

석탄하역기 붐 호이스팅 실린더의 구조 안전성에 관한 연구

최용훈* · 곽효서* · 김 철**†

* 부산대학교 창의공학시스템학과, ** 부산대학교 기계기술연구원

A Study on Structural Safety of the Boom Hoisting Cylinder of a Coal Handling Machine

Yong Hoon Choi*, Hyo Seo Kwak* and Chul Kim**†

* Dept. of Creative Engineering System, Pusan Nat'l Univ.,

** Research Institute of Mechanical Technology, Pusan Nat'l Univ.

(Received September 16, 2015 ; Revised October 20, 2015 ; Accepted October 27, 2015)

Key Words: Boom Hoisting Cylinder(붐 호이스팅 실린더), Coal Handling Machine(석탄 하역기), V-seal(브이 실), Contact Pressure(접촉 면압), FE Analysis(유한요소해석)

초록: 석탄하역기는 화력발전소의 주 원료인 석탄을 체인 버킷을 구동하여 선박으로부터 컨베이어 벨트로 하역하는 장비이다. 그러나 국내에서는 석탄하역기의 하역위치에 따라 붐 각도를 제어하는 유압시스템인 붐 호이스팅 실린더에 대한 연구가 이루어지지 않아, 전량 수입하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 두꺼운 실린더에서 접촉면압의 이론 값을 FEM 을 수행하여 얻은 결과 값과 비교하여 접촉면압 해석기법의 타당성을 확립하였고, 이를 통하여 브이 실을 갖는 붐 호이스팅 실린더에서 작동유의 누설 여부 판단과 접촉면압을 최대로 갖는 브이 실 형상을 설계하였다. 또한, 실린더의 스트로크에 따른 구동 시뮬레이션을 수행하였고, 최대 출력 상태에서의 붐 호이스팅 실린더의 구조 안전성을 검증하였다.

Abstract: A coal handling machine is a type of equipment used for loading coal, the main material in a steam power plant, along a conveyer belt from a ship, and is placed after the driving chain bucket. However, studies on the boom hoisting cylinder, which is a hydraulic system used to control the angle of the boom based on loading location, indicate that domestic models are insufficient, and are thereby often substituted with a foreign product. In this study, a technique for analyzing the contact pressure in a thick-walled cylinder was established by comparing the contact pressure, which is calculated theoretically based on the results obtained from FEM simulation, and by checking whether the working oil is leaking from the boom hoisting cylinder using a v-seal. In addition, the driving motion was simulated according to the strokes of the cylinder, and the structural stability was verified under the maximum output conditions.

1. 서론

화력발전소는 주로 석탄 연료의 화학적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 거대한 보일러로 물을 끓여서 나오는 증기로 터빈을 회전시키고 터빈에 연결된 발전기를 돌려 전기를 발생시킨다. 화력발전소는 터빈, 발전기, 보일러, 통풍장치, 운탄설비, 전송설비로 구성되어 있으며, 이 중 운탄설비는

석탄을 운반, 분쇄하여 보일러에 공급하는 설비로서 화력발전소에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 운탄설비 중 하나인 석탄하역기는 Fig. 1⁽¹⁾과 같이 화력발전소의 연료인 석탄을 체인 버킷(Chain bucket)을 구동하여 선박으로부터 컨베이어 벨트로 하역하는 장비이며, 석탄의 하역위치에 따라 붐(Boom) 각도를 제어하는 유압시스템인 붐 호이스팅 실린더(Boom hoisting cylinder)가 장착되어 있다. 석탄하역기는 우리나라 주요 업체에서 자체 제작을 하고 있으나 붐 호이스팅 실린더의 경우에는 고가의 외자품을 전량 수입을 하고 있는 실정이며, 예비품을 보유하지 않아 돌발 고장 발

† Corresponding Author, chulki@pusan.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

생 시, 설비의 정지가 장기화되어 전력 생산에 막대한 영향을 미치기 때문에 국산화 개발이 필요하다. 또한, 붐 호이스팅 실린더의 정확한 출력, 원활한 구동 및 마모저감을 위한 작동유의 누설을 방지하기 위하여, 기존 연구에서는 오링(O-ring), 립 시일(Lip seal), U 자형 시일(U seal), 메탈 실(Metal seal)의 유한요소해석을 통한 기밀 성능 평가, 형상 설계 및 누설방지 연구가 이루어 졌으나, 브이 실(V-seal)에 대한 연구는 전무한 실정이다.⁽²⁻⁸⁾

이에 본 연구에서는 두꺼운 실린더에서 접촉면압의 이론 값을 FEM 을 수행하여 얻은 결과 값과 비교하여 접촉면압 해석기법의 타당성을 확립하였고, 이를 통하여 브이 실(V-seal)을 갖는 붐 호이스팅 실린더에서 작동유의 누설 여부 판단과 접촉면압을 최대로 갖는 브이 실 형상을 설계하였다. 또한, 실린더의 스트로크에 따른 구동 시뮬레이션을 수행하였고, 최대 출력 상태에서의 붐 호이스팅 실린더의 구조 안전성을 검증하였다.

