

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.2.99

TiNi/Al6061-T6과 TiNi/Al2024-T4 형상기억복합재료에 대한 피로강도기준의 비교

조 영 직* · 박 영 철†

(2008년 7월 2일 접수, 2008년 12월 24일 수정, 2009년 1월 6일 심사완료)

Comparison of Fatigue Strength Criteria for TiNi/Al6061-T6 and TiNi/Al2024-T4 Shape Memory Alloy Composite

Young-Jik Jo and Young-Chul Park

Key Words: TiNi/Al Shape Memory Alloy Composite(TiNi/Al 형상기억복합재료), Fatigue Life(피로수명), Probabilistic Stress-Life Curve(P-S-N곡선), Goodman Diagram(Goodman선도)

Abstract

This study produced a design curve and fatigue limit for a variation in volume ratio and reduction ratio of TiNi/Al composites. In many cases, stress-life curve does not indicate fatigue limit, so it was presented by probabilistic-stress-life curve. Goodman diagram was used to analyze the fatigue strength of materials with a finite life determined by repeated load and the fatigue strength of endurance limit with an infinite life. The fatigue experiment was conducted using the scenk-type plane bending specimen in same shape. The result of the fatigue test, which had been conducted under consistent stress amplitude, was examined. (i) The optimal condition for TiNi/Al in accordance with hot pressing (ii) Impacts of fatigue limit caused by a variation in reduction ratio and volume ratio of TiNi/Al composites (iii) Probability distribution for fatigue limit of TiNi/Al2024 and TiNi/Al6061.

1. 서 론

최근 금속복합재료(metal matrix composite)가 경량화와 강도보강 측면에서 항공 및 우주분야에 사용범위가 넓어지고 있다. 형상기억합금(shape memory alloy: SMA)을 이용한 복합재료는 형상기억효과(shape memory effect)를 이용해 균열성장 지연이나 응력집중을 완화시킬 수 있다.

많은 형상기억합금 중에 TiNi SMA는 안정한 형상기억효과를 보이고 있다. 마르텐사이트상(martensite phase)인 TiNi SMA에 인장 예변형을

가하고 TiNi의 오스테나이트 변태완료 온도인 Ar 점(363 K) 이상으로 가열하면 TiNi의 형상기억효과에 의해 원래 길이로 수축된다.^(1,2) 또한, 인장강도와 부식저항이 우수하기 때문에 실용화 측면에서 항공기 날개나 소형 항공기의 금속재료 대체 설계에 적용이 가능하다.

이러한 관점에서 항공기 동체와 날개에 발생하는 인장력과 압축력을 지지하는 보강재로 채널보(channel beam) 형태의 스트링거(stringer)^(3,4)에 대해 TiNi/Al 형상기억복합재료를 사용하고자 한다. 스트링거는 이착륙에서의 간접충격과 운항중의 피로하중을 받기 때문에 형상기억복합재료를 구조재료로 사용하기 위해서는 피로강도에 대한 평가가 중요하다.

이 재료에 대한 참고문헌은 대부분 열적 기계적

† 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학과
E-mail : parkyc67@dau.ac.kr
TEL : (051)200-7652 FAX : (051)200-7656
* 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과

특성평가에 관한 내용이다. Taya, Furuya 등^(5~8)은 TiNi SMA의 변형을 및 체적비 변화에 따른 기계적 성질을 예측하였고, 박영철 등^(9~17)은 TiNi/Al 형상기억복합재료의 제조 및 파괴특성을 평가한 바 있다. 그러나 항공기 구조재료 사용을 목적으로 TiNi SMA와 Al 모재의 종류에 따른 피로수명 연구사례는 매우 적다.

한편, TiNi SMA와 Al 모재의 피로수명은 강도문제와 형상기억합금 배열문제를 해결하기 위한 경제적인 성형 및 제작방법이 필요하다. 전보^(11,18)에 의해 핫프레스 방법(hot pressing)을 이용한 형상기억복합재료의 제작은 효과적인 결과를 얻었다. 이것은 섬유배열과 다양한 체적비를 가진 후판으로 제조할 수 있어 상용화 측면에서 유리하다. 또한, 핫프레스 방법은 형상기억합금 체적비율(volume ratio: Vr), 형상기억합금과 모재의 접합계면에 영향을 미치는 압하율(reduction ratio: Rr)이 설계와 제작에 있어서 중요한 변수가 되었다. 본 논문에서 체적비는 Al 모재의 체적당 섬유함유량이고, 압하율은 핫프레스 과정에서 프레스 전 후의 두께 차이를 의미한다.

이상과 같은 관점에서 본 논문은 1단계 연구개발^(16,18-20)에서 평가된 TiNi/Al6061-T6 형상기억복합재료와 이를 기초로 국내에서 제조된 TiNi/Al 2024-T4 형상기억복합재료에 대한 TiNi SMA의 체적비율과 압하율 변화에 대한 피로한도 및 설계곡선을 결정하였다. 복합재료의 S-N 곡선(stress-life curve)은 피로한도가 나타나지 않는 경우도 많으므로 시간강도에 해당하는 경사부의 파손확률(failure probability)에 따른 통계적 방법을 이용한 P-S-N 곡선(probabilistic-stress-life curve)⁽²¹⁻²³⁾으로 제시하였다. 동일 형상의 생크형(scenk type) 평면굽힘시험편을 사용하여 일정응력진폭 하중하에서 피로시험 결과에 대해 다음과 같은 특성을 고찰하였다.

