



해석적 방법을 통한 굴삭기 상승행정에 따른 안전 락 밸브의 구조 안전성 분석

Structural Safety Analysis for the Safety Lock Valve of the Excavator Under Boom-up Condition Using FEA

이현아* · 지상원*†
 Hyun-Ah Lee* and Sang-Won Ji*†

(Received 06 February 2018, Revision received 10 April 2018, Accepted 10 April 2018)

Abstract: The safety lock valve is the equipment for anti drop of the boom cylinder due to the damage of the hose when the excavator is operated. Nonlinear static analysis based on the finite element method is performed to confirm the safety of the safety lock valve under boom-up conditions. The purpose of the research is to comprehend the structural weakness of the original safety lock valve under the maximum working pressure and to propose modification of the design. The finite element analysis is carried out to confirm the improvement of the structural performance of the suggested safety lock valve under the same working conditions. From the results, the structural safety of the suggested safety lock valve is verified. Additional nonlinear static analysis is performed under the worst working condition that is pressure-resistant performance test condition.

Key Words : Excavator, Safety Lock Valve, Finite Element Analysis, Nonlinear Static Analysis, Safety Factor

1. 서 론

굴삭기는 고압의 오일을 순환시켜 원하는 동작 얻는 유압장치의 일종으로 버킷(Bucket)을 장착하여 주로 흙을 파내는 굴삭(Excavation) 작업을 하기 위하여 만들어진 건설기계이다. 굴삭기는 여러 가지 작업 장치를 부착하여 다양한 작업을 수행할 수도 있으므로 건설현장뿐만 아니라 여러 산업분야에서 널리 사용되는 기계이다.¹⁾

굴삭기가 작동하는 도중 유압 배관이나 연결

호스에 파열이 발생하는 경우에는 굴삭기의 붓실린더가 급격하게 낙하하므로 굴삭기 차체가 전복되거나 인명사고가 발생할 수 있다. 안전 락 밸브(Safety lock valve)는 유압 배관 등의 파열 시 유로를 단절하여 실린더 체임버에 잔류하는 고압의 기름이 흐르지 못하게 함으로써 실린더의 급격한 하강을 방지하는 장치이다.²⁻⁴⁾

건설기계의 배관 파열등에 대한 안전 락 밸브의 장착은 유럽 및 호주에서 ISO 8643, EN474⁵⁻⁶⁾ 등의 규제 규격을 바탕으로 의무장착에 대한 법

*† 지상원(교신저자) : 건설기계부품연구원
 E-mail : hyunah.lee@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2544
 *이현아 : 건설기계부품연구원

*† Sang-Won Ji(corresponding author) : Korea Construction Equipment Technology Institute.
 E-mail : hyunah.lee@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2544
 *Hyun-Ah Lee : Korea Construction Equipment Technology Institute.

제화가 시행되고 있다. 중국 등에서도 관련 법제화에 대한 시도가 있었지만 시장 환경과 업체의 준비 부족 등으로 인하여 법제화가 지연되고 있다. 그러나 유럽 등 선진시장에서의 안전 락 밸브 장착 의무화가 아시아 지역으로 확대될 가능성이 높기 때문에 이에 대한 연구 수요가 증가하고 있다.

안전 락 밸브는 생산업체에 따라 Check and metering valve, Anti drop valve, Hose burst valve, Pipe rupture valve, Lock arm valve, Holding valve - Load holding valve와 상이- 등으로 명칭이 매우 다양하나, 본 연구에서는 안전 락 밸브로 통칭한다.

안전 락 밸브는 유량을 제어하기 위하여 개구 면적을 제어하는 방식으로써 크게 포핏(Poppet) 방식과 노치 스푼(Notch spool) 방식으로 양분된다. 포핏 방식은 구조가 간단하나 개구면적 제어 정확도가 낮고 밸브에 의한 압력손실이 크다. 반면 노치 스푼 방식은 구조는 다소 복잡하나 개구면적의 제어가 용이하므로 유량제어의 정확도가 높고 압력손실이 낮아 에너지 소비효율에 장점을 가진다.

