

인공위성 태양전지판 전개에 사용되는 변형 에너지 힌지의 좌굴특성 실험

⁰허 석*, 꺾문규**

Experiments on Buckling Characteristics of Strain Energy Hinges for Solar Array Deployment

Seok Heo, Moon K. Kwak

Abstract

This research is concerned with the experiments on buckling characteristics of strain energy hinge (SEH) for solar arrays. The dynamic characteristics of the strain energy hinge is very important since it affects the shape and speed of the solar array deployment. The rapid deployment results in overshoot and undesirable residual vibrations. In this study, we carry out a series of buckling experiments to identify the dynamic characteristics of the SEH, which is made of strip measures. Buckling tests were done on the single-plate, double-plate and triple-plate SEH and VSEH. The experimental results show that the SEH has a very complex buckling behavior which can not be coped with theoretically. The modeling problem of the SEH is also discussed.

1. 서론

최근의 인공 위성들은 무게 감소를 위해 태양전지판의 전개에 사용되는 기구를 변형 에너지 힌지 (Strain Energy Hinge, SEH)로 교체하고 있는 추세이다. 국내에서 개발되는 통신위성의 태양판 전개에 SEH가 사용되는 점을 고려한다면 이에 대한 심도있는 연구가 반드시 필요한 실정이다. 따라서 SEH의 동적 특성이 규명되지 않는 한 인공위성 태양전지판의 전개를 예측하는 것은 불가능하며 완벽한 인공위성 태양전지판의 전개 또한 보장되지 못한다. SEH에 대하여 처음으로 문제를 제기한 논문은 Kwak 등[1-4]이 연구한 것으로써 이 논문

에서는 SEH의 간략화 된 모델과 실험 결과를 제시하고 Treetops 소프트웨어를 이용한 수치모사 결과를 보여주고 있다. 본 연구에서는 SEH에 대하여 좌굴실험을 수행하고 동적 특성을 좀더 자세히 규명하는데 그 목적이 있다.

SEH는 얇은 박판으로 이루어진 구조물로서 각각의 박판이 가지는 좌굴 특성에 의하여 동적특성이 결정된다. SEH를 일부러 좌굴시키고 이로부터 태양전지판을 놓을 경우 SEH에 축적된 탄성에너지로부터 전개가 이루어진다. 그러나 좌굴후의 대각 변위부터 전개가 시작하기 때문에 SEH의 동적 특성은 비선형일 수밖에 없으며 따라서 이론적인 모델링은 매우 어렵다.

* 동국대학교 기계공학과 대학원

** 동국대학교 기계공학과 교수

그 동안의 연구 결과를 살펴보면 SEH는 전개 각도에 따라 비선형 강성의 특성을 지니고 있고 특히 좌굴이 발생하는 영역에서의 강성 변화가 매우 심함을 알 수 있다. 좌굴후에서 좌굴전으로 넘어오는 구간에서 심각한 강성의 변화가 발생하기 때문에 SEH에 의한 태양판의 전개는 많은 문제점을 내포하고 있다. 그러나 SEH의 구조 자체가 단순하고 반드시 펴진다는 사실 때문에 단 한번의 실수도 용납되지 않는 우주 공간상에서의 태양판 전개에 매우 유리하게 사용될 수 있다.

SEH의 동적 특성은 인공 위성 태양전지판의 전개에 영향을 미치며 전개 과정에서 위성체에 하중을 전달하므로 이의 정확한 특성 파악과 모델링은 신뢰성 확보를 위하여 필수적이다. 그러나 SEH의 전개 거동은 대변형에 의한 비선형 탄성이론과 좌굴 후 상태에서 좌굴전 상태로의 천이 해석을 필요로 하므로 이론적인 모델링이 쉽지 않다. 또한 전개시의 과도한 관성력은 SEH가 좌굴전 상태에서 좌굴 후 상태로 다시 넘어가는 Overshoot를 유발한다. 태양전지판의 전개가 다 이루어지면 태양전지판은 전체적으로 잔류 진동의 영향을 받게 된다. 이 진동은 인공위성 자체에 전달되어 인공위성에 치명적인 문제점을 야기할 수 있기 때문에 잔류 진동의 제어 문제도 중요한 문제중의 하나이다.

위에서 지적한 바와 같이 SEH를 장착한 인공위성의 태양판 전개는 SEH의 불확실성으로 인해 우주 공간상에서의 전개에 대한 확신을 가지지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 SEH에 관한 다양한 정적 및 동적 실험을 수행하여 SEH에 관한 정확한 모델을 유도하고자 한다.