2. 이론적 해석

붐 호이스팅 실린더에 사용되는 브이 실에 의한 작동유의 누설여부 판단을 위한 구조해석기법을 확립하기 위하여, 이론적 해석을 통하여 두꺼운 실린더를 억지끼워맞춤 하였을 때 접촉면압을 도출하였다.

2.1 억지끼워맞춤에서 두꺼운 실린더의 접촉면압

평면응력(Plane stress) 상태에서 두꺼운 실린더에 P_o ($r=r_o$)의 외압 및 P_i ($r=r_i$)의 내압이 Fig. 2 와 같이 작용할 때 발생하는 응력은 라메식 (Lame's equation)⁽⁹⁻¹⁵⁾으로 나타낼 수 있으며, 반경방향 응력(σ_r)은 식 (1), 원주방향 응력(σ_t)은 식 (2)에 나타내었다. 여기서 r_i 는 실린더의 내경, r_o 는 실린더의

외경이다. 실린더에 내압만이 작용할 때, 반경방향으로 항상 압축응력이 작용하고, 원주방향으로는 인장응력이 작용하며, 원주방향응력은 내압작용면에서 내압보다 큰 값을 가진다.

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{(P_o - P_i) r_i^2 r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)} - \frac{(P_o - P_i) r_i^2 r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} \quad (2)$$

실린더의 높이가 같고 평면응력 상태라는 가정 하에서, 식 (1) 및 식 (2)를 이용하여 내부실린더 (Inner cylinder)를 외부실린더(Outer cylinder)에 억지끼워맞춤 하였을 때, Fig. 3 과 같이 접촉면에 접촉면압(P)이 발생하고, Fig. 4 와 같이 외부실린더는 내압(P_i), 내부실린더는 외압(P_o)을 받는다.

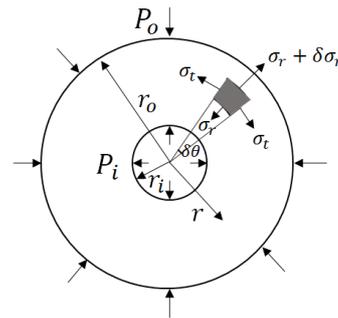


Fig. 2 General loading condition in a thick-walled cylinder

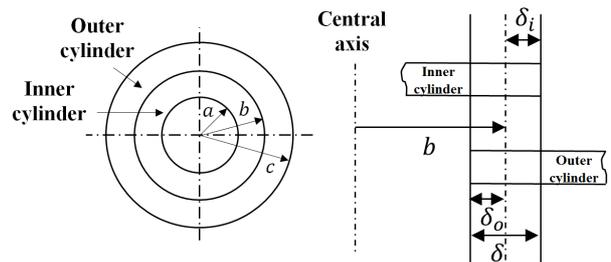


Fig. 3 Concentric cylinder assembled with interference fit

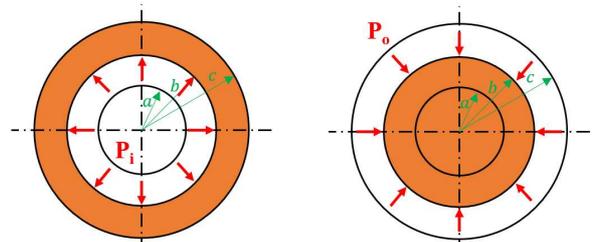


Fig. 4 Direction of pressure when concentric cylinder assembled with interference fit



Fig. 1 The coal handling machine

역지끼워맞춤의 양(δ)이 주어질 때, 외부실린더의 내측이 역지끼워맞춤에 의해 늘어나는 양(δ_o) 및 내부실린더의 외경이 역지끼워맞춤에 의해 줄어드는 양(δ_i)은 식 (3) 및 식 (4)와 같다. 이때, E_o 및 E_i 는 외부 및 내부 실린더의 탄성계수, ν_o 및 ν_i 는 포아송비이다. 또한 내부실린더의 내경은 a , 내부실린더와 외부실린더의 접촉면의 반경은 b (Interface radius), 외부실린더의 외경은 c 이다.

$$\delta_o = \frac{bP}{E_o} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_o \right) \quad (3)$$

$$\delta_i = -\frac{bP}{E_i} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \nu_i \right) \quad (4)$$

내부실린더가 중실축($a=0$)이면 역지끼워맞춤 양(δ)은 식 (5), 접촉면압은 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\delta = \delta_o - \delta_i = \frac{bP}{E_o} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_o \right) + \frac{bP}{E_i} (1 - \nu_i) \quad (5)$$

$$P = \frac{\delta}{b \left[\frac{1}{E_o} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_o \right) + \frac{1}{E_i} (1 - \nu_i) \right]} \quad (6)$$

2.2 접촉면압 계산

Fig. 5 와 같이 실(Seal)이 1.64mm 의 간섭(Interference)으로 중실 실린더에 역지끼워맞춤 되었을 때 작용하는 접촉면압을 2.1 장의 이론식을 이용하여 계산한 결과 약 0.003MPa 이 나타났으며, 해석 모델의 치수 및 물성치는 Table 1 에 나타내었다.

