

< 논문 >

공기압 근육 구동기의 유한요소 해석 및 성능시험

허 신[†] · 배상규^{**} · 김동수^{**} · 김완두^{*} · 홍성인^{***}

(2005년 10월 25일 접수, 2006년 3월 23일 심사완료)

Performance Test and Finite Element Analysis of Pneumatic Muscle Actuator

Shin Huh, Sang-kyu Bae, Dong-soo Kim, Wan-doo Kim and Sung In Hong

Key Words: Pneumatic Muscle(공기압 근육), Nylon6 cord(나일론6 코드), Contraction Ratio(수축률), Finite Element Model(유한요소 모델), Code Angle(코드 각)

Abstract

The pneumatic muscle actuator consists of an air bellows tube with two end-flanges. The air bellows tube is made from rubber layers and flexible sheathing formed from nylon 6 fibers. This structure can be stretched or compressed to convert the radial expansive forces into contractile forces. We performed the finite element analysis and the performance test of pneumatic muscle actuator. Also, the pneumatic muscle actuator was manufactured and tested by home-made tester. The results of FEA was similar with performance test below the maximum error of 42 %.

1. 서 론

어느 시스템(생물학적 또는 기계적)에서 구동기는 여러 종류의 에너지를 외부환경과 상호작용을 가능하게 하는 기계적 운동으로 변화시키는 일을 담당한다. 기술적인 이용 분야가 증가하고 새로운 요건이 기존의 구동시스템에 요구되고 있으므로, 전통적인 시스템은 몇 가지 중요한 성능 제한이 있음이 명백하다. 따라서 여러 가지 새로운 구동시스템이 개발되어 왔으며, 특히 최근에는 기존의 높은 파워, 우수한 위치 및 힘 제어가 가능하면서 안전하고 자연스런 상호작용 수단을 형성하는 생체 근육의 성능을 모방하려는 시도가 있어왔다. 불행히 생체 근육은 기술로 복제될 수 없는 근육 섬유 구조를 가지고 있으나 거시적 스케일에서 고유

한 기능성을 복제할 수 있다. 특별히 두 가지 구동기 즉, 기계-화학 상호작용 기반의 폴리머 의사 근육 구동기(pseudo-muscular actuator)와 공기압 근육 구동기(pneumatic muscle actuator)가 잠재적으로 유리한 특성을 가지는 것으로 확인되었다.^(1,2) 그 중에서 공기압 근육 구동기는 스틱 슬립, 마찰, 씰 등이 없으며, 저중량, 저가격, 고응답, 고파워화, 고수축화 등의 특징을 가지고 있으며, 대표적인 제작사는 독일의 FESTO, 영국의 Shadow Robot사가 있다. 국내의 경우는 제작사가 없으며 수요량의 전량 100%를 독일, 영국, 일본 등의 기술선진국으로부터 수입에 의존하는 실정이다. 공기압 근육 구동기의 응용분야는 피로시험기, 브레이크, 액슬, 드라이빙 시뮬레이터 등 첨단시험장비와 정밀위치, 속도, 하중제어 시스템 등의 특수 환경에서 지능형 서보 액추에이터, 지능형 로봇 등으로 매우 다양하게 적용될 수 있다.⁽³⁻⁶⁾

본 연구에서는 공기압 근육 구동기를 설계하기 위해서 유한요소 모델링을 수행하고 주요 설계변수인 코드 각도 변화에 따른 수축력, 수축률, 작경 및 압력 변화를 해석하여 최적의 설계 변수를 결

† 책임저자, 회원, 한국기계연구원 미래기술연구부
E-mail : shur@kmm.re.kr

TEL : (042)868-7886 FAX : (042)868-7933

* 회원, 한국기계연구원 미래기술연구부

** 회원, 한국기계연구원 정보장비연구센터

*** 충남대학교 기계공학과

정한다. 또한 해석 결과를 바탕으로 공기압 근육 구동기를 제작하고 성능 실험을 수행하여 그 결과를 해석 결과와 비교한다.

