

광학정반용 에폭시 접착제 개발을 위한 실험적 연구

An Experimental Study for the Development of Epoxy Adhesives for Optical Top

길 형 균* · 윤 석 원* · 김 광 산**

Hyeong gyeun Gil, Seok Weon Youn and Kwang San Kim

(2010년 4월 28일 접수 ; 2010년 6월 10일 심사완료)

Key Words : Compliance(컴플라이언스), Dynamic Deflection Coefficient(동적변형계수), Epoxy(에폭시), Filler(충진제), Modal Test(모달시험), Optical Top(광학정반)

ABSTRACT

Optical tables provide a platform for the establishment and test of measurement systems which use Laser. Therefore, not only static characteristics such as surface flatness, static stiffness and etc. but dynamic response characteristics is very important design parameter. The dynamic stiffness is generally estimated through the modal test, and compliance is used as a representative performance standard. Recently there is an example of defining the dynamic deflection coefficient and using it as a new performance standard of the dynamic stiffness, but it is not generalized yet in industry. In this study, we verify the validity of existing DDC calculus by making an experiment on granite. And for improvement in damping performance of optical tables, we are going to evaluate the effect of fillers on the compliance, then develop an epoxy adhesive based on the result of this experiment.

1. 서 론

빛의 간섭성을 이용하는 초정밀 광학 측정시스템들이 올바른 성능을 발휘하기 위해서는 바닥에서 올라오는 진동을 효과적으로 차단시켜야 할 뿐만 아니라 정반 자체의 공진에 의한 변위발생을 최소화할 수 있는 시스템을 사용해야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 개발된 제품을 광학테이블(optical table)이라 부른다. 광학테이블은 프레임과 정반 사이에 공기스프링을 배치하여 바닥으로부터 전달되는 진동을 차단시킨다. 그리고 정반은 초기 석정반을 대체하여 점탄성재료에 의해 감쇠 처리된 허니컴

(honeycomb) 구조의 광학정반(optical top)이 주로 사용되고 있다. 광학테이블 기술의 선두 기업은 미국의 TMC(T)사와 Newport(N)사로서 오랜 경험에 기초한 많은 노하우(know-how) 뿐만 아니라 관련 이론의 개발을 통하여 세계시장의 기술 선점을 주도하며 서로 경쟁하고 있다^(1,2). 국내업체의 경우 대일시스템을 필두로 여러 업체에서 광학테이블을 제작·공급하고 있지만 대부분 경험에 의존한 제작기술을 바탕으로 하고 있기 때문에 경쟁력의 한계를 경험하고 있는 실정이다. 게다가 광학정반은 정강성 뿐만 아니라 동강성이 매우 중요한 설계인자로서 감쇠처리 기술 및 제작 공정기술에 따라 성능이 크게 좌우된다.

광학정반의 동적 성능은 보통 모달시험(modal testing)에 의한 컴플라이언스 곡선(compliance curve)으로부터 평가하고 있다. 최근에는 동적변형계수(dynamic deflection coefficient : DDC)를 정의하여 성능 지표으로써 사용하고 있기도 하지만 이것은

† 교신저자; 정회원, (주)대일시스템 진동제어연구소
E-mail : waycon67@empal.com
Tel : (031)339-3375, Fax : (031)339-3376

* (주)대일시스템

** 정회원, (주)대일시스템

아직 산업계에서 일반화되지 않았다.

점탄성재료의 동특성 평가와 관련하여 많은 연구 결과들이 있으며, 신수현 등은⁽³⁾ 표준 시험방법에 의한 파라미터 추출과 관련한 체계적인 연구를 통하여 올바른 성능평가의 지침을 제시하고 있으며, 최현 등은⁽⁴⁾ 점탄성재료의 감쇠특성 평가를 진행하면서 파라미터 추출, 물리적인 의미 등을 기술하며 올바른 측정을 위한 방향을 제시하고 있다. 또한 이 우식 등은⁽⁵⁾ 모드 해석법을 통해 감쇠 처리된 시편에 대하여 점탄성재료의 동특성을 평가하고, 이를 확장하여 관련 프로그램을 개발한 바 있다. Yi 등은⁽⁶⁾ 비구속 감쇠처리된 플레이트에 대하여 해석적인 연구를 통하여 온도, 주파수, 점탄성재료의 두께 등의 영향을 분석하였다. 특히 점탄성재료의 두께가 증가할수록 감쇠능이 향상되지만 미소 크리프변형이 발생함을 지적하고 있다.

