

유한요소해석을 이용한 이물질이 고무 오링에 미치는 영향과 성능 평가

백인석¹ · 이희장² · 이석순^{1,†}

¹경상대학교 기계공학과, ERI

²셀링크 주식회사

Study on the performance of elastomeric O-ring subjected to foreign objects using finite-element analysis

Inseok Pack¹, Heejang Rhee² and Seoksoon Lee^{1,†}

¹Dept. of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang University,

²Sealink Corporation

Abstract : The elastomeric O-ring is the most-commonly-used seal due to its excellent sealing capacity, and its availability in various costs and sizes; furthermore, its importance has lasted over a long duration. However, a dearth of research exists in Korea regarding the elastomeric O-ring and the corresponding techniques. The constituent parts of elastomeric rubber are important; to determine their properties, the uni-axial tension and equi-biaxial tension need to be tested. Also, the non-linear analysis method reduces the design cost. An O-ring failure causes leaks and vibration. In this paper, foreign objects are used to affect an O-ring and its performance so that all angles of the O-ring design can be considered. This paper presents a solution for the O-ring-failure problem using a finite-element analysis.

Key Words : Elastomeric O-ring, Rubber, Non-linear, Leaks, Vibration, Foreign object

1. 서 론

Figure 1과 같은 오링은 오늘날 가장 광범위하게 사용되는 시일이다. 이유는 저렴한 생산 방법과 사용의 용이성 때문이다. 시일의 가장 큰 사용 목적은 윤활유나 작동유체의 누설과 이물질이 기계내부로 침입하는 것을 방지하기 위함이다. 오링의 설계 오류가 초래되는 문제점의 예는 1986년 챌린저호의 폭발이 대표적이다. 미항공우주국(NASA)을 비롯한 연구 기관들은 그 중요성을 인식하고 막대한 연구비를 투입하여 오링의 기밀 성능에 대한 연구를 수행해왔다.[1,2]

Figure 2에서 확인할 수 있듯이 일반적으로 오링의 기밀 성능은 최고 접촉 응력(Max. contact pressure)과 작용 압력(applied pressure)의 비에 의하여 평가되며, Leachy 등의 실험 결과에 의하면 작용 압력이 최고 접촉 응력보다 크면 오링에서 압력 누설이 발생한다고 보고되어있다. 접촉 응력은 오링의 압축 및 압력에 의해 발생되며 최고 접촉 응력의 크기는 압축률, 조립 틈새(clearance gap), 압력 등에 의존하는 것으로

Received: July 25, 2016 Revised: Aug. 10, 2016 Accepted: Aug. 11, 2016

† Corresponding Author

Tel: +82-055-772-1622, E-mail: leess@gsnu.ac.kr

Copyright © The Society for Aerospace System Engineering

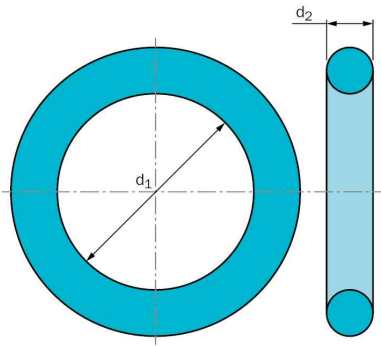


Fig. 1 Dimensions of the O-ring

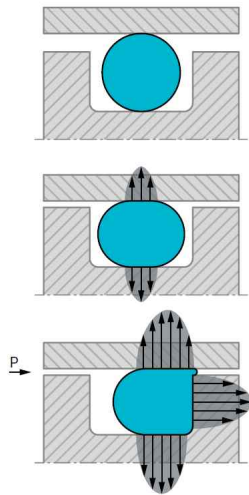


Fig. 2 O-ring sealing forces

알려져 있다. Fig. 2에서 오링의 거동 및 응력의 분포를 확인할 수 있다. 고무의 경우 대변위, 대변형 및 비선형 거동을 보일 뿐만 아니라 푸아송(Poisson) 비가 0.5에 근접하여 해석 시에 수렴이 잘 되지 않기 때문에 오링의 국부적 변형 거동을 규명하기 위한 유한요소해석 분야 연구의 발전 속도는 느린 실정이다. 또한 실험에 의한 타당한 검증 없이는 해석 결과의 신뢰성에 의문이 제기되고 있는 실정이다. 특히 오링이 단축벽 구속 하에서 압축 및 고압을 받는 조건에서 요소는 심하게 변형되며 이에 따른 해의 수렴성 문제가 발생되기도 한다.[3-6]