2. 공기압 근육 구동기의 개요

2.1 공기압 근육 구동기의 구조

Fig. 1은 공기압 근육 구동기의 주요 구성부품을 나타낸 것으로서 에어 벨로우즈, 플렌지, 잠금 너트 등으로 구성되어 공기압을 가하면 에어백의 직경은 팽창하고 길이는 수축하는 작용을 하게 된다. 튜브는 고압으로 채워지는 고무로 보강하기 위해서는 나일론 또는 아라미드 코드로 배열된 코드지가 사용되며 2장의 코드지 층으로 구성된다. 튜브의 외부 층과 내부 층은 고무로 되어 있고, 중간에는 2장의 코드지가 축 방향을 기준으로 플러스 및 마이너스 각도로 배치되어 있어 공기 압력으로 인해 하중의 대부분을 지지하는 역할을 한다.

2.2 공기압 근육 구동기의 이론적 배경⁽⁷⁾

Fig. 2는 인공근육 구동기의 개략적 해석 모델을 나타낸다. 인공근육 구동기에 가해진 내압 p 는 그 일부가 고무 자체의 팽창에 사용되며, 나머지는

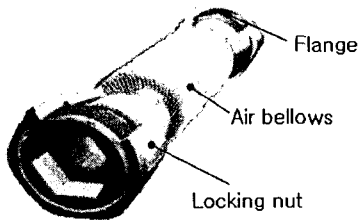


Fig. 1 Structure of pneumatic muscle actuator

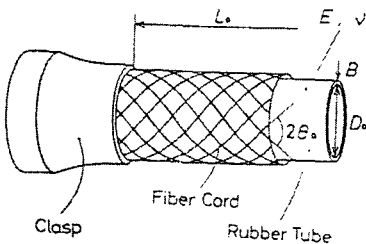


Fig. 2 Schematic diagram of pneumatic muscle actuator

보강코드로 전해진다. 보강코드에 장력으로 작용하는 외관상의 압력을 p_1 으로 표시하면 고무튜브의 축방향 응력과 원주방향 응력 및 원주방향의 변형 관계로부터 다음의 식이 성립된다.

$$p_1 = p - \frac{4EB(D^2 - DD_0)}{((2-\nu)D^2 - \nu(D - D_0)^2)D_0} \quad (1)$$

여기서, E , B , D_0 및 D 는 각각 에어 벨로우즈의 탄성 계수, 두께, 초기 내부직경, 내부직경, ν 는 푸아송 비를 나타낸다.

한편, 인공근육 구동기에 내압이 가해지면 벨로우즈는 반경방향으로 팽창하는데, 이 팽창력은 섬유코드에 의해 방향이 바뀌어 축방향의 수축력 f_1 이 된다.

$$f_1 = \frac{p_1 DL_0}{2 \tan \theta_0} \quad (2)$$

여기서, L_0 은 에어 벨로우즈의 길이, θ_0 는 코드 각도를 나타낸다.

동시에 내압은 끝단부에 축방향의 신장력 f_2 을 발생시킨다.

$$f_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 + (D - D_0)^2) p_1 \quad (3)$$

따라서 구동기에 관한 힘의 균형은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$f = f_1 - f_2 = \frac{p_1 DL_0}{2 \tan \theta_0} - \frac{\pi}{4} (D^2 + (D - D_0)^2) p_1 \quad (4)$$

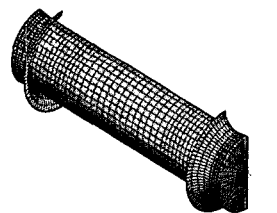
식(4)에서 실제 발생하는 수축력 f 는 압력 p_1 , 직경 D , 길이 L_0 에 비례하고 코드 각도에는 반비례함을 알 수 있다. 이와 같은 이론식은 인공근육 구동기의 특성에 대한 대략적인 경향은 예측할 수 있지만 실제 제품에 대한 설계에 적용하기에는 곤란하다.⁽⁸⁾

