

대면적 TFT-LCD 유리기판 이송용 복합재료 로봇 손 개발에 관한 연구

최기한* · 한창우** · 이상룡†

(2001년 10월 19일 접수, 2002년 3월 23일 심사완료)

The Study on the Development of Composite Robot Hand for TFT-LCD Glass Transport

Gi Han Choi, Chang Woo Han and Sang Ryong Lee

Key Words : Composites(적층), Robot Hand(로봇 손), Deflection(처짐), Natural Frequency(고유 진동수)

Abstract

A robot hand is used to transport the glass substrate in TFT-LCD manufacturing process. Carbon/epoxy composite is one of the best materials for this kind of robot hand application, due to their lightweight, high stiffness, and good damping characteristics. Major requirement of the robot hand is given as allowable deflection under weight loading of glass substrate and robot hand itself. In this thesis, a carbon/epoxy robot hand was analyzed using finite element method and beam theory to determine the deflection of the hand under the loading that is equivalent to actual weight. Because natural frequency is one of the major interests in robot hand design for TFT-LCD manufacturing process, modal analysis is also conducted using finite element method and beam theory. A robot hand was manufactured, and actual deflection and natural frequency were measured to verify the analysis results and compliance to requirement. The test results showed good agreement with analysis results.

기호설명

- E_{11} : 섬유방향 탄성계수(Pa)
- G_{12} : 전단 탄성계수(Pa)
- ν_{12} : Poisson's ratio
- δ : 처짐량 (m)
- I : 관성 모멘트(m^4)
- P : 하중 (N)
- λ : 고유치(eigenvalue)
- ρ : 밀도 (kg/m^3)
- A : 면적 (m^2)
- L : 길이 (m)
- w : 분포하중 (N/m)

1. 서론

대면적 TFT-LCD 유리기판(Glass)은 1200 × 1000×0.7mm 크기에 2.2kg 무게를 가짐으로 큰 면적에 비해 두께가 얇기 때문에 이송공정에 있어 특별한 관리가 필요하다. 로봇 손(robot hand)은 TFT-LCD 유리기판의 운반용으로 사용된다. 로봇 손의 운동은 상하 운동과 회전 운동, 그리고 로봇 전체의 주행운동으로 이루어져 있다. 따라서 로봇 손은 운반되는 유리기판을 지나친 처짐(deflection)과 과도한 진동 없이 정확히 반송하는 것이 관건이다. 따라서 유리판과 자중으로 인한 요구량 이상의 처짐을 방지해야 하며 공진 등의 진동제어를 위하여 기존의 알루미늄 보다 강성도(stiffness) 및 진동감쇄 능력이 뛰어난 탄소 섬유강화 복합재료로 제작되어는 연구가 이루어지고있다.

이대길은 그의 연구에서 ±15° 배열구조의 에폭시 복합재료 로봇팔의 정,동적해석을 통한 제작으로 그 성능을 개선하였다.⁽¹⁾ 전의진은 그의 저서에서 무게 대비 강도와 강성이 우수하며, 경량, 저밀도, 방향성에 인한 설계 유연성이 뛰어난 섬유강

* 회원, 경북대학교 기계공학과

** 경북대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과

E-mail : srllee@knu.ac.kr

TEL : (053)950-5579 FAX : (053)952-0648

화 복합재료에 대한 우수성을 역설하였으며,¹²⁾ 한 재홍은 압전소자를 사용한 지능복합재 구조의 동적거동해석을 위해 횡진단변형 이론에 기초한 유한요소를 수행하였고, 진동 각 모드의 작동 및 감지 효율성을 계산하여 이들의 효과가 선형조합적으로 시스템에 영향을 미침을 입증하였다.¹³⁾ 또한 김병노 등은 AS4/PEEK 외팔보 복합재료의 진동 및 감쇠특성을 가역시험과 자유진동실험을 통해 구하였고, 횡진단변형 이론에 의한 이론적 동적거동과 일치함을 입증하였다.¹⁴⁾ 하지만 이러한 연구들은 대면적 TFT-LCD 유리기관의 이송에 있어 그 사양을 충족시키는 적합한 적층구조 설계에 대한 적절한 기법을 제시하진 못하고 있다.

또한 지금까지는 대면적 TFT-LCD 유리기관의 이송용 로봇 손은 국내에서는 개발되지 못해 해외로부터 도입하여 사용하고 있다.

본 연구의 목적은 복합재료를 이용하여 대면적 TFT-LCD 유리기관의 이송용 로봇 손을 개발하는 것이다. 로봇 손에 정적하중이 작용 시, 처짐량을 요구량 내에 만족시키고, 또한 로봇 손이 운동하는 동적 물체인 관계로 기동 중 발생하는 진동까지 감안하여 최적 설계, 제작하였다. 그리고 이론 해석 값 등을 토대로 실제 실험값과 비교, 분석하여 최적설계의 건전성 여부를 파악하고 로봇 손이 실제 기능을 원활히 수행할 수 있는 제품인지도 검증하였다.

