

# 벨로우즈형 로드리스 실린더 특성해석 및 실험에 관한 연구

김동수<sup>†</sup>·김성종<sup>\*</sup>·배상규<sup>\*\*</sup>

## A Study on the Experiments and Characteristics Analysis of the Bellows Type Rodless Cylinder

Kim Dong-soo, Kim Sung-jong, Bae Sang-kyu

**Key Words:** Bellows(벨로우즈), Shock Absorber(충격흡수장치), Fluidic Muscle(인공근육), Friction Force (마찰력), LM Guide(엘엠가이드), Ball Bearing(볼 베어링)

### Abstract

A pneumatic cylinder used to sliding seal which seal the element one to another in relative motion. It is difficult to accuracy control because of adhesion phenomenon. To confirm this phenomenon, it is carried to friction force test and analysis for bellows type rodless cylinder. In the rodless cylinder of this type, friction force test is very important. Through the theoretical analysis of shock absorber obtained the optimal design of bellows type rodless cylinder. As the result of the friction force test, LM Guide type is suitable for work under low friction force.

### 1. 서 론

일반적인 공기압 실린더는 슬라이딩 씰을 사용하며, 이는 큰 마찰력의 발생과 저속 운동 시 고착 현상이 발생하여 실린더 구동 시 정확한 제어가 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 피스톤의 형상 및 마이크로 실린더 등과 같은 많은 연구가 수행되어왔다<sup>(1)(2)</sup>. 하지만 이러한 실린더들은 제작의 어려움과 비용이 높다는 단점을 가지고 있다. 많은 연구 중의 하나로 벨로우즈형 로드리스 실린더가 있다. 벨로우즈 실린더는 공기 누수, 스틱슬립, 마찰, 씰 등이 없는 신 개념의 액츄에이터로서 청정기술뿐만 아니라 국가주도 차세대 전략기술 6T 인 BT, RT를 만족시켜주는 혁신적인 기술이다. 벨로우즈 실린더의 응용분야는

피로시험기, 브레이크, 액슬, 드라이빙 시뮬레이터 등 첨단시험장비와 정밀위치, 속도, 하중제어 시스템 등의 특수환경에서 고속, 고정밀 리니어 운동을 위한 지능 서보 액츄에이터, 지능형 로봇 등으로 매우 다양하게 적용될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 벨로우즈 실린더의 설계, 제작 및 실험을 통해 그 특성 및 최적 설계 조건을 제시하고자 하며 향후 Fluidic Muscle 실린더 개발 연구에 기본 자료로 활용하고자 한다.

### 2. 이론 해석

#### 2.1 벨로우즈 실린더 모델링 및 시제품

**Fig. 1**은 벨로우즈 실린더의 기본모델을 도면으로 나타낸 것으로서 실린더 튜브 내에 벨로우즈가 장착되며, 벨로우즈 충격을 흡수할 수 있는 충격흡수장치가 장착되어 있고 캐리어는 볼베어링 또는 엘엠 가이드에 의해서 구동되어 진다. **Fig. 2**는 벨로우즈 실린더 시제품 사진으로 길이 1,000mm, 직경 50mm이다.

<sup>†</sup> 한국기계연구원

E-mail : kds671@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7152 FAX : (042)868-7176