3. 유한요소 모델링 및 해석

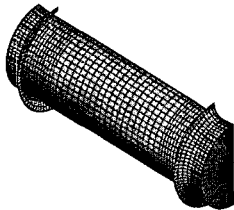
3.1 유한요소 모델링

공기압 근육 구동기는 비선형 유한요소해석 도

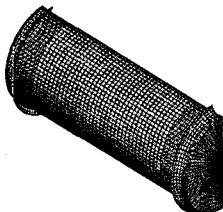
구인 ABAQUS를 사용하여 3차원의 1/2 대칭 모델로 작성되고 해석된다. 에어 벨로우즈는 S4R finite-strain shell 요소를 사용하여 모델링하고, 에어백 내부의 압력 및 체적 변화를 계산하기 위해서는 3차원 F3D3 및 F3D4 hydrostatic fluid cavity 요소를 사용한다.⁽⁹⁾ 에어 벨로우즈 내의 공기는 이상 기체로 모델링하고, 공기의 기준 밀도는 1.204 kg/m³, 온도는 23 °C, 대기압은 101.36 kPa을 사용한다. 해석 대상인 에어 벨로우즈의 고무 두께는 0.4 mm, 코드지의 두께는 0.56 mm, 코드지 및 코드지 사이의 고무 두께는 0.4 mm, 외부의 고무 두께는 0.4 mm이다. 고무 소재의 Mooney-Rivlin 상수는 $C_{10}=0.207$ N/mm² 및 $C_{01}=0.234$ N/mm²를 사용한다. 나일론6 코드지는 코드 직경 0.56 mm, 코드 간격 28 Ea/inch, 840 denia로 구성되어 있다. 이 코드는 skew rebar로 모델링 된다. 에어백과 오른쪽 및 왼쪽 잠금 너트의 접촉 모델링은 rigid element R3D4와 S4R shell 요소 사이에 접촉 쌍(contact pair)을 정의하여 표현한다.



(a) Tube diameter, 10 mm



(b) Tube diameter, 20 mm



(c) Tube diameter, 40 mm

Fig. 3 FEA models of pneumatic muscle actuator

공기압 근육 구동기의 경계 조건과 구속 조건은 오른쪽 및 왼쪽 잠금 너트의 중심 절점 자유도를 모두 구속하고, 오른쪽 잠금 너트의 중심 절점은 해석 조건에 따라 해당 자유도를 구속한다. Fig. 3(a)은 직경 10 mm의 공기압근육구동기의 유한요소 모델, Fig. 3(b)은 직경 20 mm의 공기압근육구동기의 유한요소 모델, Fig. 3(c)은 직경 40 mm의 공기압근육구동기의 유한요소 모델을 나타낸다. 1 단계의 해석에서는 공기압 근육 구동기의 양단의 자유도를 모두 고정된 다음, 공기 압력을 공급한다. 2 단계의 해석에서는 1 단계에서 제공된 압력을 유지하면서, 오른쪽 부분의 1축 방향의 자유도를 해제한다. 그러면 공기압 근육 구동기는 직경 방향으로 팽창하면서 동시에 길이 방향은 수축하게 된다.

3.2 보강 코드의 기계적 물성 시험

공기압 근육 구동기의 성능은 보강코드의 기계적 물성에 따라 크게 좌우되므로 보강코드의 정확한 기계적 물성을 측정해야 한다. 보강코드의 기계적 물성시험을 위해서 Instron 4301 시험기를 이용하였으며 ASTM D 855 시험 기준에 따라 시험을 수행하였다. Fig. 4는 840 denia의 Nylon6 보강코드의 인장시험을 수행하여 얻은 응력-변형률 곡선이다. 초기 6%이내의 변형률에서는 고분자 사슬들의 재배열되는 영역으로 비교적 응력이 작게 나타난다. 그리고 변형률 6% 이상에서는 응력이 급하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 탄성계수는 이 영역에서의 기울기를 측정하여 탄성계수를 계산하며, 측정된 탄성계수는 $E=5.58$ MPa이다. 또한 보강코드가 파단되는 최대 변형률은 17%이다. 보강코드의 푸아송비는 $\nu=0.3$ 으로 추정된다.

3.3 유한요소 해석 및 결과

공기압 근육 구동기의 정적 특성은 일반적으로 코드의 설정 각도에 크게 의존하게 되므로, 코드의 설정각도 변화가 공기압 근육 구동기의 정적 특성에 미치는 영향을 해석을 통해 예측해 보았다. Fig. 5는 직경 10, 20, 40 mm의 공기압 근육 구동기가 공기압 6 bar 상태에서 코드각도 변화에 대한 수축률(contraction ratio) 및 직경 변화를 보이고 있으며, 코드각도가 감소할수록 수축률은 증가하고 직경도 증가하는 경향을 보이고 있다.