2. 로봇 손의 형상

로봇 손은 속이 빈 중공의 사각 튜브(tube)이며, 한쪽 끝이 고정된 외팔보(cantilever beam) 형상이다.

Fig. 1 과 같은 전체 구조물 중 로봇 손은 한 개의 고정판(clamp) 에 좌우 두개가 장착된다. 이러한 고정판은 다시 상하로 2 개가 장착되어 로봇 손은 총 4 개가 장착되는 것이다.

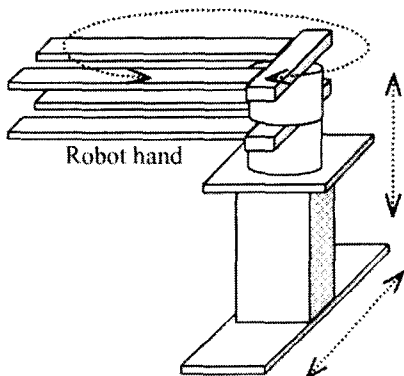


Fig. 1 The schematic diagram of robot hand

이러한 로봇 손의 세부형상은 Fig. 2 와 같고, 이는 탄소섬유 프리프레그(carbon prepreg)를 사용하여 적층한 후 오토클레이브(autoclave) 성형에 의하여 제작되어진다

3. 해석에 사용된 물성 값 및 적층구조

3.1 물성 값

로봇 손 제작에 사용된 재료로는 일방향 탄소/에폭시 프리프레그(unidirectional carbon/epoxy prepreg)와 직조형 탄소/에폭시 프리프레그(fabric carbon/epoxy prepreg) 등이 있다. 그 기본 물성값은 Table 1 과 같다.

3.2 적층구조

각 프리프레그 내 보강섬유의 방향은 섬유장화 복합재료의 방향성 특징을 최대한 살려 굽힘하중에 대해 가장 큰 강성을 가지도록 로봇 손의 길이 방향과 프리프레그의 섬유방향이 일치하게 적층하였다.

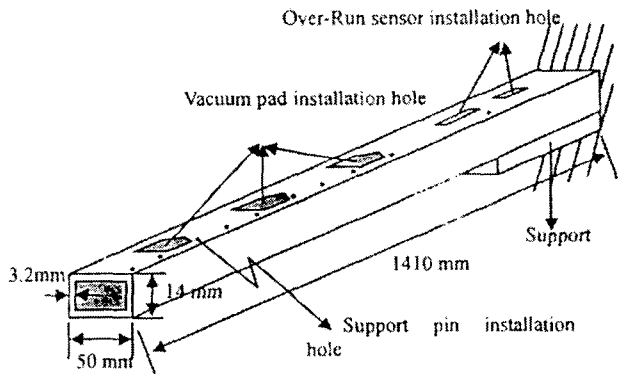


Fig. 2 The shape of robot hand

Table 1 The properties of materials

	E_{11} (GPa)	ρ (kg/m^3)	t (mm)	α (적층각)
Uni. Carbon/epoxy (URN 300, SK)	178	1774.8	0.262	0°
Fab. Carbon/epoxy (WSN 3K, SK)	70.34	1222.2	0.27	0°
Aluminum 2024-T4	73	2800	-	-

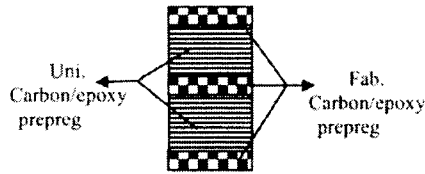


Fig. 3 The cross section of robot hand

Table 2 The structure of layers

Prepreg	Layer angle	Thickness (mm)	Ply number
Fab. Carbon/epoxy.	0°	0.27	1
Uni. Carbon/epoxy	0°	1.0 (0.262x4plies)	2~5
Fab. Carbon/epoxy	0°	0.27	6
Uni. Carbon/epoxy	0°	1.4 (0.262x5plies)	7~11
Fab. Carbon/epoxy	0°	0.27	12
합계	-	3.2	12

또한 섬유 수직방향에 대한 균열이나 파괴전진을 막고자 로봇 손의 길이방향에 대하여 0°/90°로 적조된 프리프레그를 제일 아래층과 중간층 그리고 제일 위층에 삽입시켜주었다. 적층 단면의 형상은 Fig. 3 과 같으며, 적층구조는 Table 2 와 같다.

4. 유한요소 해석(FEA)

로봇 손의 모든 요소는 2D shell element (2D QUAD4)를 사용하였으며, 전체에 걸쳐 복합재료 적층판이므로 PCOMP card 를 사용하여 특성(property)을 정의해 주었다.

