

시뮬레이션 기반의 55마력급 서보식 정유압 무단변속기 정적구조안정성 분석 Simulation Analysis on Static Safety of 55Hp-Servo-Based Hydrostatic Transmission

원종근¹ · 윤종일^{1*} · 이현아¹ · 정성교² · 정재수²

Jonggeun Won, Jongil Yoon, Hyunah Lee, Seonggyo Chung, and Jaesu Jeong

Received: 14 Jan. 2022, Accepted: 7 Feb. 2022

Key Words : FEM(유한요소해석), Hydrostatic transmission(정유압무단변속기), Tractor(트랙터)

Abstract: Hydrostatic transmission (HST) comprises rotary parts, shafts, valve plate, swashplate, and servo pistons. Ensuring structural stability of each part of an HST has a significant impact on product safety. In this study, the structural stability of HST in agricultural machinery and industrial vehicles was analyzed using ANSYS software. For conservative evaluation, high-pressure conditions (35.5 MPa and 2 MPa pilot pressure) were applied as load conditions. The number of grids used in the calculations ranged from 0.4 to 0.8 million depending on modeling requirements. Structural analysis was performed for essential parts and safety factor was analyzed. All major parts of HST had a safety factor of ≥ 1.5 . Thus, they were judged to be structurally safe. This study provides important information for designing an HST system.

1. 서 론

정유압 무단변속기(Hydrostatic transmission, HST)는 동력밀도가 높고, 소형 및 경량화가 가능하며 제어성능이 좋아 주로 소형트랙터 및 산업차량에 적용되어 사용되고 있다.¹⁾

2020년 기준 농업기계시장은 1508억 달러규모로 이중 트랙터가 차지하는 시장비율은 535억 달러인 35.4%를 차지하고 있으며²⁾, 선진 농기계업체들은 트랙터시장의 경쟁력 강화를 위해 지속적으로 무단변속기에 대한 연구개발에 투자하고 있다.³⁻⁵⁾

Fig. 1에서 보듯이 HST의 경우 유압펌프와 모터가

하나의 시스템으로 구성되어있으며, 펌프에서 발생한 유체에너지를 모터구동에 이용하는 폐회로 시스템이다. 모터의 출력과 방향은 펌프의 사판각도를 조절함으로써 제어할 수 있으며, 이 때 사판을 조절하기 위한 구조로 기계식 변속방법과 서보식 변속방법이 존재한다.

기계식 변속방법(Mechanical lever system)은 펌프의 사판과 조작 레버가 1:1로 직결되는 구조로서 사판의 복귀력, 조작력, 진동이 조작레버에 전달되어 작업자의 피로도가 증가하는 문제가 발생한다.

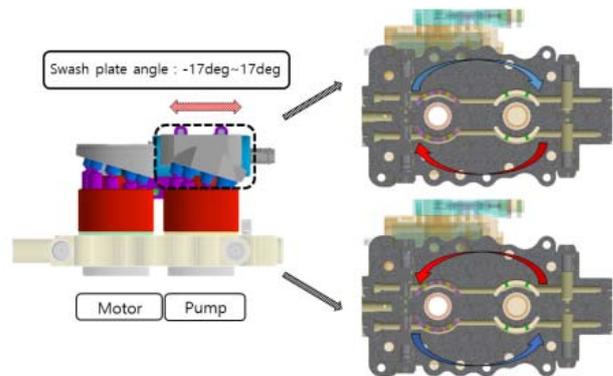


Fig. 1 Mechanism of HST

* Corresponding author: jiyoon@koceti.re.kr

1 Department of Industrial Innovation Strategy Lab, Korea Construction Equipment Technology Institute, Kunsan 54004, Korea

2 Department of Technical Research Center, J.I Hydraulic co., Ltd, Gyeongnam 51787, Korea

Copyright © 2022, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

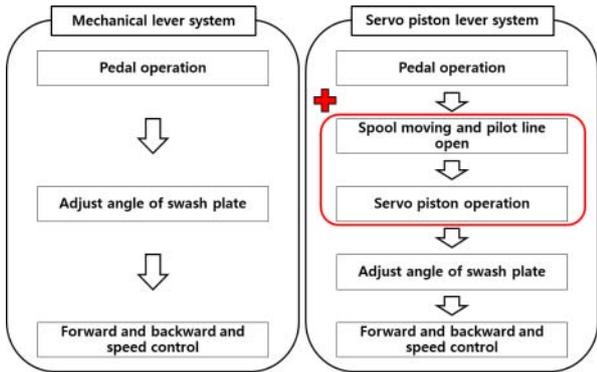


Fig. 2 Schematic diagram of servo-based HST

서보식 변속방법(Servo piston lever system)의 무단 변속기는 이러한 문제를 해결하기 위한 기술로 Fig. 2에서 우측그림과 같이 사판의 각도를 조절하기 위한 조작레버와 사판의 중간에 서보식 변속 시스템을 적용한 기술로 조작자의 작업편의성 증대 및 피로도를 저감시킬 수 있다.

