면이 변하고 있다. 가장 뚜렷한 특징으로서 균열성장방향에 수직인 전형적인 줄무늬 형상을 관찰할 수 있으며 dimple이 부분적으로 덮혀있고 dimple의 평균지름은 대략 $5\mu m$ 이며, 줄무늬의 간격은 한 Cycle당 대략 $0.5\mu m$ 로 나타났다(Fig. 3(b)).

대기환경에서의 저 ΔK 영역(삼각파형)은 가로와 세로의 길이가 거의 같은 등축 dimple의 형상을 나타내고 있으며(Fig. 3(c)), 고 ΔK 영역에서도 줄무늬 형상을 관찰할 수 있으며, dimple의 평균지름은 대략 $5\mu m$ 이며 줄무늬의 간격은 한 cycle당 대략 $0.8\mu m$ 이므로 대기환경에서의 삼각파형과 사다리꼴 파형의 그래프를 비교해 보면 균열의 안정성장영역인 $\Delta K = 25MPa\sqrt{m}$ 인 지점에서의 피로균열성장거동은 크게 영향을 받지 않고 있다(Fig. 3(d)).

물환경에서의 저 ΔK 영역(사다리꼴파형)은 얇은 dimple로 덮여있는 것을 볼 수 있으며 dimple의 지름은 $4\mu m$ 이하이고, dimple 안쪽에 미소입자가 발견되었다(Fig. 3(e)). 고 ΔK 영역(사다리꼴파형)은 균열진전방향으로 대부분의 줄무늬가 파단표면에 퍼져있으며, 줄무늬의 간격은 대략 $1.4\mu m$ 이며 또한, 산화피막이 형성되어있으며 딩플과 등근입자로 구성된 밝은 영역은 하중이 걸리지 않은 상태하에서의 부식-피로 과정의 파단표면의 부식으로부터 생성된 것이라고 생각되어지며, 입내

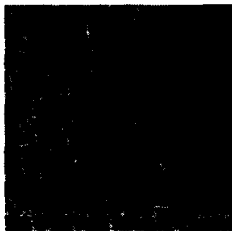
파면의 형상을 관찰할 수 있다(Fig. 3(f)).

물환경에서의 저 ΔK 영역(삼각파형)에서도 dimple로 덮여있는 것을 관찰할 수 있으며 산화피막이 형성되어 있다(Fig. 3(g)). 고 ΔK 영역(삼각파형)은 주로 입계 파면의 형상을 보여주지만 입내파면의 형상도 관찰할 수가 있었으며 균열의 안정성장영역에서의 줄무늬의 간격은 대략 $1\mu\text{m}$ 이다. 이로써 물환경에서의 삼각파형과 사다리꼴파형의 파면을 비교해보면 균열의 안정성장영역에서의 한 cycle당 줄무늬 간격이 사다리꼴 파형이 더 넓음으로서 부식피로균열성장속도도 빠르게 나타남을 알 수 있다(Fig. 3(h)).

해수환경에서의 저 ΔK 영역(사다리꼴파형)은 벽개파괴 즉, 결정학적인 면을 따라 일어나는 입내파괴 형상을 보여주고 있으며, 리버페턴(river pattern)과 유사한 물결모양의 fun shaped pattern을 보여주는데, 이 모양의 형성은 리버페턴과는 다르며 특정 결정면을 따라 부식용해가 행해졌을 때 형성되는 파면이다. 그리고, 부식pit의 형상 및 파면상에는 재결정된 소금결정체가 관찰되었으며(Fig. 3(i)), 고 ΔK 영역(사다리꼴파형)인 안정성장영역에서는 심한 산화피막의 형성에 의해 파면의 모습을 관찰할 수가 없었다(Fig. 3(j)).

해수환경에서의 저 ΔK 영역(삼각파형)은 입내균열과 유사한 양상을 보여주나 이것은 입내균열과 더불어 파면상에 만들어진 mud-crack-pattern이라하는 산화피막이 부서진 것으로 추정된다. 그리고, 사다리꼴파형의 파면에서와 같이 부식pit의 형상과 파면상에는 재결정된 소금결정체가 관찰되었다(Fig. 3(k)).

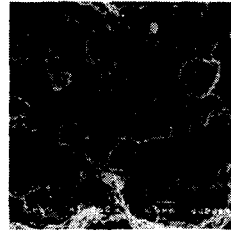
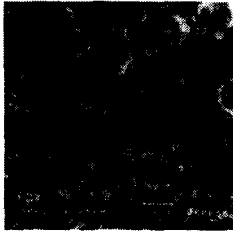
고 ΔK 영역(삼각파형)에서는 입내파괴의 형상과 부식pit 및 재결정된 소금결정체가 관찰되었다(Fig. 3(l)).



