

대구경 주반사경의 접착 특성에 관한 연구

김현중[†] · 서유덕^{*} · 박상훈^{*} · 윤성기^{*} · 이승훈^{**} · 이덕규^{**} · 이응식^{**}

A Study on the Adhesive Properties of Lightweight Primary Mirror

Hyun-Jung Kim, Yu-Deok Seo, Sang-Hoon Park, Sung-Kie Youn, Seung-Hoon Lee, Deog-Gyu Lee and Eung-Shik Lee

Key Words : adhesive (접착제), shear modulus (전단계수), single lap adhesively bonded joint (단일 겹치기 접착 조인트)

Abstract

The optical performance of the mirror for satellite camera is highly dependent on the adhesive properties between the mirror and its support. In order to design a mirror with high optical performance, the mechanical properties of adhesives should be well defined. In this research, the mechanical properties of three kinds of space adhesives are studied. In case of the materials which show nearly incompressible behavior such as space adhesives, it is important to measure shear modulus which governs deviatoric stress components. Shear moduli of the adhesives are determined by using single lap adhesively bonded joint. For the shear tests, several points have been selected from -20°C to 55°C which is operating temperature range of the adhesive. The shear modulus of each adhesive is expressed as a function of temperature. Characteristics of the adhesives are discussed regarding their temperature sensitivity. The analysis results of RMS wavefront error w.r.t shear modulus are presented.

1. 서론

인공위성 주반사경의 접착 특성은 반사경의 변형에 지대한 영향을 미치고 온도에 따라 그 특성이 민감하게 변하기 때문에 고성능의 반사경을 설계하기 위해서는 반사경 제작 이전에 접착특성을 고려한 반사경 변형의 정확한 구조해석이 필요하다. 이를 위해 접착제의 접착 특성에 관한 정확한 자료가 요구되고 실험을 통한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 우주에서 널리 사용되어 성능이 입증된 세 종의 접착제를 선별하여 접착제의 기계적 특성을 규명한다.

우주용 접착제와 같이 포와송비가 0.5 에 근접한 비압축성에 가까운 거동을 보이는 재료의 경우, 체적 완화 함수(dilatational relaxation function)의 분

모는 상당히 작은 값을 갖는다. 따라서 탄성계수를 정확히 측정하여 대입하였다 하더라도 체적 변형 부분의 항 자체가 이미 상당히 큰 값을 갖기 때문에 탄성계수의 변화폭을 제대로 반영하기가 어렵다. 따라서 점탄성 재질의 거동을 잘 표현하기 위해서는 편차응력 성분을 지배하는 전단계수의 정확한 측정이 필요하다.

본 연구에서는 우주용 접착제로 많이 사용되고 있는 에폭시(epoxy) 계열의 접착제 A, B, 폴리우레탄(polyurethane) 계열의 접착제 C 에 대해 온도에 따른 기계적 특성을 규명하고, 해석을 통해 접착제의 전단계수에 따른 반사경 RMS 오차의 경향을 파악한다. 규명하고자 하는 접착제의 기계적 특성은 전단계수로 탐재체 내부 운용온도 범위인 -20°C에서 55°C내 8 개 온도점을 선택하여 시험을 수행한다. 세 접착제의 기계적 특성을 비교, 분석하여 각 접착제의 기계적 특성이 반사경의 변형과 광학 성능에 미치는 영향을 알아본다. 접착특성을 고려한 반사경 해석을 통해 각 접착제가 지지부의 접착제로 사용하였을 경우에 대해 안정성 여부를 파악한다.