본 연구에서는 단 축벽 구속 하에서 압축 변형과 압력을 동시에 받는 오링 문제에 대하여 초탄성 유한요소해석을 비선형해석 전문 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였다. 수행된 해석 방법과 결과를 토대로 조립틈새와 작용압력이 오링의 접촉 응력 분포에

미치는 영향을 상세하게 분석하여 고무 오링의 설계 평가 기준으로 제시하였다.[7,8,9]

2. O-ring 유한요소 해석

2.1재료특성

가장 광범위하게 사용되는 시일의 재료는 고무가 주를 이루고 있다. 고무는 탄성을 가지고 있지만 하중과 변형이 선형적이지 않고 대변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초탄성체(hyperelastic material)의 성질을 가지고 있다. 고무와 같은 초탄성 특성을 나타내는 재료의 거동에 대해서는 일반적인 미소변형의 응력-변형률 식이 아닌 주신장률-변형률에너지포텐셜의 식으로 표현된다.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_3\lambda_1 \quad (3)$$

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \quad (4)$$

여기서 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 주신장률(principal stretch)이다. 재료를 비압축성으로 가정하면 $\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1$ 이며, Mooney-Rivlin model 또는 Ogden model로 나타낼 수 있다.

Mooney-Rivlin model

$$W = W(I_1, I_2) = \sum_{i+j} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (5)$$

Ogden model

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (3)$$

여기서 C_{ij}, α_n, μ_n 은 시험결과로부터 결정할 수 있는 재료상수이며, 인장시험, 압축시험, 전단시험 등으로부터 얻을 수 있다.[10,11,12]

본 연구에서는 이 단축인장 시험결과를 ABAQUS에 입력하여 Mooney-Rivlin 모델의 상수 값을 구하여 해석에 사용하였고 그 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material Properties

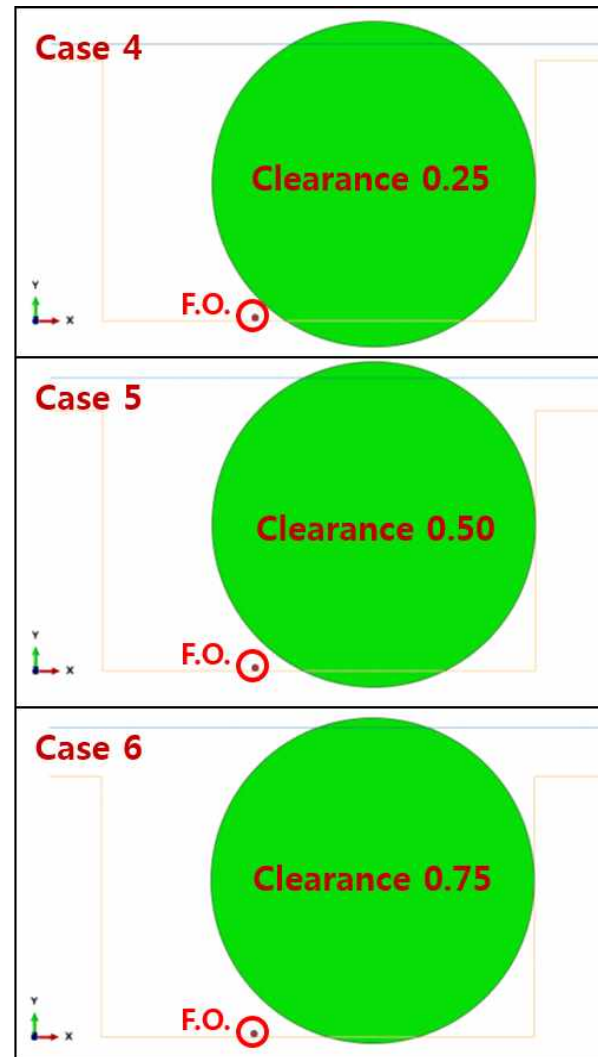
	C10	C01	Density (kg/m ³)
Seal, NBR	2.746	4.597	0.0425