(a) $\Delta K \approx 15\text{MPa}\sqrt{m}$, Air(Trapezoid) (b) $\Delta K \approx 25\text{MPa}\sqrt{m}$, Air(Trapezoid)

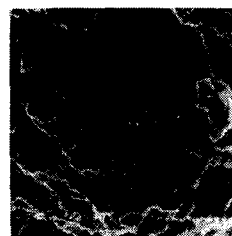


(c) $\Delta K \approx 15\text{MPa}\sqrt{m}$, Air(Triangle) (d) $\Delta K \approx 25\text{MPa}\sqrt{m}$, Air(Triangle)



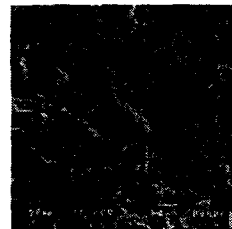
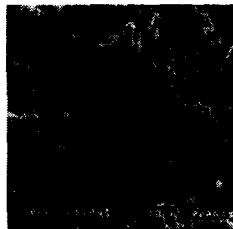
(e) $\Delta K \cong 15\text{MPa}\sqrt{m}$, Water(Trapezoid)

(f) $\Delta K \cong 25\text{MPa}\sqrt{m}$, Water(Trapezoid)



(g) $\Delta K \cong 15\text{MPa}\sqrt{m}$, Water(Triangle)

(h) $\Delta K \cong 25\text{MPa}\sqrt{m}$, Water(Triangle)



(i) $\Delta K \cong 15\text{MPa}\sqrt{m}$, Sea water
(Trapezoid)

(j) $\Delta K \cong 25\text{MPa}\sqrt{m}$, Sea water
(Trapezoid)



(k) $\Delta K \cong 15\text{MPa}\sqrt{m}$, Sea Water
(Triangle)

(l) $\Delta K \cong 25\text{MPa}\sqrt{m}$, Sea Water
(Triangle)

Fig. 3 Fractographical morphology in Air, Water and Sea water

4. 결 론

본 연구에서는 부식환경하에서의 주기하중파형의 변화가 피로균열성장거동에 미치는 영향에 관한 것으로서, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 주기하중의 형태가 사다리꼴과 삼각파형일 경우에는 거시적으로 피로균열성장 거동에 미치는 영향은 일치한다고 고찰되나, 하중상승시간과 최대하중지연시간이 부식피로균열성장거동에 미치는 영향은 앞으로의 연구과제라 하겠다.
2. 각 환경에서의 부식피로균열성장거동은 주기하중파형에 상관없이 해수, 물 그리고 대기환경 순으로 피로균열성장속도가 빠르게 나타났으나, 이 때의 m 값은 3.3~4.0으로 비슷하게 나타났으며, 단지 C의 값만이 크게 차이가 났다. 따라서, 각 환경에 대한 C와 m 값의 관계를 하나의 식으로 나타낼 수 있다면 더욱 더 폭넓게 A1-합금 7075-T651에 대한 안전수명 및 안전성 평가를 하는 데 도움이 되리라 생각된다.
3. 각 환경에서의 주기하중파형의 변화에 따른 피로파면의 형상은 대기환경에서는 dimple과 전형적인 줄무늬 형상이 관찰되었고, 물환경에서는 산화피막의 형성과 입계파면의 형상을 보여주지만 입내파면의 형상도 관찰할 수가 있었으며, 삼각파형과 사다리꼴파형의 파면을 비교해 보면 균열의 안정성장 영역에서는 한 cycle당 줄무늬 간격이 사다리꼴파형이 더 넓음으로서 부식 피로균열성장속도도 빠르게 나타났다. 해수환경에서는 벽개파면의 형상을 보여주며 부식pit의 형상과 파면상에는 재결정된 소금결정체가 관찰되었다.

5. 참고문헌

- 1] Staley, J. T., in *Aluminum Alloys Contemporary Research and Applications*, ed. A. K. Vasudevan and R. D. Doberty, Academic Press, London, p.3, 1989
- 2] Rajan. K., Wallace, W. and Beddoes, J. C., *J. Mater. Sci.*, Vol.17, p.2817, 1982 *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.54, No.6, pp.879~889, 1996
- 3] 김봉철, 우홍식, "고강도 알루미늄 합금의 부식피로균열 성장 거동에 관한 연구 (I)", 동국논집, 제 16집, 2호, pp. 175~187, 1997
- 4] P. S. Pao, "Mechanisms of Corrosion Fatigue", *ASM Handbook*, Vol.19, Fatigue and Fracture, pp. 185-192, 1996
- 5] S. T. Rolfe and J. M. Barsom, "Fracture and Fatigue Control in Structures", Prentice-Hall, pp.317-342, 1977
- 6] 鯉淵興二, 山根雅己, "非正弦波 による波れ強 ちとそのシオロツ的解析", 機械學會論文集, 34~258, p.261, 昭432