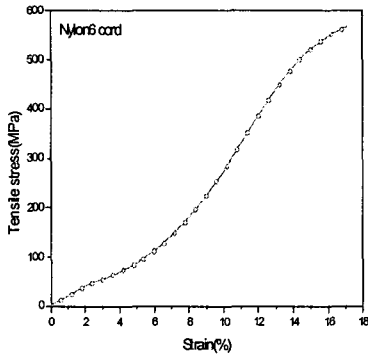
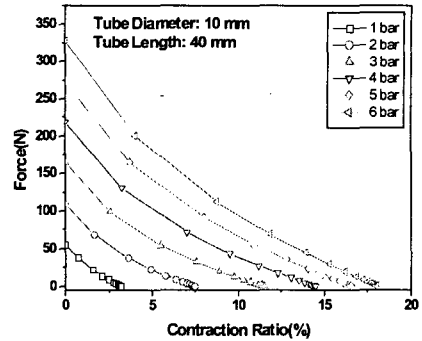


Fig. 4 Stress-strain curve of Nylon6 cord



(a) Tube diameter, 10 mm

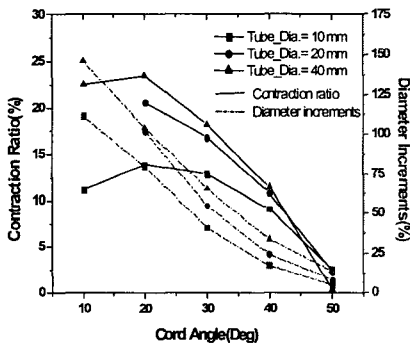
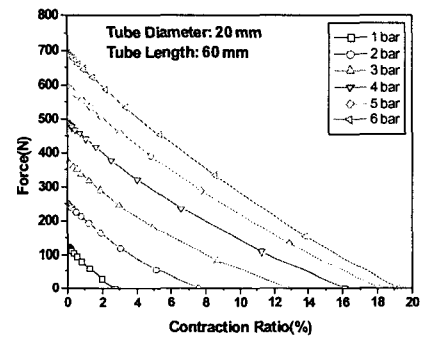


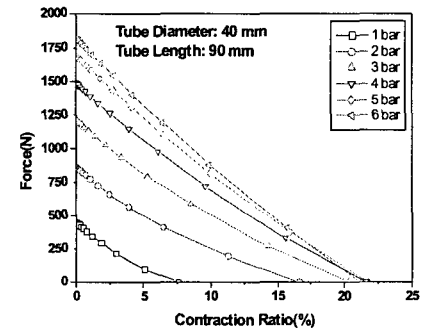
Fig. 5 Variations of contraction ratio and diameter increments for cord angle (air pressure = 6 bar)

코드각도가 10도 및 20도 사이의 영역은 직경 변화가 최소 75 %에서 최대 147 % 정도로서 너무 큰 변형을 발생하여 작동 성능에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 예측된다. 또한 코드각도가 30도 및 50도 사이의 영역은 수축률이 최소 1 %에서 최대 12 % 정도로서 수축 성능이 좋지 않을 것으로 예측된다. 따라서 공기압 근육 구동기의 주요 성능인자인 수축률 및 직경 증가율을 고려하여 가장 적합한 코드각도는 약 25 정도로 판단된다.

Fig. 6의 (a), (b) 및 (c)은 코드 각도를 25도로 배열한 직경 10, 20, 40 mm의 공기압 근육 구동기에 공기압력 1, 2, 3, 4, 5 및 6 bar를 공급하여 수축률 및 수축력의 변화를 유한요소해석을 통해서 계산하였다. 공기압력 증가에 따라서 수축률 및 수축력은 증가하는 경향을 보이고 있다.



(b) Tube diameter, 20 mm



(c) Tube diameter, 40 mm

Fig. 6 FEA results of pneumatic muscle actuator (cord angle= 25 deg.)

