

굽힘하중을 받는 외팔보의 변동하중에 대한 균열진전 거동 Crack Propagation Behavior for Variable Load in Cantilever Beam under Bending Load

김엽래(경민대), 유현일(국민대), 이종선(대진대), 김세환(천안공전)

Kim, Yeob Rae · Yoo, Heonil · Lee, Jong Sun · Kim, Sei Hwan

ABSTRACT

This paper examines the crack growth behavior of 7075-T651 and 5052-H32 aluminum alloys for variable load within tensile load range condition.

The cantilever beam type specimen with a chevron notch is used in this study. The crack growth and closure are investigated by compliance method. The applied initial stress ratio is $R=0.3$ and variable load are $R=0.65, 0.46$

Crack length, stress intensity factor range, ratio of effective stress intensity factor range and crack growth rate etc. are inspected with fracture mechanics estimate.

제1장 서론

실제로 구조물이나 부재에 작용되는 하중은 최대하중과 최소하중의 평균값과 진폭이 불규칙하게 변하는 변동하중이며, 부재의 강도설계에서 변동하중하의 피로균열 진전거동에 대하여 자세한 검토가 요구된다.

기거나 구조물에 대한 설계는 사용기간 동안 사용하중 범위내에서 예상되는 균열의 크기가 기준이상이 되지 않도록 설계하는 안전수명설계(safe life design), 작용하중에 기거나 구조물이 손상되더라도 손상이 연결되지 않는 파손안전설계(fail safe design), 사용이나 운전중에 피로 또는 부식에 의한 손상이 발생되더라도 운전중에 일어날 수 있는 결함을 허용하는 손상허용설계

(damage tolerance design) 개념으로 발전하여 왔다.¹⁾ 설계대상물이 실제 받고 있는 하중에 대한 피로균열 진전평가는 균열의 존재로 말미암아 재료의 항복강도 이하에서도 피로에 의하여 파괴되는 경우가 대단히 많으므로 피로균열 진전거동의 파악이 매우 중요한 과제로 인식되고 있다.

정량적으로 취급한 취성파괴 문제가 20세기 초 Griffith이론에 의하여 정립되어 졌으며, 1940년대에 Irwin²⁾은 연성재료까지 파괴이론을 확대 적용하였다. 1960년대 초 Paris와 Erdogan³⁾은 피로균열 성장을 선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics, LEFM)에 의한 응력확대계수폭(ΔK)과 균열진전속도(da/dN)로서 $da/dN = C\Delta K^m$ 의 관계를 정립하였다. Forman⁴⁾ 등에 의하여 그 유용성을 검증한 결과 일반적으로 응력확대계수로 피로균열 진전거동을 해석하므로써 그 타당성이 입증되었다.

균열단합현상을 관찰하는 방법으로 여러 가지가 제안되고 있으나, 감산변위(differential displacement)를 사용한 제하탄성컴플라이언스(unloading elastic compliance)법⁵⁾을 이용한 방법으로 균열면적의 변화를 검출하여 균열길이를 평가할 수 있기 때문에 평균적인 균열길이를 측정할 수 있으며, 균열단합거동도 평가할 수 있다. 또한 균열길이와 균열단합점을 실험도중 중단함이 없이 연속적으로 측정할 수 있다.

제2장 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 실험에 사용한 재료는 항공기 및 압력용

기에 많이 쓰이는 고강도 7075-T651, 5052-H32 알루미늄 합금이다. 두재료의 화학적 성분은 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Chemical compositions of 7075-T651 and 5052-H32 aluminum alloys(%wt.)

Materials	Zn	Cu	Mg	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	other	
									each	total
7075-T651	5.6	1.6	2.5	0.3	0.3	0.5	0.4	0.2	0.05	0.15
5052-H32	0.1	0.1	2.5	0.3	0.1	0.4	0.2	-	0.05	0.15

시험편의 형상은 관통균열 부위에 폭 10mm, 두께 4mm의 평면굽힘 외팔보 형식의 굽힘 시험편이며, 웨브론노치(chevron notch)는 관통균열의 표면 0.6mm에서 균열길이에 대해 최대한의 균열 진전 거동을 관찰하기 위하여 120°로 제작하였다. 이때 웨브론노치의 높이는 0.9mm로 하여 웨브론노치가 끝나는 지점을 예비균열(pre-crack)으로 설정하고 데이터의 산정은 예비균열 이후의 균열 진전에 대하여 검토하였다.