- (i) 핫프레스 방법에 의한 TiNi/Al 형상기억복합재료의 최적제조 조건
- (ii) TiNi/Al 형상기억복합재료의 체적비 및 모재의 압하율 변화에 따른 피로강도기준
- (iii) TiNi/Al6061-T6, TiNi/Al2024-T4의 S-N 곡선의 통계적 결정 방법

2. 제작 및 시험방법

2.1 제작 방법

TiNi/Al 형상기억복합재료 시험편의 제조를 위해

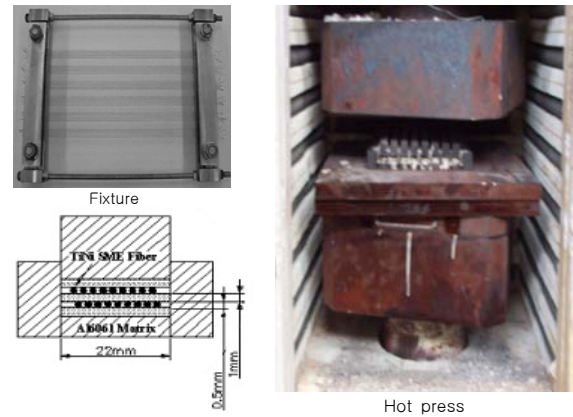


Fig. 1 Schematic diagram of hot pressing

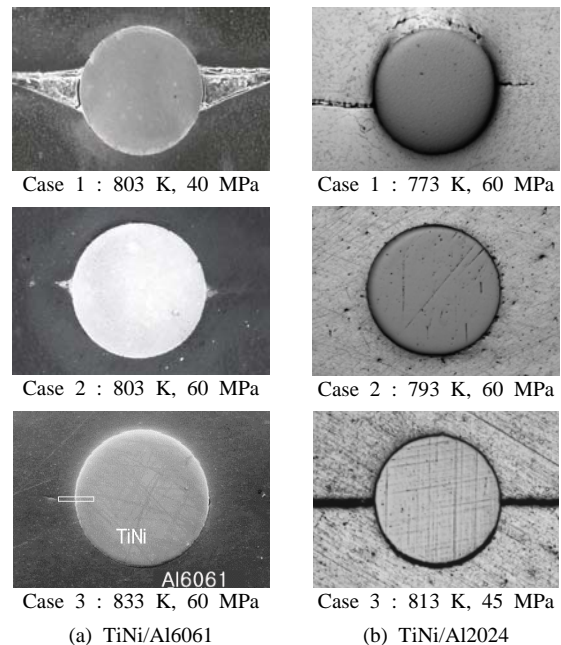


Fig. 2 SEM photo of delamination area for TiNi/Al shape memory alloy composite

모재로써 고압하에서 내응력 및 산화 부식성이 우수한 Al6061 및 Al2024와 직경 500 μm의 TiNi SMA (Ti-50at%, Martensitic Starting Temp.=303 K, Austenite Starting Temp.=327 K, Austenite Finishing Temp.=337 K, Martensitic Finishing Temp.=290 K) 와 이어를 사용하고, 최고 1000℃까지 온도유지가 가능한 250톤 용량의 핫프레스 방법⁽¹¹⁾을 이용하였다.

Fig. 1은 시험편 제조방법을 나타낸 것으로 260 mm×14 mm×1 mm의 Al 사이에 TiNi SMA를 일정한 간격으로 고정시킨 후 핫프레스 온도조건 773 K-813 K와 압력 45 MPa-75 MPa 구간에서 고정하고 유지시간을 30분으로 하였다. 복합재료 시험편은 Al 표면에 산화를 방지하기 위하여 아르곤 분위기에서 제조

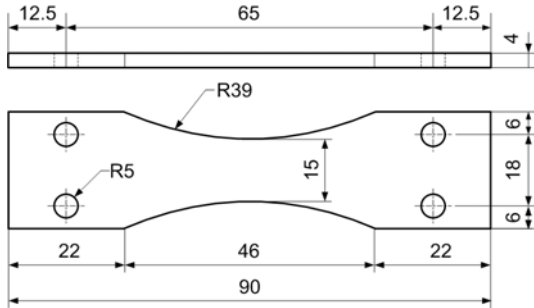


Fig. 3 Geometry and dimensions of fatigue specimen



Fig. 4 Apparatus for scenck type bending fatigue tester

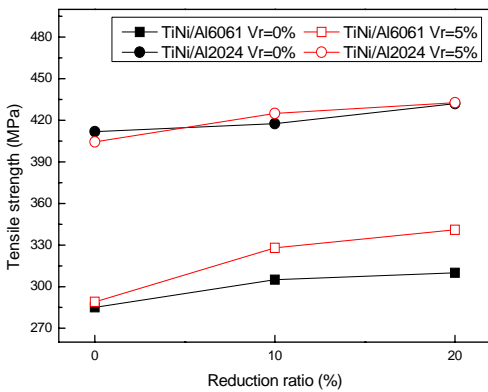


Fig. 5 Comparison of relationship between volume ratio and reduction ratio for tensile strength

하였다. 제조한 시험편은 재료 내부에 압축잔류응력을 부여하기 위해 1×10^{-4} mm/s 예변형을 가하였다.