3. 유한요소해석

상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS workbench 를 이용하여 구조해석을 통한 붐 호이스팅 실린더 작

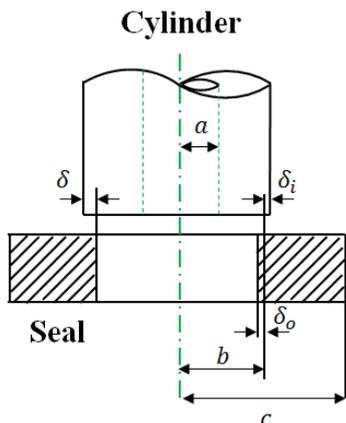


Fig. 5 Model of the concentric cylinder

동유의 누설 여부 분석, 최대 접촉면압을 갖는 브이 실의 형상 설계, 스트로크에 따른 실린더의 구동 시 플레이션 및 최대 출력 상태에서의 구조 안전성을 검증하였다.⁽¹⁶⁾

3.1 접촉면압 해석기법 확립

평면응력 상태에서 접촉면압의 해석기법을 확립하기 위하여, 2.2 장의 이론적 모델과 동일한 실린더의 2D 모델링 수행하였다. 실린더와 실 사이에는 Fig. 6 과 같이 접촉조건(Frictionless)으로 설정 후 두 물체간에 침투를 허용하지 않는 라그랑지 법(Lagrange method)^(17,18)을 이용하여 실린더에 Target 조건, 상대적으로 강성이 낮은 실에 Contact 조건을 부여하고 구조 해석을 수행한 결과, Fig. 7 과 같이 실에 0.003MPa 의 접촉면압이 나타났다. 이 값은 이론식으로 계산한 접촉면압(약 0.003MPa)과 거의 일치하므로, 접촉면압의 해석기법의 타당성을 검증하였고, 이 기법을 실제 붐 호이스팅 실린더에 사용되는 브이 실의 접촉면압 도출을 위한 구조해석에 적용하였다.

3.2 브이 실의 접촉면압 도출을 위한 구조해석

3.2.1 모델링 및 해석 조건

석탄 하역을 위한 붐의 위치에 따라서 붐 호이

Table 1 Dimensions and material properties of the concentric cylinder and seal

Symbol	Value
a	0mm
b	180mm
c	200mm
δ	1.64mm
E_o	0.003GPa
ν_o	0.48
E_i	205GPa
ν_i	0.29

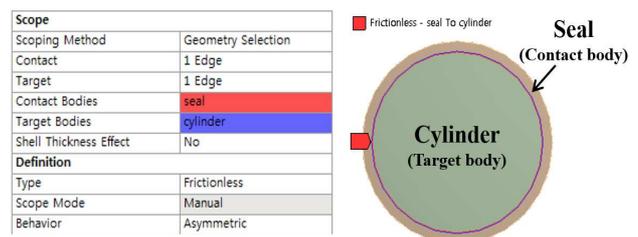


Fig. 6 Boundary condition between seal and cylinder

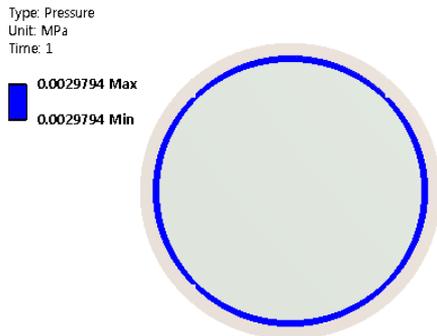


Fig. 7 Contact pressure of the seal with concentric cylinder, obtained from FEM simulation

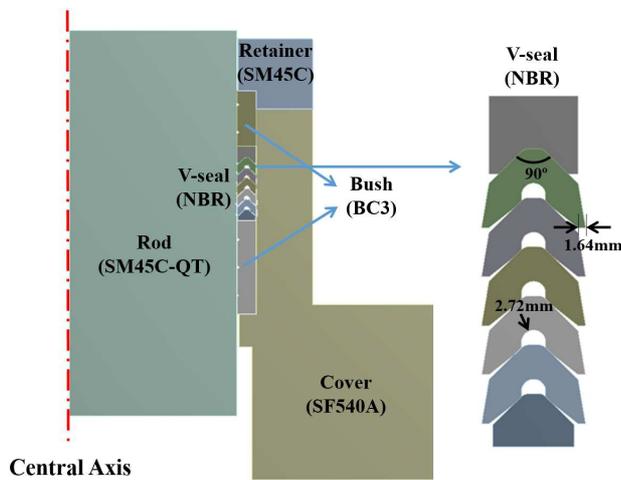


Fig. 8 2D models of the boom hoisting cylinder for structural analysis

스팅 실린더가 피스톤 운동을 하며, 이때 로드 (Rod)와 커버(Cover) 사이에 작동유가 누설되지 않도록 1.64mm의 간섭을 가지는 브이 실이 장착된다. 구조해석용 모델은 90°의 각도와 2.72mm의 반지름을 갖는 브이 실, 로드, 리테이너(Retainer), 부쉬(Bush) 및 커버로 이루어져있으며, 이를 Fig. 8에 나타내었다. 해석시간 단축을 위하여 1/2형상의 2D 모델링을 수행하고 축대칭 조건을 설정하였으며, 물성치를 Table 2에 나타내었다.

로드와 커버의 하단부에 완전고정조건(Fixed support)을 부여하고, 하중조건은 실린더의 작동내압(32MPa)보다 1.25배 가혹한 조건인 테스트내압(40MPa)을 적용하였으며, 이를 Fig. 9에 나타내었다.