기존의 안전 락 밸브는 굴삭기의 안전을 확보하기 위하여 실린더의 하강 속도를 늦추나, 호수나 유압배관이 파열된 상황에서 안전 락 밸브를 작동하면 별다른 장치 없이 기름이 외부로 방출된다. 또한 기존 모델의 경우 분리된 몸체를 볼트로 체결하기 때문에 체결부에서 응력집중현상이 발생하여 구조 안전성을 확보하는 데 어려움이 있었다. 이를 극복하기 위하여 본 연구 대상인 안전 락 밸브는 몸체를 일체형으로 수정하였으며, 실린더의 상승 및 하강 행정을 위한 2개의 포핏과 스푼 밸브의 2중 구조로 구성함으로써 기존 안전 락 밸브의 단점을 최소화한 모델이다.

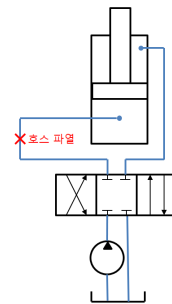
본 논문에서는 굴삭기의 실린더 상승 행정 시 제안된 새로운 형태의 안전 락 밸브에 최대사용압력이 작용할 때 구조적 안전성을 판단하기 위하여 비선형 정적 해석을 수행한다. 구조해석 결과로부터 안전 락 밸브의 구조적 취약점을 분석하고 상세설계 변경 방안을 제시한다. 설계 변경된 안전 락 밸브가 기존 상황과 동일한 환경에 놓일 때 비선형 정적 해석을 통한 구조 안전성의 상

승을 확인한다.

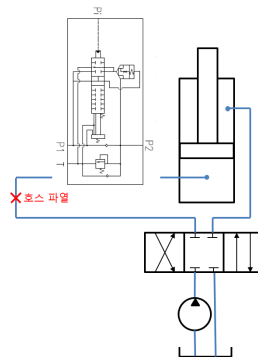
안전 락 밸브의 평가 시 적용되는 내압성능 시험 조건이 존재한다. 이때 내압조건은 최고 작동압력보다 높은 압력조건이다. 최종 설계안으로 결정된 안전 락 밸브에 추가적으로 내압성능 시험 조건인 압력이 가해질 때 구조해석을 수행함으로써 시스템의 안전도를 확인한다. 구조해석에는 ANSYS Mechanical 18.0⁷⁾을 이용한다.

2. 안전 락 밸브

안전 락 밸브는 파이프나 호스와 같은 배관의 파열 등으로 인하여 실린더의 유압 공급이 중단될 경우 유로를 차단함으로써 유압유를 체임버에 가두어서 실린더와 부하물의 급격한 낙하를 방지하는 장치이다. Fig. 1은 본 연구의 대상인 굴삭기용 안전 락 밸브의 동작과 회로도를 개략적으로



(a) Without the safety lock valve



(b) Installation of the safety lock valve

Fig. 1 Schematic view of the safety lock valve

보인 것이다. Fig. 1에서 보듯이 안전 락 밸브가 장착되지 않은 경우, 배관 파열시 체임버 내부의 유압유가 외부로 유출되어 압력이 유지되지 않으나 안전 락 밸브가 장착되는 경우에는, 배관 파열시에도 체임버 내부의 압력을 유지할 수 있으므로 실린더의 급격한 낙하를 방지할 수 있음을 알 수 있다.

