

TiNi/Al 형상기억복합재료의 피로곡선에 대한 연구

*오승환¹, 송학관², 강정호³, 박영철⁴

^{1,2} 동아대학교 대학원 기계공학과, ^{3,4} 동아대학교 기계공학과

S-N Fatigue Curve of a TiNi/Al Shape Memory Alloy Composite for Aircraft Stringer Design

*S. H. Oh¹, Xueguan Song², J. H. Kang³, Y. C. Park⁴

^{1,2} Dept. of Mech. Eng., Graduate School of Dong-A Univ., ^{3,4} Dept. of Mech. Eng. Donga Univ.

Key words : TiNi/Al Shape Memory Alloy, Fatigue Life, Probabilistic-Stress-Life Curve

1. 서론

최근 금속복합재료(metal matrix composite)가 경량화와 강도보강 측면에서 항공 및 우주분야에 사용범위가 넓어지고 있다. 형상기억합금을 이용한 복합재료는 형상기억효과(shape memory effect)를 이용해 균열성장 지연이나 응력집중을 완화시킬 수 있다. 특히 많은 형상기억합금 중에 TiNi 섬유는 안정한 형상기억효과를 보이고 있다. TiNi 섬유와 Al 기지재료의 피로수명은 강도문제와 섬유배열문제를 해결하기 위한 경제적인 성형 및 제작방법이 필요하다. 따라서 본 연구는 1단계 연구개발에서 평가된 TiNi/Al6061 형상기억복합재료와 이를 기초로 국내에서 제조된 TiNi/Al2024 형상기억복합재료에 대한 TiNi 섬유의 체적비율과 압하율 변화에 대한 설계곡선 및 피로한도를 결정하였다. 복합재료의 S-N 곡선(stress-life curve)은 피로한도가 나타나지 않는 경우도 많으므로 시간강도에 해당하는 경사부의 파손확률에 따른 통계적 방법을 이용한 P-S-N 곡선(probabilistic stress-life curve)으로 제시하였다. 동일 형상의 생크형(schenk type) 평면굽힘 시험편을 사용하여 일정응력진폭 하중하에서 피로시험 결과에 대해 다음과 같은 특성을 고찰하였다.

- (i) 핫프레스 제작방법에 의한 TiNi/Al 형상기억복합재료의 최적제조 조건
- (ii) TiNi 섬유 체적비 및 기지재료간의 압하율 변화에 따른 피로한도의 영향
- (iii) TiNi/Al2024와 TiNi/Al6061의 피로한도의 확률분포

2. 제작 및 시험방법

2.1 제작방법

TiNi/Al 형상기억복합재료 시험편을 제조하기 위해 기지재료로써 고압하에서 내응력 및 산화 부식성이 우수한 Al6061 및 Al2024와 직경 500 μ m의 TiNi 섬유(Ti-50at.%, Martensitic Starting Temp.=303K, Austenite Starting Temp.=327K, Austenite Finishing Temp.=337K, Martensitic Finishing Temp.=290K)와이어를 사용하였으며, 최고 1000 $^{\circ}$ C까지 온도유지가 가능한 250톤 용량의 핫프레스 방법⁽¹⁾을 이용하였다. 시험편 제조방법은 260mm \times 14mm \times 1mm의 Al 사이에 TiNi 섬유를 일정한 간격으로 고정시킨 후 핫

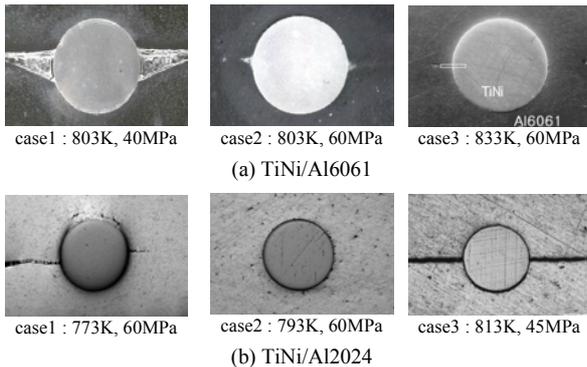


Fig. 1 SEM photo of delamination area for TiNi/Al shape memory composite

프레스 온도조건 773~813K와 압력 45~75 MPa 구간에서 고정하고 유지시간을 30분으로 하였다. 복합재료 시험편은 Al 표면에 산화를 방지하기 위하여 아르곤 분위기에서 제조였다. 제조한 시험편은 재료 내부에 압축잔류응력을 부여하기 위하여 1 \times 10⁻⁴ mm/s 에변형을 가하였다.

Fig. 1는 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 온도 및 압력조건 변화에 따른 TiNi/Al의 층간분리 상태를 나타낸 사진이다. 기지재료에 따른 최적 제조조건은 다음과 같다.