3.2.2 접촉면압해석 결과

실린더에 내압이 작용하면 Fig. 10과 같이 부쉬가 상승하면서 브이 실을 밀어주고, 브이 실이 압축되면서 접촉면압이 커져, 작동유의 누설을 방

Table 2 Material properties of the boom hoisting cylinder

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
SM45C (Retainer)	205	0.29	343	569
SM45C-QT (Rod)	205	0.29	490	686
SF540A (Cover)	206	0.3	275	540
BC3 (Bush)	103.4	0.34	172	303
NBR (V-seal)	0.003	0.48	-	24.1

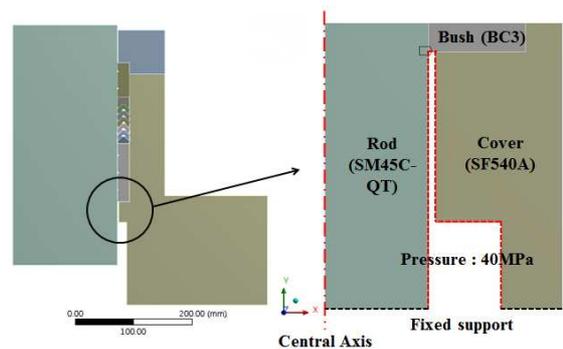


Fig. 9 Boundary and load conditions

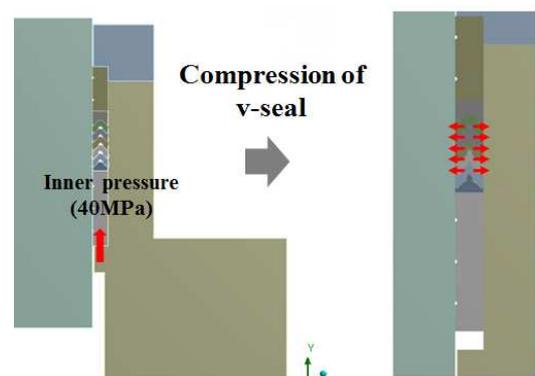


Fig. 10 Operating mechanism of the v-seal under operating conditions (interference: 1.64mm and inner pressure: 40MPa)

지한다. 부쉬에 내압이 작용하지 않은 상태에서 로드와 브이 실의 간섭(1.64mm)에 의한 접촉면압은 0.541MPa이며, 간섭이 있는 상태에서 40MPa의 내압 작용하면 4.394MPa의 접촉면압이 나타나며 이를 Fig. 11(a)~(b)에 나타내었다.

기존의 일반적인 실은 작동내압이 작용하면 접촉면압이 낮아져 누설에 좋지 않은 영향을 미치지만, 붐 호이스팅 실린더에 있는 브이 실의 경우 영구변형이 발생하지 않는 범위에서, 작동내압이 커질수록 브이 실의 압축량 및 접촉면압이 증가한다. 그러므로 브이 실의 접촉면압이 로드 내경방향으로 작용하면, 실과 로드의 접촉이 이루어진 상태이므로 작동유의 누설이 발생하지 않으며, 접촉면압이 커질수록 누설방지 효과가 더 크다.

3.3 최대의 접촉면압 갖는 브이 실 형상 설계

작동유의 누설 방지 효과를 극대화하기 위하여, 최대의 접촉면압을 갖는 브이 실의 형상 설계를 수행하였다. 브이 실의 각도와 반지름이 브이 실의 접촉면압에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 현장에서 사용되는 브이 실의 반지름인 2.72mm 로 고정한 상태에서 Fig. 12 와 같이 각도(80°, 85°, 90°, 95°)를 변경하였을 때 접촉면압을 Fig. 13 (a)에 나타내었고 현장에서 사용되는 브이 실의 각도인 90° 로 고정한 상태에서 과도한 변형이 일어나지 않는 반지름(2.6mm, 2.72mm, 2.8mm)으로 변경하였을 때 접촉면압을 Fig. 13(b)에 나타내었다. 그 결과, 브이 실의 각도가 커질수록, 반지름이 작아질수

록 접촉면압이 증가하는 경향을 보였으며, 반지름보다 각도가 접촉면압에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

최대 접촉면압을 나타내는 브이 실 형상을 도출하기 위하여, 과도한 변형이 일어나지 않게 하는 각도 및 반지름의 치수를 결정하였고(Table 3), 이에 대한 접촉면압을 도출한 결과, Fig. 14 와 같이 각도(95°), 반지름(2.6mm)일 때 최대 접촉면압(4.788MPa) 나타났다.