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : kim1392@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3074 FAX : (042)869-3095

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국항공우주연구원 광학탐재체 그룹

2. 전단 시험 절차

2.1 전단 시험 시편 제작 절차

본 연구에서는 우주용 접착제의 전단계수 측정법으로 단일겹치기 접착 조인트(single lap adhesively bonded joint)를 이용한 전단 시험법을 사용한다. 이에 관해서는 ASTM D5656, D3983 에 기술되어있다. 이 방법은 두꺼운 접착물(thick adherend)을 사용하기 때문에 peel strength 에 의한 영향을 최소화할 수 있다. 시험에 사용된 시편의 규격은 ASTM D5656, D3983 을 참고하여 시험장비에 적합하게 수정하여 사용하였다. 접착 두께는 $0.5\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ 로 하였고 접착물로 강(steel)시편을 사용하였다. 시편의 형상은 Fig. 1 과 같다.

강-강 시편의 정렬을 맞추고 접착 두께를 일정하게 유지하도록 하기 위해 Fig. 2 와 같은 시편 제작용 금형을 고안하였다. 금형은 상판(top mold), 중판(middle mold), 하판(bottom mold) 3 개의 판으로 구성된다. 상판은 시편의 덮개 역할을 하며 중판은 접착 두께를 결정하는 역할을 한다. 두 개의 강 시편 접착부 사이의 틈이 0.5mm 가 되도록 강 시편과 중판을 제작한다. ‘ㄱ’ 자 형태의 강 시편 접착부의 높이가 중판의 두께와 같고, ‘ㄴ’ 자 형태의 강시편의 접착부가 중판의 두께에서 접착두께만큼 낮게 위치시킴으로써 접착 두께가 일정한 값을 갖도록 하였다. ‘ㄱ’ 자 형태의 강 시편과 ‘ㄴ’ 자 형태의 강 시편 사이의 공백을 채우는 테프론(teflon)은 비접착성 특성을 갖으며, 충분한 양

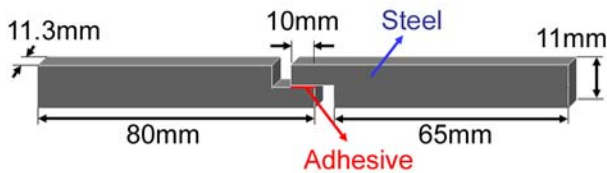


Fig. 1 The shape and size of the shear test specimen

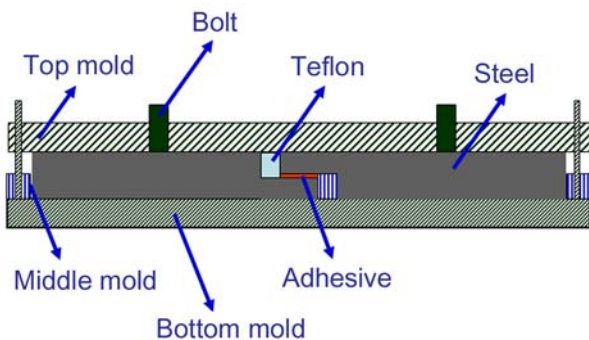


Fig. 2 Schematic diagram of molds

의 접착제 투여시 넘친 접착제가 시편 옆으로 흘러나오도록 하는 역할을 한다.

하나의 금형으로 10 개의 시편을 제작할 수 있도록 하였는데, 상판만 이용하여 시편을 압축한다면 강 시편 간 제작오차로 인해 최악의 경우 2 개의 시편만 압축력을 받을 수 있다. 시편이 충분한 양의 압축력을 받지 않는다면 강-강 시편이 제대로 접착되지 않아 시편 불량률이 발생한다. 이러한 시편 제작상의 불량률을 감소시키기 위해 상판과 중판, 하판을 체결하고 상판을 볼트로 뚫어 볼트를 죄임으로써 볼트가 각각의 강 시편에 직접 압축력을 가할 수 있게 금형을 고안하였다.