본 해석을 위해 소프트웨어는 MSC/NASTRAN ver.8.0, MSC/PATRAN ver. 8.0 프로그램을 사용하였다. 전체적인 형상은 Fig. 2 에서 보듯이 진공 패드가 삽입되는 구멍과 진공 튜브가 지나가는 로봇 손 내부 통로 및 여러 지지핀 장착구(support pin hole), 그리고 센서 장착구(over-run sensor hole) 등 복잡한 형상이다. 그러나 여러 지지핀 장착구 및 센서 장착구 등은 처짐량에 미치는 영향이 미미하다 판단되어 생략하였으며, 비교적 큰 변형을 차지하는 진공패드 장착구와 로봇 팔내 진공 튜브 공간만을 고려하였다. 따라서 전체적인 로봇 손의 형상을 상판에 오각구멍이 3 개 뚫린 중공빔

(beam) 외팔보로 가정하였다. 경계조건(boundary condition)으로는 지지 되는 한쪽 끝을 고정지지(fixed condition)하였다. 그리고 하중조건(load condition)은 로봇 팔 끝단 부위에 집중 하중이 적용된다는 명확한 조건(무게추 실험)으로 설정하였다. 그리고 고유진동수는 모드 해석(modal analysis)을 통해 산출하였다.

5. 이론해

5.1 처짐량 해석

유한요소 해석을 이용한 해의 신뢰성을 검증하기 위해 이론해를 산출하였다. 이론해를 산출하기 앞서 먼저 복합재료 적층판에서의 전체 탄성계수 E 값을 산출하기 위한 고전 적층판 이론을 사용하였다.⁽²⁾

고전 적층판 이론의 힘과 변형률과의 관계에서 인장 강성도(extensional stiffness)를 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 A_{ij} =인장강성도 (Extensional stiffness)

N_i = 적층판에 가해지는 힘

ϵ_i^0 =적층판 중간면에서의 변형률

A_{ij} 는 힘 N_i 가 적층판에 가해졌을 때 x-y 평면에서 변형이 얼마만큼 발생했는가를 말해 주는 척도이다. 식 (1)을 중간단면의 변형률에 대한 역행렬로 다시 정리하면,

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} & A'_{16} \\ A'_{12} & A'_{22} & A'_{26} \\ A'_{16} & A'_{26} & A'_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

만약 y 방향과 xy 방향의 힘, 즉 $N_y = N_{xy} = 0$ 이라면 다음과 같이 정의된다.

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x^0} = \frac{N_x/t}{A'_{11} N_x} = 1/LA'_{11} \quad (3)$$

여기서 t = 적층판의 두께

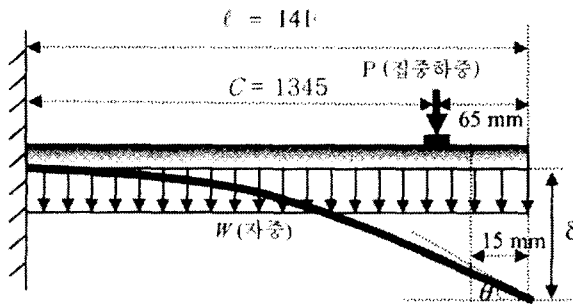


Fig. 4 The schematic diagram of point load condition

$$\theta = \frac{1}{EI} \frac{Pc^2}{2} \quad (6)$$

식 (3)에 구한 값을 유효 탄성계수(effective modulus)라 한다.^(5,6) 이러한 유효 탄성계수에 이용하여 이론해 풀이 과정에서 각 층마다 각기 다른 복합재료 탄성계수를 일반 등방성 재료에서와 같이 동일한 하나의 탄성계수로 대체하여 사용할 수 있다.

이론해는 한쪽이 고정 지지된 외팔보로 가정한 로봇 손을 실제 실험과 같은 조건으로 끝단에서 65mm 지점에 집중하중을 주었으며, 끝단에서 15mm 지점에서의 처짐량을 산출하였다.

한 개의 외팔보에 몇 개의 하중들이 동시에 작용하는 경우에 발생하는 임의 단면의 처짐량은 그 하중들이 각각 1 개씩 작용할 때 발생하는 그 단면의 처짐량을 합하여 구할 수 있다. (중첩법, method of superposition)⁽⁷⁾

여기서 로봇 손의 총 처짐량은 집중하중에 의한 처짐과 로봇 손 자체의 자중에 의한 처짐량을 합한 값과 같다.

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_w + \delta_p \\ &= \frac{wl^4}{8EI} + \frac{Pc^2}{2EI} \left(l - \frac{c}{3}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, δ_w = 자중에 의한 처짐 (분포하중)

δ_p = 집중하중에 의한 처짐

c = 로봇 팔 지지부로부터

집중하중 점까지의 거리

단, 실제 측정부위는 끝단 앞 15mm 지점이므로,

$$\delta = \left\{ \frac{wl^4}{8EI} + \frac{Pc^2}{2EI} \left(l - \frac{c}{3}\right) \right\} - \tan \theta \cdot (15) \quad (5)$$

여기서 끝단 처짐각 θ 는,

5.2 고유 진동수 해석 (Modal analysis)⁽⁸⁻¹⁰⁾

로봇 손은 회전과 상하 및 주행운동 등 복잡한 기동을 하므로 처짐량 해석과 함께 자체 고유 진동수 해석도 중요하다. 이러한 고유 진동수는 구조물의 동적 특성을 대변하는 특성값으로서 로봇 손과 같은 동적 구조물의 경우, 고유 진동수가 높을수록 외부 가진 주파수와 일치할 확률이 떨어지므로 진동 특성이 향상된다. 또한 진동 모드(mode)는 구조물이 동작 중 진동이 발생할 경우 동반되는 변형 형상을 나타낸 것이다.