Fig. 2는 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 TiNi/Al의 층간분리 영역을 나타낸 사진이다. 모재의 종류에 따라서 온도 및 압력조건에 대한 형상기억합금과의 접합정도에 차이를 보이고 있다. Fig. 2(a)인 TiNi/Al6061의 경우 Case 1, 2는 모재와 접합계면에서 접합라인이 나타나고 섬유와 모재의 접합계면에서도 완전한 접합이 되지 않은 상태로 관찰된다. 이에 반해, Case 3은 접합성이 양호하다. Fig. 2

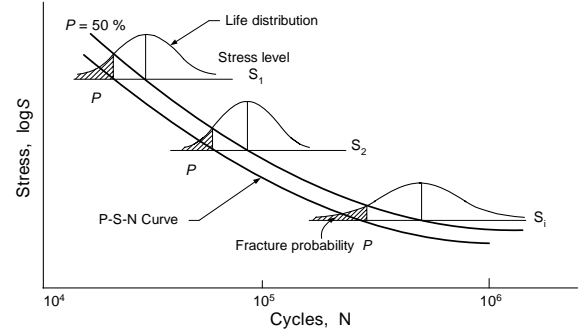


Fig. 6 Scheme of P-S-N curve

(b)인 TiNi/Al2024의 경우 Case 1은 가열온도가 낮아 충분한 확산층이 생기지 않고 Case 3은 높은 온도와 작은 압력으로 모재의 접합계면이 관찰된다. Case 2는 충분한 확산층이 확보되어 양호한 접합성이 나타난다. 따라서 TiNi/Al6061은 Case 3, TiNi/Al 2024는 Case 2가 최적 제조조건이며 결과는 다음과 같다.

(a) TiNi/Al6061 : 온도 833 K, 압력 60 MPa, 가압 시간 30분, 열처리 조건 T6, 압하율 10%

(b) TiNi/Al2024 : 온도 793 K, 압력 60 MPa, 가압 시간 30분, 열처리 조건 T4, 압하율 10%

여기서 압하율 범위는 0%, 10%, 20%로 하였고 압하율이 높을수록 Al과 TiNi SMA의 접합상태가 우수하였다. 시험편의 계면박리 및 모재 사이의 손상을 저감하기 위해 냉간압연 과정 후에 열처리를 수행하였다. 열처리를 먼저 실시할 경우는 압연과정에서 발생하는 열에 의해 형상기억합금에 형상기억효과가 발생하여 형상기억합금은 늘어나지 않으려는 성질이 생기고 반면에 Al은 늘어나려는 성질이 발생하여 계면분리 현상이 발생하였다.

2.2 피로 시험

Fig. 3은 TiNi/Al6061-T6와 TiNi/Al2024-T4의 형상기억복합재료의 피로한도를 결정하기 위한 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

Fig. 4는 피로시험에 사용한 생크형(scenck type) 평면굽힘 피로시험기(MORI Co. model5171, Japan)를 나타낸 것이다. 최대굽힘모멘트는 2 kgf·m, 매분 회전수 1500rpm으로 평균응력을 0으로 하는 하중제어형태로 제어된다.

Fig. 5는 인장강도에 대한 압하율과 TiNi SMA의 체적비율과의 관계를 나타낸 것이다. 복합재료의 피로강도는 모재의 종류, 강화재인 SMA의 체적비율, 압하율에 의해서 영향을 받는다. 따라서 제조조건에 따른 시간강도와 피로한도를 결정

하기 위해 형상기억합금 압하율 0%, 10%, 20%와 체적비율 0%, 5%의 시험 조건에 대해 각 16개의 시험편으로 피로시험을 수행하였다.

2.3 파손확률에 대한 P-S-N 곡선

복합재료의 피로한도는 섬유와 매트릭스의 계면 결합, 층간분리와 제작상의 어려움 등으로 인해 상당한 변동성이 나타난다. 따라서 수명자료에 대한 확률론적 특성을 정확히 결정하는 것이 중요하다.

Fig. 6은 P-S-N 곡선(probabilistic-stress-life curve) 결정법⁽²²⁻²⁴⁾을 개념적으로 나타내고 있다. 일반적인 복합재료는 섬유가 모재에 발생한 균열진전 저지의 역할을 다하지 못하는 경우도 있고 균열 발생에서 파단까지의 시간이 짧은 경우 응력수준의 감소는 장수명측으로 비대칭 분포가 나타난다.

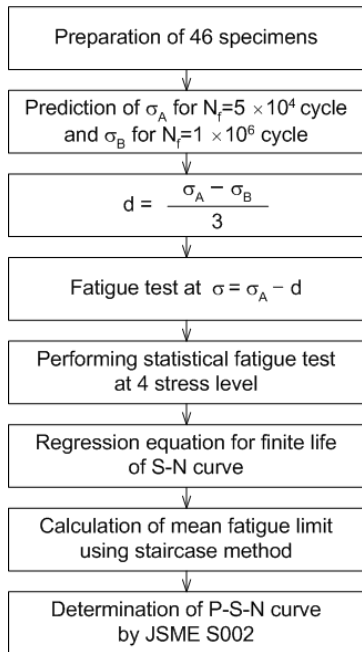


Fig. 7 Procedure for estimation of P-S-N curve

또한 금속재료에 비해 응력변화에 대한 불연속 구간이 빠르게 나타나고 피로수명에 큰 영향을 미치기 때문에 응력수준에 관계된 미리 규정된 신뢰도를 보증하는 설계곡선 형태가 적합하다.

Fig. 7은 P-S-N 곡선 평가를 위한 과정을 나타낸 것이다. 시간강도에 대한 경사부의 파손확률에 대한 설계곡선과 피로한도를 결정하기 위해 JSME S002^(24,25)에서 규정하는 S-N 시험방법을 이용하였다. 경사부의 시간강도에 대한 피로수명을 회귀직선으로 편대수(semi-log) 좌표로 정리하면 식 (1)로 나타낸다.

$$\log N = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \Delta S \tag{1}$$

파손확률 P=10%, 90%에 대한 P-S-N 곡선은 식 (2)로 나타낸다.

$$\log N = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_1 \Delta S \pm 1.64 \hat{\sigma} (\log N) \tag{2}$$

$$\hat{\sigma} (\log N) = \left[\frac{1}{6} \sum_{i=1}^8 \{ \log N_i - (\hat{\alpha}_1 + \hat{\beta}_1 \Delta S_i) \}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

여기서 ΔS 는 응력수준이고, $\hat{\sigma} (\log N)$ 는 피로한도영역에서 6개의 시험편에 대한 계단식(staircase) 시험으로 구한 파단수명의 대수 표준편차이다. 파손확률 P=5%, P=95%에 대한 S-N 곡선은 50%에 대한 파단부의 표준편차 추정치인 식 (3)에 대하여 $\pm 1.64 \hat{\sigma}$ 씩 평행 이동하여 구한다.