2.2 전단 시험 절차

시험기기는 INSTRON 사의 전단 시험기기를 사용하였으며 변형률은 신장계(extensometer)를 이용하여 측정하였다. Fig. 3 는 신장계를 전단 시험 시편에 부착하였을 때의 사진을 나타낸다. 탑재체 운용온도 범위인 -20°C 에서 55°C 범위내 -20°C , -10°C , 0°C , 10°C , 20°C , 30°C , 40°C , 55°C 의 8 개 온도 점에서 전단 시험을 수행하였으며 항온 시간은 20 분으로 하였다. 각 온도지점당 최소 10 개 이상의 시편을 사용하였으며 시험기기로부터 받는 데이터는 초당 20 개로 설정하였다. ASTM D3983 에는 치구작동속도(crosshead speed)를 분당 접착두께만큼의 속도로 하도록 제시되어있다. 본 과제에서는 시편의 접착두께가 0.5mm 이므로 치구작동속도를 $0.5\text{mm}/\text{min}$ 로 하였다.

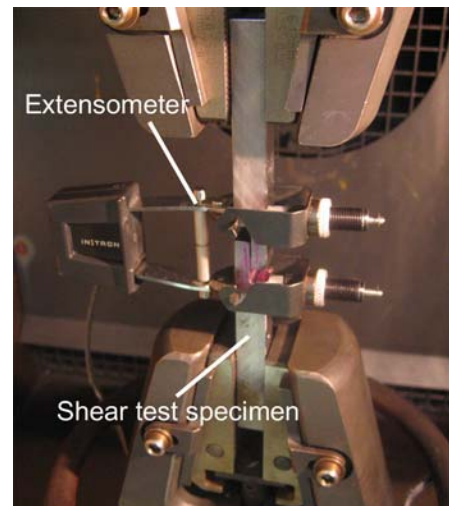


Fig. 3 Shear test setting with extensometer

3. 전단 시험 결과

3.1 에폭시 계열의 접착제 A

Fig. 4 는 20°C 에서 접착제 A 의 전단응력-전단변형

를 그래프(shear stress-shear strain)를 나타낸다. 일반적으로 전단계수는 전단응력-전단변형률 그래프에서 선형구간을 찾아 그 기울기로 계산된다. 인공위성 카메라에 사용되는 접착제의 변형은 수십마이크로 미터 수준에 불과하므로 접착제의 변형은 초기의 극히 미세한 부분에서 변형이 일어난다고 할 수 있다. 이를 고려하여 1% 변형률 범위까지 선형 맞춤하여 전단계수 값을 구하였다. Fig. 5 는 대표적으로 시편하나에 대해 20°C에서 접착제 A의 선형맞춤 결과를 나타낸다. 접착제 A의 온도에 따른 전단계수를 표 1에 나타내었다. 이를 적절한 곡선맞춤 함수를 선택하여 전단계수를 온도