만약 로봇 손이 기동시 외부 가진 주파수와 고유 진동수가 일치될 때 공진이 발생된다. 공진이 발생할 경우, 과도한 처짐량 발생 뿐만 아니라, 유리기관 운반시 기동이 원활히 이루어 지지 않거나 유리기관 및 로봇 손 자체의 손상도 가져올 수 있다. 따라서 이러한 진동해석 목적은 로봇 손 자체의 고유 진동수를 예측하고 제어하여 외부 가진 하의 공진을 피한다. 따라서 공진 발생 시의 현저한 특징인 큰 변위 발생을 억제하고 처짐 요구량 내에서 원활히 로봇 손이 작동될 수 있도록 제어한다.

고유진동수 산출시 일반해(general solution)는 식 (7)과 같다.

$$V(x) = C_1 \sinh \lambda x + C_2 \cosh \lambda x + C_3 \sin \lambda x + C_4 \cos \lambda x \quad (7)$$

여기서 한쪽 고정단에서는 변위 및 기울기, 모멘트 그리고 전단력이 없다고 경계조건을 주고 x 에 대하여 미분하여 정리하면 식 (8)와 같은 특성방정식(characteristic equation)이 유도된다.

$$\cos \lambda L \cosh \lambda L + 1 = 0 \quad (8)$$

이러한 특성 방정식을 만족시키는 고유진동수 w_r 는 식 (9)와 같다. 단, 복합재료 적층판이므로 각 층의 물성값에 대한 합으로 나타낼 수 있다.

$$w_r = \frac{(\lambda_r L)^2}{L^2} \left(\frac{\sum_{i=1}^{12} E_i I_i}{\sum_{i=1}^{12} \rho_i A_i} \right)^{1/2} \quad (9)$$

6. 로봇 손의 처짐량 및 고유진동수 측정

6.1 유리기판 무게에 준하는 무게 추 실험

로봇 손은 자체의 자중과 유리기판으로 인한 외부하중으로 인해 처짐량이 발생된다. 유리기판으로 인한 하중은 총 2.2 kg(21.6N)으로 이 하중은 로봇 손 좌우 한 쌍에 전달된다. 따라서 로봇 손 한 개의 전달되는 하중은 1.1 kg(10.8N)/개당 이며, 이러한 하중은 로봇 손 표면에 있는 3 개의 진공 패드(pad)로 전달된다. 그러나 3 개의 진공 패드로 전달되는 하중은 유리기판의 무게중심의 위치 및 로봇 손에 지지대(support) 장착 여부에 따라 균일하게 1/3 씩 전달되지는 않는다. 그러므로 유리판 하중에 준하는 무게 추를 이용하여 로봇 손 끝단에 집중하중을 주어 이론해 및 유한요소 해석과 실험값의 비교, 분석을 수월토록 하였다. 그 후 실제 유리기판을 올려놓아 본 실험조건의 타당성 여부를 검증하였다. 실험 방법은 Fig. 5 와 같다.

처짐량은 a, b 두 지점에서 레이저 변위 측정기를 통해 측정했으며, 처짐량 방지를 위해 로봇 손 고정부에 알루미늄 지지대를 장착한 경우와 장착하지 않은 경우에 대하여 각각 측정하였다. 측정치는 지면으로부터의 높이이다.

끝단 처짐량은 위치 ㉑에서 추를 올려놓았을 경우와 그렇지 않을 경우의 수를 뺀 값이 된다. 따라서 순수 로봇 손의 처짐량은 6mm, 지지대 장착 시는 5mm 이다.