3. 결과 및 요약

3.1 피로파손 형태

Fig. 8은 모재종류와 시험조건에 따른 파단양상을 나타낸 것이다. 대부분의 시험편은 표점거리

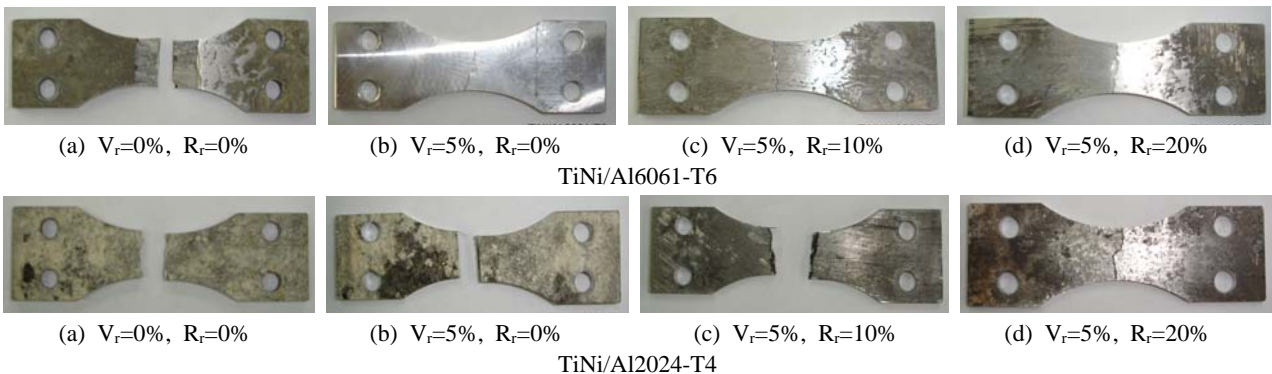


Fig. 8 Fatigue fractured specimen of TiNi/Al shape memory alloy composite

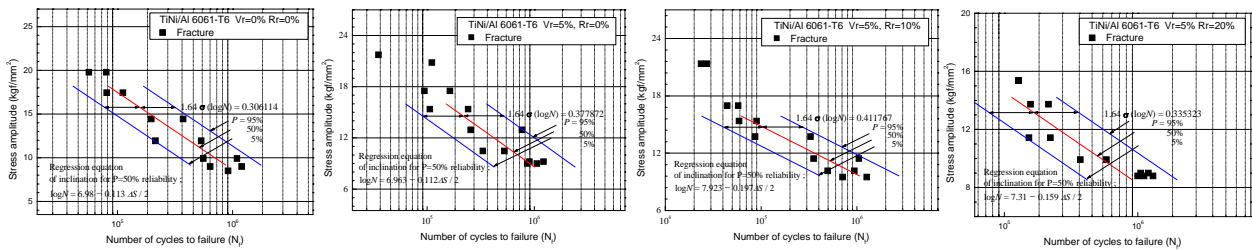
구간의 모재금속 표면에서 초기 균열이 생성되고 강화재로 진전되어 파단 되었다. 특히 TiNi/Al 6061-T6의 경우 TiNi/Al2024-T4보다 상온에서 모재와 형상기억합금의 인장강도의 차이에 의해 계면분리가 많이 발생한 것으로 판단된다.

3.2 TiNi/Al 형상기억복합재료의 P-S-N 곡선

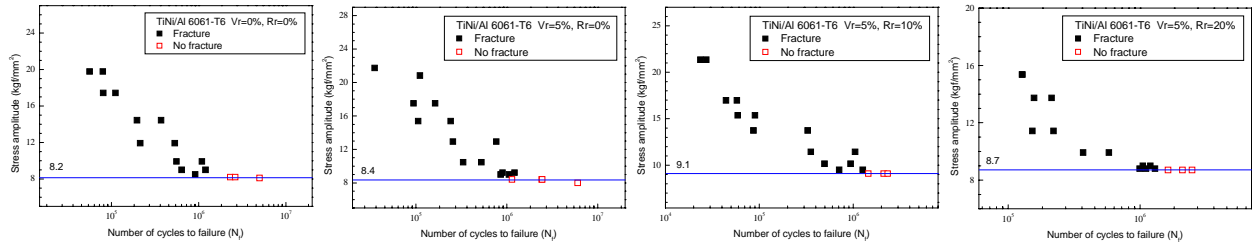
복합재료는 재료내부에 층간박리, 강화섬유파단, 모재균열 등의 내부손상이 축적되고 피로특성도 금속재료에 비해 큰 분산이 나타난다. 또한 S-N 곡선이 반복수 10^7 을 넘어도 피로한도에 해당하는 수평부가 나타나지 않는 경우가 많다. Zako 등은 이러한 경우 피로한도를 가지는 S-N 곡선의 통계적 방법을 제안하였다.^(26,27) 특히 복합

재료의 경우 피로한도 근방의 응력수준은 시험편 자체의 비용과 시간적 제약 때문에 소표본(small sample)을 이용한 해석이 요구된다. 이와 같은 점에서 시간강도에 대한 경사부와 피로한도에 대한 수평부의 연속성을 고려해서 피로한도가 존재하지 않는다고 가정하고 전체 데이터를 경사부로서 S-N 곡선을 결정하였다. 즉 경사부와 수평부를 분리하는 수명 N 을 변화시키면서 경사부와 수평부의 분포가 가장 잘 일치하는 수명을 내구한도로 결정한다.