<sup>\*</sup> 한국기계연구원

<sup>\*\*</sup> 한국기계연구원

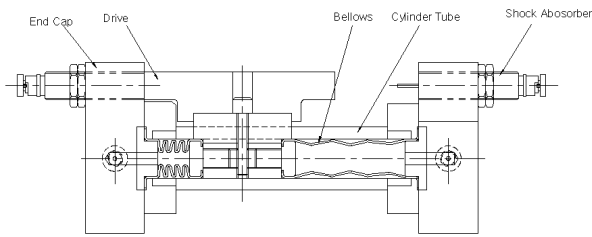


Fig. 1 Schematic of Bellows Cylinder

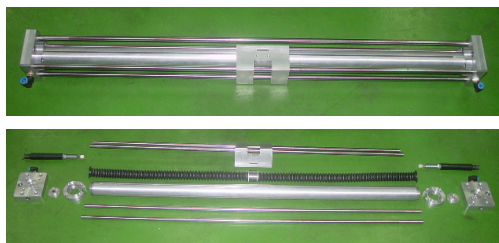


Fig. 2 Prototype of Bellows Cylinder

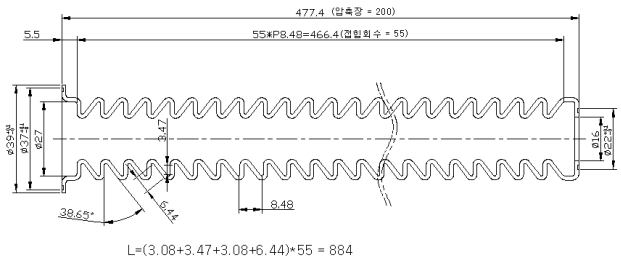


Fig. 3 Shape and Dimension of Bellows

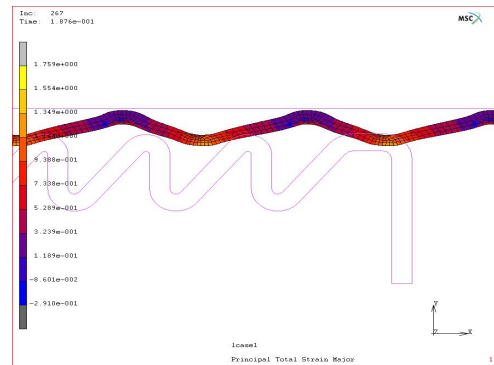


Fig. 4 Strain Curve for CR80

2.2 벨로우즈 설계 및 해석

본 연구에서는 벨로우즈를 셀프 댐핑 (Self-Damping)이 가능한 구조로 설계하였으며, 이론과 해석을 이용하여 최적의 벨로우즈를 설계하였다. 이론적인 Bellows 계산식에서 피치는 8.48mm, 접힘수는 55개, 1피치길이는 3.47+6.44+3.08×2 = 16.07mm, 이론 스트로크는 884mm, 최대 작동 길이는 800mm가 된다. Fig. 3은 벨로우즈의 형상 및 치수를 나타낸 도면이다.

최적의 Bellows를 제작하기 위하여 비선형 유한요소 해석 프로그램인 MSC.MARC를 사용하여 해석을 수행하였다. 벨로우즈는 축대칭 사면체 요소를 사용하여 구현하였으며, 튜브는 강체이며 벨로우즈 재질은 클로로프렌 고무(CR) 경도 80으로 가정하여 모델링을 하였다. 튜브와 벨로우즈 간의 접촉을 고려하여 마찰계수를 1로 사용하였으며 이것은 그 사이에 윤활제가 있는 것을 감안한 것이다. 내압은 8기압으로 하고 공기 유입 부는 완전 구속 조건을 사용하였다. 이와 같은 해석을 통하여 Fig. 4과 같은 고무의 변형을 해석 결과를 얻었으며, 최적의 조건을 설계에 반영하여 벨로우즈를 제작하였다.

Table 1 Combination data of Rubber (CR80)

배합 재료	배합량,g ( % )	비 고
CR	10,000(44.2)	고무원료
SRF	5,000(22.1)	보강제
FEF	3,800(16.8)	보강제
DOP	3,000(13.2)	가소제
스테아린산	300(1.3)	가소제
ZnO	-	가황촉진제
MgO	400(1.8)	가황촉진제
TT	50(0.2)	가황촉진제
3P	100(0.4)	연화제
합 계	22,650(100)	

벨로우즈의 재질은 본 연구 특성에 가장 적합한 온도와 속도의 특성에 가장 알맞은 클로로프렌 고무(CR)를 선정하였으며 내후성, 내오존성, 내약품성, 내열성, 강도 등이 우수한 고무로 알려져 있다. 쇼어경도 80을 얻기 위한 CR 고무를 배합 조건을 Table 1에 나타내었으며 각종 고무시험을 통한 물성치를 Table 2와 같이 나타내었다.