2. SEH의 Buckling 실험

인공위성의 태양판 전개에 사용되는 SEH는 줄자에 사용되는 서로 반대의 곡률을 갖는 얇은 패널들이 간격을 두고 위 부분과 아래 부분으로 나뉘어져 있다. Fig. 1은 VSEH를 보여주고 있다. 좌

[2,3]은 SEH에 대하여 UTM을 이용한 좌굴실험을 수행하고 이를 바탕으로 1차원 비선형 등가 스프링으로 치환된 SEH 모델을 제시하였다. 기존의 SEH는 급격한 전개로 인하여 잔류 진동이 발생하는데 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 좌 등[4]이 점탄성 변형 에너지 힌지(VSEH)를 제안하였다. VSEH를 사용하면 좌굴 모멘트를 감소시키고 감쇠를 증가시켜 급격한 전개를 방지하고 잔류진동을 억제하게 되어 유용한 태양판 전개 장치로 사용될 수 있음을 밝혔다[4].

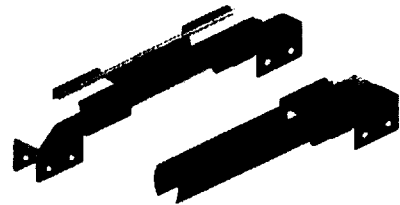


Fig. 1 Structure of SEH

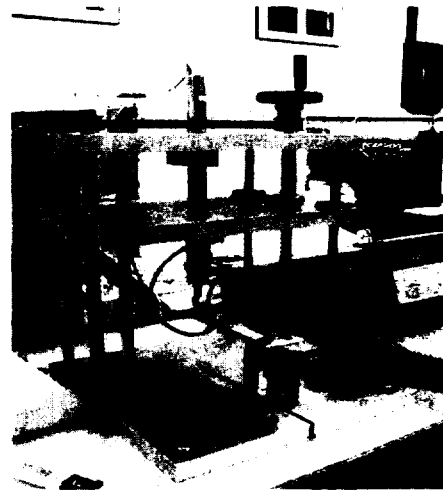


Fig. 2 Testing Apparatus for the SEH

SEH의 각변화에 대한 강성의 변화를 계속하기 위하여 SEH의 한쪽을 고정시키고 반대쪽에 힘을 가

하였다. Fig. 2는 Load Cell과 LVDT를 이용하여 SEH의 강성을 구하는 하드웨어 구성을 보여주고 있다.

이와 같은 장치를 가지고 LVDT에서 구한 변위와 Load Cell로부터 가해진 힘을 제측하여 선도를 구하였다. 시험 중 관찰된 것은 단일 SEH의 중앙에 지지점이 없을 경우 전단 거동이 먼저 나타나는 것이다. 순수 굽힘에 의한 실험 결과는 좌굴지점이 정확히 존재하는데 비해 전단에 의한 실험 결과에서는 좌굴이 명확하지 않다. 따라서 순수한 굽힘 거동에 대한 실험을 수행하기 위하여 중앙을 지지하여 전단 거동을 방지하였다. Fig. 3은 1점 SEH의 순수 굽힘의 강성 그래프를 나타낸 것이다. 그림에서 보이듯이 좌굴전과 좌굴후 강성의 차이가 확연함을 알 수 있다. 좌굴전에서는 강성이 크나 좌굴후에서는 강성이 매우 작아짐을 볼 수 있다. Fig. 3에서 보이는 두 개의 그래프중 위의 것은 SEH에 힘을 가한 경우이고 아래 것은 전개가 될 때 즉 가한 힘을 제거했을 때의 결과 그래프이다. 태양전지판의 전개에 있어 지금까지의 연구를 보면 대부분 힘을 가한 경우만 가지고 해석을 하였으나 힘이 제거 될 때의 경우가 전개 시에 얼마나 중요한 것인지를 인식할 수 있다. 즉 그래프 중 아래 것은 태양전지판의 초기 조건에서부터 전개가 일어날 때의 경우이고 그래프중 위의 것은 관성력에 의해 SEH가 다시 접혀질 경우에 해당된다.

