

공기압용 순간 연결식 관연결구의 응력 해석

장용준* · 김윤제** · 김익수*** · 황병옥*** · 이위로*** · 임상봉****

A Stress Analysis on One-touch Fitting of Pneumatic Systems

Y.-J. Chang, Youn J. Kim, I.-S. Kim, B.-O. Hwang,
W.-R. Lee, W.-S. Choi and S.-B. Lim

Key Words: Finite element method(유한요소법), One-touch fitting(순간 연결식 관연결구)
Isotropic(등방성), Jack claw spring(보정지지부 스프링)

Abstract

One-touch fittings are important components that can make a quick and tight connection between pneumatic pipe systems. In this study, the stress analyses with various working pressures on these one-touch fittings are carried out using finite element method. Material properties, to use the stress analyses, are measured by the universal tester and digital Vickers hardness tester. The stress analyses on the circular shell spring forced by various pressures(100, 150, 200, 250kPa) and on the main body due to the fluid-structural interaction are investigated. Results show that the stresses of one-touch fitting are concentrated to supported part of main body and the soundness of a circular shell spring with maximum pressure 250kPa was confirmed.

기호설명

B	Matrix of cofactor elements
D	Matrix of material structure
L	Length between nodes
N	Function of appearance
K	Transient coefficient
k	Matrix of element stiffness
$ss, tt, z'z'$	Positions of nodes at Cartesian coordinates
t	Time
u, v, w	Function of element displacement
v_x, v_y	Velocity of fluid

그리스 문자

α, β, γ	Cofactor
τ	Shear stress
ϵ	Strain
σ	Normal stress
ν	Poisson's ratio
ϕ	Potential function
ξ, η, ζ	Cartesian coordinates of elements

1. 서론

공기압용 순간 연결식 관연결구(one-touch fitting)는 공압을 요하는 자동화기계의 실린더 등 액추에이터에 부착하여 튜브를 끼워 공압을 공급할 때 사용되는 공압부품이다.⁽¹⁾ 유공압기기를 사용하는 자동화 기계에는 공압 부품인 관연결구가 다량 사용되고 있다. 근래 들어 각 산업분야

* 성균관대학교 대학원
** 성균관대학교 기계공학부
*** 산업자원부 기술표준원
**** 상아뉴메틱(주)

에 자동화 요구가 점차 증대되고 있고, 공기압을 이용한 자동화 장비의 사용이 점차 늘어나는 추세이다. 이러한 자동화 장비는 탈착이 용이하며 작동 압력하에서의 신뢰성 및 건전성이 확보되어야 한다.⁽²⁾ 그러나, 공압이 몸체 내부에 작용하는 영향과 관련결구의 핵심부품인 보정지지부 스프링에 대한 해석적 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 순간 연결식 관련결구에 대한 표준을 수립하고 신뢰성을 높이기 위해, 실험과 유한요소법을 이용하여 해석하고, 원형 판 스프링과 몸체의 응력 분포를 파악하였다. 본 연구에서 사용된 L형 순간 연결식 관련결구 개요도는 Fig. 1에 도시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 3차원 유한 요소 해석

3차원 직교 좌표계에서 dx, dy, dz 의 크기를 갖는 미소요소에 작용하는 모멘트 평형방정식은 3개의 수직응력과 3개의 독자적인 전단응력으로 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X_b &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y_b &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z_b &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2)$$

Hooke의 법칙으로부터 등방성(isotropic)요소의 변형률-변위 관계는 다음과 같다.

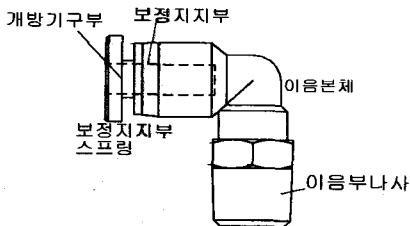


Fig. 1 Schematic diagram of one-touch fitting (L-Type)

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (3)$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

위 식을 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\{\epsilon\} = [D]\{\sigma\} \quad (5)$$

위 식에서 구성 행렬 $[D]$ 는 다음과 같다.