**Table 2** Properties data of Rubber (CR80)

시험항목		규격	실측치
기본물성	경도(Shore-A)	80±	80
	인장강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	100 이상	251
	신장율(%)	350 이상	403
시험조건		100°C × 2Hr	
내열성 시험	경도변화	+15 이하	3
	인장강도변화(%)	-15 이하	-2
	신장율변화(%)	-40 이하	-10
시험조건		100°C × 2Hr	
압축성 시험	압축영구 줄음률(%)	80 이하	10
	시험조건		100°C × 3Hr
내구성 시험	경도변화	± 3)	+3
	인장강도변화(%)	-30 이하	-12
	신장율변화(%)	-30 이하	-18
	체적변화(%)	-10 ~ 15	+4
시험조건		50PPHM 40°C × 2Hr 20%	
오존성 시험	균열상태	육안	양호
	시험조건		-40°C 3Hr
내한성 시험	균열상태	육안	양호

2.3 충격흡수장치의 설계 및 해석

충격흡수장치의 성능평가를 위해 상태방정식, 운동방정식 및 오리피스 유동방정식을 서로 결합하여 변수들을 소거하면

$$1 - \frac{Mu_0}{A_v^2 \rho V_0 l} (1 - \frac{u}{u_0}) - \frac{l-x}{l} (1 - \frac{M}{Fv_c A_v} \frac{du}{dt})^{\frac{2}{k}} + \frac{V_s}{A_v l} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{M}{Fv_c A_v} \frac{du}{dt} \right)^{\frac{1}{k}} \right\} = 0 \text{ 이 된다.}$$

여기서 무차원수  $y = \frac{x}{l}$ ,  $\bar{u} = \frac{u}{u_0}$ ,  $\tau = \left( \frac{t}{l} \right)$ ,  $V_k = \frac{V_s}{A_v l}$

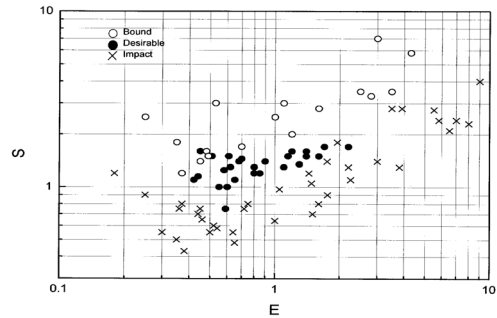
로 정의하면

$$1 - \frac{1}{S} (1 - \bar{u}) - \left( 1 - \frac{1}{E} \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)^{\frac{1}{k}} (1 - y + V_k) + V_k = 0 \text{ 이 된다}$$

여기서,  $E = \frac{Fv_c A_v l / 2}{Mu_0^2 / 2}$ ,  $S = \frac{Av_0^2 \rho v_0 l}{Mu_0}$  이고, 물리적

의미를 살펴보면 E는 운동에너지와 흡수에너지의 관계를 나타내고, S는 운동량과 피스톤 힘의 관계를 나타낸다.

상기식에서



**Fig. 5** Evaluation of Shock Absorber Performance

$\bar{u}=0, y>0, -\frac{d\bar{u}}{d\tau} \leq 0, S>1$ 이면 Bound 상태이고

$\bar{u}=0, y=0, -\frac{d\bar{u}}{d\tau} = 0, S=1$ 이면 Cushioning 상태이며,

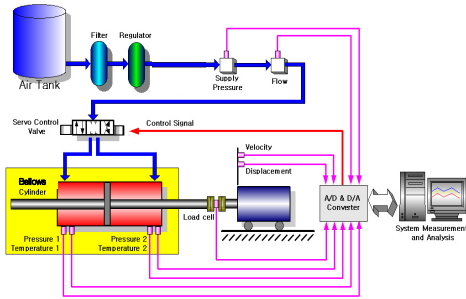
$0 < \bar{u} < 1, y=0, -\frac{d\bar{u}}{d\tau} \leq 0, 0 < S < 1$  일 때 Impact가 된다.