이 연구에서는 광학정반 및 최근에 대두되고 있는 동적 성능사양을 소개하고, 기존에 제안된 성능평가방법의 타당성을 실험적으로 검증한다. 그리고 광학정반의 감쇠능 향상을 위하여 4종의 충진제가 컴플라이언스에 미치는 영향을 평가한 후 이 시험 결과에 기초하여 에폭시 접착제를 개발하고자 한다.

2. Optical Top

광학정반의 설계는 경량이면서도 가능한 한 높은 강성을 보유하여 고유진동수를 높게 설정해야 하며, 그리고 점탄성 재료(에폭시접착제)의 동특성을 조정하여 여러 고유진동수에서 발생하는 변위진폭을 최소화하는데 초점을 맞추고 있다. 일반적인 광학정반의 내부구조를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 플레이트나 코아와 같은 구성품의 기계적 성질들은 대부분 유사하다. 따라서 제품의 성능은 제작 공정과 에폭시 접착제의 특성에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 이들 중 에폭시 접착제의 동적 특성에 초점을 맞춘다.

2.1 광학정반의 성능사양

광학정반의 성능사양은 정적 특성으로써 변형량(static deflection), 평면도(surface flatness) 등이 있으며 동적 응답특성으로써 컴플라이언스 곡선에서 가장 낮은 공진주파수에서의 컴플라이언스 또는 동

적변형계수(dynamic deflection coefficient : DDC)를 주로 사용한다.

컴플라이언스는 변위진폭이 가장 크게 나타나는 모서리 부분에서 모달시험을 통하여 구하며, 광학정반 표면의 한 점에서 가해진 단위 힘에 대한 변위진폭의 비로서 정의한다. 스프링(k)-질량(m)-감쇠기(h) 시스템의 주파수응답함수(FRF)는 아래와 같다.

$$\alpha(w) = \frac{x}{f} = \frac{1}{(k - w^2m) + i(h)} = \frac{1/k}{1 - (\frac{w}{w_n})^2 + i\eta} \quad (1)$$

여기서, f 는 인가된 힘, x 는 변위이고, η 를 구조감쇠인자(structural damping factor) 또는 손실계수(loss factor)라 한다. 그리고 w 는 가진주파수, w_n 은 계의 고유진동수이다.

Log-Log 그래프상에 컴플라이언스 곡선과 질량선 분 곡선(mass line : ML)을 중첩시켜 나타냄으로써

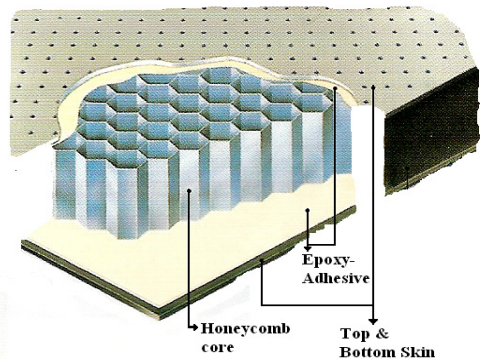


Fig. 1 The internal structure of the optical top

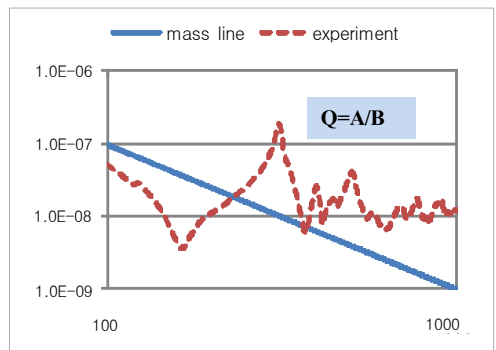


Fig. 2 Definition of the Q value

최근 정량적인 동적 성능사양으로 제시되고 있는 DDC를 아래와 같이 계산할 수 있다⁽¹⁾.

$$D.D.C = \sqrt{\frac{Q}{f_n^3}} \quad (2)$$

여기서, ‘Q factor 또는 magnification factor’로 일컬어지며, 공진점에서 진폭의 크기를 나타내는 Q는 Fig. 2에서와 같이 컴플라이언스 곡선과 ML사이의 관계로부터 구한다.