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, ν 는 포아송 비(Poisson's ratio)를 나타낸다. 3차원 요소를 ξ, η, ζ 의 등매개변수(equivalent parameters) 좌표계로 구성하고, 요소면들은 $\xi, \eta, \zeta = \pm 1$ 로 정의한다. 등매개변수를 정식화(normalize)하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^8 \left\{ \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \right\} \quad (7)$$

여기서, 각 절점(nodes)에 대한 형상함수 N_i 는 다음 식과 같이 정리된다.

$$N_i = \frac{1}{8} \{ (1+ss_i)(1+tt_i)(1+z'z'_i) \} \times (ss_i + tt_i + z'z'_i - 2) \quad (8)$$

위 식을 이용하여 변위함수(function of displacement)를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^8 \left\{ \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{pmatrix} \right\} \quad (9)$$

또한, 고체요소 강성행렬은 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (10)$$

이러한 강성행렬을 수치적으로 적분하여 정성적인 해를 구하는 것이 3차원 고체요소 해석이다. 본 연구에서 사용된 3차원 shell 요소는 ξ 방향의 크기가 미소한 판 형태의 요소이며 상부면과 하부면의 응력이 다르게 나타난다.⁽³⁾

2.2 2차원 유체-구조 연성해석

기본 직선요소로 표현되는 1차원 유동요소를 선택하면, 다음과 같은 2차원 속도 포텐셜함수를 지배 방정식으로 갖는다.⁽⁴⁾

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \bar{Q} = 0 \quad (11)$$

여기서, K_{xx} 는 투과성매체의 x 방향 투과계수이며, \bar{Q} 는 단위체적당 유량을 나타낸다. 경계조건은 다음과 같다.

$$\phi = \phi_B \quad \text{on} \quad S_1 \quad (12)$$

여기서, ϕ_x 는 알고 있는 경계 수두이고, S_1 은 수두 표면을 나타낸다. 2차원 삼각형 유체요소의 포텐셜함수는 형상함수와 압력과의 관계를 이용하여 구할 수 있다.⁽³⁾

$$[\phi] = [N_i \ N_j \ N_m] \begin{pmatrix} p_i \\ p_j \\ p_m \end{pmatrix} \quad (13)$$

형상함수(appearance function)는 텐서 형태로 다음과 같이 표현한다.

$$N_i = \frac{1}{2A} (\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y) \quad (14)$$

위의 결과식을 이용하여 압력구배와 속도구배의 관계는 식(15)와 같이 구배행렬 $\{g\}$ 를 이용하여 표현할 수 있다.

$$\{g\} = [B] \{p\}$$

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & \beta_j & \beta_m \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_m \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = -[D] \{g\}$$

유체요소 강성행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$[k] = \int \int_V \int [B]^T [D] [B] dV = tA [B]^T [D] [B] \quad (16)$$

하중행렬은 요소전체에 대해 단위체적당 체적 유량이 일정할 경우 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{f_q\} &= \int \int_V \int Q [M]^T dV = Q \int \int_V \int [M]^T dV \\ &= \frac{QV}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

또한, 2차 하중행렬은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \{f_q\} &= \int_{S_2} \int q^* [M]^T dS = \int_{S_2} \int q^* \begin{pmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{pmatrix} dS \\ &= \frac{q^* L_{i-j}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

전체 유체요소에 전달되는 1차와 2차 하중행렬의 합으로 연산을 수행하는 유동해석을 수행한 후, 그 해를 고체 요소행렬에 대입, 연산하여 유체-구조에 대한 연성 해석(coupled analysis)를 한다.