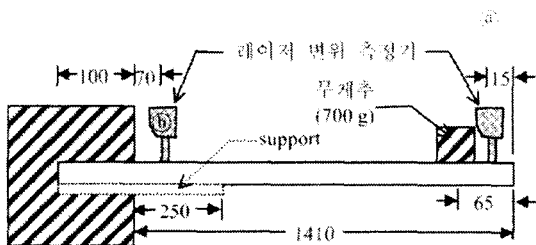


Fig. 5 The measuring system for deflection of robot hand

Table 3 Deflection of robot hand (단위: mm)

	Without support			With Support		
	0g	700g	差	0g	700g	差
㉑ (mm)	101	107	6	94.0	99.0	5
㉒ (mm)	98.2	98.3	0.1	92.0	92.0	-

6.2 실제 유리판 하중 적용시 처짐량 측정 실험
유리판 무게에 준한 무게 추 실험의 신뢰성을 검증하기 위하여 실제 유리판을 로봇 손 위에 올려놓고 그 처짐량을 측정하였다

Table 4 와 Table 3 을 비교하면 유리판 하중에 준한 집중하중이 적용되었을 때 처짐량은 실제 유리판 하중 적용 시에 비해 그 오차가 30%~40%로 크게 나타났다. 이로써 집중하중 적용 실험과 실제 유리판 하중 적용 실험이 같은 조건을 가지기 위해서는 추의 위치, 혹은 무게를 조정해야 할 필요성이 제기되었다

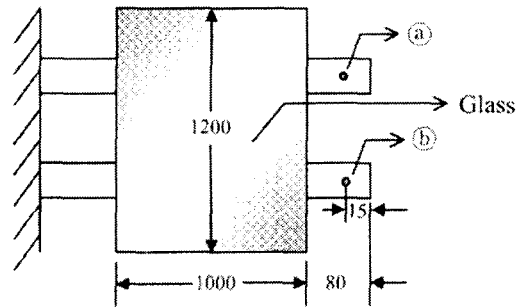


Fig. 6 Schematic diagram of measuring system of deflection of robot hand



Fig. 7 The measuring system for deflection of robot hand

Table 4 The deflection of robot hand (단위: mm)

	Without Support			With support		
	Glass 有	Glass 無	差	Glass 有	Glass 無	差
㉑	107	102	5	97.6	93.9	3.7
㉒	106	102.5	3.5	100.6	96.5	4.1
평균	106.5	102.2	4.3	99.1	95.2	3.9

6.3 로봇 손의 고유진동수 측정 실험

로봇 손은 회전과 상하 및 주행운동 등 복잡한 기동과 함께 그에 따르는 진동을 유발한다. 이러한 진동은 로봇 손이 유리판 이송상에 여러 문제를 야기시키는데 그에 대한 해석은 5.2 장에서 살펴보았다. 이러한 고유진동수 실제로 측정해 보고 앞서 예측된 해석값과 비교해 검토해 보기 위해 다음과 같은 실험을 실시하였다. Fig. 8 과 같이 실제 로봇 손을 전체 기기에 장착하여 가속도 $0.5m/s^2$ 로 전후로 운동할 때 그로 인해 상하로 발생하는 로봇 손의 진동을 잡아내어 시간과 진폭에 대해 Fig. 9 와 같이 나타내었다.

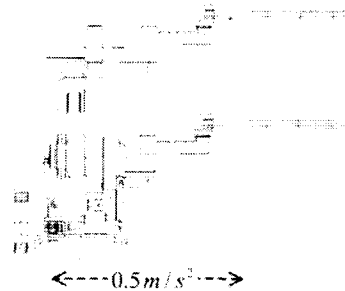


Fig. 8 The schematic diagram of vibration test while forward & backward motion of robot hand

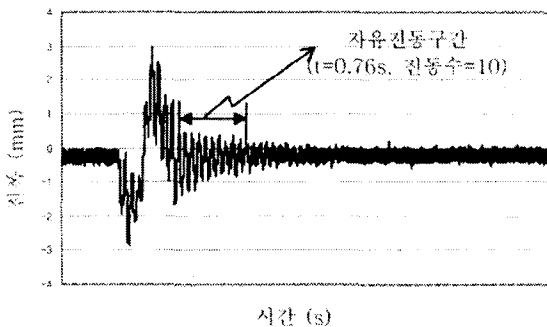


Fig. 9 The vibration of robot hand while moving (without support)

Table 5 Natural frequency & amplitude of robot hand

	고유진동수 (Hz)	진폭 (mm)
Without support	13.1	5.7
With Support	15.9	5.85

여기서 시간과 진동수에 의해 고유진동수가 산출된다. 같은 방법으로 지지대를 장착한 경우의 실험도 실시하여 그 값을 얻는다. 그 결과, 각 경우의 고유진동수와 진폭은 Table 5 와 같다.

7. 결과 및 고찰

7.1 처짐량 해석⁽¹¹⁾

로봇 손이 유리기관 하중으로 발생하는 정적 처짐량을 유한요소 해석을 통하여 해석하였으며, 또한 이 값을 다시 이론해로 산출, 이를 비교, 분석하여 신뢰성을 검증하였다. 단, 실제 로봇 손은 Fig. 2 와 같이 진공 패드 장착구와 각종 센서 장착구가 있어 이러한 구멍들이 실제 변위와 응력에 영향을 미친다. 그러나 이론해에서는 이러한 변수들을 고려할 수 없으므로 표면에 아무런 구멍이 뚫려있지 않는 단순한 외팔보로 가정하여 계산하였다.