직경 10 mm의 경우, 공기압력 6 bar에서 최대 수축력은 230.0 N이 작용하고 최대 수축률은 13.8 %이었다. 직경 20 mm의 경우, 공기압력 6 bar에서 최대 수축력은 691.0 N이 작용하고 최대 수축률은 19.2 %이었다. 직경 40 mm의 경우, 공기압력 6 bar에서 최대 수축력은 1817.0 N이 작용하고 최대 수축률은 21.6 %이었다.

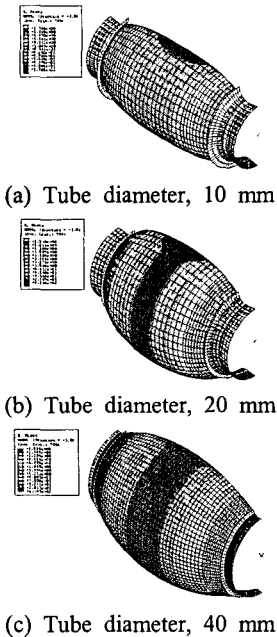


Fig. 7 Deformation shape and stress contour of air bellows(Cord angle=25 deg., Air pressure=6 bar)

Fig. 7의 (a), (b) 및 (c)은 직경 10, 20, 40 mm의 공기압 근육 구동기의 유한요소 모델을 사용하여 공기압력 6 bar의 상태에서 튜브의 변형 형상 및 응력 해석 결과이다. 공기압 근육 구동기의 직경 10, 20, 40 mm에 대해서 공기압력 6 bar를 제공했을 경우, 공기압 근육 구동기의 중앙부위에서 각각 1.7 MPa, 2.5 MPa 및 2.8 MPa의 최대 응력이 발생한다.

4. 시제품 제작 및 실험

4.1 시제품 설계 및 제작

공기압 근육 구동기는 사용 용도에 따라 지지 하중 및 행정이 다른 성능을 가져야 하므로 사용 공기압을 고려하여 직경 및 길이를 다양하게 결정할 수 있으나, 본 연구에서는 최대 공기압 6 bar에서 200 N에서 2000 Newton 범위의 수축력을 발생시킬 수 있는 공기압 근육 구동기를 제작하기 위해서 직경을 10, 20, 40 mm으로 결정하였다. 또한 수축력을 결정하는 설계변수 중의 하나인 튜브 길이는 사용 목적에 따라 달라질 수 있으므로 특별히 설계에 고려하지 않았다. 위의 유

Table 1 Dimensions of Fluidic Muscle Cylinder

Diameter (mm)	Length (mm)	Pressure (bar)	Weight (kg/m)	Lifting force (Nmax)
10	40	6	0.09	230
20	60	6	0.16	700
40	90	6	0.36	1800

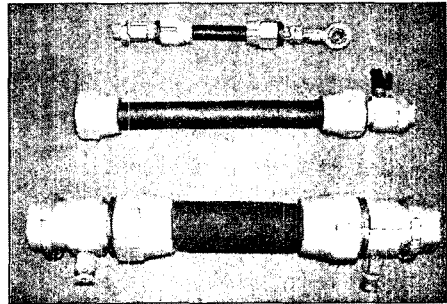


Fig. 8 Prototypes of pneumatic muscle actuator

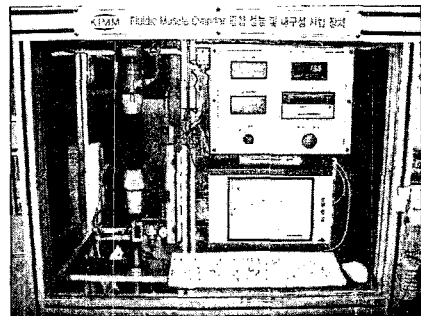


Fig. 9 Performance test apparatus

한요소 해석 결과를 바탕으로 조건에 맞는 공기압 근육 구동기를 설계 및 제작하였다.⁽¹⁰⁾ 공기압 근육 구동기의 설계 사양은 Table 1과 같다. Fig. 8은 제작된 직경 10, 20, 40 mm의 공기압 근육 구동기의 조립된 상태의 사진이다.