따라서 DDC값의 신뢰성은 올바른 질량곡선의 근사화에 있다. 비감쇠(undamped) 시스템의 경우 컴플라이언스는 $\alpha(w) = \frac{x}{f} = \frac{1}{k-w^2m}$ 와 같으며, 이것의 양변에 로그를 취하여 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \log|\alpha(w)| &= -\log|k-w^2m| \\ &\cong -\log k, \quad \text{for } w \ll 1 \\ &\cong -\log w^2m, \quad \text{for } w \gg 1 \end{aligned} \quad (3)$$

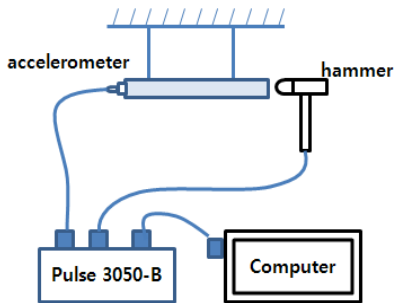


Fig. 3 The schematic of the test device to verify the mass line of ideal rigid body(rod)

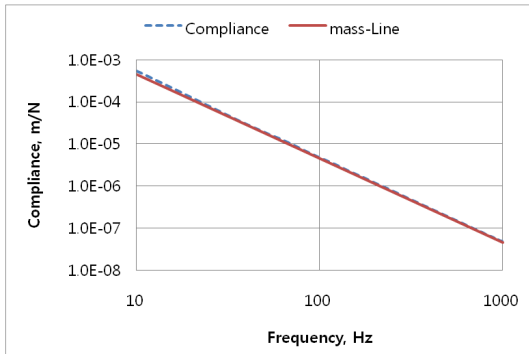


Fig. 4 The mass line and the compliance curve of the rod

식 (3)에서 $w \ll 1$ 인 경우 강성(stiffness)성분으로 컴플라이언스 곡선에서 강체진동의 공진점 좌측에서 수평성분으로 나타나고, $w \gg 1$ 인 경우 질량성분으로서 공진점 이후 기울기 -2를 갖는 직선으로 나타난다.

이상적인 강체의 예로써 S45C 재질의 $\phi 22$, 191 mm 환봉에 대한 시험 장치의 구성 및 모달 시험 결과를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. 시험에는 kistler사의 impact hammer(9728A20000), Endveco사의 가속도센서(751-10) 및 B&K사의 주파수 분석기 type 3050을 사용하였다. 그리고 해머 및 가속도 신호에 uniform window를 씌우고, 4회 평균하여 데이터를 획득하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 환봉의 컴플라이언스 곡선과 해당 ML은 기울기 -2를 갖는 직선으로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

그러나 광학정반은 여러 구성품으로 이루어진 구조물로서 센서 및 충격지점의 위치에 따라 ML의 크기가 달라진다. 이러한 문제의 원인 및 해결방안에 대하여 참고문헌 (1)에서 상세하게 설명하고 있다.

2.2 Mass Line의 근사화

참고문헌 (1)에 따르면 ML을 올바르게 근사화하기 위해서는 도심에서 측정이 이루어지는 경우를 기준으로 가진 및 측정지점에 따라 특정한 값을 곱해주어야 한다. 이 값들은 회전운동(rotation motion)성분이 더해짐으로써 나타난 결과이며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