2.2 해석 모델

**Fig. 3** Cases 1 to 3 without foreign object

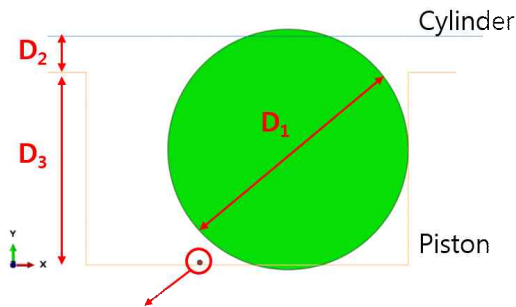
본 연구에서는 조립 틈새의 변화와 이물질에 의한 작용 압력에 대한 최대 접촉 응력을 도출한다. Fig. 3, 4의 6가지 경우로 조립 틈새와 이물질을 변화를 두었다. 조립 틈새는 0.25, 0.50, 0.75 mm로 3가지 경우

이다. 오링은 $\varnothing 5.00$ mm이며, 이물질은 $\varnothing 0.10$ mm이다. 오링은 trelleborg사의 고무 오링을 참고하였고, 이물질은 머리카락 굵기를 기준으로 하여 원형의 이물질로 모델링 하였다. Fig. 5에 오링과 피스톤, 실린더의 형상을 확인할 수 있다. 위아래의 선분들이 실린더와 피스톤의 벽을 나타낸다. 아래의 실린더 벽에 홈이 파져 있고 홈 내부에 오링이 장착된다. 피스톤과 실린더가 모두 원통형으로 축대칭 형상이 되므로 내부 오링도 오링의 단면을 기준으로 한 축대칭 2차원 해석을

**Fig. 4** Cases 4 to 6 with foreign object

수행하였다. Fig. 6에는 오링과 이물질의 요소망을 나타내었다. 사용된 유한요소격자의 수는 오링에 2342개, 절점 수는 2409개로 6가지 case 조건 모두 동일하다. 이물질에는 유한요소격자 1040개를 생성하였다. 실린더 및 피스톤은 고무 오링에 비하여 상대적으로

단단하므로 강체로 처리하였으며, 비선형 유한요소 해석에 강점이 있는 ABAQUS를 해석 툴로 사용하였다. 해석 순서는 첫 번째로 오링의 장착이 되고 두 번째는 150 bar의 압력이 가해진다. 이물질이 들어가는 경우는 세 번째 단계가 들어가며 압력이 가해져 있는 오링과 실린더 사이로 침입하게 시뮬레이션 하였다. 이것은 실제적으로 일어나기 힘든 경우이지만 가장 극단적인 경우로 상황을 모사한 것이다. 모든 부품 간에는 작동유가 존재하므로 마찰계수는 0.01로 설정하였다.



Foreign object = $\varnothing 0.10$ mm (Const)

$D_1 = \varnothing 5.00$ mm (Const)

$D_2 = 0.25, 0.50, 0.75$ mm

$D_3 = 4.00$ mm (Const)

Fig. 5 Drawing of analysis modeling

2.3 O-ring 설계 인자

본 연구에서 사용되어진 오링은 sealink사의 $\varnothing 5.00$ mm의 모델이다. 구조물에 대해 오링을 선택하지 않았다. 오링에 맞춰서 구조물을 모델링하여 연구에 적용하였다. 역으로 한 이유는 구조물에 맞춰서 오링을 선택을 하게 된다면, 구조물과 오링의 모델링이 복잡해 지므로, 최대한 간단한 모델을 적용하기 위해 오링을 기준으로 모델링 하였다. 설계 기준은 KS B 2799, JIS B 2406 규격에 의해 설계하였다. Fig. 7에서 오링의 설계 기준을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 찌그러짐율을 약 20% 이하로 설정하고 충전율은 약 70%로 설정하였다. 총 6가지 경우이지만 간극에 따라 3경우로 나뉘므로 설계 인자 값은, 간극이 0.25 일 때에 찌그러짐율은 15 %, 충전율은 68.9 % 이다. 간극이 0.50 일 때에 찌그러짐율은 10 %, 충전율은 65.1 % 이다. 간극이 0.75 일 때에 찌그러짐율은 5 %, 충전율은 61.7 % 이다. 초기 설계 인자 값에 충족하는 값으로

설계 하였다.