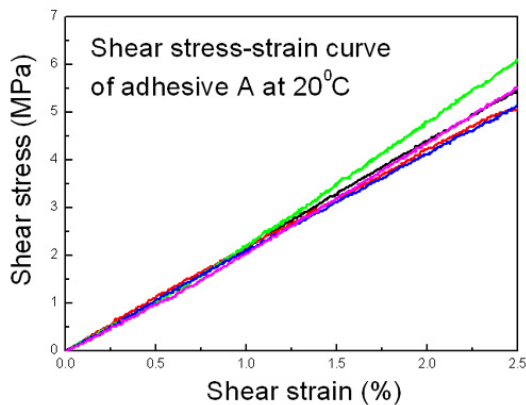


Fig. 4 Shear stress-strain curve of adhesive A at 20°C

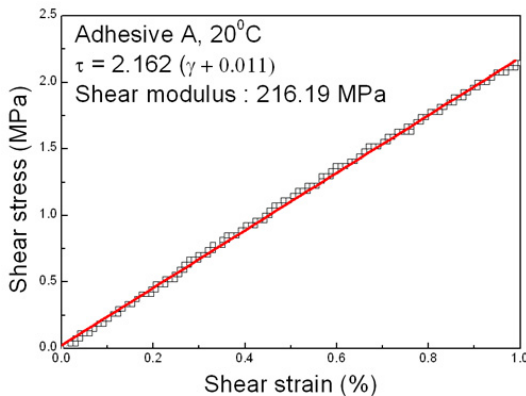


Fig. 5 Linear fitting of shear stress-strain curve at 20°C : adhesive A

Table 1 Shear modulus of adhesive A

Temp.	Shear modulus (MPa)	Temp.	Shear modulus (MPa)
-20°C	400.88	20°C	213.78
-10°C	365.45	30°C	192.63
0°C	296.59	40°C	154.87
10°C	279.82	55°C	73.42

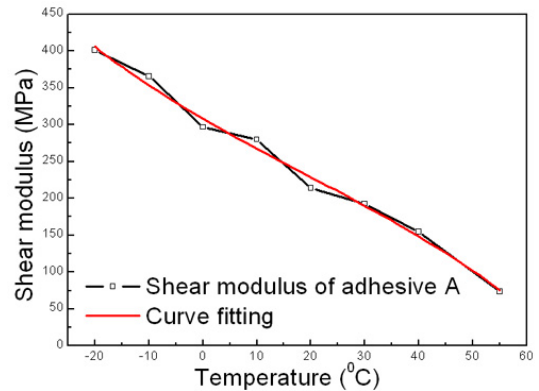


Fig. 6 Shear modulus of adhesive A with respect to temperature

에 따른 식으로 표현하면 식(1)과 같고, 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다.

$$G = 308.097 - 4.256T^2 + 0.023T^3 - 0.0004T^4 \quad (1)$$

여기서 G 는 전단계수(MPa), T 는 온도(°C)를 의미한다.

3.2 에폭시 계열의 접착제 B

접착제 B도 접착제 A와 마찬가지로 8개의 온도점에서 전단 시험을 수행하였다. 접착제 B가 어떠한 거동을 보이는지 알아보기 위해 Fig. 7에 20°C 온도 환경에서 전단응력-전단변형률 그래프를 나타내었다.

Fig. 4에 보인 바와 같이 접착제 A는 선형거동을 보이는 반면에 접착제 B는 고무와 같은 유연한 재료특성으로 인해 비선형 거동을 보임을 알 수 있다. 이와 같이 비선형성이 큰 거동을 보이는 재료는 식(2)와 같이 지수함수형태로 곡선 맞춤하면 재료의 물성을 표현할 수 있다.

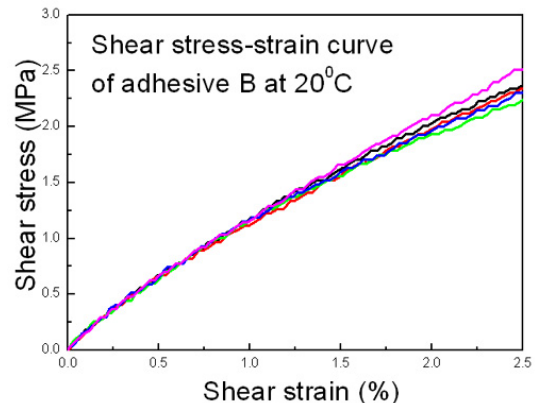


Fig. 7 Shear stress-strain curve of adhesive B at 20°C

$$\tau = a\gamma^b \quad (2)$$

여기서 τ 는 전단응력, γ 는 전단변형률을 나타낸다. 반사경 접착부에 사용되는 우주용 접착제는 초기의 극히 미세한 구간에서 변형이 일어난다. 접착제 초기의 전단계수를 근사적으로 추출하는 방법은 식(3)과 같이 식(2)를 미분하여 원점에서의 기울기로 전단계수를 추출하는 방법이 있다.

$$\tau' = ab\gamma^{b-1} \quad (3)$$

대표적으로 하나의 시편에 대해 10°C에서 접착제 B의 곡선맞춤한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 시험으로부터 얻은 계수 a 와 b , 식(3)을 통해 얻은 전단계수 값을 표 2에 정리하였다. 전단계수와 온도의 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 9와 같고 적절한 곡선 맞춤함수를 선택하여 전단계수를 온도에 대한 함수로 나타내면 식(4)와 같다.

