

# 고속 공기압 쿠션 실린더의 설계에 관한 연구

김도태<sup>+</sup>, 김동수\*, 주민진\*\*

(논문접수일 2009. 6. 25, 심사완료일 2009. 9. 14)

## A Study on the Design of a High-Speed Pneumatic Cushion Cylinder

Do-Tae KIM<sup>+</sup>, Dong-Soo KIM\*, Min-Jin JU\*\*

### Abstract

Of all of pneumatic components utilized in the make up of pneumatic circuits on either automatic assembly machine or industrial equipment, the pneumatic cylinder is more oriented toward being a structural as well as a pneumatic member. The structural design must be based to a large degree on the end of application of the cylinder on the equipment it is operating. In this paper, design studies of a double-acting pneumatic cushion type cylinder with low-friction and high-speed driving have been developed. Of interest here is to investigate the stress and strain analysis of cylinder tube, piston rod, end cover, and to analyze the buckling of piston rod. A finite element analysis is carried out to compute the distribution of the displacement, stress and safety factors by using ANSYS. As a result, the structural safety factors of each parts in pneumatic cushion cylinder are evaluated and confirmed at the design specifications.

**Key Words** : Pneumatic cushion cylinder(공기압 쿠션 실린더), High-speed driving(고속구동), Finite element analysis(유한요소 해석)

## 1. 서론

공기압 쿠션 실린더는 각종 자동화기기를 비롯한 산업용 액추에이터로 많이 사용되며, 최근에는 생산성 향상에 따른 사이클 시간의 단축으로 고속구동이 필요하다. 공기압 쿠션 실린더를 고속으로 구동하기 위해서는 피스톤과 부하를 포함한 구동부하의 신속한 가감속이 필요하며, 이 때 피스톤의

행정 끝단(Stroke end)에서 감속특성을 파악하여 쿠션성능을 향상시키는 것이 중요하다.

표준형 공기압 쿠션 실린더에서는 헤드커버와 로드커버에 내장된 니들밸브(Needle valve)의 개구면적(Opening area)을 조절하여 실린더에서 배출되는 공기를 교축시키고, 이따 발생하는 쿠션실 내부의 배압이 작용하여 완충작용이 일어난다. Kim<sup>(1)</sup>, Lee<sup>(2)</sup>, Kawakami<sup>(3)</sup> 등은 니들밸브형 쿠션기

+ 경일대학교 기계자동차학부 (dtkim@kiu.ac.kr)

주소: 712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33

\* 한국기계연구원

\*\* (주)FAMCO

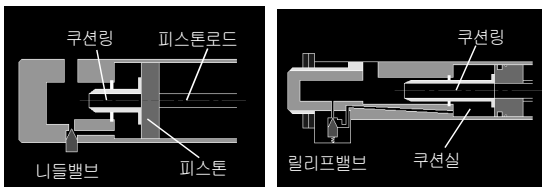
구의 동적거동에 대해 시뮬레이션과 실험을 수행하였고, Fujita<sup>(4)</sup>는 공기압 쿠션 실린더의 미터아웃 제어에서 마찰과 온도변화를 고려한 쿠션 실린더의 응답특성을 조사하였다. Kim 등은 공기압 쿠션 실린더의 위치제어기 선정에 대해 연구하였다<sup>(5)</sup>. 공기압 쿠션 실린더의 구동속도가 저속에서는 니들밸브형 쿠션기구로도 행정 끝단에서 발생하는 진동과 충격을 잘 흡수하지만, 3m/s 정도의 고속 구동이 되면 충격에너지를 잘 흡수하지 못하고 바운드(Bound) 현상이 발생하는 등 문제점이 많다.

본 연구에서는 공기압 쿠션 실린더의 쿠션기구로써 니들밸브 대신에 고속 구동에 적합한 릴리프밸브형 쿠션기구의 설계기술을 확보할 목적으로, 실린더 튜브, 쿠션링과 쿠션슬리브를 포함한 피스톤과 피스톤 로드, 헤드커버와 로드커버 등 실린더 주요 구성부품에 대한 유한요소모델을 제작하여 등가응력과 변형을 분포를 구하였다. 해석은 신뢰성이 입증된 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS 11.0을 사용하였고, 이를 이용하여 설계 안전도를 평가하여 고속 공기압 쿠션 실린더의 설계에 대한 기초자료를 획득하였다.