따라서 충격흡수기 성능의 평가는 S와 E로 판정할 수 있으며 Fig. 5에서 살펴보면 1<S<1.5, 0.5<E<2 사이에서 최적의 충격흡수성능을 나타낼 수 있다.

3. 마찰력 및 종합성능 실험

3.1 실험장치 개략도 및 사진

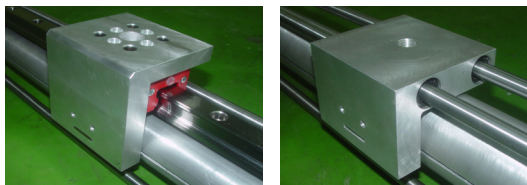
벨로우즈 실린더의 마찰력 측정 및 종합성능 평가를 위한 시험 장치를 Fig. 6과 같이 구성하였으며, 압축된 공기는 서보밸브에 의해 제어되며, 마찰력을 측정하기 위하여 로드 셀을 부착하고, 위치 및 속도 센서인 LVDT를 부착하였으며, 압력, 유량을 측정하기 위하여 각각의 센서를 부착하여 실험 장치를 구성하였다. Fig. 7은 제작된 종합성능 시험장치의 컨트롤러 부와 메카니즘 부의 사진을 나타낸다. 마찰력을 측정하기 위하여 캐리어 장치를 Fig. 8과 같이 볼베어링 장치와 과 LM 가이드 장치를 구성하여 각각에 대한 무부하 및 부하(10kgf)상태에서 실험을 수행하였다.



**Fig. 6** Friction Force and Performance Test Apparatus



**Fig. 7** Measurement Apparatus of Friction Force

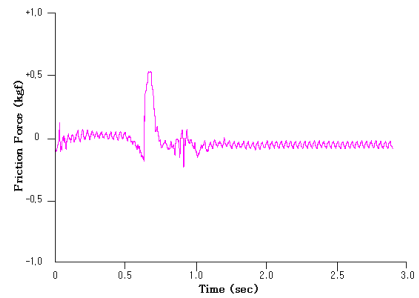


(a) LM Guide Type (b) Ball Bearing Type

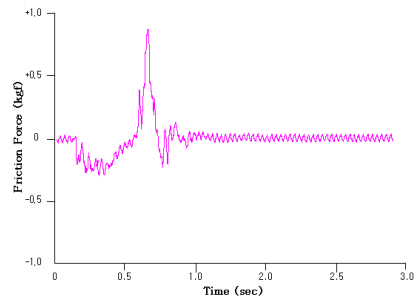
**Fig. 8** Carrier Apparatus

3.3 마찰력 실험 결과

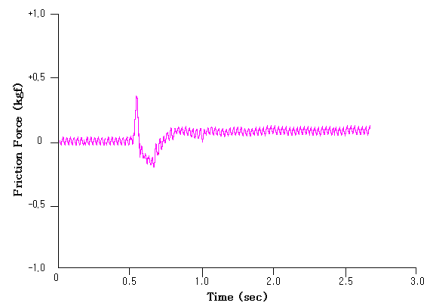
마찰력 측정결과 벨로우즈 캐리어 장치의 마찰력은 Ball Bearing Type이 LM Guide Type보다 20~25%정도 마찰력이 더 크며, 무하상태(10kgf)가 무부하 상태일 때 보다 2배정도의 큰 마찰력을 보여주고 있다. **Fig. 9 ~ Fig. 12**는 마찰력 측정에 대한 실험결과 그래프를 나타낸다



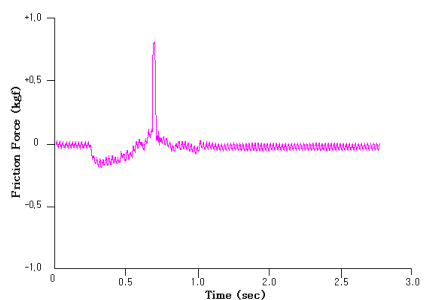
**Fig. 9** Friction Force Measure Result by Ball Bearing Type under Unload Status