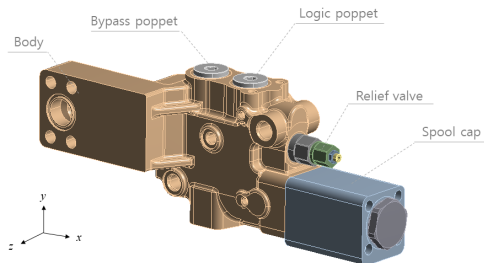
3. 구조해석

3.1 해석 대상물

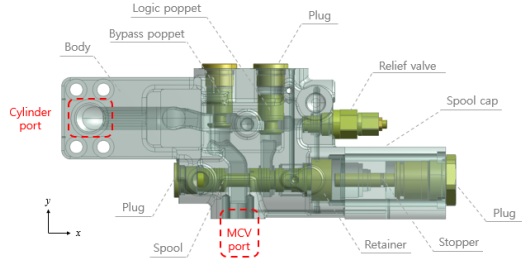
Fig. 2는 본 연구의 해석 대상물인 안전 락 밸브의 3D 모델로 굴삭기 실린더 상승행정 시 시스템을 보인 것이다. 안전 락 밸브의 상승행정 동작은 일반적인 유압시스템의 릴리프 밸브(Pressure relief valve)와 구조와 동작이 유사하나 하강행정 동작은 릴리프 밸브와 반대로 나타난다. Fig. 2에서 보듯이 안전 락 밸브는 실린더 상승행정과 실린더 하강행정에 관련된 바이패스 포핏(Bypass poppet) 및 로직 포핏(Logic poppet)과 1개의 스푼(Spool)로 구성된다.

스토퍼(Stopper)와 릴리프 밸브(Relief valve)가 내장되어 있으며 실린더 상승 행정시에는 압유가 바이패스 포핏을 지나면서 압손을 최소화하며 하강행정 시에는 파일럿(Pilot) 압력에 의하여 로직 포핏이 이격되면서 실린더 체임버 내부의 작동유를 메인 컨트롤 밸브(Main control valve, MCV)쪽으로 흘러가도록 한다.

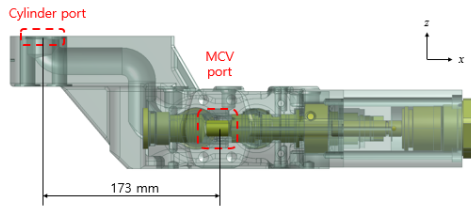
해석의 대상이 되는 최초 설계안에 따른 안전 락 밸브의 실린더 포트와 배관 포트 사이의 거리



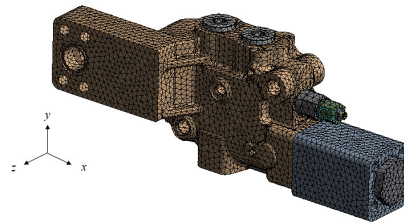
(a) Isometric view



(b) Section view



(c) Distance between in & out ports



(d) Finite element model

Fig. 2 3D model of the safety lock valve

는 Fig. 2(c)에서 보는 것과 같다. 최초 설계 모델의 구조 해석을 통한 특성을 분석하고 이후 구조 강성 향상을 위한 상세 설계 변경을 수행한다.

Fig. 2(d)는 안전 락 밸브의 격자계로 전체 요소(elements)는 93,527개이며, 절점(node)수는 154,286개로 모든 요소는 1차 사면체 요소로 구성하였다.

3.2 안전을 산출 기준

구조 해석으로부터 시스템의 안전도를 판단하는 기준으로 안전율을 산출하는 것이 일반적이다. 안전율 산출 방법에는 여러 가지가 있으나 가장 대표적으로 사용되는 방법은 사용된 재료의 강도와 유한요소해석으로부터 계산된 응력값의 비로 계산하는 것이다.⁸⁻⁹⁾

연성재료의 경우 안전율($SF_{ductile}$)을 위한 기준으로 항복강도(Yield strength, σ_Y)를 이용하며 해석 결과에서 등가응력(Equivalent stress)으로 분미세스 응력(von-Mises stress, σ_v)를 선택하는 것이 일반적이며 식 (1)과 같다.

$$SF_{ductile} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_v} \quad (1)$$

취성재료는 인장강도(Ultimate tensile strength, σ_T)와 최대주응력(Maximum principle stress, σ_p)의 비로 안전율을 계산하며 식 (2)를 이용한다.