## 2. 공기압 쿠션 실린더의 쿠션기구

Fig. 1은 쿠션기구 내장형 공기압 실린더의 개략도이다. 쿠션기구는 행정 끝단에서 피스톤의 운동에너지를 흡수하기 위해 헤드커버와 로드커버에 설치하며, 공기압 쿠션 실린더는 Fig. 1(a)와 같이 일반적으로 니들밸브를 사용한다.

본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이, 니들밸브 대신에 릴리프밸브를 사용하며, 쿠션실 내부 압력을 릴리프밸브 설정압력 정도로 높아질 때까지 밸브를 닫고 있을 수 있기 때문에 고속 구동에 따른 큰 충격을 흡수하는 데 매우 효율적이고, 쿠션성능이 최대인 압력범위에서 공기를 배출할 수 있는 장점이 있다. 또한 피스톤의 속도변화에 따른 쿠션성능은 릴리프밸브의 압력설정조정나사로 쉽게 조절할 수 있고, 표준형 공



(a) Needle valve type (b) Relief valve type

Fig. 1 Cushion mechanism in pneumatic cylinder

기압 쿠션 실린더의 쿠션링 보다 길게 하여 쿠션실 체적 이 커지므로 큰 충격에너지를 흡수할 수 있다.

## 3. 고속 공기압 쿠션 실린더의 해석

### 3.1 형상 모델링 및 격자 생성

본 연구에서는 실린더 튜브 지름 25mm, 행정 300mm인 고속 공기압 쿠션 실린더(이하 CY25로 표기함)와 실린더 튜브 지름 32mm, 행정 500mm인 실린더(이하 CY32로 표

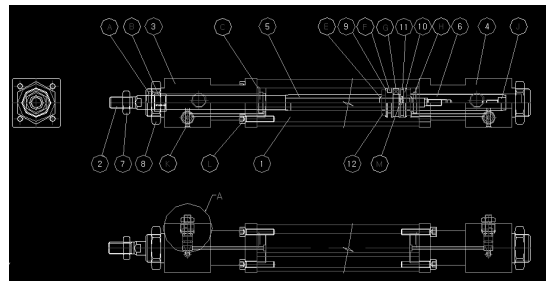
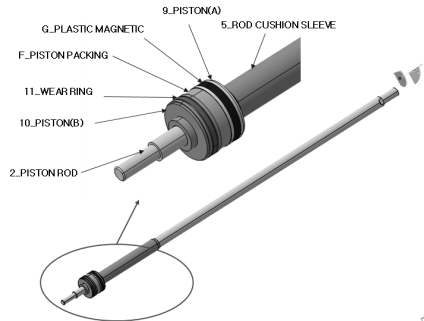
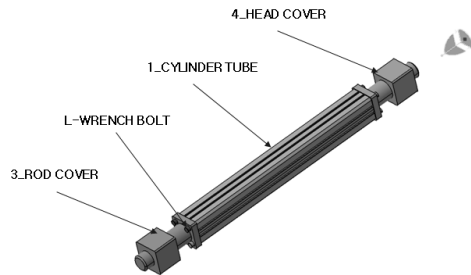


Fig. 2 Two-dimensional CAD data

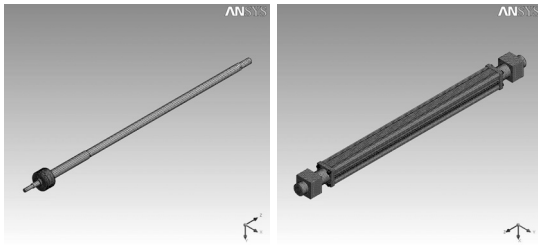


(a) Piston and piston rod assemble



(b) Pneumatic cylinder assemble

Fig. 3 Geometric modeling of pneumatic cylinder



(a) Piston and piston rod (b) Pneumatic cylinder assemble

Fig. 4 Mesh generation of finite element models

Table 1 Design Specification

Working fluid	Air
Proof pressure	1.5MPa
Maximum operating pressure	1.0MPa
Minimum operating pressure	0.1MPa
Maximum piston speed	3.0m/s
Cushion	Air cushion
Lubrication	None
Operating temperature	-10~60℃

기함)를 설계하여 구조해석을 하였다.

Fig. 2는 CY25의 CAD도면의 일부이며, Fig. 3은 2차원 CAD 데이터를 기준으로 하여 CATIA V5R17을 이용하여 피스톤과 피스톤 로드, 공기압 쿠션 실린더 조립상태의 기하학적 형상을 모델링한 것이다.