Fig. 9와 10은 TiNi/Al6061-T6와 TiNi/Al2024-T4의 피로시험결과를 나타낸다. 체적비와 압하율 변화에 따른 P-S-N 곡선에 대해 시간강도의 기울기와 분산을 표시하였다. TiNi/Al6061-T6의 피로

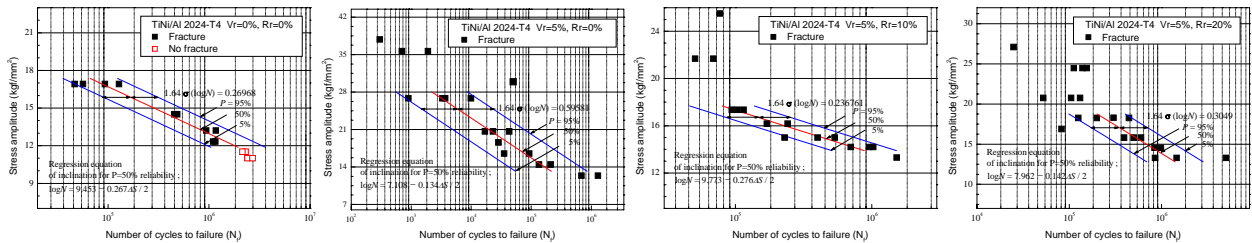


(a) Fatigue strength without fatigue limit

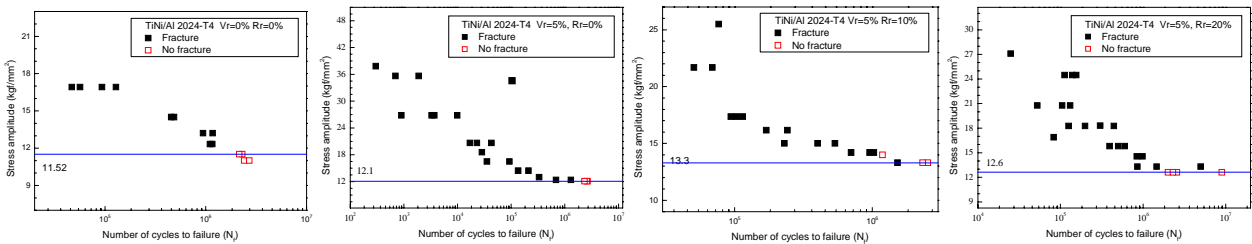


(b) Fatigue limit

Fig. 9 P-S-N curve of TiNi/Al6061-T6



(a) Fatigue strength without fatigue limit



(b) Fatigue limit

Fig. 10 P-S-N curve of TiNi/Al2024-T4

Table 1 Result of fatigue limit by JSME statistical method

Type	$V_r=0\%$ $R_r=0\%$	$V_r=5\%$ $R_r=0\%$	$V_r=5\%$ $R_r=10\%$	$V_r=5\%$ $R_r=20\%$
TiNi/Al6061-T6 (kgf/mm ²)	8.2	8.4	9.1	8.7
TiNi/Al2024-T4 (kgf/mm ²)	11.5	12.1	13.3	12.6

한도는 체적비 0%, 압하율 0%에서 8.2 kgf/mm², 체적비 5%일때 0%, 10%, 20%의 압하율에 대해서 각각 8.4 kgf/mm², 9.1 kgf/mm², 8.7 kgf/mm²로 나타났다. TiNi/Al2024-T4는 체적비 0%, 압하율 0%에서 11.52 kgf/mm², 체적비 5%일때 0%, 10%, 20%의 압하율에 대해서 각각 12.1 kgf/mm², 13.3 kgf/mm², 12.6 kgf/mm² 이다.

TiNi/Al6061-T6와 TiNi/Al2024-T4는 체적비 5%, 압하율 10%에서 가장 좋은 피로강도가 나타났고 압하율이 20%가 되면 오히려 피로강도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 모재와 TiNi SMA의 계면결합의 약화 및 분리, 인장강도 차이로 인한 응력집중이 발생한 원인이라 판단된다.

Table 1은 TiNi/Al 형상기억복합재료의 체적비와 압하율에 따른 피로한도 결과를 요약한 것이다. TiNi/Al6061-T6와 TiNi/Al2024-T4 모두 체적비 5%, 압하율 10%에서 피로한도는 가장 우수한 결과를 얻었다. 이때의 P-S-N 곡선은 다음과 같다.