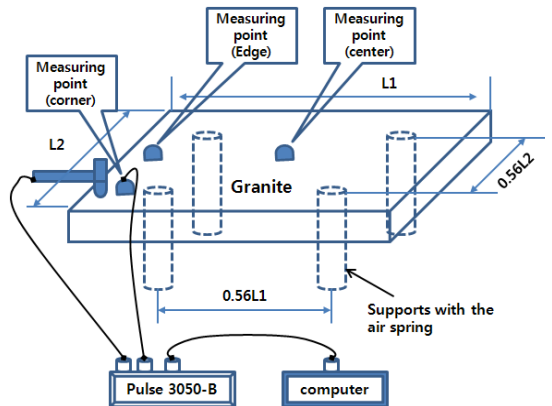


Fig. 5 The schematic of the test device for the verification of the mass line

- 정반의 도심에서 평가가 이루어질 경우 :

$$C = \frac{x_0}{F_0} = \frac{1}{w^2m} \quad (4)$$

- 정반의 일축방향 끝단에서 이루어질 경우 :

$$C_{total} = \frac{|x_{tot}|}{|F|} = \frac{4}{w^2m} \quad (5)$$

- 정반의 모서리에서 이루어질 경우 :

$$C_{total} = \frac{|x_{tot}|}{|F|} = \frac{7}{w^2m} \quad (6)$$

각각의 결과에 대한 타당성을 검증하기 위하여 석정반을 대상으로 모달시험을 실시하였다.

Table 1 Change of the DDC for the mass deviation

M[kg]	143.44	M-5 %	M+5 %	M-10 %	M+10 %
D.D.C	0.3399 E-3	0.3312 E-3	0.3482 E-3	0.3224 E-3	0.3564 E-3
D.D.C rate[%]	±2.5			±5	

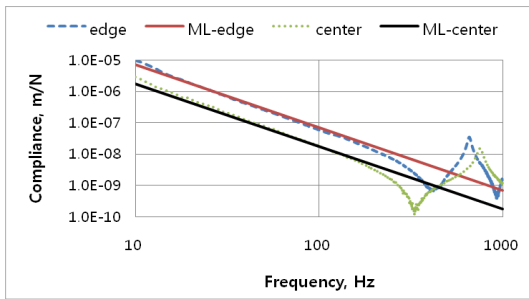


Fig. 6 The results of the test at the center and the edge

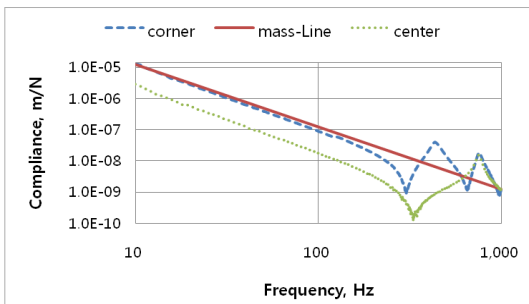


Fig. 7 The results of the test at the corner

석정반의 체적은 0.75 m×0.75 m×0.085 m이며, 밀도 3000 kgf/m³를 적용하여 무게를 계산하면 143.44 kg이다. 자유단 상태를 유지시키기 위하여 지지대 위에 공기스프링을 설치하였으며, 지지대는 석정반의 끝단으로부터 전체길이의 22%에 해당하는 지점에 위치시켰다. Fig. 5는 시험장치 구성을 나타낸다.

Fig. 6은 정반의 도심에서 측정된 결과와 일 축선의 끝단(edge)에서 시험한 결과를 식 (5)의 ML과 함께 도시한 그림이고, Fig. 7은 정반의 모서리부분에서 시험한 결과를 식 (6)의 ML과 함께 나타낸 그림이다. 각 그림으로부터 각각의 ML근사식은 실제 질량곡선 부분을 비교적 잘 근사화하고 있음을 볼 수 있다.

Table 1은 도심에서 평가한 결과에 대하여 ML 근사화시 질량의 측정오차에 기인하여 발생할 수 있는 DDC값의 편차를 검토하여 질량오차의 허용 정도를 확인하기 위하여 질량을 $M \pm \Delta M$ 으로 적용하여 계산한 결과이다. 그 결과 질량 10% 차이에 대하여 DDC값은 약 5% 변화를 가져옴을 확인하였다. 산업현장에서 DDC값의 표시는 보통 유효숫자 첫째자리의 지수형태로 나타내기 때문에 질량 편차에 따른 크기 변화는 허용범위 이내일 것으로 판단된다. 따라서 식 (5)와 식 (6)에 의한 ML 근사식은 어떤 두 제품사이의 상대비교 시 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 충전재의 영향평가