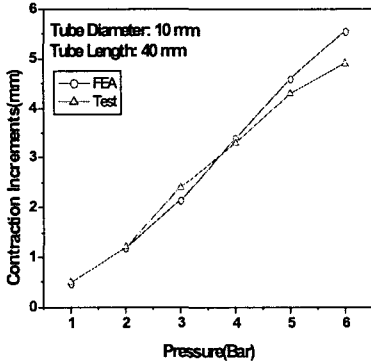
4.2 시험장치 구성 및 성능시험

공기압 근육 구동기의 성능 평가를 위한 시험 장치를 Fig. 9와 같이 구성하였다. 압축된 공기는 서보 밸브에 의해 제어되며, 힘을 측정하기 위해서 로드 셀을 부착하고, 위치 및 속도 센서인 LVDT를 부착하였으며, 압력, 유량을 측정하기 위하여 각각의 센서를 부착하여 실험 장치를 구성하였다. 시제품의 실험시, 구동기의 한쪽은 밀폐시키고 한쪽으로부터 공기압을 가해 튜브의 길이방향의 수축 변화량과 직경방향의 팽창 변화량을 측정한다.

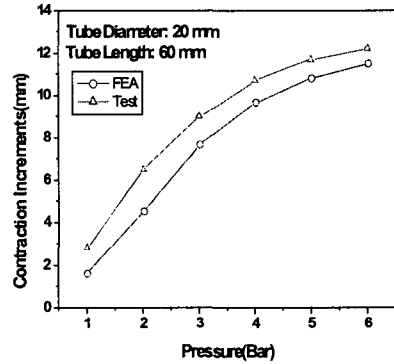
4.3 공기압 근육 구동기의 성능시험 및 해석 결과 비교

Fig. 10의 (a), (b) 및 (c)은 직경 10.0 mm인 공기압 근육 구동기의 공기압력 변화에 따른 길이 방향의 수축률, 수축력 및 직경 변화율에 대해서 실험 및 해석 결과를 비교하였다.

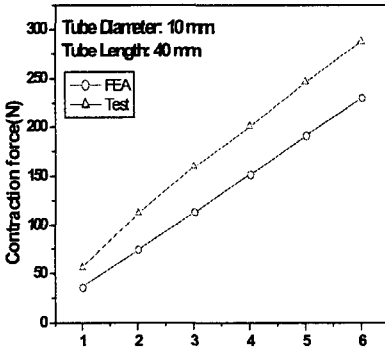
실험 결과, 공기압력의 증가에 따라서 수축률 및 수축력은 일정하게 증가하고, 직경 변화율은 공기압력이 4 bar 이상에서 감소하는 경향을 보인다. 시험 및 해석 결과를 비교하면, 공기압력 6 bar에서 수축률은 최대 오차 13.2 %, 수축력은 최대 오차 20.1 %, 직경 변화율은 최대오차 42.0 %



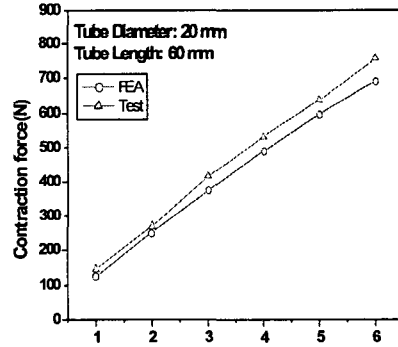
(a) Contraction increments



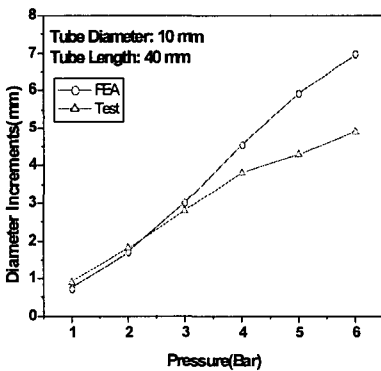
(a) Contraction increments



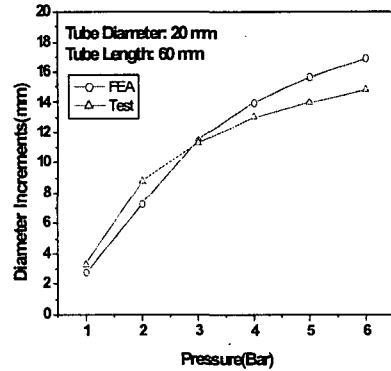
(b) Contraction forces



(b) Contraction forces



(c) Diameter increments



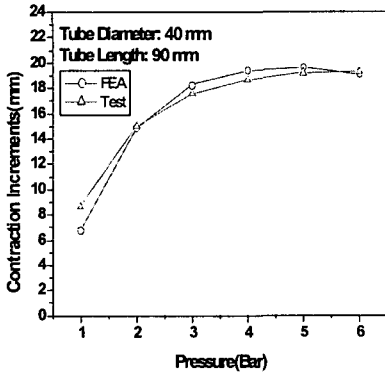
(c) Diameter increments

Fig. 10 The performance comparisons of test and FEA results for the tube diameter of 10 mm