2.3 유한 요소

유한요소법을 이용하여 스테인레스 보정지지부 스프링은 Fig. 2와 같이 3차원 고체 평판 요소(shell 63)로 구성하였다. 이 요소는 3차원 판 또는 막 구조물의 경우에 사용되므로 본 요소를 채택하였다. 관련결구의 플라스틱 요소는 2차원 평판 요소(plane 42), 유체 요소는 2차원 평판 요소(fluid 141)를 이용하여 Fig. 3과 같이 유체-구조 연성 요소(fluid-structural coupled element)를 구성하였다.⁽³⁾

2.4 요소 물성치

정확한 해석을 위하여 각 요소의 물성치를 정의하는 것이 상당히 중요하다. 따라서, 각 시편에 대한 인장시험 및 경도시험을 각각 수행하였다. 스테인리스 시편은 KS B 0801⁽⁶⁾에 따라 Fig. 4(a)와 같은 박판 5호 시험편을 사용하였으며, Instron 만능시험기를 사용하여 인장시험을 수행하였다. 인장속도는 5mm/min와 10mm/min으로 주어 실험을 행하였으며,⁽⁷⁾ Vickers 경도계를 이용하여 경도를 측정하였다.⁽⁸⁾ 플라스틱 인장시험편은 KS B 3006⁽⁹⁾에 따라 Fig. 4(b)와 같은 1호 시험편을 사용하여 인장속도 200mm/min로 실험을 수행하였다. 또한, 디지털 Vickers 경도계를 이용하여 경도를 측정하였다.⁽⁸⁾ 이와같이 실험을 통하여 요소 물성치를 정의하여 유한요소해석을 수행하였다.

3. 순간 연결식 관연결구의 모델링

3.1 스프링 격자계 구성

보정지지부 스프링은 각 업체마다 유사한 형태를 갖고 있으며 본 연구에서는 국내 S사의 보정지지부를 기본으로 하여 간략한 형상으로 모델링하였다.⁽⁴⁾ Fig. 2는 원형 판 스프링의 고체 요소(shell 63) 격자를 나타내고 있으며 직경 12.5mm인 원형 판 스프링을 기준으로 작성하였다. 격자의 구성은 980개의 요소(element)와 1120개의 절점(node)으로 구성된 격자를 나타내고 있다. 보정지지부 스프링은 파이프에 연결되는 돌출부와 스프링을 지지하는 지지부로 구성하였다.

3.2 유체-구조 연성 모델링

관연결구의 몸체는 PBT(Poly Butane Thalate)를 사용하였으며 이에 대한 물성치를 파악하기 위해 KS B 3006⁽⁷⁾에 따라 엔지니어링 플라스틱의 인장시험을 하였다. 또한, 유체 압력 영향의 한계를 구하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 그림과 같은 유체요소와 고체요소의 다중역학 모델(multi-physics model)로 모델링하였다. Fig. 3은 엔지니어링 플라스틱의 고체요소와 유체요소로 구성된 격자계를 나타낸다.⁽⁴⁾

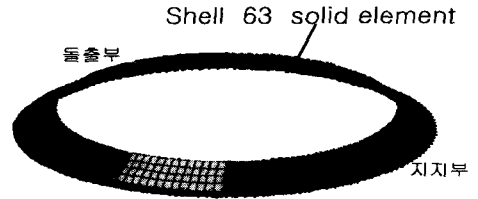


Fig. 2 Three dimensional grid systems of a circular shell spring.

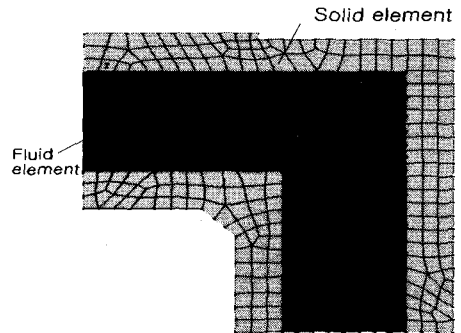


Fig. 3 Two-dimensional grid systems of one-touch fitting and fluid element.

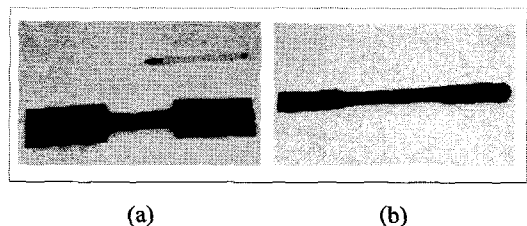


Fig. 4 Tensile test specimens; (a) stainless steel, (b) engineering plastic.