$$SF_{brittle} = \frac{\sigma_T}{\sigma_p} \quad (2)$$

Table 1 Material properties

Materials	FCD500	SM45C	SCM415
Parts	Body, Spool cap	Stopper, Retainer, Plug	Bypass poppet, Logic poppet
Young's modulus [GPa]	179.2	205	205
Density [kg/m ³]	7196	7850	7850
Poisson's ratio	0.31	0.29	0.29
Yield strength [MPa]	380	343	550
Ultimate tensile strength [MPa]	553	569	834

Table 1에 안전 락 밸브의 재질을 보였다. 몸체(Body)와 스푼 캡(Spool cap)은 주철 재료를 사용하기 때문에 취성성이 크며 이외의 부품들은 연성재료이다. 따라서 안전 락 밸브의 안전율 계산 시 재료 특성에 맞는 안전율 산출기준에 따른다. 정적 시스템의 경우 일반적으로 안전율이 3 이상인 경우 안전설계가 되었다 판단하며, 2 이하인 경우 구조적으로 취약한 것으로 판단한다.⁸⁻⁹⁾ 상기

기준에 따라 안전 락 밸브의 구조해석 결과를 분석한다.

안전율 산출을 위하여 비선형 정적 해석을 수행한다. 해석의 기법은 해석 대상물과 시스템의 특성에 따라 결정한다. 안전 락 밸브의 몸체는 Fig. 3에 보인 응력-변형률 선도(Stress-strain curve)를 가지는 FCD500 재질로 구성되었다. 따라서 소성변형을 고려해야 하므로 재료 비선형성을 포함하여 해석을 수행한다. 또한 Fig. 2에서 보듯이 모든 부품들이 상호간에 접촉성을 띄기 때문에 접촉 비선형성도 포함해야 한다. 그러나 구조물 내에 대변형(Large deformation)은 존재하지 않기 때문에 기하 비선형은 구조해석 시 포함하지 않는다. 내압해석의 경우 외력이 시간의 함수가 아니므로 정해석으로 구현하는 것이 타당하다. 이러한 비선형 정적 해석 기법은 많은 연구자들에 의하여 이론과 적용 방법이 정립되어 있다.^{7,10-12)}

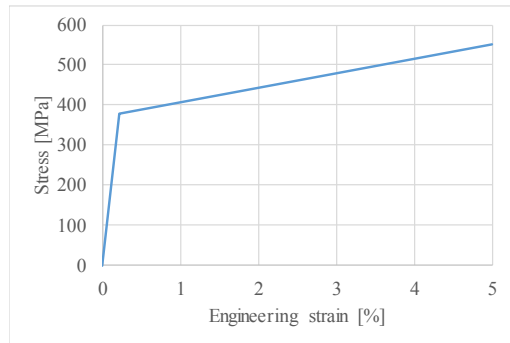


Fig. 3 Stress-strain curve of FCD500

3.3 경계조건

굴삭기 실린더 상승 행정 시 배관 포트에 유입된 압유가 바이패스 포핏을 통하여 실린더 포트에 배출된다. Fig. 4에 실린더 상승 행정시 안전 락 밸브 내부에 작용하는 내압의 영역을 보였다. 연구 대상인 굴삭기용 안전 락 밸브의 최고 작동압은 350 bar이다. 실제 안전 락 밸브 내부에 작용하는 압력은 작용 위치에 따라 최대 350 bar이며, 일부 위치에서는 350 bar 이하의 압력이 작용한다. 그러나 본 연구에서는 안전 락 밸브가 최악 조건하에 존재할 때 구조 안전성을 파악하기 위

하여 Fig. 4에 보인 것과 같이 내압이 작용하는 모든 위치에 최대 작동압인 350 bar를 외력으로 적용하였다.

안전 락 밸브는 굴삭기 실린더의 급격한 하강을 방지하기 위한 장치로서 굴삭기의 주요 성능에 관련된 부분(MCV-암, MCV-봄 등)에 장착된다. 실제 안전 락 밸브가 굴삭기에 장착되는 상황을 구조해석 시 모사하기 위하여 Fig. 5와 같이 안전 락 밸브가 볼트로 굴삭기에 체결되는 부분에 완전 구속 조건을 정의한다.