시험편은 균열진전 방향으로 시험편 두께의 20%인 r=0.4mm의 반원형 측면홈(side groove)을 가공하여 균열진전이 되면 평면변형을 상태에서 균열성장이 발생되도록 하였다.

2.2 시험장치

시험기의 외형은 Fig. 1에 나타난 것으로 자장발생부와 구동코일은 음향스피커에 사용되고 있는 부품을 이용하였으며, 자장은 영구자석에 의하여 발생된다. 구동코일에 감겨져 있는 피로 시험기의 가동 원통은 하중봉과 연결하여 하중을 전달하고 하중봉은 횡방향으로 편심되지 않도록 슬라이드 볼 베어링에 의하여 안내된다. 시험편은 판 스프링에 연결하여 처짐에 의한 변위를 판 스프링의 굽힘운동으로 흡수하도록 되었다.

시험편의 고정 부위는 하중검출용 로드셀(load cell)에 연결하고 로드셀의 고정블럭은 상·하 두개의 블럭으로 구성하여 시험편 길이, 높이의 변경이 가급적 용이하도록 하였다.

전동용 구동코일의 직경, 앰프 등을 고려하

여 최대 가진력을 100N으로 설정하고 20Hz의 정현파형으로 데이터의 수집속도는 200점/cycle로 하였다.

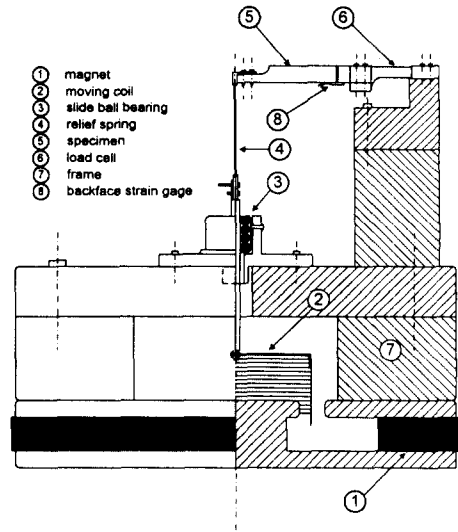


Fig. 1 Electro-dynamic type bending fatigue test machine

2.3 하중모델

하중모델은 시험기의 데이터 수집부에서 얻어진 응력비의 최대·최소전압(V_{max} , V_{min})을 선형회귀식에 적용하여 최대·최소하중(P_{max} , P_{min})으로 설정하고, 그에 따른 하중진폭($\Delta P = P_{max} - P_{min}$)을 산출하여 Table 2에 나타내었다.

본 연구에 사용한 하중모델의 설정은 초기 하중진폭($\Delta P = 57.92N$)과 초기 응력비($R = 0.3$)가 일정한 인장하중 범위내에서 작은 인장 고·저블럭의 하중진폭($\Delta P = 28.96N$)으로 변화되었을 때 하중모델이 균열성장에 미치는 영향을 검토한다.

Table 2 Variable load within tensile load range for stress ratio

R	$P_{max}(N)$	$P_{min}(N)$	$\Delta P(N)$	V_{max}	V_{min}
R=0.3	82.58	24.66	57.92	4.0	1.2
R=0.65	82.58	53.62	28.96	4.0	2.6
R=0.46	53.62	24.66	28.96	2.6	1.2
R=0.3	82.58	24.66	57.92	4.0	1.2

2.4 실험방법

외팔보 형식의 시험편 끝단에서 하중을 가했을 때 굽힘모우멘트 변화가 가장 유사한 순수굽힘(pure bending)에 대하여 CB시험편⁶⁾을 표준식으로 다음과 같이 응력확대계수를 산출하였다.

$$K = \frac{6M}{B_o W^2} F(g) \sqrt{\pi a_i}$$

$$F(g) = \left\{ 1.99 - 2.47 \left(\frac{a_i}{W} \right) + 12.97 \left(\frac{a_i}{W} \right)^2 - 23.17 \left(\frac{a_i}{W} \right)^3 + 24.80 \left(\frac{a_i}{W} \right)^4 \right\}$$

여기서 M 은 시험편의 자유단에서 부하 되는 하중과 초기 균열까지 거리에 대한 굽힘모우멘트를 나타내고 있으며, Fig. 2와 같이 B_o 는 시험편 두께, W 는 시험편 폭, a_i 는 균열길이이다.