2.4 O-ring 유한요소 해석 단계

본 연구에서는 Case 1-3에서는 총 두 개의 Step으로 해석이 이루어지고 Case 4-6에서는 총 세 개의 Step으로 이루어진다. Fig. 8에서 자세하게 해석 단계가 나뉘어져 있는 것을 확인 할 수 있다. 첫 번째 단계에서는 Abaqus에서 사용할 수 있는 해석 기법을 사용하여 오링과 구조물에 결합 단계이고, 두 번째 단계는 150

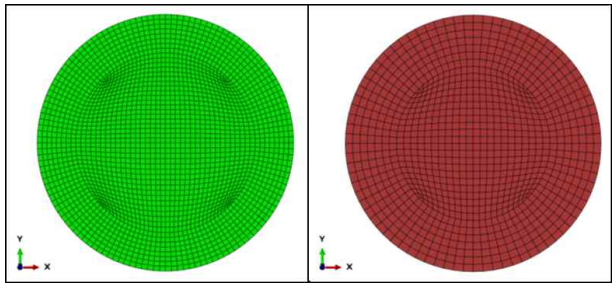


Fig. 6 O-ring and foreign-object elements

찌그러짐(mm)	$\sigma = W - H$	
찌그러짐율(%)	$\frac{\sigma}{W} \times 100$	
충진율(%)	$\frac{\pi/4 \times W^2}{G \times H} \times 100$	

Fig. 7 Rule of the O-ring design

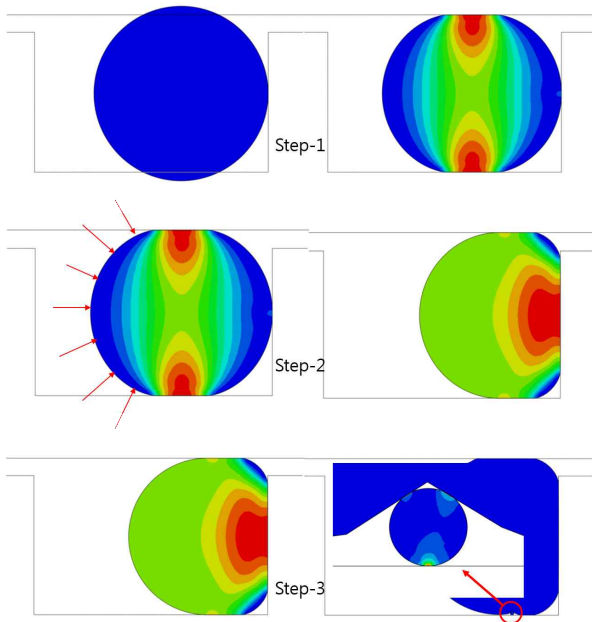


Fig. 8 Steps of analysis

bar 의 내압이 적용되어지는 단계이다. 세 번째 단계에서는 이물질이 유입되어지는 단계로 나뉘어져 있다.

Case 1~3은 결합 후 내압만을 적용하였을 때 간극에 따른 성능 평가이고, Case 4~6은 결합 후 내압을 적용하고 이물질이 오링과 그 성능에 관한 평가로 나뉘어져 있다.

Case 1~3의 경우는 밀봉이 제대로 이루어져 있는지 성능에 대한 평가만이 가능하다.

Case 4~6의 경우는 이물질이 오링과 구조물에 미치는 영향을 비롯해서 오링의 성능 평가 또한 할 수 있다.

3. 해석 결과 및 토의

본 연구에서는 내압 150 bar 의 압력보다 큰 접촉응력이 발생하면 오링의 성능을 만족하는 것이다. 그리고 이물질이 오링에 미치는 영향과 구조물에 미치는 영향을 파악하는 것이다.[13,14]

Case 1~3 은 전자에 속하고 Case 4~6은 후자에 속한다. 그래서 Case 1~3 은 해석 결과값으로 쉽게 분석가능하지만 Case 4~6은 심도있게 고려해보아야 한다.

Case 1, 2, 3에서 오링에 발생하는 최대 폰-미세스 응력값을 확인하면 14.4 MPa, 18.02 MPa, 18.19 MPa 이 발생한다. 그리고 최대 접촉응력은 21.74 MPa, 29.36 MPa, 29.71 MPa 이 발생하였다. 3가지 경우 전부 작용된 내압 150 bar 즉, 15 MPa 이상이 발생하므로 성능에 문제가 없는 것으로 판단된다. 간극이 작으