광학정반용 에폭시 접착제의 감쇠능은 충전재 (filler)에 의해 결정된다. 그리고 접착력, 유동성, 경화속도 등의 설계 파라미터들이 유기적인 관계에 있기 때문에 한가지 사양만으로 성능을 평가하기에는 다소 어려움이 있지만 에폭시 접착층이 모재로부터 쉽게 분리되지 않는 정도의 접착력, 24시간 상온·자연경화 등의 대략적인 조건하에서 컴플라이언스 크기에 초점을 맞추어 분석하고자 한다.

3.1 시험장치 및 방법

Fig. 8에서 보는 바와 같이 시편을 끝단으로부터 22%에 해당되는 지점에 줄로 매달아 장치를 구성하였다. 시편은 SUS430 모재의 한 면에 에폭시 접착제를 적층시킨 후 두께가 3 mm가 되도록 면을

가공하였다. Table 2에 각 시편의 파라미터값들을 정리하였다. 그리고 충진재는 입자의 형상에 따라 별형(FA), 원형(FB), 공동원형(hollowed-FC) 및 각형(FD) 4가지 종류를 선택하였다.

각 시편의 성능지수는 모달 시험으로부터 획득한 컴플라이언스 곡선으로부터 직접 구하였으며, 손실 계수 η 는 구조감쇠의 경우 $\frac{w}{w_n}=1$ 일 때 컴플라이언스는 최대 진폭을 갖기 때문에 가장 낮은 공진주파수에서 식 (7)로부터 계산하였다⁽⁷⁾.

Table 2 Composition of filler

Specimen	FA type[%]	FB type[%]	
SUS+A	25	75	
SUS+B	50	50	
SUS+C	75	25	
SUS+D	FC type only 100		
SUS+E	FD type only 100		
Size[mm]	240×120×4	Resin : filler	50:50
m[kg]	0.95±5g	Epoxy : hardner	10:1

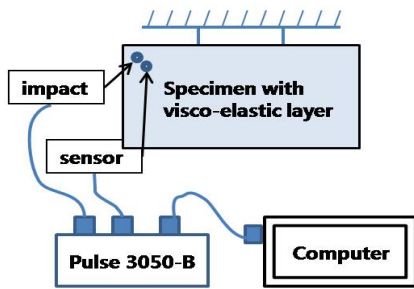


Fig. 8 The schematic of the device for the specimen test

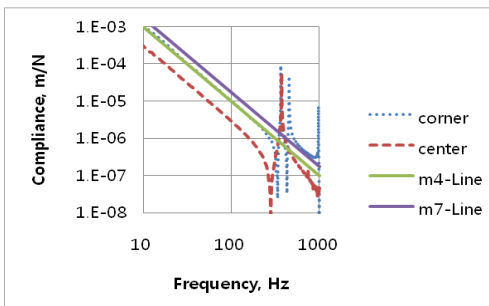


Fig. 9 The mass line and compliance curves for SUS430

$$\eta = 2\zeta = \frac{1}{Q} \quad (7)$$

3.2 평가결과

Fig. 9는 SUS430 자체의 상태를 파악하기 위하여 파선은 도심에서, 점선은 코너에서 실시한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 식 (6)에 의한 ML의 근사화 경우 실제 값보다 크게 나타났지만 식 (5)를 적용함으로써 컴플라이언스 곡선과 잘 일치하였다. 이러한 이유는 시편의 크기가 작아서 그러한 것으로 판단되지만 이 연구의 목적이 특정 값들의 상대비교를 통한 최적의 충진제 종류 및 구성을 찾아내는 것이기 때문에 식 (6)에 의한 ML의 불일치에 관해서는 더 깊이 고찰하지 않는다.