Table 6 에서 보는 바와 같이 순수 로봇 손만의 처짐량 실험값은 FEA 및 이론해 값에 비해 상대 오차가 3% 미만으로 잘 일치하고 있으나, 지지대가 장착된 경우, 그 처짐량은 개선되었으나 이론해 및 FEA 해와 오차는 지지대 미장착시와 비교하여 상대적으로 많은 오차가 발생되었다.

Table 6 The comparison of deflection from measurement, FEA and superposition method

(단위:mm)		
하중	Without Support (상대오차%)	With Support (상대오차%)
수치해		
실험치	6	5
FEA (유한요소해)	6.13 (2.2)	4.36 (12.8)
이론해 (중첩법)	5.92 (1.3)	-

Table 7 The comparison of one point load and 3-point distributed load

하중	Without Support (상대오차%)	With Support (상대오차%)
수치해		
집중하중	6 (39.5)	5 (28.2)
분포하중	4.3	3.9

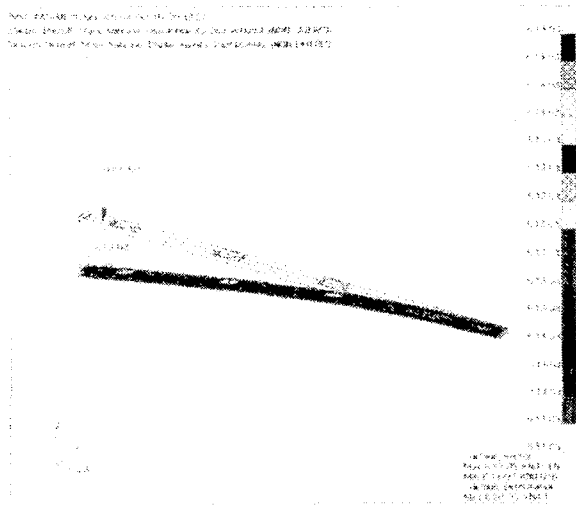


Fig. 10 Deflection of robot hand without AL support

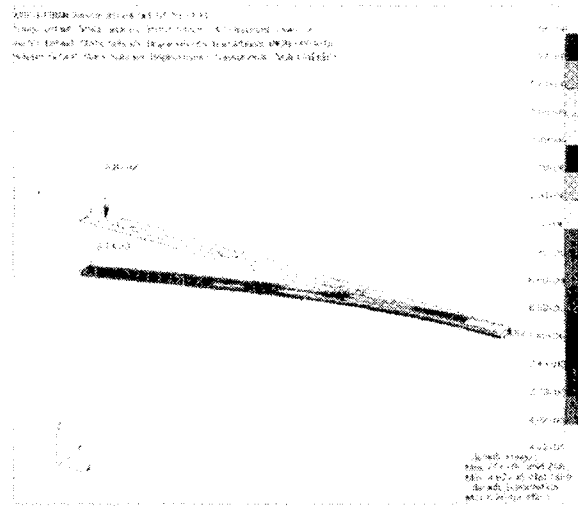


Fig. 12 The stress distribution of robot hand without support

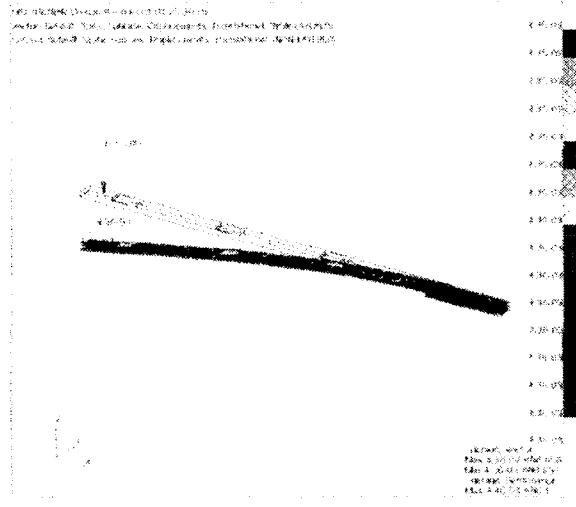


Fig. 11 The deflection of robot hand with AL support

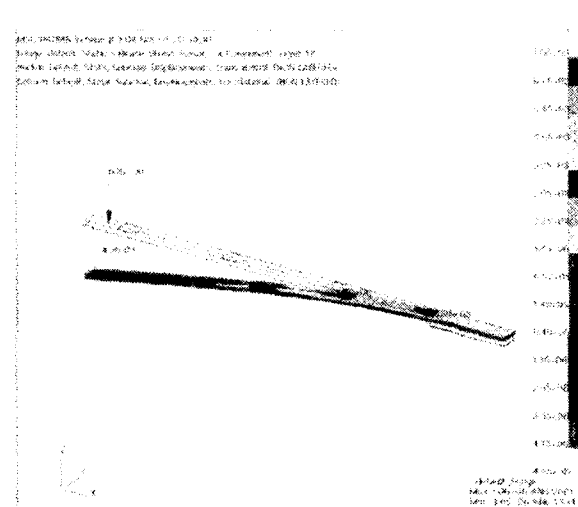


Fig. 13 The stress distribution of robot hand with support

그리고 실제 유리기판 하중을 적용하여 행한 실험에 있어서, 그에 준한 집중하중을 적용시킨 실험과 비교하면 Table 7 과 같다.