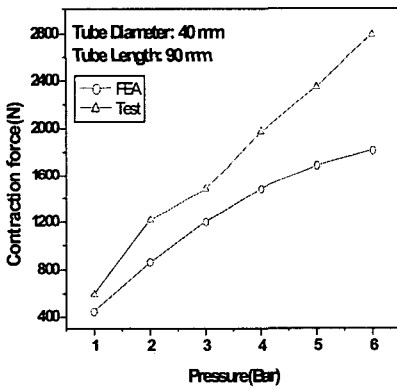
Fig. 11 The performance comparisons of test and FEA results for the tube diameter of 20 mm

가 발생하였다.

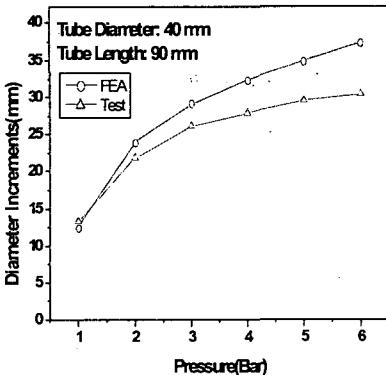
Fig. 11의 (a), (b) 및 (c)은 직경 20.0 mm인 공기압 근육 구동기의 공기압력 변화에 따른 길이 방향의 수축률, 수축력 및 직경 변화율에 대해서 실험 및 해석 결과를 비교하였다.



(a) Contraction increments



(b) Contraction forces



(c) Diameter increments

Fig. 12 The performance comparisons of test and FEA results for the tube diameter of 40 mm

실험 결과, 수축률은 공기압력의 증가에 따라 일정하게 증가하다 3 bar이상에서 완만하게 증가하고, 수축력은 일정하게 증가한다. 직경 변화율은 공기압력 2 bar 이상에서 증가율이 감소한다. 시험 및 해석 결과를 비교하면, 공기압력 2 bar에서 수축률은 최대 오차 30.0 %가 발생하고, 공기압력 6 bar에서 수축력은 최대 오차 8.7 %, 직경 변화율은 최대오차 14.5 %가 발생하였다. Fig. 12의 (a), (b) 및 (c)은 직경 40.0 mm인 공기압 근육 구동기의 공기압력 변화에 따른 길이방향의 수축률, 수축력 및 직경 변화율에 대해서 실험 및 해석 결과를 비교하였다. 실험 결과, 수축률은 공기압력의 증가에 따라 일정하게 증가하다 2 bar이상에서 완만하게 증가하고, 수축력은 일정하게 증가한다. 직경 변화율은 공기압력 2 bar 이상에서 증가율이 감소한다. 시험 및 해석 결과를 비교하면, 공기압력 1 bar에서 수축률은 최대 오차 22.0 %, 공기압력 6 bar에서 수축력은 최대 오차 34.9 %, 직경 변화율은 최대오차 22.9 %가 발생하였다. 이와 같은 오차 발생 원인은 고무의 비선형성, 코드지의 제작 시에 코드각도의 배열 문제, 고무 변형 시에 코드 배열 변화, 성능시험 시의 문제점, 즉 수축률, 수축력 및 직경 변화를 동시에 측정하지 못하여 발생하는 측정오차 등이 원인이 된다.