CY25, CY32의 실린더 튜브, 피스톤 로드 어셈블리, 실린더 커버 등의 기하학적 형상에 대한 유한요소 분할은 3D 20 Node structural solid element로 하였다. 격자(Mesh)는 Fig. 4와 같이 해석의 정확성을 높이기 위해 하중이 작용하는 부분, 즉 피스톤-로드의 헤드 부분 등은 세밀하게 3차원 요소를 사용하여 격자를 생성하였다.

Table 1은 고속 공기압 쿠션 실린더의 주요 설계사항을 나타낸다.

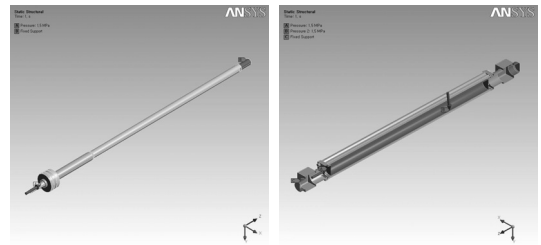
### 3.2 재료의 물성값

공기압 쿠션 실린더 구성부품의 응력과 변형을 해석하기 위해, 생성된 격자에 재료의 물성값을 입력하여야 한다.

Table 2는 실린더 튜브(A6063-T5), 피스톤 로드(SK4), 헤드·로드커버(A6063-T5), 피스톤·쿠션슬리브(SM45C), 부

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Elastic modulus	Poisson's ratio	Yield strength
A6063-T5	68.9GPa	0.33	175MPa
SK4	205GPa	0.28	315MPa
SM45C	205GPa	0.29	343MPa
C3604BD	97.0GPa	0.31	360MPa
SCM3	205GPa	0.29	1655MPa



(a) Piston and piston rod (b) Cylinder tube assemble

Fig. 5 Boundary and load conditions

싱(C3604BD), 체결용 나사(SCM3) 등에 사용한 재료의 기계적 성질을 나타낸다.

### 3.3 경계조건 및 하중 조건

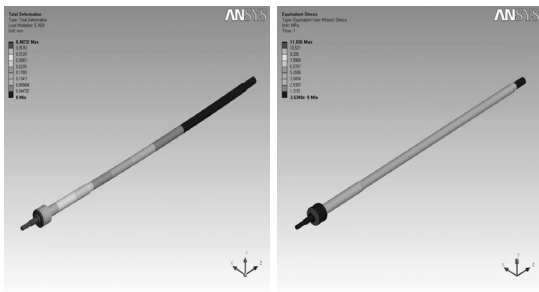
Fig. 5는 피스톤 로드와 실린더 튜브의 경계조건과 하중조건을 나타낸다. 피스톤 로드 끝단의 경계조건은 로드 상단부가 고정되어 있고, 하중조건은 피스톤 수압면적에 보증내압력(Proof pressure) 1.5MPa을 작용시켜 정적 구조해석을 한다음, 외부 하중에 대한 좌굴해석을 하여 응력과 변형 관계 및 좌굴특성을 조사하였다.

실린더 튜브 해석에서는 보증내압력 1.5MPa을 실린더 튜브 내부에서 균일하게 작용시키고, 로드커버와 헤드커버 끝부분을 완전히 구속하여 변형이 일어나지 않도록 하여 응력과 변형을 조사하였다. 또한 Fig. 4(b)와 같이 실린더 튜브와 로드 커버 및 헤드커버는 나사로 체결되었기 때문에 각 부품들이 완전히 접촉한 상태로 가정하여 해석하였다.