- (i) TiNi/Al6061 : 온도 833K, 압력 60MPa, 가압시간 30분, 열처리 조건 T6, 압하율 10% 이상
- (ii) TiNi/Al2024 : 온도 793K, 압력 60MPa, 가압시간 30분, 열처리 조건 T4, 압하율 10% 이상

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

2.2 시험편 및 시험방법

생크형(schenk type) 평면굽힘 피로시험기(MORI Co. model5171, Japan)를 사용하였다. 최대 굽힘 모멘트는 2kgf·m, 매분 회전수 1500rpm으로 평균응력을 0으로 하는 하중제어형태로 제어된다. 복합재료의 피로강도는 기지재료의 종류, 강화제의 종류와 체적비율에 의해서 영향을 받는다.

따라서 제조조건에 따른 시간강도와 피로한도를 결정하기 위하여 압하율 0%, 10%, 20%와 섬유 체적비율 0%, 55%에 대해 각 26개 시험편으로 피로시험을 수행하였다.

2.3 파손확률에 대한 P-S-N 곡선

본 연구에서는 JSME S002에서 규정하는 S-N 시험방법을 이용하여 형상기억복합재료의 P-S-N 곡선을 결정하였다.

Fig. 2는 수명분포에 대응하는 P-S-N 곡선 결정법을 개념적으로 나타내고 있다. 일반적인 복합재료는 금속재료에 비해 피로한도 근방의 응력수준과 그 분포형상이 응력수준이 감소함에 따라 장수명측으로 비대칭 분포가 나타나는 경우가 많다. 또한 섬유강화 금속계 복합재료는 응력변화가 피로수명에 큰 영향을 미치기 때문에 응력 수준에 따라 미리 규정된 신뢰도를 보증하는 설계곡선 형태가 더욱 적합하다.

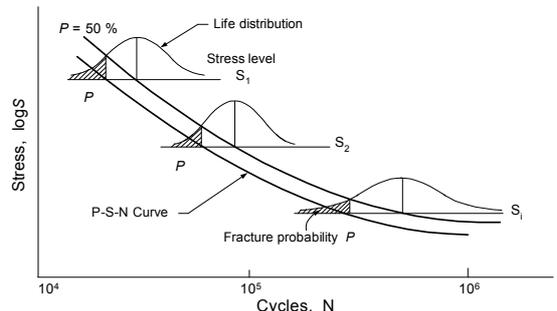


Fig. 2 Scheme of P-S-N curve

3. 실험 결과 및 고찰

피로시험결과 1 ~ 10⁶사이클 사이클 근방에서 Knee point가 형성되는 일반적인 S-N 선도의 경향을 나타내었다. 체적함유율과 압하율에 따른 피로한도 결과는 Table. 1에 나타내었다. TiNi/Al20 24-T4와 TiNi/Al6061-T6은 모두 체적함유율 5%, 압하율 10%에서 피로한도가 가장 우수하게 나타났고, 특히 TiNi/Al2024-T4 체적함유율 5%, 압하율 10%에서 13.3kgf/mm²으로 가장 우수한 것으로 나타났다. Fig. 3과 Fig. 4는 피로한도가 가장 우수한 것으로 나타난 TiNi/Al2024-T4의 피로시험의 결과를 나타낸 것이다. 피로한도인 S-N 선도의 수평부는 일종의 평균적인 관계를 나타낸 것으로 일반적으로 추천되는 스테어케이스

Table. 1 Result of Fatigue limit
(단위 : kgf/mm²)

	V _f =0% R.O.A.=0%	V _f =5% R.O.A.=0%	V _f =5% R.O.A.=10%	V _f =5% R.O.A.=20%
TiNi/Al 2024-T4	11.52	12.1	13.3	12.6
TiNi/Al 6061-T6	8.2	8.4	9.1	8.7

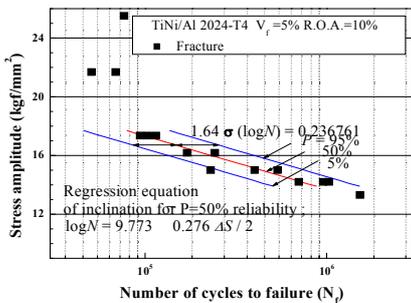


Fig. 5 Confidence limit for finite fatigue life of TiNi/Al2024-T4 (V_f = 5 %, R.O.A. = 10 %)

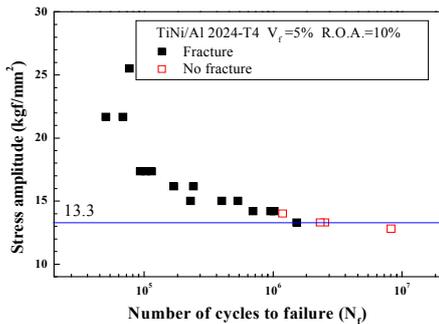


Fig. 6 S-N diagram of TiNi/Al2024-T4(V_f = 5 %, R.O.A. = 10 %)