Fig. 10은 시편의 컴플라이언스 곡선을 나타낸다. 그림에서 모든 시편은 2가지 진동모드를 나타내고 있으며, 최소 공진주파수의 값은 SUS430과 유사하게 나타난 반면 compliance 값은 크게 감소하였다. 특히 시편 SUS+C와 SUS+E에서 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있어 충진제 FA형과 FD형의 함유량이 많을수록 감쇠능이 향상됨을 알 수 있다. FC형의 경우

Table 3 Test results for various specimens

Specimen	Natural frequency [Hz]	Compliance [$\mu\text{m}/\text{N}$]	η	Q	D.D.C [*E-3]
SUS430	348.8	605	0.002	418.2	3.139
SUS+A	340.0	32.4	0.028	35.17	0.946
SUS+B	336.1	15.5	0.061	16.46	0.658
SUS+C	343.1	11.0	0.083	12.1	0.547
SUS+D	339.5	17.0	0.054	18.38	0.685
SUS+E	340.6	10.2	0.085	11.73	0.545

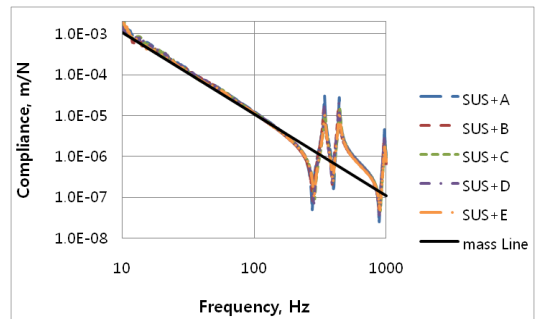


Fig. 10 Compliance curves for various specimens

17 $\mu\text{m}/\text{N}$ 의 크기로서 FA형 50% 비율의 결과와 유사한 감쇠능을 나타내고 있다.

한편 여러 부가적인 시험 결과 FA 함유량이 많을수록 감쇠능은 좋아진 반면 다른 설계인자에 있어 불리하게 나타났다.

Table 3에 평가결과를 요약하였으며, 식 (2)로 정의한 DDC값은 Q값 보다는 공진주파수에 더 큰 영향을 받는 지수이지만 시험결과에서는 공진주파수의 값이 대부분 유사하기 때문에 컴플라이언스 값에 비례하여 DDC값들이 나타났다.

4. 시제품 성능 평가

앞서의 시편 평가로부터 획득한 자료에 기초하여 2종의 에폭시 접착제를 1500×900×200[mm] 크기의 시제품에 적용하였다.

시제품 1은 수지 42%에 충전제 중 FC 27%를,

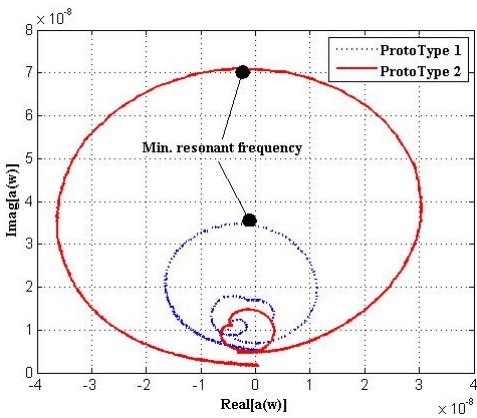


Fig. 11 Nyquist plots for two prototype

Table 4 Test results for two prototypes

Item	Compliance at 1 st N.F. [nm/N]	1 st Natural frequency [Hz]	η	Q	D.D.C [*E-3]
Prototype 1	35.0 (11.8)	289.5	0.34	3.10	0.36
Prototype 2	71.1 (12.1)	279.5	0.17	5.88	0.52
Newport	1800×900×200 standard model				0.8
TMC	35.9 ⁽¹⁾	1800×D×200 standard model			

* (1) is a result inferred from the compliance curve and performance table presented in the website.

* The values in parentheses are read from ML at the same frequency.

시제품 2는 수지 45%에 충전제 중 FD 25%를 기저(base)로 선택하고 다른 충전제를 일정비율 첨가한 제품으로 상온에서 24시간 자연경화 후 평가하였다. 평가는 Fig. 5의 방식에 따라 진행하였으며, 질량은 실측값이 아닌 단위면적당 중량(139 kg/m²)을 곱하여 계산한 값으로 187.7 kg을 적용하였으며, 식 (6)의 ML 근사식을 적용하여 DDC값을 계산하였다.