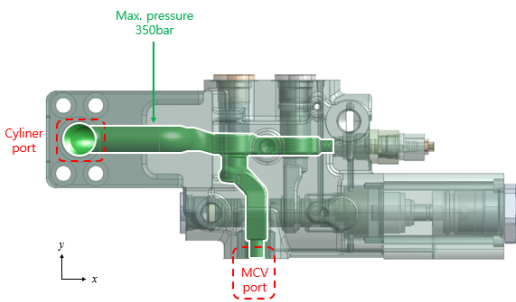


Fig. 4 Loading conditions of the safety lock valve

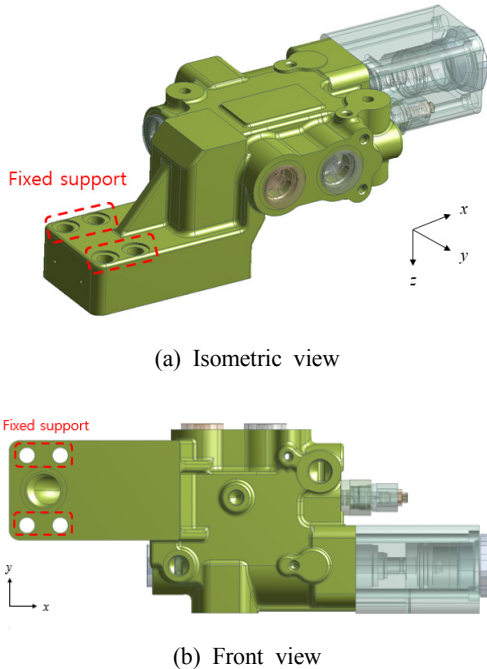


Fig. 5 Boundary conditions of the safety lock valve

3.4 해석 결과

Fig. 6은 안전 락 밸브의 비선형 구조해석의 결과로 Fig. 4에서 보인 것과 같이 350 bar의 최대 작동압이 내부 유로에 작용할 때 몸체부분에서의 응력분포이다. Table 1에서 기술하였듯이 안전 락 밸브의 몸체 부분은 FCD500의 주철재료를 사용하기 때문에 Fig. 6에 보인 응력은 최대주응력이다.

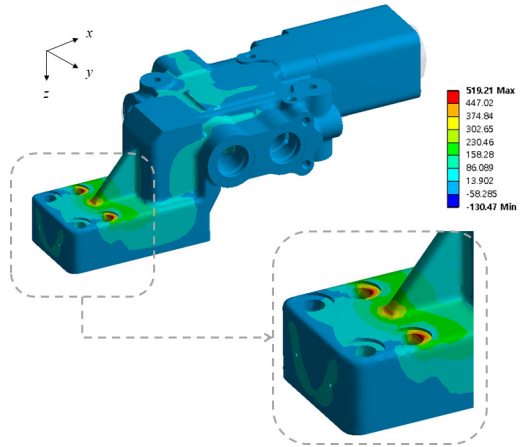


Fig. 6 The stress contour of the body of the safety lock valve

Table 2 The safety factors of the safety lock valve

Materials	FCD500	SM45C	SCM415
Parts	Body, Spool cap	Stopper, Retainer, Plug	Bypass poppet, Logic poppet
σ_Y [MPa]	-	343	550
σ_T [MPa]	553	-	-
σ_p [MPa]	519.21	-	-
σ_v [MPa]	-	43.03	191.46
SF	1.07	7.97	2.87

최대주응력의 최대값은 519.21 MPa로 Fig. 3에서 보인 탄성구간을 넘는 소성구간에서 발생하였으며, 위치는 안전 락 밸브가 굴삭기에 장착될 때 볼트로 체결되는 부위이다. Table 2에 식 (1), 식 (2)와 Table 1에 보인 재질 특성에 기반하여 산출한 주요 부품들의 안전율을 보였다.