4. 결과 및 고찰

4.1 시험 결과

원형판 스프링에 사용되는 스테인레스 인장 시편의 경우, Table 1에 인장시험의 결과가 나타나 있으며 인장속도에 의한 결과차이는 크지 않았다. 영의 계수(Young's modulus, E)를 보면 인장속도에 따른 큰 차이는 없었으며 평균 $1.93 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ { $18957.183 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ }의 값을 나타내었다.

Table 1 Results of tensile test on stainless steel specimen.

Tensile speed	Max. Load (kgf)	Max. stress (kgf/mm ²)	offset Load (kgf)	offset stress (kgf/mm ²)	broken Load (kgf)	Young's modulus (kgf/cm ²)
10mm/min	1092	145.6	1012.8	134.9	1088	19450.3
5mm/min	1111	148.1	1015.3	137.4	1097	18413.6

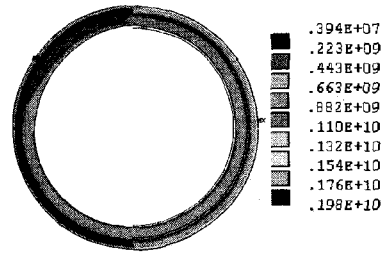
Table 2 Results of tensile test on engineering plastic specimen.

No.	Width (mm)	Thick-ness (mm)	Load (kgf)	tensile stress (kgf/mm ²)	Young's modulus (kgf/cm ²)
1	12.60	3.30	227.49	549.1	3.921
2	12.60	3.30	232.35	558.8	4.081

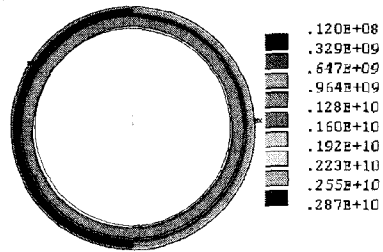
관연결구의 몸체에 사용되는 플라스틱의 경우, Table 2에 나타나 있는 바와 같이 신장률이 높은 1번 플라스틱 시편의 경우, Young의 계수가 $0.4N/cm^2 \{3.921 kg_f/cm^2\}$, 신장률이 낮은 2번 플라스틱 시편의 경우 $0.42N/cm^2 \{4.081 kg_f/cm^2\}$ 을 나타내었다. 이의 결과를 갖고 요소 물성치를 대입하여 유한요소해석을 수행하였다.

4.2 보정지지부 스프링의 유한요소해석

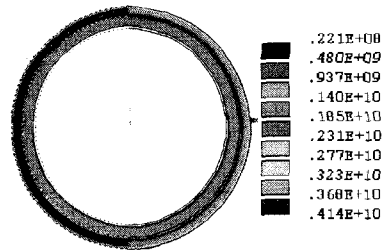
보정지지부 스프링(Jack claw spring)에 각기 다른 압력을 가했을 때 von Mises 응력 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 왼쪽 반원은 돌출부면, 오른쪽 반원은 지지부면의 응력 분포를 나타내었다. 이러한 원형 판 스프링의 경우, 응력 집중이 대칭형으로 발생하며 돌출부의 변위 변화가 크고 지지부에서 응력 집중이 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 돌출부면 보다 지지부면에 응력이 집중됨을 알 수 있다. Fig. 6은 원형 판 스프링 응력 분포를 측면에서 나타낸 그림이다. 스프링 자체의 탄성한도가 비교적 크므로 변위 변화가 크지만 150kPa과 250kPa의 압력이 작용할 때의 변위 차는 작았다. 따라서, 스프링에 가해지는 최대 응력이 파괴 하중에 도달하지 않으므로 돌출부상에 최대 250kPa의 분포 하중이 작용할 지라도 건전성이 확보됨을 알 수 있었다.