Fig. 3(a)는 하중-감산변위선도를 나타내고 있으며, 감산변위를 사용하여 제하탄성컴플라이언스법을 실험에 적용한 하중과 균열길이, 균열열림점을 측정한다.

Y' 점이 균열열림점의 하중이 되며, (b)의 P_{op} 로 결정하여 균열열림점의 응력확대계수(K_{op}) 측정할 수 있다.

선형과피역학에서 균열진전은 ΔK_{eff} 에 의해 이루어지며, 이는 K_{max} 와 K_{op} 의 차에 의해 $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ 로 표현된다. 하중-변위력곡선(load-displacement hysteresis loop)으로 부터 측정된 ΔK_{eff} 와 유효응력확대계수폭비(U)는 $\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K$ 로서

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}}$$

여기서,

$$K_{op} = K_{min} \quad R \geq 0$$

$$K_{op} = 0 \quad R < 0$$

으로 하면,

$$U = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = 1 \quad R \geq 0$$

$$U = \frac{K_{max}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{1}{1 - R} \quad R < 0$$

가 된다.

균열단합현상에 대한 균열진전속도는 Paris의 식³⁾에서 U 와 ΔK_{eff} , ΔK 의 관계에서 다음과 같이 나타내어진다.

$$da/dN = C'(\Delta K_{eff})^m = C'(U \cdot \Delta K)^m$$

피로수명을 예측하는데 있어서 균열진전속도가 응력비, 미시조직의 영향을 많이 받는 경우에 대하여 균열단합을 고려한 ΔK_{eff} 으로 표현하면 보다 정확한 피로수명을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 고강도 알루미늄 합금 재료로서 외팔보 형식의 시험편을 사용하여 시험편 끝단에서 일정한 하중진폭으로 균열을 발생시킨 후 다단계로 하중진폭을 변화하였다. 변동하중의 하중패턴은 블럭하중을 선택하고 하중조건은 인장·압축 등 다양하게 변화시켜 응력비별로 변동하중에서의 균열진전거동, 균열단합이 균열성장에 미치는 영향, 균열길이에 의한 균열진전수명을 고찰한다.

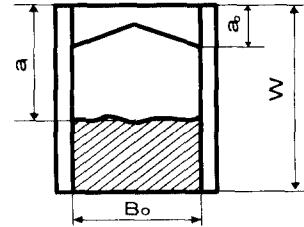


Fig. 2 Fracture surface of chevron notch

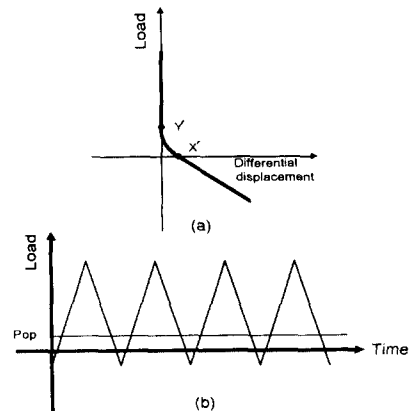


Fig. 3 Load-displacement behavior
(a) Load vs. differential displacement curve
(b) Sine curve

제3장 실험결과 및 고찰

3.1 균열진전거동

균열진전은 일정한 하중진폭에서 응력비가 증가하면 진전속도가 증가한다. 응력비의 영향은 $R > 0$ 에서 대체로 진전속도가 낮은 영역은 응력비의 영향은 크게 나타나고, $R < 0$ 인 경우에는 진전속도의 전영역에서 응력비의 영향이 비교적 크게 나타난다. Hubbard⁷⁾의 압축하중하의 균열진전 연구에서도 볼 수 있듯이 압축하중 부분도 균열진전에 상당히 기여한다는 것을 의미한다. 따라서 압축하중이 큰 경우에는 위험이 예상된다.