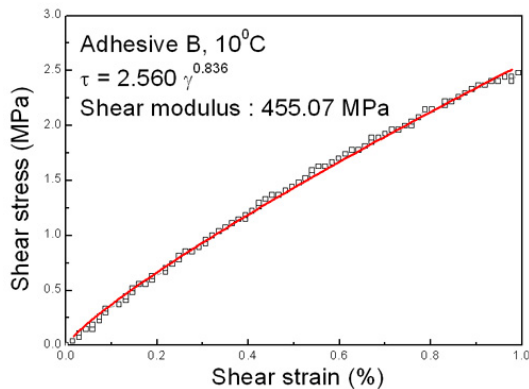


Fig. 8 Exponential fitting of shear stress-strain curve at 10°C : adhesive B

Table 2 Coefficient a , b and shear modulus of adhesive B

Temp.	a	b	Shear modulus (MPa)
-20°C	5.559	0.897	802.02
-10°C	4.401	0.889	651.25
0°C	5.199	0.999	521.75
10°C	2.466	0.821	459.52
20°C	1.165	0.829	212.04
30°C	0.285	0.749	67.58
40°C	0.162	0.811	30.84
55°C	0.128	0.853	21.51

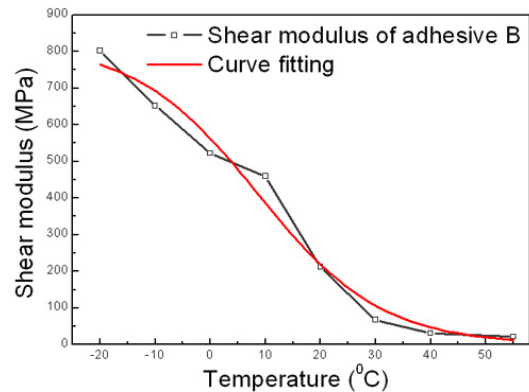


Fig. 9 Shear modulus of adhesive B with respect to temperature

$$G = \frac{822.714}{1 + e^{0.0894(T-8.645)}} \quad (4)$$

여기서 G 는 전단계수(MPa), T 는 온도(°C)를 의미한다.

3.3 폴리우레탄 계열의 접착제 C

시험방법은 접착제 A, B와 동일하다. 접착제 C의 경우 폴리우레탄 계열의 접착제이므로 다른 재료들에 비해 재료가 상당히 유연하여 강성이 상대적으로 낮은 값을 갖는다. Fig. 10은 20°C에서 접착제 C의 전단응력-전단변형률 그래프를 나타낸다. 접착제 C는 Fig. 10에 보인 바와 같이 선형거동을 보이므로 선형맞춤하여 전단계수를 측정하였다.

시험으로부터 얻은 온도에 따른 전단계수를 표 3에 정리하였다. 이를 적절한 곡선맞춤 함수를 선택하여 온도에 따른 전단계수를 식으로 표현하면 식(5)와 같고 그래프는 Fig. 11과 같다.