Table 7 의 결과에 따르면 실제 유리기판 하중 적용 시에 대하여 집중하중 적용 시가 비교적 큰 상대오차를 가지고 있어 실제 하중에 준한 집중하중 적용에 문제가 있었음을 알 수 있었다. 이를 시정하기 위해서 결과를 가지고 역으로 재해석한 결과, 지지대를 장착하지 않은 로봇 손을 기준으로, 같은 위치에 420g 무게추를 사용하거나 같은 무게추를 사용하되 로봇 손 지지부에서부터 980mm 지점에 올려놓으면 유리판 분포하중에 상응하는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

Fig. 10~11 은 지지대를 장착하지 않은 로봇 손 및 지지대를 장착한 로봇 손에 집중하중을 적용하였을 때의 처짐량과 그 형상을 나타내고 있다.

Fig. 12~13 은 집중하중 적용시, 섬유 길이 방향 (x component)에 대한 응력(stress) 분포를 나타낸 것이다. 로봇 손 내 가장 많은 응력을 받는 제일 바깥층(12 ply)층을 기준으로 순수 로봇 손의 경우는 최고 인장응력은 7.06 MPa, 최대 압축응력은 -4.82 MPa 이며, 지지대 장착 시에는 최고 인장응력은 7.06 MPa, 최대 압축응력은 -4.95 MPa 으로 지지대 장착 유무와 관계없이 일정한 응력값을 보이고 있다.

Table 8 The comparison of natural frequency from measurement, FEA, and theoretical result

Methods	Frequency (Hz)	
	Without Support (상대오차%)	With Support (상대오차%)
측정치	13.1	15.9
FEA	13.6 (3.8)	16.7 (5.0)
이론해	13.97 (6.6)	

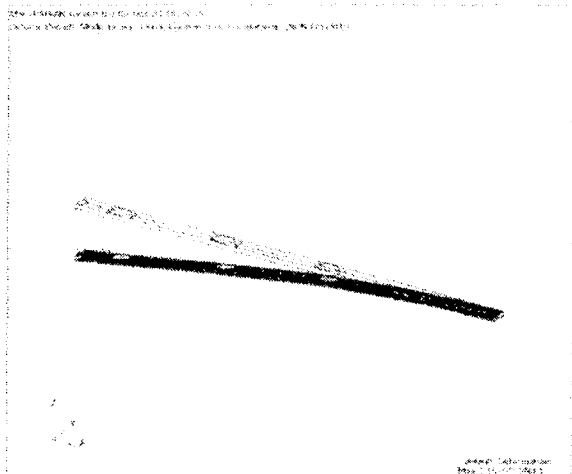


Fig. 14 1st mode shape

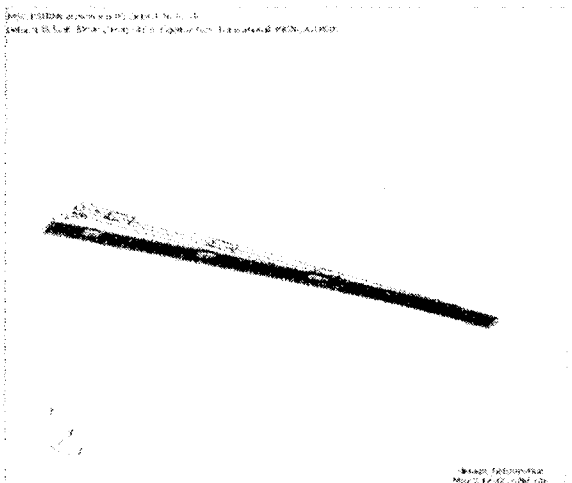


Fig. 15 2nd mode shape

7.2 고유진동수 해석

유한요소 해석과 이론 해를 통하여 로봇 손의 고유진동수(natural frequency)를 구하였다. 그리고 실제 전후로 기동 시 발생하는 상하 진동값을 이용

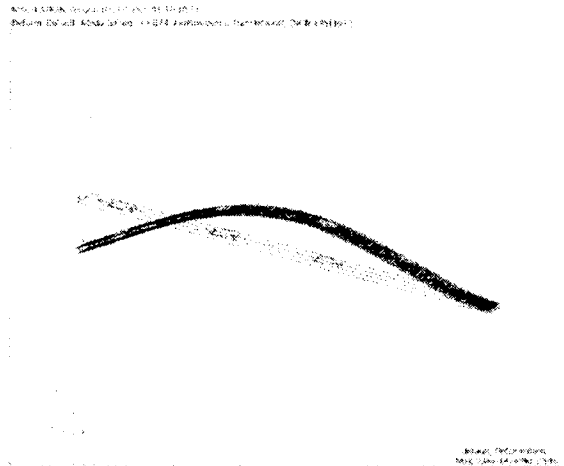


Fig. 16 3rd mode shape

하여 얻은 고유진동수와 비교, 분석하였다. 그 결과는 Table 8 과 같다.