본 연구에서 피로균열진전 실험을 수행한 후 Photo.와 같이 균열과단면을 검토하여 균열면이 직선이 되는지를 관찰하였다. 시험편의 초기균열 길이를 시점으로 균열선단은 시험편 두께를 통하여 거의 직선이 되고 있어 균열은 선단에서 균일하게 진전한다는 가정 하에 균열진전거동을 검토하였다.



Photo. Photograph of fracture surface

전체응력비에 대한 da/dN 와 ΔK 의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 전체적으로 5052-H32 보다 강도가 큰 7075-T651 합금이 동일한 ΔK 레벨에서 균열발생 후 파단까지 빠른 진전을 형성하고 있는데 강도가 클수록 균열진전은 빠르다.

변동하중내 하중인 최대·최소하중이 고블력($R=0.65$)에서 균열진전속도 $da/dN=2.2 \times 10^6$ mm/cycle, 저블력($R=0.46$)에서 균열진전속도

$da/dN=3.8 \times 10^7$ mm/cycle 범위로서, 변동하중내 고·저블력 응력비에 따라 균열진전속도비 $(da/dN_{R=0.65})/(da/dN_{R=0.46})$ 가 5.79배 차이를 보이고 있다. 하중진폭이 같은 조건에서 응력비는 균열진전에 상당히 큰 영향을 주고 있다.

5052-H32에서도 하중진폭과 응력비를 7075-T651과 같게 설정하여 균열진전을 검토하였다. 변동하중 부분인 고블력($R=0.65$)의 균열진전은 $da/dN=3.0 \times 10^7$ mm/cycle, 저블력($R=0.46$)에서는 $da/dN=1.8 \times 10^7$ mm/cycle의 진전속도를 나타내고 있다. 변동하중내 고·저블력 응력비에 따라 균열진전속도비 $(da/dN_{R=0.65})/(da/dN_{R=0.46})$ 가 1.67배로 7075-T651보다는 균열진전의 차이가 크게 나타나지 않았다.

두 재료에서 균열진전은 동일한 ΔK 레벨의 응력비로 볼 때 $(da/dN_{7075,R=0.65})/(da/dN_{5052,R=0.65})=7.33$, $(da/dN_{7075,R=0.46})/(da/dN_{5052,R=0.46})=2.11$ 배이다. 7075-T651이 $R=0.65$ 에서 5052-H32 보다 7배 이상, $R=0.46$ 에서는 2배이상의 빠른 균열진전을 보이고 있어 고응력비 일수록 균열진전의 차이가 매우 크게 형성되고 있음을 알 수 있다. 같은 응력비와 하중진폭에서 재료의 특성에 따라 균열진전속도의 변화가 매우 심하다는 것이 본 실험에서 나타나고 있다.

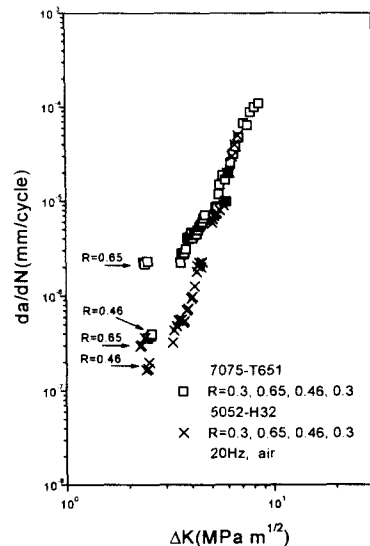


Fig. 4 Comparison between da/dN vs. ΔK

3.2 균열진전 평가

Fig. 5는 변동하중의 하중진폭 변화에 대하여 ΔK 의 변화를 나타낸 것으로서 균열이 진전됨에 따라 균열단면적의 감소로 ΔK 의 범위는 증가되고 있다.