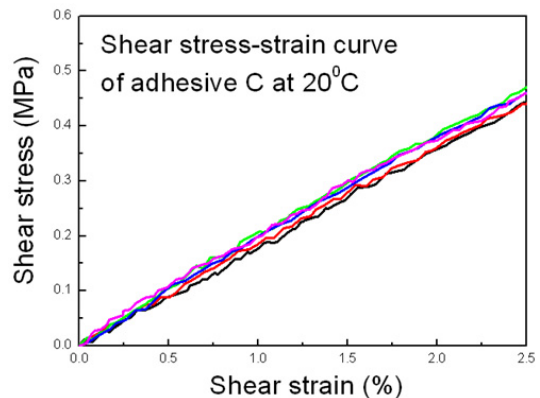


Fig. 10 Shear stress-strain curve of adhesive C at 20°C

Table 3 Shear modulus of adhesive C

Temp.	Shear modulus (MPa)	Temp.	Shear modulus (MPa)
-20°C	30.25	20°C	17.74
-10°C	27.91	30°C	14.65
0°C	24.61	40°C	13.43
10°C	20.74	55°C	11.89

$$G = -0.827 + 24.536 \times e^{-\frac{T}{76.336}} \quad (5)$$

여기서 G 는 전단계수(MPa), T 는 온도(°C)를 의미한다.

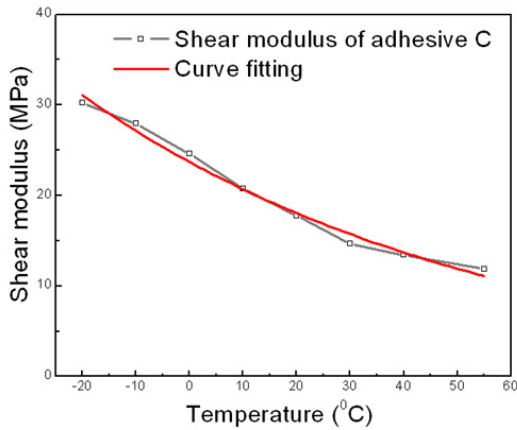


Fig. 11 Shear modulus of adhesive C with respect to temperature

3.4 접착제 A, B, C 의 전단계수 비교

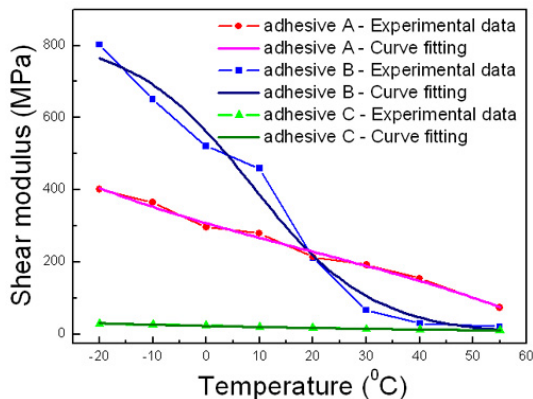


Fig. 12 Comparison of shear modulus : A, B and C

전단계수 비교를 위해 Fig. 12 에 세 접착제의 온도에 따른 전단계수 그래프를 나타내었다. 접착제 B 는 저온에서 800MPa 정도로 강성이 크지만 고온으로 갈수록 전단계수가 급격히 감소하는 경향을 보인다. 반면 접착제 A 는 저온에서 B 보다

강성이 작지만 온도에 따른 변화폭은 B 보다 작아 고온에서는 B 보다 높은 강성을 갖는다. 접착제 C 는 저온에서 고온으로 갈수록 전단계수가 감소하기는 하나 그 수치가 수십 MPa 정도를 유지하여 다른 접착제에 비해 온도에 따른 전단계수 변화폭이 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 온도 민감도(temperature sensitivity)를 본다면 접착제 B > 접착제 A > 접착제 C 의 순이다.