## 4. 해석 결과 및 고찰

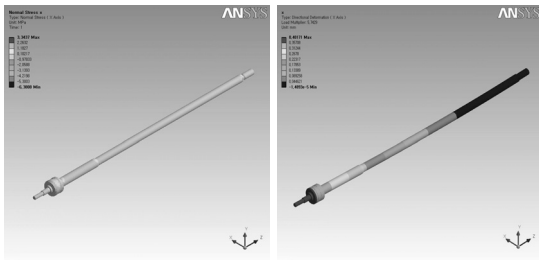
### 4.1 피스톤-피스톤 로드

Fig. 3~Fig. 5와 같이 CY25, CY32의 형상 모델링과 격

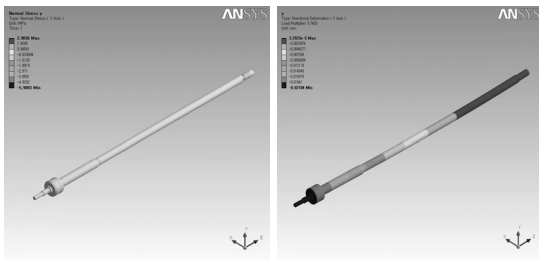


(a) von-Mises stress (b) Total deformation

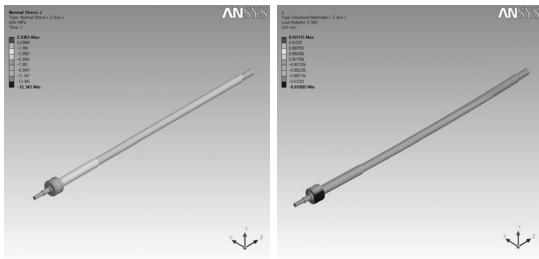
Fig. 6 von-Mises stress and deformation distribution of a piston and piston rod for CY25



(a) Normal stress (x axis) (b) Deformation(x axis)



(c) Normal stress (y axis) (d) Deformation(y axis)



(e) Normal stress (z axis) (f) Deformation(z axis)

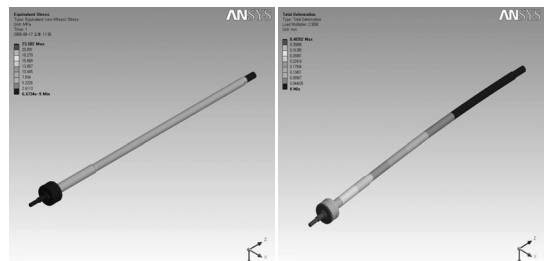
Fig. 7 Stress and deformation distribution of a cylinder tube for CY25

자생성, 재료의 물성값 입력, 경계조건 및 하중조건을 바탕으로 하여, ANSYS 11.0을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 구조해석은 실린더 튜브 내부에 작용하는 내압과 피스톤 로드에서 작용하는 하중에 대해 응력과 변형 및 피스톤 로드의 좌굴(Buckling)해석을 통해 구조적 안정성을 검토하였다.

피스톤은 추력(Thrust)을 발생시키고 실린더 튜브 내부에서 왕복운동을 하며, 경우에 따라 실린더 커버에 충돌하게 된다. 따라서 충분한 강도와 양호한 미끄럼 특성이 요구되기 때문에 재료는 기계 구조용 탄소강(SM45C)로 선정하였다. 피스톤 로드는 피스톤의 출력을 전달하는 역할을 하기 때문에 인장, 압축, 진동 등을 견디어야 하고, 또한 내마모성이 요구되며, 녹, 부식 등이 발생하지 않아야 한다. 피스톤 로드의 재료는 탄소공구강(SK4)이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 CY25의 피스톤-피스톤 로드 해석 결과, Fig. 8은 CY32의 결과이다. 피스톤 지름 25mm인 CY25에서는 최대변형이 0.402mm이고, 최대 변형은 x방향에서 발생하고, y, z방향에서는 x방향과 비교하여 변형이 적다. 최대응력은 하중이 작용하는 피스톤 로드 하단부에서 발생하며, von-Mises응력의 크기는 약 11.836MPa 정도이다. 피스톤 지름이 32mm인 CY32에서는 변형이 거의 일어나지 않으며 최대응력은 약 23.5MPa이 발생하였다. 이 결과는 피스톤 로드를 탄소공구강으로 설계하였을 때, Table 2의 항복강도 315MPa 보다 아주 작은 값을 가진다. 항복응력을 사용(허용)응력으로 나눈 값을 안전계수(이하 SF로 표기함)로 정의하면, SF는 26.6 정도이므로 정적인 구조해석 결과는 구조상 안전한 것을 알 수 있다.