인장하중 범위내 고·저블럭 변동하중으로 응력비 $R=0.3$ 인 초기균열과 변동하중후의 균열진전에서 ΔK 는 일정하게 증가를 보이고 있으며, $R=0.65, 0.46$ 은 변동하중 상태의 응력비로서 $\Delta K=2.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 범위에서 변동하중을 나타내고 있다. 변동하중시 ΔK 의 편차는 $2.26\sim 2.67 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 정도의 차이를 보이고 있으며, 두재료에서 응력비와 하중이 같으므로 ΔK 의 증가도 같다.

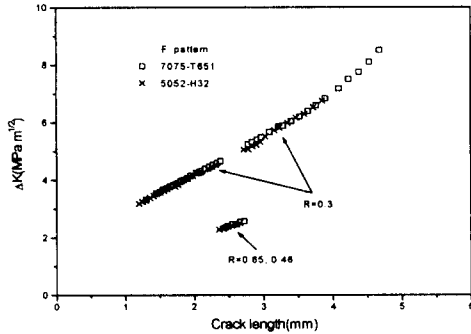


Fig. 5 Relation between stress intensity factor range(ΔK) and crack length(a_i)

Fig. 6은 인장하중 범위내 변동하중으로 7075-T651 재료는 변동하중이 작용하더라도 $\Delta K = \Delta K_{eff}$ 로서 $U_{R=0.3} = U_{R=0.65} = U_{R=0.46} = U_{R=0.3} = 1$ 의 균열단침이 없이 U 는 최대치를 나타내고 있다. 5052-H32 재료는 하중진폭이 적어지면서 균열이 진전될수록 U 가 변화되어 응력비를 $R=0.46$ 으로 낮추었을 때 $\Delta K > \Delta K_{eff}$ 로 단침현상이 발생되어 균열이 진전되며, $U_{R=0.3} = U_{R=0.65} = 1$, $U_{R=0.46} \approx 0.85$, $U_{R=0.3} \approx 0.95$ 로서 응력비가 변화되는 부분에서부터 균열이 진전될수록 U 값은 응력비에 의존하고 있다.

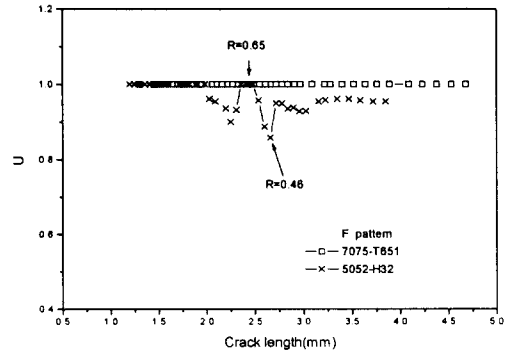


Fig. 6 Relation between effective stress intensity factor range ratio(U) and crack length(a_i)

Fig. 7은 일정한 하중진폭에서 단계적으로 하중진폭을 변화할 때 피로수명 지연이 어느 정도 효과가 있는가에 대하여 검토하였다. 7075-T651는 $R=0.3$ 인 예비균열 후 $a_i=2.3\text{mm}$ 까지 $N=2.88 \times 10^5$, $R=0.65$ 인 $a_i=2.3\sim 2.5\text{mm}$ 는 $N=7.56 \times 10^4$, $R=0.46$ 인 $a_i=2.5\sim 2.7\text{mm}$ 까지는 $N=4.62 \times 10^5$ 의 피로수명을 보였고, 5052-H32에서는 $a_i=2.3\text{mm}$ 까지 $N=1.43 \times 10^6$, $R=0.65$ 인 $a_i=2.3\sim 2.5\text{mm}$ 는 $N=5.4 \times 10^5$, $R=0.46$ 인 $a_i=2.5\sim 2.7\text{mm}$ 까지는 $N=9.99 \times 10^5$ 의 피로수명을 나타냈다. $a_i=2.3\sim 2.7\text{mm}$ ($R=0.65 \rightarrow 0.46$)까지 응력비 변화로 인한 균열지연 효과는 7075-T651에서 약 $N=5.376 \times 10^5$, 5052-H32에서는 $N=1.539 \times 10^6$ 의 피로수명을 지연시킬 수 있으며, 두재료의 지연효과는 5052-H32 재료가 2.86배 정도 크게 나타났다.