Primer 는 접착물 간의 접착력을 강화시키기 위해 접착제 투여이전에 접착물에 바르는 표면코팅 시약으로 대구경 반사경과 반사경 지지부 접착시 반드시 필요하다. 전단계수 측정 시험 과정 중 시편을 제작하는 과정에서 primer 를 바르는 경우와 그렇지 않는 경우에 대해 접착제의 접착력이 확연히 차이가 남을 알 수 있었다. Primer 를 바르지 않게 되면 시편 불량률이 높고 그림에 시편을 물릴 때 접착부가 쉽게 파단되기 때문에 primer 를 바르지 않는 시편의 경우는 시험을 수행할 수 없었다. 따라서 primer 가 접착부의 접착 특성과 접착력에 크게 영향을 미친다고 판단된다. 또한 실제 접착 환경은 상당히 얇은 두께에 전단력이 가해진다. 따라서 반사경 지지부의 접착특성은 접착제의 순수 강성 외에 primer 에 의한 접착효과, size effect, 접착제와 primer 의 상호 화학작용 등 추가적인 변수에도 영향을 받는다. 이와 같은 관점에서 본 연구에서 채택한 단일접착기 조인트 접착 시험법은 실제 반사경의 제작환경과 잘 부합하며 시험으로부터 얻은 전단계수는 상기에서 언급한 추가 변수를 고려해서 얻은 결과이므로 실제 반사경의 제작 환경을 반영한 물성치라고 판단된다.

3.5 접착 특성을 고려한 반사경 지지부 해석

본 연구실에서 기존에 설계한 바 있는 partially open-back mirror 타입 반사경 시스템을 Fig. 13 에 나타내었다. 시험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 우주용 접착제의 접착 특성이 대구경 주반사경의 광학적 성능에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 실제 마운트

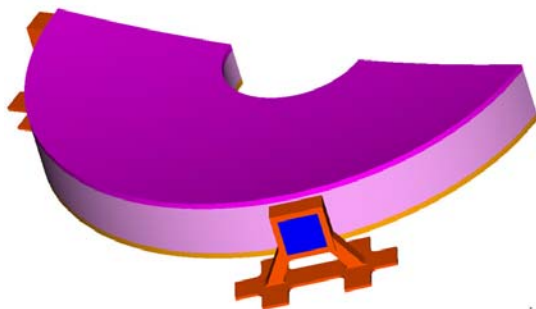


Fig. 13 The light-weight mirror with bipod flexure considering adhesive parts

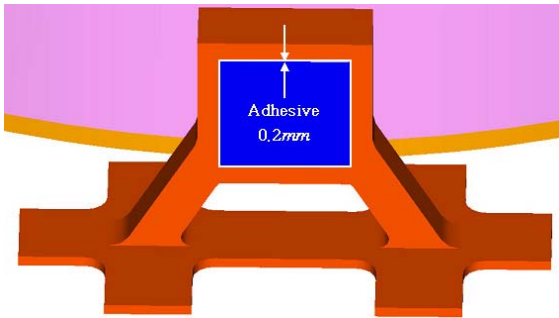


Fig. 14 The mirror system with an adhesive

를 주반사경에 접착시킬 때 접착면의 두께가 0.2mm 이므로 실제 접착 조건과 동일하게 두께를 0.2mm로 모델링하였다.(Fig. 14) 자중은 광축에 수직인 방향으로 작용한다고 가정하였고 반사경 재료는 제로더(zerodur)로, 마운트 재료는 인바(invar)로 모델링 하였다.

접착제의 재료 상수는 온도에 따라 급격하게 변할 수 있으며 이러한 변화가 반사경의 광학면 RMS 파면오차에 영향을 미친다. 반사경 시스템의 해석을 수행하여 접착제의 전단계수 변화에 따른 광학면 RMS 파면 오차의 경향을 파악하였다. Fig. 15 는 전단계수에 따른 광학면의 RMS 파면 오차 결과를 나타낸다. 실험으로부터 탐재체 운용온도 범위내에서 접착제 A, B, C의 전단계수가 가질 수 있는 범위를 얻었으므로 이 범위에 따른 RMS 파면오차를 정사각형으로 도시하였다. 운용 온도 범위 내에서 접착제 A와 B를 사용한 경우 모두 광학 성능 요구 조건인 $\lambda/20$ 를 만족시킴을 알 수 있다. 접착제 A의 경우 온도 변화에 따라 전단계수의 변화폭이 크지 않고 모든 온도에서 $\lambda/30$ 수준의 광학 성능을 유지하는 것으로 확인되었다. 반면에 접착제 B의 경우 기계적 특성이 온도 변화에 매우 민감하여 광학면 RMS 오차의 폭이 상대적으로 크게 나타났다. 접착제 C의 경우 유연