Table 3은 Fig. 6과 Fig. 7에서 제시한 CY25의 피스톤-피스톤 로드의 최대 수직응력과 최대변형 및 von-Mises응력



(a) von-Mises stress (b) Total deformation

Fig. 8 von-Mises stress and deformation distribution of a piston and piston rod for CY32

**Table 3 Stress and deformation of piston and rod for CY25**

	Max. Normal stress [MPa]	Max. Deformation [mm]	von-Mises stress	Total Deformation
x	3.34	0.402	11.836	0.402
y	2.90	$0.329 \times 10^{-6}$		
z	2.64	0.016		

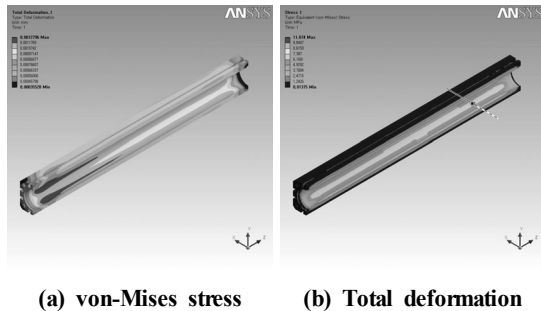
과 변형 결과를 나타낸다.

**4.2 실린더 튜브**

실린더 튜브는 피스톤이 왕복운동을 할 뿐만 아니라 압력 용기의 외곽을 형성하기 때문에 충분한 내압성과 내마모성이 필요하다. 실린더 튜브의 안지름 수치는 KS B 6702에 규정된 안지름 25mm와 32mm로 설계하였다.

Fig. 9는 실린더 튜브의 von-Mises 응력과 변형이다. 실린더 튜브의 양쪽 끝단은 폐쇄되어 있고, 실린더 튜브 내부에 보증내압력 1.5MPa이 작용하는 조건에서 해석하였다. 실린더 튜브는 알루미늄 합금 프로파일을 사용하였다. Fig. 9의 해석 결과에서 보듯이, 압력 1.5MPa이 실린더 튜브 내부에서 균일하게 작용할 때, von-Mises응력은 11.07MPa이고, 그 때 전체 변형은  $1.27 \times 10^{-3}$ mm이다. 또 알루미늄 합금 재료(A6063-T5)의 항복응력이 115MPa일 때, 안전계수가 15.8로 평가되어 구조적으로 안전하다고 판단된다.

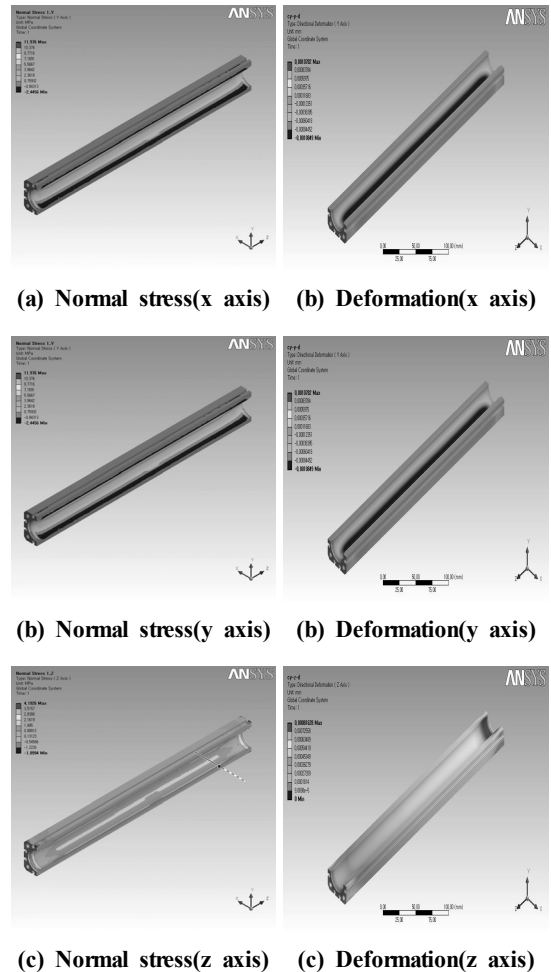
Fig. 10(a), (b), (c)는 CY25 실린더 튜브의 각각 반지름 방향(x방향), 원주방향(y방향), 축방향(z방향)의 수직응력과 변형을 나타낸다. 반지름 방향의 최대응력 12.12MPa, 최대



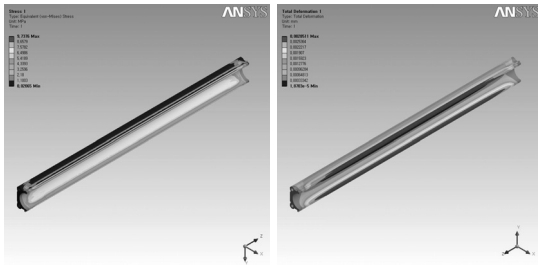
**Fig. 9 von-Mises stress and deformation distribution of a cylinder tube for CY25**