일반적인 경우 구조해석 결과 안전율이 2이상의 값이 도출될 때 구조 시스템의 안전성이 확보된 것으로 판단한다. Table 2에서 보듯이 몸체의 안전율은 인장강도 553 MPa 대비 1.07로 시스템의 안전성을 보장하기 어렵다. 이외의 부품들은 모두 2 이상의 안전율을 보인다. 따라서 안전 락 밸브 몸체의 안전율을 높이기 위한 설계 변경이 필요함을 확인할 수 있다.

4. 설계 개선 및 구조 안전성 분석

4.1 설계 변경

기존 최초 설계안에 따른 안전 락 밸브가 최대 작동압 하에서 구동될 때 구조 안전성을 확인하기 위한 비선형 정적 해석을 수행한 결과, 몸체의 안전율이 1.07로 낮게 도출되었다. 이를 극복하고 안전 락 밸브의 구조적 안전성을 확보하기 위한 설계 변경이 요구된다.

Fig. 6에서 보듯이 안전 락 밸브를 굴삭기에 장착할 때 볼트 체결부에서의 응력값이 높게 도출됨을 확인할 수 있다. 발생 응력을 낮추기 위하여 실린더 포트와 배관 포트 사이의 거리를 조정함으로써 볼트 체결부를 몸체에 가깝게 이동시키는 설계 변경을 시도하며, 이를 Fig. 7에 보인다.

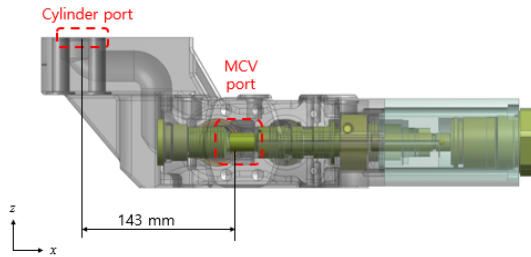


Fig. 7 Changing the design of the safety lock valve

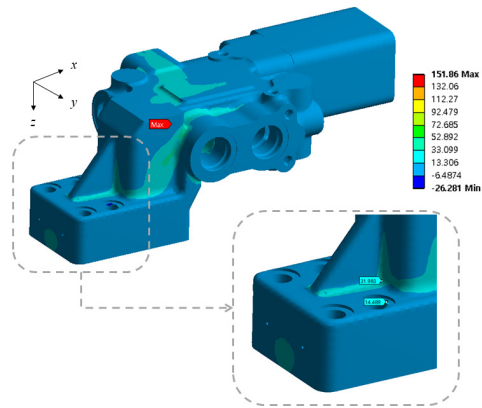
Fig. 2(c)의 기존 안전 락 밸브에 비하여 포트 간 거리가 약 30 mm 짧다. 이러한 설계 변경을 통하여 볼트 체결부와 몸체 사이의 거리가 짧아짐으로써 볼트 체결부에서 발생하는 응력이 몸체 쪽으로 분산되는 효과를 얻을 것으로 예상된다.

4.2 경계조건

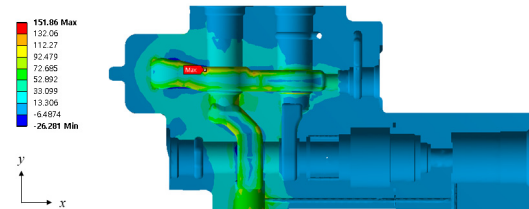
설계 변경한 안전 락 밸브의 구조 해석을 위한 재료 물성치 및 하중조건, 경계조건은 기존의 안전 락 밸브의 구조해석 시 기준과 동일하게 적용한다. 이를 통하여 설계 변경한 안전 락 밸브가 굴삭기 상승 행정 시 최고 작동압 하에서 작동할 때 구조 안전성의 확보 여부를 확인한다.

4.3 해석 결과

Fig. 8에 설계 변경한 안전 락 밸브의 응력 분포를 보인다. 기존 안전 락 밸브에서 최대 응력이 발생하는 볼트 체결부에서의 최대 주응력값은 약 32 MPa로 현저히 낮아졌음을 확인할 수 있다. 이는 볼트 체결부와 몸체의 거리가 가까워지면서 몸체 지지부로 응력이 분산되었기 때문인 것으로 이해할 수 있다.