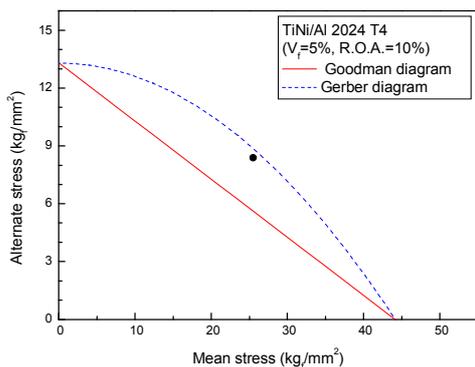


Fig. 5 Goodman-Gerber Diagram of TiNi/Al2024-T4 (V_f = 5 %, R.O.A. = 10 %)

방법을 사용하여 결정한 것이다. 시간강도에 해당하는 경사부는 피로강도의 특정 분위수를 나타내는 P-S-N 선도를 이용하여 파괴확률 P에 대한 설계곡선을 구성하였다. 이 설계곡선은 주어진 응력에서 수명분포의 하한에 형성되고 있다.

그리고 TiNi/Al2024-T4 체적함유율 5%, 압하율 10% 피로시험 결과는 Fig. 5에서 알 수 있듯이 Gerber 선도를 이용하는 것이 적절함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 TiNi/Al2024-T4 및 TiNi/Al6061-T6 후판 복합재료의 내구한도의 신뢰성을 위한 통계적 S-N 선도를 JSME S002 방법에 의하여 평가하였다. 또한 고유기술 분야의 피로시험에 적용할 수 있는 통계적 방법의 우수성을 파악하고 개선된 설계곡선 작성 절차를 제시하여 관리기술의 유용성을 입증한 연구로서 복합재료에 대한 피로시험 자료의 통계적 분석능력과 범위를 제고할 수 있는 기초 연구가 될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 후판 복합재료와 같은 강건성(robustness)을 요하는 피로시험자료의 경우에는 특정자료의 몇 %가 포함되는 하한에 더 관심이 있는데 본 연구는 이를 설정해주는 설계곡선(design curve)을 정량적으로 제시하였다.
2. 전체적으로 시험편의 표면상태는 피로강도에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단되며, TiNi/Al6061-T6의 일부 거친표면은 피로손상의 개시점으로 작용할 수 있지만 최종파손에는 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.
3. 피로강도에서 강화제인 TiNi 합금은 피로수명의 견지에서 볼 때 체적함유율 0%에 비해 5%가 피로강도를 증가시키는 것으로 나타났다.
4. 복합재료의 시간강도에 해당하는 경사부의 피로한도와 신뢰구간에 대한 분산관계는 TiNi/Al 2024-T4의 경우 피로한도가 가장 높은 체적함유율 5%, 압하율 10%일 때 파단수명에 대한 표준편차가 0.23676(신뢰한도 95%)로써 가장 낮다. 한편, TiNi/Al6061-T6의 경우 체적함유율 5%, 압하율 10%일 때 피로한도는 가장 높지만 파단수명에 대한 표준편차도 0.411767(신뢰한도 95%)로 다른 복합재료에 비해 가장 높았다.
5. 피로한도를 인장강도로 나눈 비피로한도를 이용하여 복합재료의 피로강도를 평가해본 결과 TiNi/Al2024-T4의 경우 체적함유율 5%에서 압하율 0%, 10%, 20%일 때 비피로한도는 각각 0.293, 0.307, 0.285로써 일반적인 복합재료의 비피로한도의 경우인 0.25 ~ 0.40과 비교해 볼 때 피로한도가 적정 수준에서 결정되었다.
6. 복합재료의 피로시험의 보다 정확한 신뢰성을 확보하기 위해서는 피로한도 파악에 유용한 스테어케이스 방법의 응력수준 간격과 경사부 설계곡선에 대한 허용구간의 유효성에 관한 연구가 요구된다.

후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-01-03)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. FHawong, J. S. and Lee, H. J., "A Study on the Measurement for the Recovery Stress of Intelligent Composite by Experiment", Transactions of the KSME, Vol. 27, No. 4, pp. 515~523.
2. Jean, R. D. and Hu, C. T., "Shape Memory Effect by Constant-Stress Aging in Ti50.50at.% Ni Alloy", Journal of Material Science, Vol. 29, pp. 449~455.
3. Jin-Kyung Lee, Young-Chul Park, Kyu-Chang Lee, Il-Kook Choi and Joon-Hyun Lee., "Fabrication Process and Reliability Evaluation of Shape Memory Alloy Composite", Journal of the Korean Society For Nondestructive Testing, Vol. 21, no. 6, pp. 634~641.