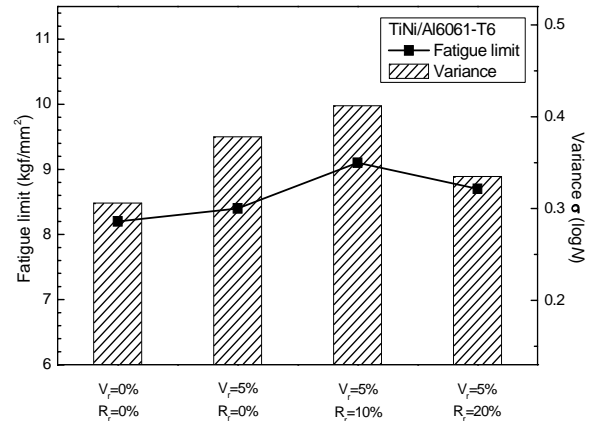
TiNi/Al6061-T6의 P-S-N 곡선

$$\log N = 7.923 - 0.197 \Delta S / 2 \pm 0.41177 \quad (4)$$

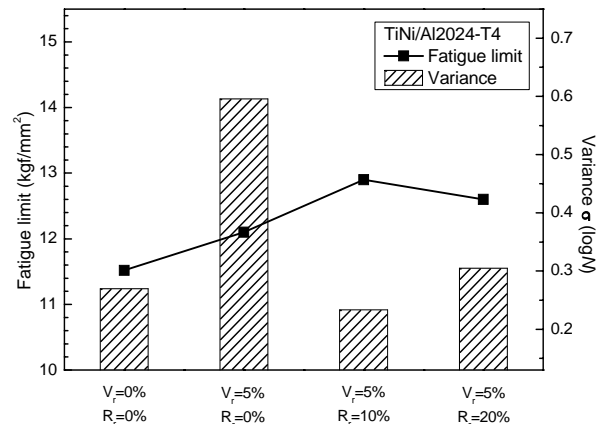
TiNi/Al2024-T4의 P-S-N 곡선

$$\log N = 9.773 - 0.276 \Delta S / 2 \pm 0.23676 \quad (5)$$

Fig. 11은 TiNi SMA의 체적비와 압하율 변화에 대한 TiNi/Al6061-T6와 TiNi/Al2024-T4의 피로한도와 신뢰구간의 분산을 비교한 것이다. Fig. 11(a)의 TiNi/Al6061-T6의 경우 피로한도와 분산은 증가하다가 체적비 5%, 압하율 20%일때 감소한다. 각 시험편의 분산은 모재의 경우 0.306이고 $V_r=5\%$, $R_r=0\%$, 10%, 20%인 경우 각각 0.378, 0.412, 0.335로 나타났다. 체적비 5%, 압하율 10%일 때 피로한도는 가장 좋지만 신뢰구간의 분산은 다른 세 경우의 재료와 비교해서 크다. 이러한 결과는 TiNi/Al6061-T6의 경우 모재가 피로균열전파에 큰 영향을 미치고 있어 섬유강화효과와



(a) TiNi/Al6061-T6



(b) TiNi/Al2024-T4

Fig. 11 Relation between fatigue limit and variance of TiNi/Al shape memory alloy composite

에 변형 효과가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 이때의 계단식 시험법을 이용하여 얻어진 피로한도의 평균값은 9.1 kgf/mm²이다.

Fig. 11(b)는 TiNi/Al2024-T4의 피로한도와 신뢰구간의 분산을 비교한 것이다. 체적비 5%, 압하율 10%일 때 피로한도는 가장 좋고 신뢰구간의 분산도 가장 작다. 각 시험편의 분산은 모재의 경우 0.269이고 $V_r=5\%$, $R_r=0\%$, 10%, 20%인 경우 분산은 각각 0.596, 0.237, 0.305이다. 형상기억복합재료의 정적강도와 동적강도의 균형을 평가하기 위해 피로한도를 인장강도로 나눈 피로강도비 (fatigue strength ratio)⁽²⁸⁾를 이용한다. 피로한도가 우수한 TiNi/Al2024-T4의 경우 체적비 5%에서 압하율 0%, 10%, 20%일 때 피로강도비는 각각 0.293, 0.307, 0.285 이다. 일반적인 복합재료의 피로강도비 값인 0.25-0.4와 비교하면 TiNi/Al 형상기억복합재료의 피로한도가 적절한 수준에서 결정되었음을 알 수 있다.

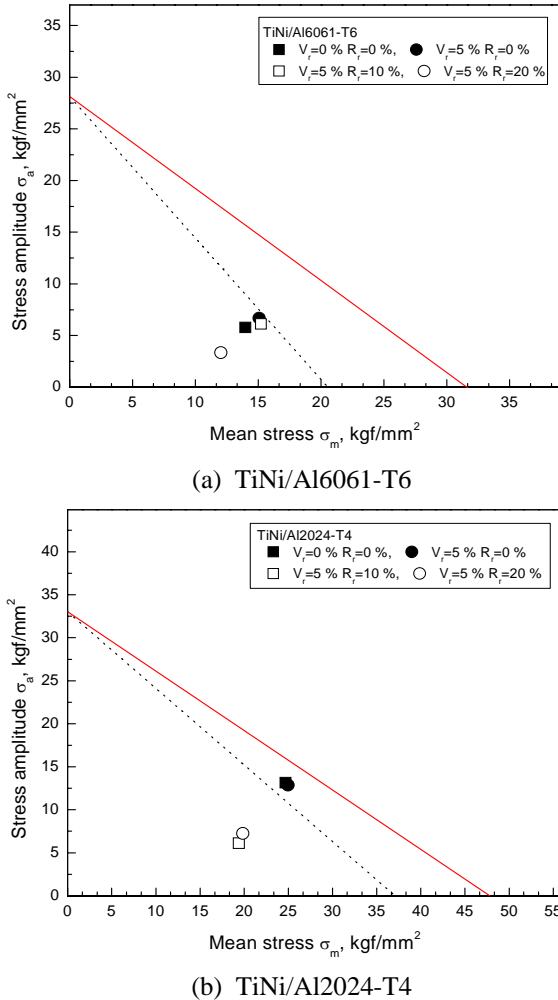


Fig. 12 Goodman diagram for TiNi/Al6061-T6 and TiNi/Al2024-T4. Note: the Goodman line endpoint is the UTS from an axial tensile test

3.3 피로강도의 평가

반복하중에 의한 유한수명에서의 재료의 피로강도 또는 무한수명에서의 내구한도에 관한 피로강도 해석을 위해서는 Goodman 선도(Goodman diagram)⁽²⁹⁻³¹⁾가 이용된다.

Fig. 12는 TiNi/Al6061-T6와 TiNi/Al2024-T4의 피로시험결과를 Goodman 선도에 나타낸 것이다.