Fig. 11은 컴플라이언스 곡선을 나이퀴스트(Nyquist) 선도로 나타낸 그림이다. 점선은 시제품 1의 165 Hz~470 Hz 범위, 실선은 시제품 2의 178 Hz~450 Hz 범위에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전형적인 다자유도 시스템의 포인트 컴플라이언스(point compliance) 출력형태를 보이고 있다⁽⁸⁾. 또한 앞서의 시편 평가결과와 유사하게 FC기반의 제품이 FD기반 제품에 비해 약 2배의 진폭 저감특성을 나타내고 있다. 그러나 유동성 측면에서는 FD기반 제품이 더 좋은 것으로 제작과정 중 확인하였다. 한편 모드 감소 비율은 비례적이지 않으며, 변위 진폭이 0에 가깝지 않은 반 공진주파수 영역도 관찰되고 있다.

Table 4에 최소 공진주파수에서의 성능사양 값들을 요약하였으며, 미국의 N사 및 T사의 제품 중 시제품과 유사한 모델의 성능을 함께 나타내었다. 현재 N사는 DDC값을 주요 동적성능의 지표로써 제시하고 있는 반면 T사는 최대 컴플라이언스 값을 사용하고 있다.

시제품 1의 경우 T사의 제품과 유사한 수준의 성능을 나타내고 있기는 하지만 제품의 크기가 달라 직접 비교는 할 수 없다. 반면 시제품 2는 컴플라이언스 값이 T사의 약 2배 정도로 나타나고 있는 반면 N사의 DDC 성능보다는 우수하게 나타났다. 이러한 결과에 기초하여 광학정반이 경쟁력을 갖추기 위해서는 10% 이상의 감쇠비 즉 손실계수 값이 0.2 이상이 되도록 설계해야 할 것이다.

4. 결 론

이 연구에서는 정밀 광학측정시스템이 올바른 기능을 수행할 수 있도록 제작된 광학정반을 소개하고, 최근 성능지표로써 제시되고 있는 DDC값의 산출을 위한 질량곡선의 근사화 및 질량오차의 영향

에 대하여 석정반을 대상으로 실험적으로 검증하였다. 그 결과 제시된 근사식은 질량곡선을 잘 표현하고 있으며, 일정 범위내의 질량오차는 허용 가능함을 확인하였다. 그리고 입자 형상에 따라 분류한 4종의 충진제에 대한 시편평가를 토대로 에폭시 접착제를 개발하였으며, 앞서의 성능평가 방법에 준하여 시험한 결과 현재 세계적인 수준의 제품들과 비교하여도 경쟁력 있음을 확인하였다.

향후에는 강제경화 방식에 의한 제작기술의 기초 연구로써 컴플라이언스 뿐만 아니라 온도특성, 접착강도 등의 설계인자를 고려한 에폭시 접착제 개발을 이론적인 해석에 기초하여 연구를 추진할 계획이다.

참 고 문 헌

- (1) www.newport.com, "Technical Reference".
- (2) www.techmfg.com, "Technical Information".
- (3) Shin, S. H., Lee, Y. B., Jung, S. S. and Lee, D. H., 2004, "Comparison of Test Methods for Vibration Damping Properties," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering,

Vol. 14, No. 9, pp. 852~860.

- (4) Choi, H., Park, K. R., Kim, D. H. and Lee, S. J., 1997, "A Study on the Dynamic Test of Viscoelastic Material," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 937~943.

- (5) Lee, U. S. and Lee, J. K., 1994, "On Damping Characteristics of Viscoelastic Materials," Transactions of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 7, No. 1, pp. 99~107.

- (6) Yi, S., Fouad Ahmad, M. and Hilton, H. H., 1996, "Dynamic Responses of Plates with Viscoelastic Free Layer Damping Treatment," Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 118, No. 3, pp. 362~367.

- (7) Newland, D. E., 1989, Mechanical Vibration Analysis and Computation, John Wiley & Sons, Inc., New York.

- (8) Ewins, D. J., 1984, Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd., Herts.