**Fig. 10** Friction Force Measure Result by Ball Bearing Type under Load Status



**Fig. 11** Friction Force Measure Result by LM Guide Type under Unload Status



**Fig. 12** Friction Force Measure Result by LM Guide Type under Load Status

3.3 종합성능 실험 결과

Fig. 13, Fig.14는 6bar의 압력을 주었을 때 마찰력, 속도, 변위의 변화분포를 나타낸 그래프이다. 속도는 최대 3.8m/sec를 나타내며, 마찰력은 최대 0.8kgf, 변위는 실린더 스트로크인500mm 이동 후 일정한 상태를 보여주고 있다. 실험결과 압력이 증가할 수 록 마찰력 및 속도도 증가하는 추세를 얻을 수 있었다.

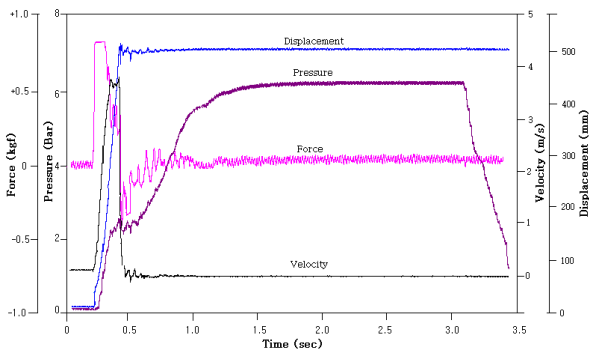


Fig. 13 Forward Direction Test Data at 6bar

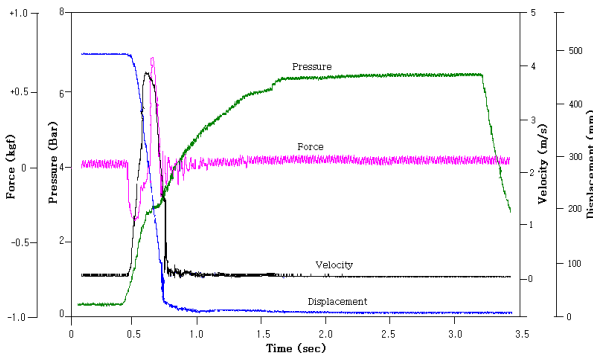


Fig. 14 Back Direction Test Data at 6bar

4. 결 론

본 연구에서 벨로우즈형 로드리스 실린더 특성 해석 및 실험에 관한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 벨로우즈 CR고무를 선정하기 위하여 배합, 물성치 실험 및 유한요소 해석을 수행하였으며 그 결과 CR80 재질이 타당하다는 결론을 얻었으며, 선정된 CR80에 대한 변형율 선도를 이용하여 벨로우즈 제작시 최적조건을 구현 할 수 있었다.
2. 벨로우즈형 로드리스 실린더 양 끝단의 충

격력 흡수기의 무차원 해석을 통하여 최적 충격흡수 조건을 제시 하였으며, 설계 데이터로 사용 할 수 가 있다.

3. 마찰력 특성 실험을 통하여 Ball Bearing Type이 LM Guide Type보다 20~25%정도 마찰력이 더 크며, 부하상태(10kgf)가 무부하상태일 때 보다 2배정도의 큰 마찰력을 가진다는것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산자부에서 시행한 부품·소재 기술 개발사업인 “ Fluidic Muscle 실린더 개발”에 대한 연구과제의 일부임을 밝히며, 감사드립니다.

참고문헌

- (1) G. Belforte, T. Raparelli, M. Velardocchia, 1993, "Study of the behavior of lip seals in pneumatic actuators", Lubrication Engineering, Vol. 49, No. 10, pp. 775-780.
- (2) G. Belforte, T. Raparelli, A. Trivella, 1995, "Study and development of innovative pneumatic microcylinders", Conference of Hydraulics and Pneumatics, Germany, pp. 235-248.
- (3) C.W. Ju, 2004, "A Study on the Development for Fluidic Muscle Cylinder", 1st Final Report.
- (4) D.S. Kim, 2002, "Rodless Cylinder", Patent No. 09616, Korea.