Fig.12(a)의 실선은 Al6061-T6의 항복강도인 28.1 kgf/mm²와 극한인장강도 31.6 kgf/mm²를 직선으로 연결한 Goodman 선도이다. 점선은 극한인장강도 대신에 파단강도(정적강도의 65%) 20.5 kgf/mm²를 고려한 수정 Goodman 선도이다. 여기에 TiNi의 체적비와 압하율에 따른 4가지 경우의 피로시험을 통해서 얻은 최대응력 및 최소응력을

기준으로 평균응력과 응력진폭을 설정하여 Goodman 선도에 표시하였다. 그 결과 Goodman 선도의 안전영역 내부에 균일한 집단을 이루고 있다. Fig. 12(b)에서 실선은 Al2024-T4의 항복강도인 33 kgf/mm²와 극한인장강도 47.8 kgf/mm²를 직선으로 연결한 Goodman 선도이다. TiNi/Al6061-T6와 마찬가지로 안전영역 내부에 있는 것을 알 수 있다. 그러나 점선으로 표시된 극한인장강도 대신에 파단강도(정적강도의 65%) 31.1 kgf/mm²를 고려한 수정 Goodman 선도를 이용하면 압하율이 0%인 경우는 안전영역을 벗어나고 있고 압하율이 10%, 20%인 경우는 안전영역 내부에 존재한다. 이것은 TiNi/Al2024의 경우 압하율 0%일 때는 모재와 강화재간에 접합성이 나빠서 강화재가 그 역할을 다하지 못한 이유라고 판단된다. TiNi/Al2024-T4는 TiNi/Al6061-T6과 비교해서 동일한 물리적 작용인 체적비와 압하율 중에서 피로한도는 압하율에 더 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

4. 결론

항공기 스트링거 설계를 위한 TiNi/Al6061-T6, TiNi/Al2024-T4 형상기억복합재료의 최적제조조건을 제시하고 TiNi SMA의 체적비, 압하율에 따른 P-S-N 곡선과 피로수명을 평가하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) TiNi/Al 형상기억복합재료의 가장 우수한 피로한도의 제조조건은 체적비 5%, 압하율 10%이다. 이때 피로한도는 TiNi/Al6061-T6은 9.1 kgf/mm², TiNi/Al2024-T4는 13.3 kgf/mm²이다. P-S-N 곡선을 나타내면 아래와 같다.

TiNi/Al6061-T6 P-S-N 곡선:

$$\log N = 7.923 - 0.197 \Delta S / 2 \pm 0.41177$$

TiNi/Al2024-T4 P-S-N 곡선:

$$\log N = 9.773 - 0.276 \Delta S / 2 \pm 0.23676$$

(2) P-S-N 곡선의 결과 시간강도에 대한 경사부의 피로한도 분산은 TiNi/Al6061-T6의 경우 체적비 5%, 압하율 10%일 때 피로한도는 우수하지만 분산은 0.412(신뢰구간 95%)로 가장 품질이 떨어진다. 이와 반대로, TiNi/Al2024-T4의 경우 피로한도가 우수한 체적비 5%, 압하율 10%일 때 분산이 0.237(신뢰구간 95%)으로 가장 우수하다.

(3) TiNi/Al6061-T6는 Goodman 선도의 안전영

역에 모든 제조조건이 균일한 집단을 이루고 있지만 TiNi/Al2024-T4는 압하율의 조건에 따라 피로강도의 차이를 보인다. 이것은 피로강도에 미치는 압하율의 영향이 TiNi/Al6061-T6은 적게 받는 것에 비해 TiNi/Al2024-T4는 압하율의 영향에 강도변화가 민감하다고 판단된다.

후 기

이 논문(작품)은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Jean, R. D. and Hu, C. T., 1994, "Shape Memory Effect by Constant-stress Aging in Ti-50.5at.% Ni alloy," *Journal of Material Science*, Vol. 29, No. 2, pp. 449~455.
- (2) Lee, H. J., Hawong, J. S. and Shimamoto, A., 1999, "A Study on the Effect of Fracture Delay of Intelligent FRP by Transparent Photoelastic Experimental Method," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 23, No. 11, pp. 1904~1911.
- (3) Attiaa, O., Kinlochb, A. J. and Matthews, F. L., 2003, "The Prediction of Fatigue Damage Growth in Impact-damaged Composite Skin/stringer Structures. Part I: Theoretical Modelling Studies," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 10, pp. 1463~1472.
- (4) Mahfuz, H., Majumdar, P., Saha, M., Shamery, F. and Jeelani, S., 2004, "Integral Manufacturing of Composite Skin-Stringer Assembly and Their Stability Analyses," *Applied Composite Materials*, Vol. 11, No. 3, pp. 155~171.
- (5) Taya, M. and Arsenault, R. J., 1989, *Metal Matrix Composites: Thermomechanical Behavior*, Elsevier Science Ltd.
- (6) Taya, M., Furuya, Y., Yamada, Y., Watanabe, R., Shibata, S. and Mori, T., 1993, "Strengthening Mechanisms of TiNi Shape Memory Fiber/Al Matrix Composites," *Proceedings of SPIE-the international society for optical engineering*, Vol. 1916, pp. 373~383.
- (7) Furuya, Y., 1995, "Design and Experimental Verification of Intelligent Materials Using Shape Memory Alloy," *Proceeding of the International Symposium on the Microsystems, Intelligent Materials and Pobots, Sendai, Japan*, pp. 313~318.
- (8) Furuya, Y. and Taya, M., 1996, "Enhancement of High Temperature Mechanical Strength of TiNi Fiber/Al Composite Induced by Shape Memory Effect," *Journal of the Japan Institute of Metals*, Vol. 60, No. 12, pp. 1163~1172.
- (9) Park, Y. C. and Furuya, Y., 1992, "Thermal Cyclic Deformation and Degradation of Shape Memory Effect in TiNi Alloy," *Nondestr. Test. Eval.*, Vol. 4, No. 8, pp.541~554.
- (10) Lee, J. K., Park, Y. C., Ku, H. T., Park, D. S. and Lee, K. C., 2002, "Fracture Characteristic of TiNi/Al6061 Shape Memory Alloy Composite using Acoustic Emission Technique," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 2, pp. 275~282.
- (11) Park, Y. C., Park, D. S., Lee, J. H. and Lee, G. C., 2002, "Fabrication and Characterization of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum Matrix Composite by Using Hot Press," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 7, pp. 1223~1231.
- (12) Park, Y. C., Lee, J. K. and Lee, G. C., 2004, "Development of On-line Monitoring System and AE Characterization of SMA Composite under Severe Conditions," *Key Engineering Materials*, Vols. 270-273, pp. 1839~1844.
- (13) Lee, J. K., Park, Y. C., Lee, J. H., Lee, S. P. and Hur, K. D., 2004, "Nondestructive Evaluation and Fracture Mechanism of Smart Material," *Key Engineering Materials*, Vols. 261-263, pp. 1379~1384.
- (14) Park, Y. C. and Lee, J. K., 2004, "Fabrication and AE Characteristics of TiNi/Al6061 Shape Memory Alloy Composite," *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 3, pp. 453~459.
- (15) Park, Y. C., Lee, G. C. and Furuya, Y., 2004, "A Study on the Fabrication of TiNi/Al6061 Shape Memory Composite Material by Hot-press Method and its Mechanical Property," *Materials Transactions*, Vol. 45, No. 2, pp. 264~271.
- (16) Park, Y. C., Lee, D. H. and Park, D. S., 2004, "The Development of Expert System for