(a) Bolting



(b) Section view

Fig. 8 The stress contour of the new safety lock valve

설계 변경된 안전 락 밸브에서 최대 응력이 발생하는 위치는 Fig. 8(b)에서 보듯이 최대 작동압인 350 bar를 직접 받는 내부 유로이며 이때의 최대주응력의 최대값은 151.86 MPa이다.

Table 3에 새로운 안전 락 밸브의 안전율을 보였다. 기존 안전 락 밸브에서 문제가 되었던 몸체 부분에서의 안전율이 1.07에서 3.64로 증가하였다. 2 이상의 안전율이 산출되었기 때문에 실린더 포트와 배관 포트 사이의 거리를 수정한 새로운 안전 락 밸브의 구조적 안전성이 확보되었다.

Table 3 The safety factors of the new safety lock valve

Materials	FCD500	SM45C	SCM415
Parts	Body, Spool cap	Stopper, Retainer, Plug	Bypass poppet, Logic poppet
σ_Y [MPa]	-	343	550
σ_T [MPa]	553	-	-
σ_p [MPa]	151.86	-	-
σ_v [MPa]	-	26.78	183.90
SF	3.64	12.81	2.99

4.4 내압 성능 만족도 확인

상기 연구를 통하여 연구 대상인 안전 락 밸브의 최대 작동압인 350 bar 하에서의 구조 안전성이 확보되었다. 통상적으로 굴삭기 내 안전 락 밸브의 구조적 성능 확보를 위하여 최대 작동압을 초과하는 내압조건에서의 성능을 확인한다. 본 연구의 개발 대상물인 안전 락 밸브의 구조해석을 추가적으로 진행함으로써 내압 성능에 대한 구조적 안전성을 확인한다.

내압 성능 확인 조건은 최대 작동압인 350 bar 보다 높은 500 bar를 목적으로 한다. 설계 변경으로 350 bar 하에서의 안전성이 확보된 설계안을 대상으로 500 bar의 하중조건을 적용하여 비선형 정적 구조해석을 수행한다.

Fig. 9와 Table 4는 내압 조건에 대한 구조해석 결과를 보인 것이다. 결과에서 보듯이 설계 변경된 새로운 안전 락 밸브는 최대 작동압인 350 bar

보다 높은 500 bar의 내압 조건 하에서도 충분히 구조적 안전성이 확보되었음을 확인할 수 있다.

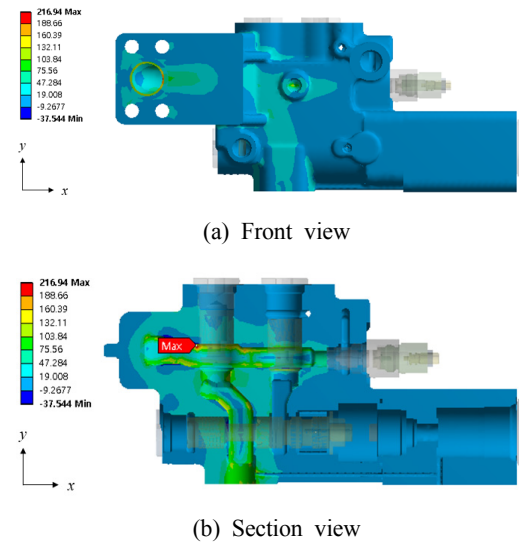


Fig. 9 The new safety lock valve on pressure-resistant performance

Table 4 The safety factors of the new safety lock valve under 500 bar

Materials	FCD500	SM45C	SCM415
Parts	Body, Spool cap	Stopper, Retainer, Plug	Bypass poppet, Logic poppet
σ_Y [MPa]	-	343	550
σ_T [MPa]	553	-	-
σ_p [MPa]	216.94	-	-
σ_v [MPa]	-	38.25	262.71
SF	2.55	8.97	2.09