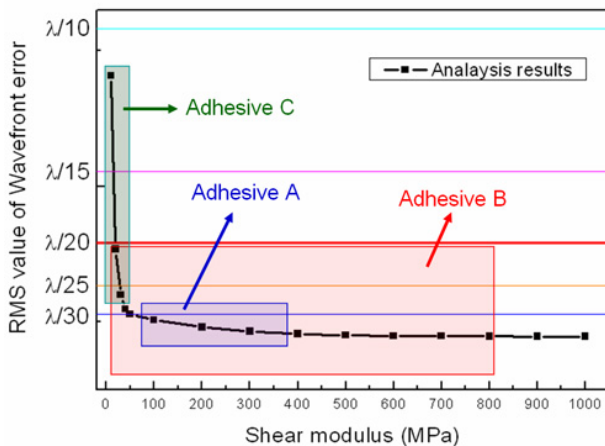


Fig. 15 RMS wavefront error with respect to shear modulus of the adhesives

한 재료 특성으로 고온에서 반사경 광학면의 RMS 파면오차가 다소 크게 나타나 광학 성능의 안정성을 보장할 수 없음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 반사경 지지부의 접착 특성 연구를 위해 접착제의 기계적 물성을 규명하였다. 우주용 접착제는 점탄성 재료와 같이 비압축성에 가까운 거동을 보이므로 편차응력 성분을 지배하는 전단계수의 정확한 측정이 필요하다.

전단계수 측정법으로 단일접지기 접착 조인트 시험법을 사용하였으며 반사경의 운용 온도 범위인 -20°C 에서 $+55^{\circ}\text{C}$ 내 8 개 온도점에서 에폭시 계열의 접착제 A, B, 폴리우레탄 계열의 접착제 C에 대해 전단 계수를 측정하였다 시험을 통해 규명한 전단계수는 실제 반사경의 구동환경과 잘 부합하는 재료 특성으로 판단된다.

시험 결과를 바탕으로 접착특성을 고려한 반사경 구조해석을 수행하였다. 기 설계된 반사경 시스템에서 전단계수가 수십 MPa 정도의 값을 갖으면 반사경 RMS 파면오차가 광학성능 요구조건($\lambda/20$)보다 크게 나와 광학 성능의 안정성을 보장할 수 없었고, 접착제 A와 B의 경우 모든 운용온도 범위에서 광학성능 요구 조건을 만족시켰다. 이와 같은 일련의 과정을 통해 반사경의 하중 및 온도 환경, 재료 등 반사경의 성능에 영향을 미치는 다양한 요인들을 면밀히 검토할 수 있으며 이에 맞는 적합한 접착제를 선별할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원(KARI)의 ‘다목적실용위성 3 호 탐재체 개발사업’에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) K.-S. Park, J.-H. Lee and S.-K. Youn, 2005, "Lightweight mirror design method using topology optimization," Optical engineering, Vol. 44, pp. 053002.
- (2) K.-S. Park, S.-Y. Chang and S.-K. Youn, 2003, "Topology optimization of the primary mirror of a multi-spectral camera," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 25, No. 1, pp. 46-53.
- (3) Uhm, T. K., Park, K.S., Cho, J. H., Lee, W. S., Lee, J. H., Youn, S. K., Lee, E. S., Woo, S. H., Lee, S. H. and Paik, H. Y., "Design of Flexure Mounts for Satellite Primary Mirrors", Optical Society of Korea Summer Meeting, 2003, pp. 138~139.