예비균열 이후의 각 응력비별로 균열길이에 대한 두재료의 하중반복수 차이를 보면, $N_{R=0.3,5052} / N_{R=0.3,7075} = 4.965$, $N_{R=0.65,5052} / N_{R=0.65,7075} = 7.14$, $N_{R=0.46,5052} / N_{R=0.46,7075} = 2.162$ 배로 나타나 5052-H32 재료가 피로수명을 크게 지연시킬 수 있다.

그림에서 (—)은 일정하중 진폭하에서 피로수명을 예측한 것이다.

참고 문헌

- 1) J. H. Kwon, 1990, "Damage Tolerance Analysis in Aircraft Structural Design", KSME, Vol. 30, pp.131-140.
- 2) Irwin, G. R., 1948, "Fracture of Metals", ASM, pp.147.
- 3) Paris, P. C., and Erdogan. F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Transaction ASME, J. Basic Engineering Vol. D85, pp.528-534.
- 4) Forman, R. G., Kerney, V. E., and Engle, R. M., 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures", Trans. ASME, J. Basic Engineering, Vol. 89, pp.459-464.
- 5) 菊川眞, 城野政弘, 田中建一, 高谷勝, 1976, "除荷弾性 コンプライアンス법による低進展速度領域における疲労き裂進展速度とき裂閉開口舉動の測定", 材料, Vol. 9, No. 276, pp.899-903.
- 6) 國尾 武, 中澤 一, 林 郁彦, 岡村弘之, 1984, "破壊力學試驗法", pp.128-190.
- 7) Hubbard, K. P., 1972, "Crack Growth under Cyclic Compression", ASME, Vol. 84.
- 8) 김엽래, 유헌일, 1998, "외팔보 형식의 하중진폭 변화에 대한 Al 합금의 관통균열 거동에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제22권, 제4호, pp.834-842.
- 9) 김엽래, 유헌일, 김세환, 1998, "하중진폭이 작은 인장과대 하중의 균열성장 거동", 한국공작기계학회논문집, 제7권, 제2호, pp.54-61.

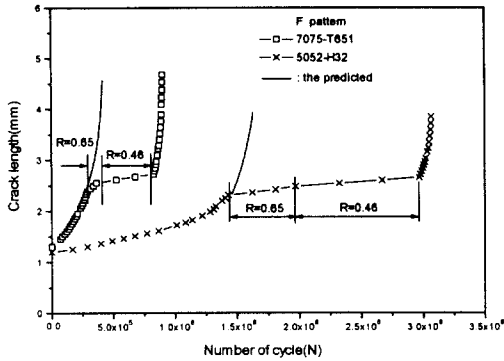


Fig. 7 Relation between crack length(a_i) and number of cycle(N)

제4장 결론

쉐브론노치의 관통균열 형태를 갖는 외팔보 형식 고강도 알루미늄합금 시험체를 준비하여 인장하중 범위내 진폭변화 변동하중에 대해 균열진전 거동 실험을 수행하였다.

초기균열 선단의 쉐브론노치부를 예비균열로 설정하고, 초기하중진폭은 일정한 상태에서 균열이 진전된 후 블록형태의 하중으로 만든 다음 응력비를 변화시켜 다단계 변동하중에 대한 균열진전 거동, 제하탄성컴플라이언스법을 이용하여 균열면적의 변화를 측정한 균열단합거동, 균열길이와 하중반복수에 의한 피로수명을 검토한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최대하중이 같은 조건에서 변동하중의 균열진전은 같은 ΔK 레벨로 검토하면 하중진폭이 적을수록 균열진전은 빠르며, ΔK 의 범위가 크면 균열진전속도는 느리게 나타났다. 피로수명을 연장하려면 응력비를 높게 설정하여야 한다.

2) 인장하중 범위내 변동하중시 7075-T651은 $\Delta K = \Delta K_{eff}$ 로서 단합현상이 없었으나 5052-H32에서는 하중진폭이 적어짐에 따라 소성영역내에서 다시 균열이 시작되어 단합현상이 발생되었다.

3) 인장하중진폭 범위내 변동하중에서는 5052-H32는 7075-T651보다 약 3배 정도의 지연효과가 있었고, 응력비별로 보면 저응력비보다 고응력비에서 지연효과는 더 크게 나타났다.