5. 결 론

굴삭기 호스 등의 파열로 인하여 발생할 수 있는 사고를 방지하기 위한 목적으로 안전 락 밸브를 개발하였다. 본 연구에서는 굴삭기의 상승 행정시 기존 최초 설계안에 따른 안전 락 밸브의 구조적 안전성을 파악하기 위하여 최대 작동압 하에서 안전 락 밸브의 비선형 정적 구조해석을 수

행하였다. 이를 통하여 최대 작동압 작용 시 기존의 안전 락 밸브의 안전율이 1.07로 구조적 안전성을 만족시키지 못함을 확인할 수 있었다.

안전 락 밸브의 구조 성능 향상을 위하여 실린더 포트와 배관 포트 사이의 거리를 축소하는 설계 변경을 수행하였으며 동일 최대 작동압 하에서 비선형 정적 해석을 수행하였다. 변경 설계를 따른 안전 락 밸브 몸체의 안전율은 3.64로 향상 되었으며 이로부터 새롭게 제시된 안전 락 밸브의 구조적 안전성이 확보되었음을 확인하였다.

또한 최대 작동압인 350 bar를 초과하는 내압 성능 기준인 500 bar 하에서 안전 락 밸브의 구조 성능을 확인하기 위한 추가적인 해석을 수행한 결과, 안전율은 2.55로 계산되었으므로 제안된 안전 락 밸브가 상승 행정에서 구조적으로 충분히 안전함을 확인하였다.

본 연구에서는 굴삭기의 상승 행정에 대한 안전 락 밸브의 구조 성능을 확인하였으므로, 향후 굴삭기의 하강 행정에 대한 추가적인 구조 성능 연구가 필요하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 지역산업거점기관지원사업으로 수행된 결과입니다 (과제번호: A019800018).

References

1. J. J. Kim, 2015, "Excavators for NCS", GoldenBell, Seoul, pp. 10-11.
2. P. A. Nordhammer, M. K. Bak and M. R. Hansen, 2012, "Controlling the Slewing Motion of hDraulically Actuated Cranes using Sequential Activation of Counterbalance Valves", 12th International Conference on Control, Automation and Systems, Jeju Island, Korea, 17-21 October 2012, pp. 773-778.
3. H. Xie, J. Liu, H. Yang, L. Hu, X. Fu and Y. Fan, 2015, "Design of Pilot-assisted Load Control Valve with Load Velocity Control Ability and Fast Openin Feature", Advanced in Mechanical Engineering, Vol. 7, No. 11, pp. 1-9.
4. M. M. Rahman, J. L. Porteiro and S. T. Weber, 1997, "Numerical Simulation and Animation of Oscillating Turbulent Flow in a Counterbalance Valve", Proceeding of the 32nd Inter-society on Energy Conversion Engineering Conference, Honolulu, HI, 27 July-1 August, pp. 1525-1530.
5. ISO 8643, 1997, Earth-Moving Machinery-Hydraulic Excavator and Backhoe Loader Boom-Lowering Control Device-Requirements and Tests.
6. EN 474, 2006, Earth-Moving Machinery-Safety-Part 5: Requirement of Hydraulic Excavators.
7. "ANSYS Mechanical User's Guide", ANSYS, Inc.
8. J. P. Hong, 2017, "Machine Design: Theory and Applications", Kyobobooks, Seoul, pp. 104-108.
9. T. H. Jung, B. G. Han, T. J. Jung, H. S. Oh, S. S. Lee and J. Y. Lee, 1999, "Machine Design: An Integrated Approach", Prentice Hall, pp. 32-53.
10. R. Cook, D. Malkus and R. Witt, 2001, "Concepts and Applications of Finite Elements Analysis", John Wiley & Sons Inc., NY.
11. T. Belytchshko, W. K. Liu and B. Moran, 2004, "Nonlinear Finite Elements for Coninua and Structures", John Wiley & Sons Inc., NY.
12. J. N. Reddy, 2004, "An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis", Oxford University Press, NY.