변형  $1.08 \times 10^{-3}$ mm이며, 원주방향의 최대응력 11.98MPa, 최대변형  $1.08 \times 10^{-3}$ mm이고, 축방향의 최대응력 4.19MPa, 최대변형이  $0.81 \times 10^{-3}$ mm로 나타났다. 최대응력과 최대변형이 반지름방향에서 일어나며, 원주방향 응력이 축방향 보다 약 2배 정도 큰 응력을 나타내며, 이것은 이론해의 결과와도 잘 일치한다. 또한 실린더튜브 재료의 항복응력이 115MPa이므로, x, y, z방향의 변형에 따른 실린더 튜브는 구조상의 문제점이 없는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 CY32 실린더 튜브의 von-Mises 응력과 변형이며, von-Mises 응력은 9.74MPa, 전체 변형은 0.0028mm로 나타났다. 이 경우 보증내압력 1.5MPa이 실린더 튜브 내

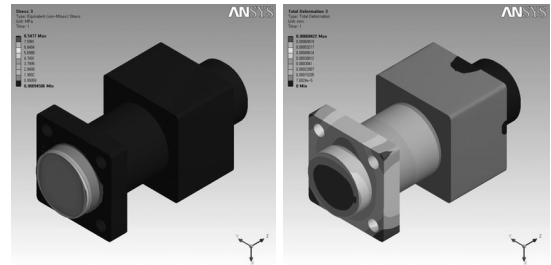


**Fig. 10 Stress and deformation distribution of a cylinder tube for CY25**



(a) von-Mises stress (b) Total deformation

Fig. 11 von-Mises stress-deformation distribution of a cylinder tube for CY32



(a) von-Mises stress (b) Total deformation

Fig. 13 von-Mises stress-deformation distribution of a cover for CY32

Table 4 Stress and deformation of cylinder tube for CY25

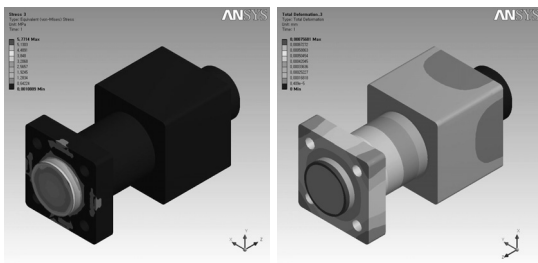
	Max. Normal stress [MPa]	Max. Deformation [mm]	von-Mises stress	Total Deformation
x	12.12	$1.08 \times 10^{-3}$	11.07	$1.27 \times 10^{-3}$
y	11.98	$1.08 \times 10^{-3}$		
z	4.19	$0.81 \times 10^{-3}$		

부에 균일하게 작용할 때, 안전계수가 18.0이므로 강도상 문제가 없다.

Table 4는 Fig. 9~Fig. 10에서 나타낸 CY25의 실린더 튜브에 대한 x, y, z방향의 최대 수직응력과 변형 분포 및 von-Mises응력과 전체 변형 결과이다.

### 4.3 실린더 커버

Fig. 12는 CY25, Fig. 13은 CY32의 실린더 커버의 von-



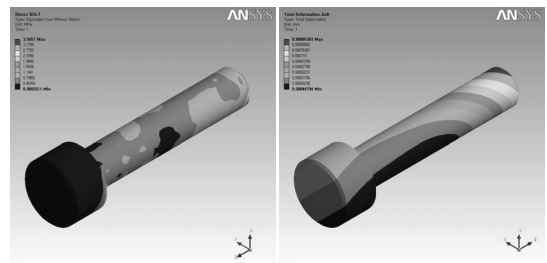
(a) von-Mises stress (b) Total deformation

Fig. 12 von-Mises stress-deformation distribution of a cover for CY25

Mises 응력과 전체 변형을 나타낸다. 재료는 실린더 튜브와 같이 알루미늄 합금(A6063-T5)이다. CY25에서 von-Mises 응력은 5.77MPa, 전체 변형은  $7.57 \times 10^{-4}$ mm이다. CY32에서 von-Mises 응력 8.55MPa, 전체 변형  $6.84 \times 10^{-4}$ mm이며, 실린더 튜브와 접촉면에서 발생한다. 또한 안전계수는 CY25에서 30.3, CY32에서 20.5로 평가되어 보증내압력 1.5MPa에서 변형은 무시할 수 있다고 판단된다.