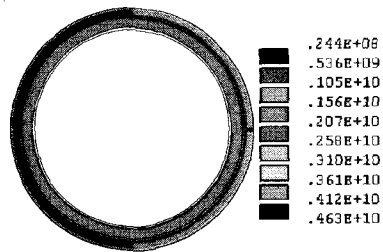
(a) pressure 100kPa



(b) pressure 150kPa

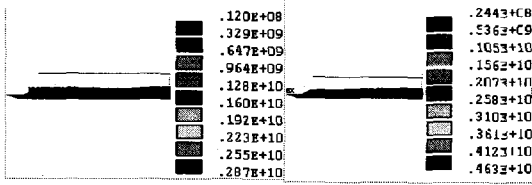


(c) pressure 200kPa



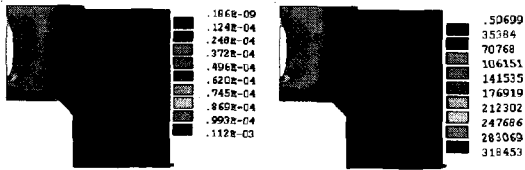
(d) pressure 250kPa

Fig. 5 von Mises stress distributions of a circular shell spring.

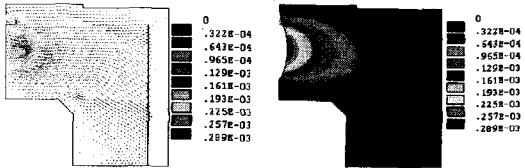


(a) pressure 150kPa (b) pressure 250kPa

Fig. 6 Stress contours on the circular shell spring (half side view).



(a) stress contour (b) pressure contour



(c) velocity vector (d) velocity contour

Fig. 7 Results of 2-D finite element analysis on main body (L-type) and fluid elements.

4.3 유체-구조 연성 해석

유체압력에 의해 변화되는 플라스틱 요소의 2차원 유한요소 해석 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 초기 조건은 작동압력 하에서 발생하는 보정지지부 스프링의 압력 및 일정한 공압이 가해질 때의 압력으로 설정하였다. 가압측 하부에서의 최대 응력은 $11.42\text{N}/\text{mm}^2$ ($112\text{ kgf}/\text{mm}^2$), 최대 압력은 318.4kPa 로 나타났다. 결과를 살펴보면, 플라스틱 몸체의 개방 지지부 하부에 응력 집중이 나타났으나 파괴하중에는 도달하지 않았으며, 외부 경계면의 변형은 없었다. 유속 분포를 보면 출구 측에서 최소 2.2 m/s , 가압측 중앙부에서 최고 2.8 m/s 의 속도로 나타났다. 작동하는 공압기의 경우, 연결되어 있는 보정 지지부에서 응력 집중이 심화되므로 보강재의 사용이 필요할 것이라 판단된다.

5. 결론

순간 착탈식 관연결구의 건전성과 신뢰성 평가 기준을 마련하기 위해 유한요소법을 이용하여 2차원 및 3차원 응력 해석을 수행하였다. 연구 결과, 원형 판 스프링의 경우 최고 250kPa 의 압력을 가했을 때 파괴 한도내를 유지하였기 때문에 사용 압력내에서는 건전성이 유지됨을 확인하였다. 또한, 유체-구조 연성해석에서는 플라스틱 몸체의 보정지지부에 응력집중이 발생함을 확인하였다.

후기

본 연구는 산업자원부 기술표준원의 산업기반 기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) JIS B 8381 空氣壓用たわみ管の管緞手, 社団法人 日本工業協會, 1995.
- (2) JIS B 8370 空氣壓システム通則, 社団法人 日本工業協會, 1995.
- (3) Logan, D. L., "A first course Finite Element Method Using Algor", PWS Publishing Co., 1997.
- (4) Saad, M. A., "Compressible fluid flow" 2nd Ed., Prentice Hall, 1993.
- (5) Moaveni, S., "Finite element analysis-theory and application with ANSYS", Prentice Hall, 1999.
- (6) KS B 0801 금속재료 인장 시험편, 한국표준협회, 1981.
- (7) KS B 0802 금속재료 인장시험, 한국표준협회, 1981.
- (8) KS B 0811 비커스 경도-시험방법-, 한국표준협회, 1999.
- (9) KS B 3006 플라스틱 인장성 측정방법, 한국표준협회, 1983.