기존 브이 실의 접촉면압과 비교하면, 간섭만 있을 경우 접촉면압이 35.4% 증가, 간섭 및 내압

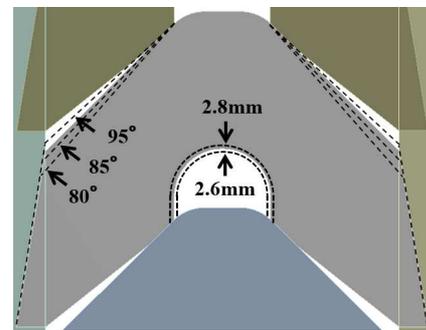
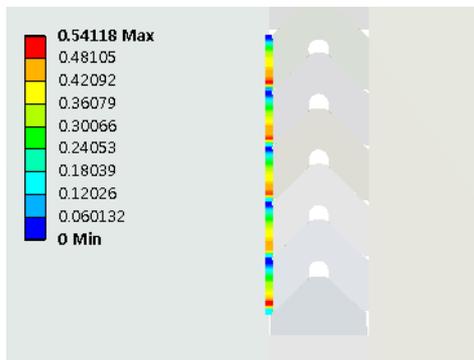
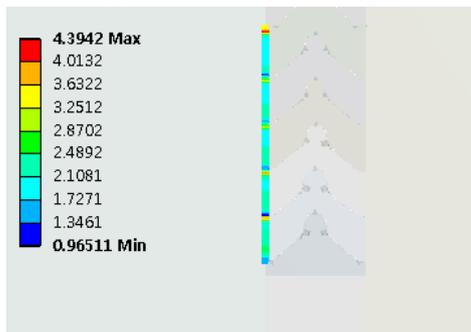


Fig. 12 Shapes of the v-seal according to the angles and radii

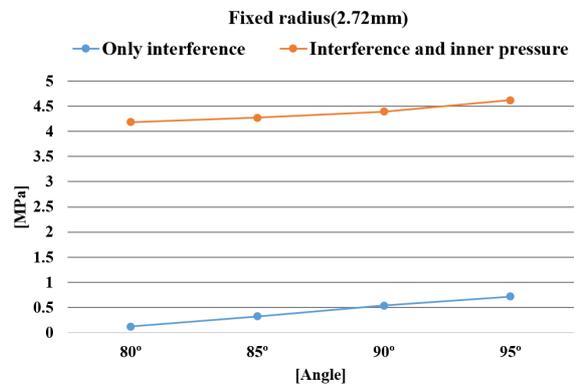


(a) Interference(1.64mm)

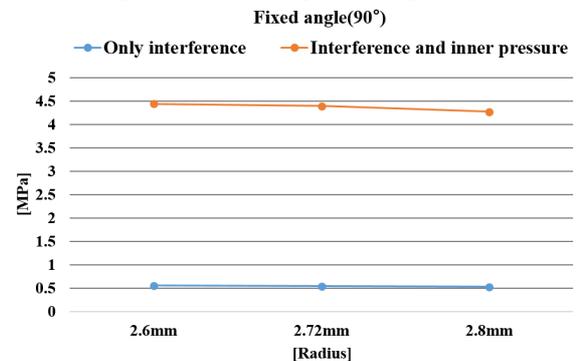


(b) Interference(1.64mm) and inner pressure(40MPa)

Fig. 11 Contact pressure of the v-seal under operating conditions (interference: 1.64mm and inner pressure: 40MPa)



(a) Contact pressure according to the angles of the v-seals

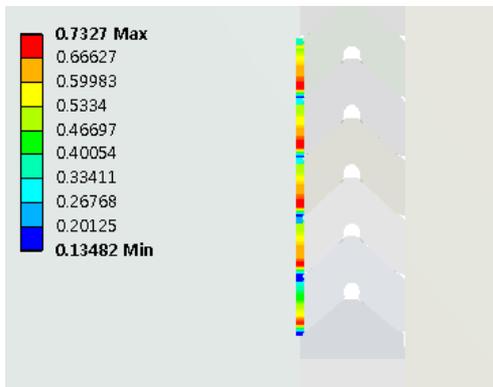


(b) Contact pressure according to the radii of the v-seals

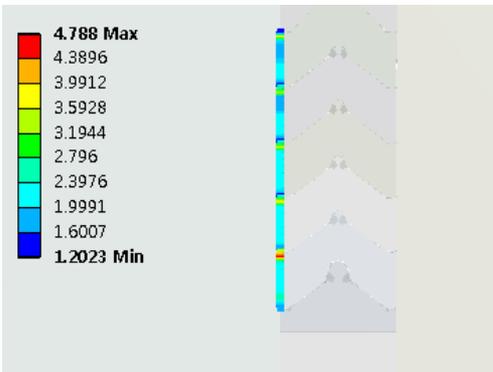
Fig. 13 Tendency of contact pressure according to the angles and radii of the v-seals

Table 3 Maximum contact pressures according to the radii and angles of the v-seal under operating conditions (interference: 1.64mm and inner pressure: 40MPa)

Angles (°)	Radii (mm)	Maximum contact pressure (MPa)
80	2.6	4.243
	2.72	4.183
	2.8	4.096
85	2.6	4.547
	2.72	4.271
	2.8	4.136
90	2.6	4.438
	2.72	4.394
	2.8	4.273
95	2.6	4.788
	2.72	4.619
	2.8	4.476



(a) Interference



(b) Interference and inner pressure (40MPa)

Fig. 14 Contact pressure of the v-seal under operating conditions (interference: 1.64mm and inner pressure: 40MPa)

이 작용할 경우 접촉면압이 9.0% 향상된 값이며, 이를 Fig. 15 에 나타내었다.