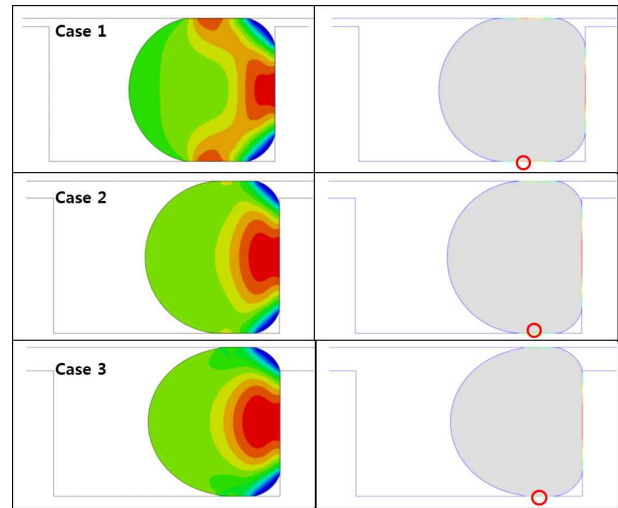


Fig. 9 Results of Cases 1 to 3

면 접촉응력이 클 것 이라고 생각했지만, 해석 결과에서는 오히려 간극이 증가할수록 접촉응력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Case 4, 5, 6에서 오링에 발생하는 최대 폰-미세스 응력값을 확인하면 24.09 MPa, 21.95 MPa, 18.43 MPa 이 발생한다. 그리고 시일과 구조물 사이의 최대 접촉응력은 5.28 MPa, 7.72 MPa, 5.87 MPa 이 발생한다. 접촉응력을 확인하면 내압 15 MPa 보다 작으므로 누수 발생의 원인이 된다. 또한 이물질과 구조물 사이에 발생하는 최대 접촉응력은 924.0 MPa, 740.9 MPa, 376.2 MPa 이 발생한다. 그러므로 이물질에 의해서 구조물에 파손이 발생할 수 있는 것으로 판단할 수 있다. 또한 오링에 발생하는 최대 접촉응력값은 약 100 MPa, 76 MPa, 40 MPa 이 발생하였다. 간극이 증가함에 따라 이물질과 구조물 사이에서 발생하는 응력이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 발생한 응력은 오링에 충분히 파손을 입힐 수 있는 것으로 판단된다. Case 4, 5, 6에 대해서 판단하자면 이물질이 침범한 위치는 누수의 위험이 있지만 총 3면이 접촉을 하고 있으므로 다른 2점 점에서 누수를 막아 줄 수 있다고도 판단된다. 초탄성체의 접촉응력은 간극이 감소함에 따라 증가하지는 않고, 일정 변형량을 넘어서면 오히려 감소하는 것을 Case 1, 2, 3 에서 확인할 수 있다. 그리고 탄성체와 탄성체 간은 계속해서 접촉응력이 증가하는 것을 Case 4, 5, 6에서 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서 Case 1, 2, 3은 단순 오링의 밀봉 성능

만 판단할 수 있다면 Case 4, 5, 6은 밀봉 성능 뿐만 아니라 외부 이물질에 의한 오링, 구조물의 영향을 알아 볼 수 있다. 충전율이 따라 Case 4, 5, 6 을 분석한다면 충전율이 높을수록 이물질에 대한 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 그리고 내압에 대한 변형을 또한 충전율이 높을수록 변형률이 낮게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

2D 해석이므로 신뢰도에서는 분명 문제가 있다. 하지만 간단하게 오링 및 실린더, 피스톤 구조물을 설계했을 때 설계 시 고려사항들을 충분히 판단할 수 있다고 생각한다.

현재 3D 모델링으로 오링 시일을 연구한 논문 자료나 연구 자료가 매우 부족하다. 연구자 본인은 3D 오링 시일로서 연구를 하고 있으므로 차기 논문에서는 보다 신뢰성 있는 연구 논문으로 내용을 채울 수 있을 것이라 사료된다.