5. 결론

본 연구에서는 공기압 근육 구동기의 성능을 좌우하는 주요 설계변수를 결정하기위해서 유한요소 해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 시제품을 제작하고 성능시험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.⁽¹¹⁾

(1) 공기압 근육 구동기의 유한요소 해석 결과, 수축률의 경우, 코드각도가 10도 및 20도에서는 변화가 작고 20도 이상에서는 일정하게 감소하는 경향을 보인다. 또한 직경 변화율의 경우, 코드각도의 증가에 따라 일정하게 감소하는 경향을 보인다. 구동기의 설계 코드각도는 직경변화율을 75 % 이하로 유지하면서 최대 수축률을 발생시키는 25도로 결정하였다.

(2) 설계결과를 바탕으로 튜브직경 10, 20, 40 mm의 공기압 근육 구동기를 제작하고, 성능시험을 수행한 결과, 공기압력 6 bar에서 최대 수축력

은 각각 230.0 N, 691.0 N 및 1817.0 N이 측정되었고, 최대 수축률은 각각 13.8 %, 19.2 % 및 21.6 %이었다.

(3) 직경 10, 20, 40 mm의 시제품에 대한 실험 값과 해석 값을 비교한 결과, 공기압력에 따른 성능 변화의 경향은 일치하였으며, 수축률은 최대 오차 30 % 이내, 수축력은 최대 오차 35 % 이내, 직경 변화율은 최대 오차 42 % 이하로 발생하였다. 이와 같은 오차 발생 원인은 고무의 비선형성, 코드지의 제작 시에 코드각도의 정확한 배열 여부, 고무 변형 시에 코드 배열 변화, 성능시험 시의 문제점, 즉 수축률, 수축력 및 직경 변화를 동시에 측정하지 못하여 발생하는 오차 등이 존재하므로 해석 오차는 비교적 허용할 수 있는 범위로 판단된다.

(4) 유한요소 해석을 통해서 공기압 근육 구동기의 변형 및 특성을 비교적 잘 예측할 수 있음을 알았으며, 향후 공기압 근육 구동기의 신제품 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산자부에서 시행한 부품·소재 기술 개발사업인 'Fluidic Muscle 실린더 개발에 대한 연구과제의 일부임을 밝히며 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Caldwell, D.G., Tsagarakis, N. and Medrano-Cerda, G.A., 1993, "Bio-mimetic Actuator: Polymeric Pseudo Muscular Actuators and Pneumatic Muscle Actuators for Biological Emulation," *Mechatronics*, Vol. 10, pp. 499~530.
- (2) Schneider, R.T., 2002, "It Looks Like a Piece of Hose. but It's a Pneumatic Tensile Actuator". Ideas & Applications, Festo corp.
- (3) Belforte, G., Raparelli, T., Trivella, A., 1995, "Study and Development of Innovative Pneumatic Microcylinders," *Conference of Hydraulics and Pneumatics*, Germany, pp. 235~248.
- (4) Caldwell, D.G., Medrano-Cerda, G.A., and Goodwin, M., 1995, "Control of Pneumatic Muscle Actuators," *IEEE Control Systems*, pp. 40~48.
- (5) Ostasevicius, V., Sapragonas J., Rutka, A. and Staliulionis, D., 2002, "Investigation of Active Car Suspension with Pneumatic Muscle," *2002 SAE International Body Engineering Conference*, pp. 2002~2206.
- (6) Fuchiwaki, M., Tanaka, K., Sewa, S. and Onishi, K., 2003, "Vortex Control by an Artificial Muscle Based on the Conducting Polymer," *Proceedings of the 4th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, Vol 1C, pp. 1757~1762.
- (7) Yokota, S., Komatsu T., 1991, "A Study on a Flexible Hydraulic Actuator for Space Manipulators," *J. of JSME(C)*, Vol. 57, No. 542, pp. 3222~3227.
- (8) Lee, Y.K., Shimoyama, D., 2000, "A Micro Rubber Artificial Muscle Driven by A Micro Compressor for Artificial LIMBS," *Actuator 2000 International Conference*, pp. 272~275.
- (9) ABAQUS Users's Manual, Ver. 6.2.1
- (10) Kim, D.S., Bae, S.K., Huh S. and Hong, S.I., 2005, "An Characteristics Analysis of the Fluidic Muscle Cylinder," *JFPS International Symposium on Fluid power*, Vol. 1, pp. 546~551.
- (11) Ju, C.W., Kim, D.S., 2005, "A Study on the Development for Fluidic Muscle Cylinder," Final Report, pp. 64~89.