3.4 붐 호이스팅 실린더의 구조 안전성 검증

3.4.1 스트로크에 따른 실린더 구동 시뮬레이션

1) 모델링 및 해석 조건

붐 호이스팅 실린더의 스트로크에 따른 구동 시뮬레이션을 수행하기 위하여, 붐 호이스팅 실린더와 석탄하역기의 3D 모델링을 수행하였다. 실린더는 로드 엔드(Rod end), 로드(Rod), 리테이너(Retainer), 커버(Cover), 튜브(Tube), 피스톤(Piston), 클레비스(Clevis)로 구성되어 있으며, 붐 호이스팅 실린더를 포함한 석탄하역기 전체 모델을 Fig. 16 에 나타냈다.

Fig. 17(a)~(b)와 같이 실린더와 연결되는 석탄하역기 본체(Body) 및 붐 사이에 회전 조인트

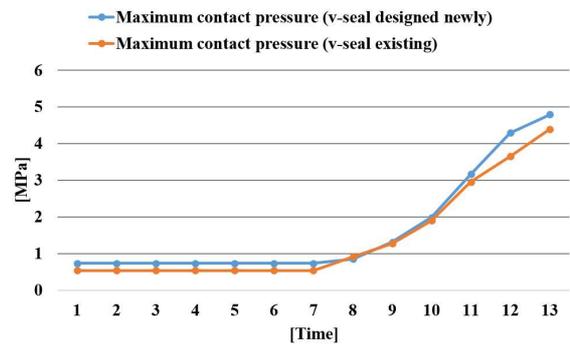


Fig. 15 Comparison of the contact pressures between the v-seal existing and the v-seal designed newly

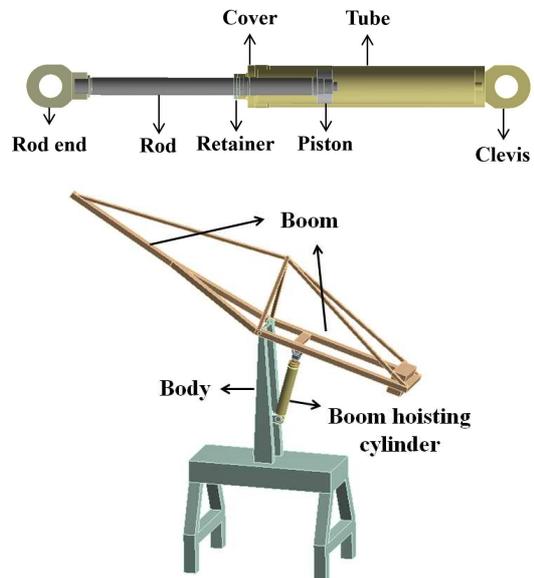


Fig. 16 3D models of the coal handling machine

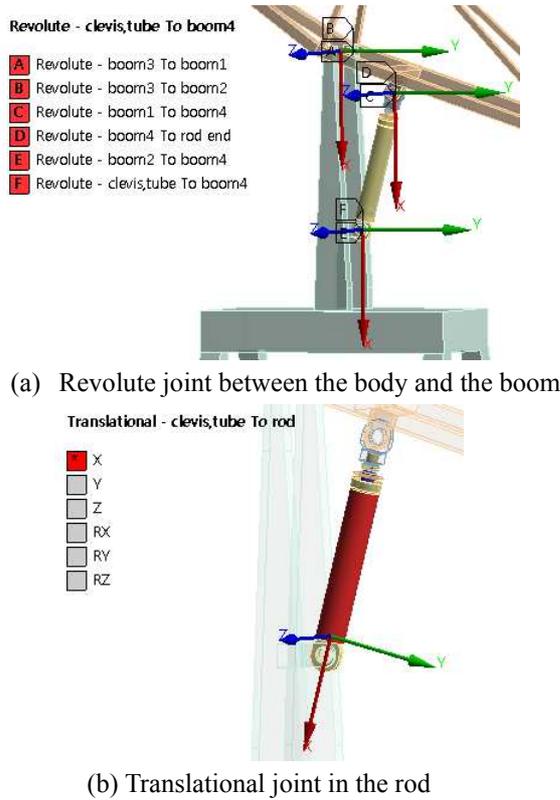


Fig. 17 Constraint conditions of the body and the boom

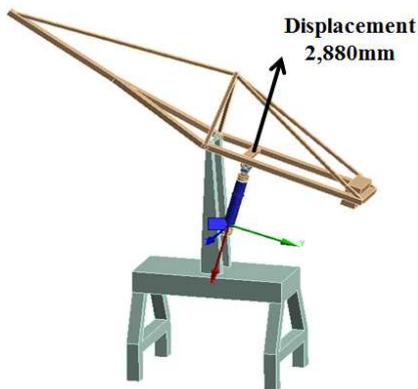


Fig. 18 Joint-displacement condition (the maximum stroke, 2,880mm)

(Revolute joint)를 부여하였고, 로드와 왕복운동 조인트(Translational joint)를 부여하여 피스톤 운동이 되도록 설정하였으며, 하중 조건은 Fig. 18 과 같이 실린더의 최대 스트로크인 2,880mm 를 Joint-displacement 조건으로 부여하여 왕복운동이 가능하게 하였다.⁽¹⁹⁾

2) 실린더의 구동 시뮬레이션

초기 상태의 실린더는 Fig. 19 와 같이 붐의 각도가 -18° 이며, 실린더의 로드와 점점 상승하여 붐의 각도가 최대 36° 가 되며, 이때 100kN 의 최