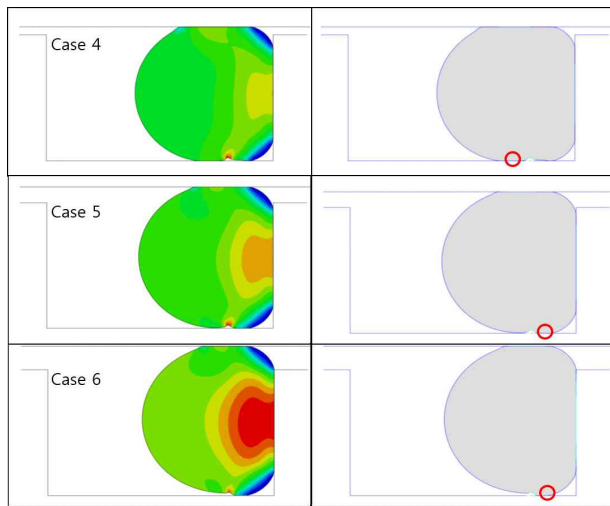


Fig. 11 Results of Cases 4 to 6

후 기

본 연구는 중소기업청과 중소기업기술정보진흥원의 “중소기업기술혁신개발사업 투자연계과제(과제번호: S2370889), 차세대 기계항공 창의인재 양성사업인 BK Plus와 교육부 지방 특성화 사업인 CK-I 사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

[1] Ellis, R. A. and Keller, JR, R. B., “Solid Rocket Motor Nozzles,” NASA-SP-8115, 1975.

[2] Allan, J. M., “Lessons Learned but Forgotten from the Space Shuttle Challenger Accident,” Space 2004 Conference and Exhibit, AIAA 2004-5830, pp. 1-10, 2004.

[3] Lindley, P. B., “Compression Characteristics of Laterally- Unrestrained Rubber O-Rings,” Journal of Industrial Research Institute, Vol. 1, pp. 209-213, 1967.

[4] Leachy, J. C., “Sealing with Elastomers and Applications to Valve Seat Design for High Pressure,” 5th International Conference on Fluid Sealing, pp. 69-88, 1971.

[5] Ebisu, T., Yamamoto, M., Maekawa, J. and Onodera, A., “Fundamental studies on the performance of ‘O’ ring for cask,” PATRAM 83, pp. 672-679, 1983.

[6] Yokoyama, K., Okazaki, M. and Komito, T., “Effect of Contact Pressure and Thermal Degradation on the Sealability of O-ring,” JSAE Review, Vol. 19, No. 2, pp. 123-128, 1998.

[7] Pearl, D. R., “O-Ring Seals in the Design of Hydraulic Mechanics,” SAE Quarterly Transactions, Vol. 1, No. 4, pp. 602-611, 1947.

[8] Hooke, C. J., Lines, D. J. and O’Donoghue, J. P., “Elasto-hydrodynamic Lubrication of O ring Seal,” Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Vol. 181, No. 9, pp. 205-223, 1967.

[9] Cho, H. G., Chae, S. W. and Park, J. J., “A Remeshing Criterion for Large Deformation Finite Elenent Analysis,” J. of KSPE, Vol. 13, No. 10, 99. 78-85, 1996.

[10] Day, J. R. and Miler, K. A., “Equibiaxial Steretching of Elastomeric Sheets, an Analytical Verification of an Experimental Technique,” ABAQUS Users Conference Proceedings, pp. 205-219, 2000.

[11] Rivlin, R. S., 1956, “Large Elastic Deformations in Rheology: Theory and Application,” Academic Press, New York. Vol. 1.

[12] Ogden, R. W., 1972, “Large Deformation Isotropic Elasticity-On the Correlation of Theory and

Experiment for Incompressible Rubber-like Solids,”
Proceedings of Royal Society of London, Vol. A 326,
 pp. 565~584.

- [13] Kang, M. G., Tak. S. M., Park. D. J. and Lee. S. S. “The Study of Impact Analysis about Inertia Measure Unit of High Speed along Impact curve,”
Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 29-33, December, 2012.
- [14] Kang, M. G., Park. D. J. and Lee. S. S. “The Study of Aerodynamic about High-speed projectiles using Fluid Structure Interaction analysis,”
Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 7-11, December, 2012.

저 자 소 개



백 인 석

2012년 경상대 기계공학과 졸업. 2014년 동 대학원 석사 수료. 2014년~2015년 두원중공업 근무 2015~현재 경상대학교 기계공학과 석사. 관심분야는 최적 설계 및 초탄성 해석



이 희 장

1988년 충남대 화학과 졸업. 1990년 동 대학원 석사. 2004년~2006년 경상대 박사과정. 2014년~현재 쉐링크 주식회사 대표이사. 관심분야는 유체 쉐링크 연구 및 운할공학, 모델링, IoT 및 융합밀폐 장치.



이 석 순

1982년 한국항공대 공학사. 1984년 한국과학기술원(KAIST) 공학석사. 1989년 한국과학기술원(KAIST) 공학박사. 2000년~현재 경상대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 최적 설계 및 접촉 문제.