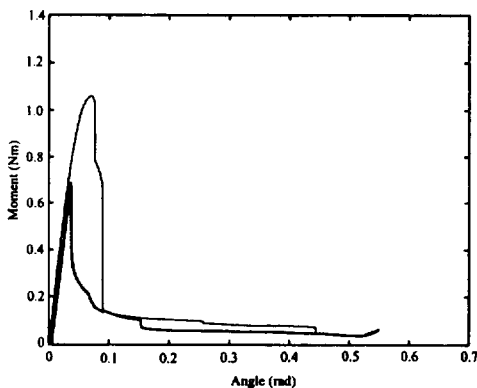


Fig. 3 Torque versus Angle for the 1 Plate-SEH with a Central Support

Fig. 4와 Fig. 5는 2점 SEH, 3점 SEH의 순수 굽힘의 강성 그래프를 나타낸 것이다.

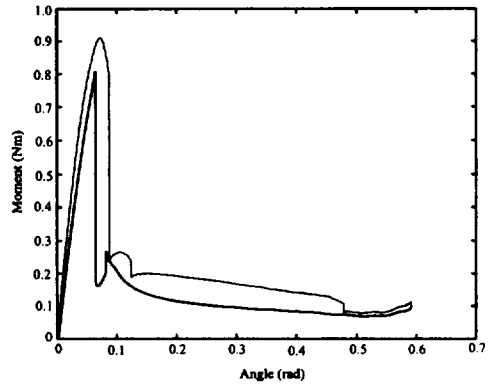


Fig. 4 Torque versus Angle for the 2 Plate-SEH with a Central Support

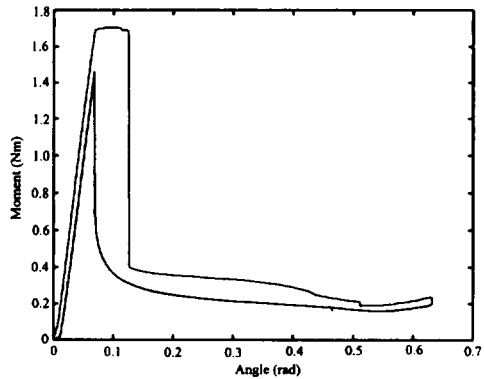


Fig. 5 Torque versus Angle for the 3 Plate-SEH with a Central Support

Fig. 4에서 보듯이 2점인 경우 1점의 경우보다 최대 좌굴 모멘트가 위의 곡선에서는 감소했지만 아래의 곡선에서는 상승한 것을 알 수 있다. 또한 0.1 rad 부근에서의 변화가 심한 것을 볼 수 있다. 이것은 좌굴후 중앙지점의 꺾임상태가 고정단으로 이동하면서 발생하였다. Fig. 5의 3점인 경우 위의 곡선과 아래 곡선 모두 최대 좌굴 모멘트가 증가하였지만 위의 곡선의 최대모멘트에서의 지연현상에서 볼 때 좌굴전과 좌굴후의 최대 모멘트 값이 거의 같은 부근이라 보여진다.

본 연구에서 순수 굽힘에 의한 SEH의 강성을 고려한 이유는 태양판이 전개 될 때 회전 관성에 의하여 SEH가 순수 굽힘 운동을 하고 SEH에 Overshoot가 발생할 때도 굽힘의 작용이 크기 때문이다. Fig. 3~5에서 보면 실험상 30~35 ° 까지 밖에는 강성을 알 수가 없다. 따라서 태양전지판 전개 시에는 대변형 강성도 필수적으로 알아야 만 한다.

3. VSEH

태양전지판 전개가 인공위성 본체에 영향을 주지 않기 위해서는 태양전지판 전개장치인 SEH가 태양전지판을 가급적 서서히 전개하는 것이 바람직하다. 급격한 전개는 Overshoot와 잔류진동을 유발하기 때문에 되도록이면 피해야 한다. 그러나 일반적인 SEH는 태양전지판 전개를 가속화시키는 경향이 있으며 Overshoot로 인한 태양전지판의 전개 후의 잔류 진동을 유발할 가능성이 있다. 따라서 이런 문제점을 해결하기 위하여 팍 등[4]은 Viscoelastic Material을 삽입한 새로운 형태의 SEH를 고안하게 되었다. 본 연구에서 고안한 SEH는 보다 부드러운 전개와 Overshoot를 줄여 위성체에 전달하는 잔류 진동을 줄일 수 있다는 것을 증명하였다.