Table 4 Material properties of the boom hoisting cylinder

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
SM45C-QT (Tube)	205	0.29	490	686
SM45C-N (Clevis)	205	0.29	343	569
SM490A (Piston)	206	0.3	393	543
SF540A (Rod end)	206	0.3	275	540

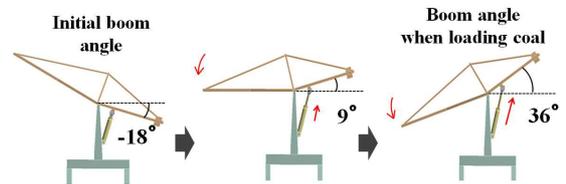


Fig. 19 Simulations according to the strokes of the cylinder

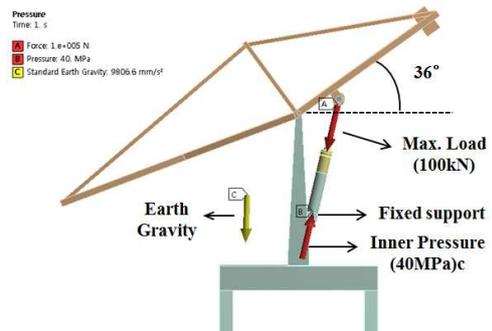


Fig. 20 Boundary conditions for structural analysis of the cylinder

대 출력을 낸다. 이와 같이 로드의 피스톤 운동이 반복되면서 붐의 각도가 조절되어 선박의 내부에 있는 석탄을 육지로 하역한다.

3.4.2 최대 출력에서 실린더의 구조 안전성 검증

1) 해석 조건

실린더의 작동 환경 중, 가장 가혹한 조건인 최대 출력(100kN)에서 구조 안전성 검증을 위하여, 붐 각도가 36° 일 때 구조해석을 수행하였으며, 실린더의 각 부분에 대한 물성치는 Table 2 및 Table 4 와 같다.

실린더 하부인 클레비스에 완전고정조건(Fixed support) 및 실린더 자체 하중을 고려하기 위해 중력(Standard earth gravity)을 적용하였으며, 실린더 상부인 로드 엔드에 최대 출력량(100kN) 및 작동

내압 40MPa 을 부여하여 Fig. 20 에 나타내었다.

2) 구조해석 결과 및 고찰

최대 출력(100kN) 상태에서 실린더 각 부품의 구조해석을 수행한 결과, 최대 유효응력은 로드 엔드에서 205.78MPa, 로드에서 240.95MPa, 부쉬에서 72.03MPa, 리테이너에서 37.60MPa, 커버에서 32.34MPa, 피스톤에서 180.32MPa 및 튜브에서 255.81MPa 이 나타났으며, 이를 Table 5 에 나타내었다. 또한, Fig. 21 과 같이 실린더 전체 모델에서 가장 큰 최대 유효응력(301.08MPa)이 나타난 부분은 중력의 영향을 가장 많이 받는 클레비스이나, 이는 작동내압(32MPa) 보다 가혹한 조건(40MPa)에서의 응력 결과이며, 실제 실린더 구동 시 출력을 최대(100kN)로 사용하지 않기 때문에 클레비스의 실제 최대 응력은 구조해석 결과값보다 더 낮을 것으로 판단된다. 클레비스에 나타난 최대 유효

Table 5 The results of structural safety in the each part of the boom hoisting cylinder

Parts	Yield Strength (MPa)	Maximum equivalent stress (MPa)	Structural safety
Rod end	275	205.78	Safe
Rod	490	240.95	Safe
Bush	172	72.03	Safe
Retainer	343	37.60	Safe
Cover	275	32.34	Safe
Piston	393	180.32	Safe
Tube	490	255.81	Safe
Clevis	343	301.08	Safe

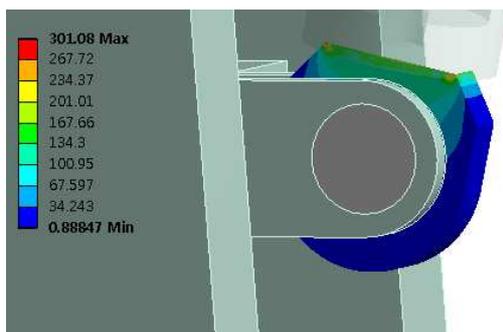


Fig. 21 Stress distribution of the clevis with maximum equivalent stress in the boom hoisting cylinder

효응력(301.08MPa)은 소재의 항복강도(343MPa)를 초과하지 않으므로 구조적으로 안전함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실린더에서 접촉면압의 이론 값과 유한요소해석을 수행하여 얻은 결과 값을 비교하여, 접촉면압 해석기법의 타당성을 확립하였다. 이를 통하여 브이 실을 갖는 붐 호이스팅 실린더의 작동유 누설 여부 판단 및 최대의 접촉면압을 갖는 브이 실 형상을 설계하였다. 또한, 실린더의 스트로크에 따른 구동 시물레이션을 수행하고, 최대 출력 상태에서의 구조 안전성을 검증하였다.