- Strength Evaluation of TiNi Fiber Reinforced Al Matrix Composite," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 28, No. 8, pp. 1099~1108.
- (17) Park, Y. C., Lee, J. K., Lee, G. C., Lee, S. P., Lee, J. H., Cho, Y. H. and Lee, J. B., 2006, "A Study on Fatigue Damage of Shape Memory Alloy Composite Using NDE Technique," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 20, Nos. 25-27, pp. 3775~3780.
- (18) Park, Y. C., Kang, J. H., Lee, J. K., Lee, G. C. and Furuya, Y., 2007, "Effect of Cold Rolling of Fatigue Crack Propagation of TiNi/Al6061 Shape Memory Composite," *Smart Materials & Structures*, Vol. 16, pp. 982~988.
- (19) Park, Y. C., Lee, J. K. and Lee, G. C., 2007, "Development of an Expert System for Evaluation of the Strength of Matrix Shape Memory Composites," *Composite Structures*, Vol. 77, pp. 241~248.
- (20) Hasegawa, M., Asano, T., Hashimoto, K., Lee, G. C., Park, Y. C., Okazaki, T. and Furuya, Y., 2006, "Fabrication of Multiferroic Composite Actuator Material by Combining Superelastic TiNi Filler and a Magnetostrictive Ni Matrix," *Smart Materials & Structures*, Vol. 15, pp. N124~N128.
- (21) Murty, A. S. R., Gupta, U. C. and Krishna, R., 1995, "A New Approach to Fatigue Strength Distribution for Fatigue Reliability Evaluation," *Int. J. Fatigue*, Vol. 17, No. 2, pp. 85~89.
- (22) Zheng, X. and Wei, J., 2005 "On the Prediction of P-S-N Curves of 45 Steel Notched Elements and Probability Distribution of Fatigue Life Under Variable Amplitude Loading from Tensile Properties," *Int. J. Fatigue*, Vol. 27, pp. 601~609.
- (23) Baek, S. H., Lee, K. Y., Mun, S. J., Cho, S. S. and Joo, W. S., 2005, "Fatigue Cumulative Damage and Life Prediction of Uncovered Freight Car Under Service Load using Rainflow Counting Method," *Trans. of the KSAE*, Vol. 13, No. 2, pp. 1~9.
- (24) Baek, S. H., Cho, S. S. and Joo, W. S., 2008, "Fatigue Life Prediction Based on the Rainflow Cycle Counting Method for the End Beam of a Freight Car Bogie," *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 95~101.
- (25) JSME Standards S002, *Standard Method of Statistical Fatigue Testing*, The Japan Society of Mechanical Engineers.
- (26) Zako, M., Kurashiki, T. and Hanaki, S., 2001, "Statistical Method for Decision of S-N Curve with Fatigue Limit," *J. Soc. Mat. Sci. (in Japanese)*, Vol. 50, No. 3, pp. 278~283.
- (27) Nishikawa, I., Nakayasu, H., Sugeta, A., Yokomaku, T., Yoshioka, S., Shuto, T., Shintani, T., Sakai, T. and Sakai, T., 2002, "Proposal of Standard Regression Method for S-N Curve Based on Fatigue Test Data for Metallic Materials," *J. Soc. Mat. Sci. (in Japanese)*, Vol. 51, No. 1, pp. 54~60.
- (28) Oh, S. W., Yoon, H. K., Cha, Y. H. and Nam, K. W., 2002, *Strength of Materials* (in korean), Wonchang Publishing Ltd., pp. 182~185.
- (29) Goodman, J., 1899, *Mechanics Applied to Engineering*, Longmans, Green, and Co., London.
- (30) Wang, S., Dixon, M. W., Huey, C. O. and Chen, S., 2000, "The Clemson Limit Stress Diagram for Ductile Parts Subjected to Positive Mean Fatigue Loading," *ASME J. Mech. Des.*, Vol. 122, pp. 143~146.
- (31) Baek, S. H., Lee, K. Y., Cho, S. S., Jang, D. Y. and Joo, W. S., 2007, "An Experimental Investigation of Bending Fatigue Strength in Table Liner for Cement Mill," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 31, No. 12, pp. 1214~1220.