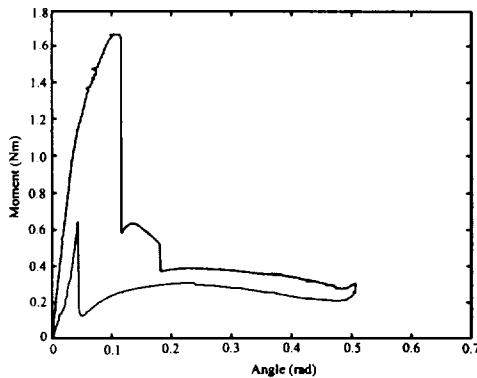


Fig. 6 Torque versus Angle for the VSEH with a Central Support

Fig. 6은 2점의 패널사이에 점탄성 재료를 부착하

여 중앙에 지지점을 두고 강성을 조사하였다. Fig. 4와 비교하였을 때 위곡선의 최대 좌굴 모멘트 값은 상승하였지만 아래곡선의 최대 모멘트값은 오히려 감소하였다. 즉 VSEH에 가한 힘을 제거 할 때 좌굴 모멘트가 SEH에 비하여 작고 좌굴 위치 근처에서 모멘트 변화가 좀더 부드럽게 진행됨을 알 수 있다. 이것은 태양판 전개시 강성의 급격한 변화가 적은 VSEH가 좀더 부드러운 전개를 보장할 수 있음을 말해주고 있다. 하지만 좌굴후의 모멘트 값은 점차 줄어들지 않고 지속되는 경향을 보이고 있다.

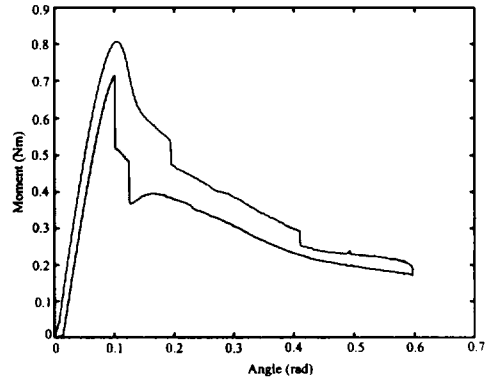


Fig. 7 Torque versus Angle for the VSEH without a Central Support

Fig. 7은 중앙 지지점이 없는 경우이다. Fig. 6과 비교할 때 완전히 다른 좌굴특성을 보이는 것을 알 수 있다. 만약 VSEH에 가해진 전단력이 굽힘 모멘트보다 클 경우 태양전지판은 회전하기 보다는 전단운동을 하게 될 것이다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 1점, 2점, 3점 SEH의 이론적인 모델링을 위하여 SEH의 좌굴 실험을 수행하여 SEH의 강성 특성을 조사하였다. 좌굴실험 결과 SEH는 비선형 강성특성을 나타냄을 알 수 있었고 하중이 제거되는 전개시의 동적 특성이 하중이 가해지는 경우와 다르다는 것을 알 수 있었다. 보다 만족스러운 전개를 얻기 위하여 SEH의 Strip 사이에 점

탄성 재료를 삽입한 새로운 형태의 VSEH에 대하여 좌굴시험을 통하여 동적 특성을 조사하였다. 본 연구를 통하여 VSEH는 태양판 전개시 부드러운 전개를 보장하고 따라서 Overshoot의 위험이 적으며 감쇠의 증대로 인하여 잔류진동이 저감된다는 장점이 있다.

본 연구에서 얻어진 SEH의 동특성 곡선은 1차원 등가 비틀스프링으로 치환하는데 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 등가 비틀 스프링으로 치환된 SEH와 강체로 간주된 태양판에 대한 이론 모델을 토대로 전개 예측 프로그램이 구축되었으며 실험 결과와 비교될 예정이다.

후 기

이 논문은 미국 공군 연구소 AFOSR Grant AOARD-99-4008의 지원을 받아 수행되었다. AOARD의 Dr. Thomas Kim과 Dr. Koto White에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. M. K. Kwak, D. Sciulli, W. T. Schlagel, R. M. Martin, and Alok Das, "Deployment Dynamic Analysis and Experiments on ACTEX-II Array Structure", Proceedings of the 35th SDM Conference.
2. 라 완규, 곽 문규, "변형에너지 힌지를 갖는 인공위성 태양판 전개모델 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 대전, 1998년 11월, pp. 280-284.
3. 곽문규, 라완규, 윤광준, "변형에너지 힌지를 갖는 인공위성 태양판의 전개 운동 해석", 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, 서울, 1998년 11월, pp. 269-272.
4. 곽문규, 라완규, 윤광준, "점탄성 변형에너지 힌지를 이용한 인공위성 태양판 전개 장치의 개발", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 대전, 1998년 11월, pp. 285-289.