(1) 실린더의 역지끼워맞춤에서, 이론적 해석을 통한 실의 접촉면압과, 유한요소해석에서 도출된 접촉면압을 비교하여 접촉면압 해석기법의 타당성을 검증하였으며, 검증된 기법을 이용하여 실린더의 접촉면압해석을 수행한 결과, 로드와 브이 실의 간섭만에 의해 나타난 접촉면압(0.541MPa)과 간섭이 있는 상태에서 40MPa 의 내압이 작용하였을 때의 접촉면압(4.394MPa)을 구할 수 있었다.

(2) 브이 실의 각도 및 반경에 따른 구조해석을 수행한 결과, 각도(95°), 반지름(2.6mm)일 때 최대의 접촉면압(4.788MPa)을 얻을 수 있었고, 이는 작동유의 누설을 방지할 뿐만 아니라 기존의 브이 실보다 접촉면압이 9% 향상되었다.

(3) 선박의 내부에 있는 석탄을 하역하기 위한 붐 호이스팅 실린더의 스트로크에 따른 구동 시물레이션을 수행하였고, 가장 가혹한 조건인 붐 각도(36°), 최대 출력(100kN)일 때 구조 해석을 수행한 결과, 모든 부분에서 재료의 항복강도보다 낮은 최대 유효응력 값을 가지므로, 붐 호이스팅 실린더는 구조적으로 안전함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Energy Economic News, <http://www.ekn.kr/news/article.html?no=78915>.
- (2) Park, S. H., Kim, J. H. and Kim, W. H., 2009, "An Evaluation on Sealing Performance of Elastomeric O-ring Compressed and Highly Pressurized," *Journal of the Korea society for Precision Engineering*, Vol. 26,

- No. 2, pp. 86~93.
- (3) Kim, C. K., 2005, "On the Contact Behavior Analysis of the O-ring Depending on the Contact Surface Profiles," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 29, No. 2, pp. 169~175.
- (4) Kim, C. K. and Kim, D. H., 2012, "Finite Element Analysis on the Deformation Behavior Stability of Contact Sealing Rings," *Journal of The Korean Institute of Gas*, Vol. 16, No. 5, pp. 47~51.
- (5) Kim, D. T. and Zhang, Z. J., 2011, "Analysis of a Low Friction Piston Seal in Pneumatic Cylinders," *Journal of Drive and Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 21~26.
- (6) Yoo, M. H. and Lee, T. S., 2009, "A Study on the Relationship Between Stress Relaxation and Performance of a Lip Seal," *Journal of the Korea Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 11, pp. 85~91.
- (7) Yoo, M. H., Lee, T. S. and Kwon, J. H., 2006, "Computational and Experimental Investigation on U-Type Seal of Hydraulic Actuator," *Journal of the Korea society for Precision Engineering*, Vol. 23, No. 12, pp. 80~87.
- (8) Ahn, J. T., Lee, K. C., Lee, Y. B. and Han, S. H., 2011, "Seat Tightness of Flexible Metal Seal of Butterfly Valve at Cryogenic Temperatures," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 6, pp. 643~649.
- (9) Timoshenko, S. P., 1970, *Theory of Elasticity*, Mc Graw-Hill, New York.
- (10) An, S. C., 2000, "Optimal Design of Dimensions of Die and Stress Rings in Extrusion," *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, pp. 12~14.
- (11) Kim, E. H., Jang, J. H., Park, S. P. and Moon, Y. H., 2010, "Analysis of the Stress Characteristics of Double Layered Tube at Elevated Temperature," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 19, No. 7, pp. 405~410.
- (12) Hur, K. D., Yeo, H. T. and Ye, S. D., 2000, "Design of the Prestressed Cold Extrusion Die with Two Stress Rings," *Journal of the Korea society for Precision Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 77~82.
- (13) Kim, T. H., Kim, B. M. and Choi, J. C., 1995, "Methodology of Tool Analysis to Improve the Accuracy of Cold Forged Parts," *Journal of the Korea Society for Precision Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 29~33.
- (14) Truman, C. E. and Booker, J. D., 2007, "Analysis of a Shrink-Fit Failure on a Gear Hub/Shaft Assembly," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 14, No. 4, pp. 557~572.
- (15) Noda, N. A., Suryadi, D., Kumasaki, S., Sano, Y. and Takase, Y., 2015, "Failure Analysis for Coming out of Shaft from Shrink-Fitted Ceramic Sleeve," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 57, pp. 219~235.
- (16) ANSYS, 2010, *ANSYS Workbench Basic*, ANSYS Inc., Pennsylvania, U.S.
- (17) Lee, M. H. and Kim, S. W., 2003, "Development of 2-Dim Lagrangian Hydrocode and Application to Large Deformation Problems," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 27, No. 3, pp. 409~415.
- (18) Lee, K. S., Kim, D. W., Park, S. H., Cho, S. H. and Kim, B. W., 2002, "Analysis of Dynamic Contact and Stress of a Valve in Internal Combustion Engine," *Transactions of KSAE*, Vol. 10, No. 2, pp. 159~165.
- (19) Kim, M. H., Kim, S. S. and Yun, H. S., 2013, "Comparative Study on DAE Solution Methods for Effective Multi-Body Dynamics Analysis of Unmanned Military Robot Based on Subsystem Synthesis Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 9, pp. 1069~1075.