### 4.4 체결용 나사

Fig. 14는 CY25, Fig. 15는 CY32의 실린더 튜브와 실린더 커버를 체결하는 나사의 해석 결과이며, 재료는 기계구조용 탄소강(SCM3)을 사용하였다. CY25에서 나사 끝부분에서 von-Mises 응력 3.58MPa, 전체 변형  $8.5 \times 10^{-4}$ mm, CY32에서는 von-Mises 응력 8.58 MPa, 변형  $8.08 \times 10^{-4}$ mm가 발생하였다. SCM3의 항복응력이 1655MPa 정도 이므로 안전계수는 CY25에서 464.9, CY32에서는 192.9 정도로 나타나 강도상 매우 안전하다고 할 수 있다.



(a) von-Mises stress (b) Total deformation

Fig. 14 von-Mises stress-deformation distribution of a bolt for CY25

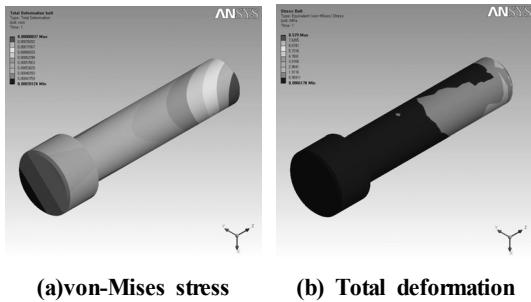


Fig. 15 von-Mises stress-deformation distribution of a bolt for CY32

### 5. 결론

본 연구에서는 고속 구동에 적합한 릴리프밸브 내장형 공기압 쿠션 실린더의 설계기술을 확보할 목적으로, 실린더 튜브, 피스톤-피스톤 로드, 실린더 커버 등 실린더 주요 구성부품에 대한 유한요소 모델을 구하여, ANSYS 11.0으로 응력과 변형을 해석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개발한 공기압 쿠션 실린더에 보증내압력 1.5MPa이 작용할 때, 실린더튜브, 피스톤, 피스톤로드, 실린더 커버의 안전계수가 모두 15 이상으로 재료의 강도측면에서 충분히 안전하게 설정되었음을 알 수 있었다.
- (2) 피스톤로드의 한쪽 끝단이 지지되고, 피스톤의 수압면적에 보증내압력 1.5MPa이 작용하는 하중조건에서 피스톤로드의 좌굴에 의한 영향은 무시할 수 있다.
- (3) 설계사양을 만족하는 실린더 튜브, 피스톤-피스톤 로드, 실린더 커버, 체결용 나사 등에 대한 유한요소해석 모델을 구축하여 고속 공기압 쿠션 실린더 설계에 관한 기초 자료를 획득하였다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부와 에너지관리공단에서 지원한 에너지자원기술개발사업으로 수행한 것입니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Kim, D. S., and Lee, S. C., 2004, "Computer Simulation and Modeling of Cushioning Pneumatic Cylinder," *Trans. of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 23, No. 9, pp. 794~805.
- (2) Lee, J. G., Qin, F., Lee, J. C., and Shin, H. M., 2005, "Simulation Study on the Dynamic Analysis of Spring Type needle Valve to Absorb Surge Pressure in Pneumatic Cushion Cylinder," *J. of the Korean Fluid Power System Society*, Vol. 2, No. 1, pp. 15~22.
- (3) Kawakami, Y., Noguchi, H., and Kawai, S. 1990, "Some Consideration of the High-Speed Driving of Pneumatic Cylinders," *J. of the Japan Hydraulics and Pneumatics Society*, Vol. 21, No. 3, pp. 124~131.
- (4) Fujita, T., Tokashiki, L. R., Ishii, Y., and Kagawa, T., 1998, "Analysis of Pneumatic Cylinder Responses Driven by Meter-Out Circuit," *J. of the Japan Hydraulics and Pneumatics Society*, Vol. 29, No. 4, pp. 87~94.
- (5) Kim, I. S., Kim, K. W., Jeong, Y. J., Son, J. S., Song, C. J., and Park, J. S., 1999, "A Study on the Selection of Controller for Position of a Pneumatic Cylinder," *J. of the Korean Society of machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 6, pp. 35~42.