Table 8 의 고유진동수는 공진제어⁽¹²⁾등에 중요한 의미를 지닌다. 또한 로봇 팔이 기동 시 그에 따르는 x,y,z 방향의 진동으로 유리기관 및 로봇 손의 피로누적 및 파괴 등 여러 부작용을 낳는다. 따라서 이러한 고유진동수 산출을 통하여 진동억제를 위한 최적화된 로봇 손을 설계할 수 있다.

Fig. 14~16 은 로봇 손의 1, 2, 3 차의 저차 진동모드 형상을 나타낸다. 여기서 1 차 모드는 수직방향 진동으로 고유진동수는 13.6Hz, 2 차 모드는 길이방향 진동으로 고유진동수는 45.5Hz, 3 차 모드는 비틀림방향 진동으로 고유진동수는 74.9Hz 이다.

8. 결 론

섬유강화 복합재료를 이용, 설계된 대면적 TFT-LCD 유리기관 운반용 로봇 손을 제작하여 그 처짐량과 고유진동수를 측정하고 이를 유한요소 해석과 이론해를 통해 비교, 검증하였다. 이에 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 로봇 손의 끝단 가까이에 유리기관 무게에 상응하는 무게추를 올려놓고 이를 집중하중으로 가정하여 실제 처짐량을 측정하고, 이를 이론해와 유한요소 해석값과 서로 비교해본 결과, 상대오차 3% 미만의 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 단, 과도한 처짐량 방지를 목적으로 알루미늄 지지대를 장착하면 비교적 큰 상대오차(12.8%)가 나타났다. 이는 사용된 알루미늄 지지대에 대한 명확한 물성치 적용 및 지지대와의 체결방식 등 좀더 많은 부분을 세밀하게 고려되지 못했기 때문이다.
- (2) 로봇 손의 집중하중에 대한 처짐량을 실제

유리판 하중에 대한 처짐량과 비교하여 그 타당성 여부를 검증하였다. 그 결과, 상대오차가 심하여 이 방법은 적절하지 못했음을 알 수 있었다.

(3) 로봇 손이 전후로 기동 시 발생하는 상하 진동을 이용하여 고유진동수를 구하고, 이 값과 유한요소 및 이론해 값을 비교하였다. 그 결과 상대오차 10% 미만의 비교적 정확한 값을 얻을 수 있었다. 따라서 실험값에 대한 해석값의 검증되어 그 신뢰성을 확인했다.

(4) 본 연구활동으로 제작된 로봇 손은 대면적 TFT-LCD 유리기관의 이송용으로 실제 생산현장에 적용하였다.

참고문헌

- (1) LEE Dae Kil, Jung Kuyang Sup, Kim Ki Su, Koag Yuen Guen, 1993, "Development of robot arm with composite material," *The Korean Society for Composite Material*, pp. 117~122.
- (2) Jeun Eui Jin, Lee Yoo Il, Yun Koang Jun, Kim Tae Yuk, 1995, "Composite material," pp. 1~34, Kyohak.
- (3) Han Jae Heung, Lee In, 1995, "A Study on Property of Vibration Control for Composite Material," *Journal of Korea Society for Aerospace*, Vol. 23, No. 1, pp. 85~96.
- (4) Kim Bueng No, Koo Kyo Nam, Lee In, 1993, "Vibration Damper of AS4/PEEK Composite Material," *Journal of Korea Society for Aerospace*, Vol. 21, No. 3, pp. 22~28.
- (5) Gibson, Ronald F., 1994, "Principles of composite material mechanics," pp. 220~223, McGraw-Hill.
- (6) Hyer, Michael W., 1998, *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*, pp. 212~347, McGraw-Hill.
- (7) Beer, Johnston, 1992, "Mechanics of materials," pp. 426~429, McGraw-Hill.
- (8) Lee Young Shin, Choi Meyung Hwan, 1994, "Analysis of Vibration of composite material for Cantilever," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 18, No. 8, pp. 1899~1900.
- (9) Rao Singiresu S., 1988, "Mechanical Vibration," pp. 457, Ban Do.
- (10) Craig Roy R., Jr, 1981, "Structural dynamics," pp. 207~234, Willy.
- (11) Lee Young Shin, 1989, "Analysis of Static and Dynamic Structure for Composite Material," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 13, No. 6, pp. 1203~1214.
- (12) Chang Seung Hwan, Kim Hyun Surk, Choi Jin Kyung and Lee Dai Gil, 1998, "A Study on the Design of Vibration Damper for High Speed CD-Rom Drives," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 22, No. 4, pp. 939~952.