본 연구에서는 조작편의성 및 작업편의성을 개선할 수 있는 서보식 변속시스템을 적용한 HST 개발을 위해 다양하게 검증해야 할 부분 중 하나인 구조안정성에 대한 평가를 수행한다.

제품의 성능 및 특성, 신뢰성 분석을 위해서는 시제품을 제작하여 성능 및 내구시험을 수행하는 것이 정확한 방법이다. 하지만 설계과정에서 각 주요부품에 대한 수치 해석적 검증 없이 제품을 제작하여 시험할 경우, 시험조건을 만족시키기 위한 설계변경과 시험이 반복될 가능성으로 인해 많은 비용과 시간이 소요될 가능성이 있다. 따라서 일반적으로 제품 개발을 위해 제품을 설계하고 설계부품에 대한 수치 해석적 검증을 사전에 수행하는 것이 보편적이며 다양한 해석적 연구가 진행되고 있다.^{6,8)}

HST의 구조안정성 평가부품으로 개발자의 관심사안 및 과거의 유사개발품에서 발생한 구조적 문제점 및 노하우를 바탕으로 HST의 구조안정성을 평가하기 위한 부품을 Fig. 3와 같이 선정하였다.

구조해석 대상으로 샤프트, 실린더블록과 밸브플레이트, 피스톤 및 피스톤 슈, 서보시스템을 구조안정성 평가부품으로 선정하여 구조해석을 수행한다.

샤프트의 경우 고압조건에서 변형에 의해 베어링 부분에 문제가 발생할 가능성이 있다. 로터리 파트에서 실린더블록과 접촉하는 밸브플레이트의 경우도 변형에 의해 문제가 발생할 가능성이 존재한다. 피스톤 및 피스톤 슈의 경우 고압의 유체에너지가 가장 직접적으로 생성 및 전달받는 부품이다. 마지막으로

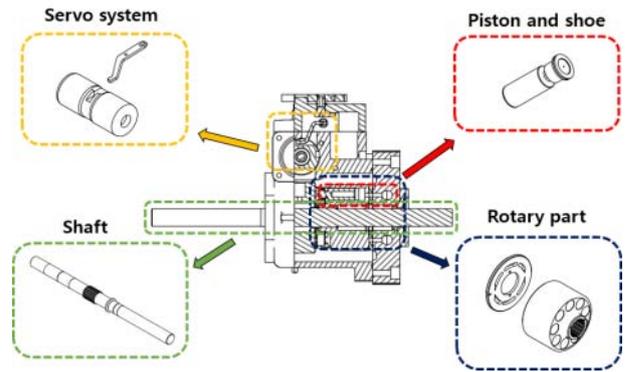


Fig. 3 Components of HST for structural analysis

서보시스템의 경우 서보식 HST의 개발을 위해 기존시스템에 대체되어 적용되어지는 새로운 부품이다. 이에 주요한 4개의 파트를 대상으로 해석을 수행하여 HST 시스템의 구조안정성을 판단한다.

2. 구조안정성 평가방법

구조안정성 평가를 수행하기 위해 상용프로그램인 ANSYS 2020 R1⁹⁾을 이용하여 Static analysis 및 Rigid body dynamics를 수행한다.

구조안정성 평가에서 필요한 경계조건의 경우, 보수적인 평가를 위해 장비가 작동되는 가장 가혹 조건인 최대작동압력 조건 및 사판의 최대경전각 상태를 고려하였으며, 제품의 사양은 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Product Specifications

Engine	Power	55hp/2600rpm
	Torque	19.6kgf-m/1600rpm
HST	Maximum relief pressure	35.5MPa
	Maximum pilot pressure	0.2MPa
	Swash plate angle	-17°~17°

안전율의 경우, 재료의 강도와 구조해석에서 계산된 응력의 값의 비율로 구조물의 안전율을 계산한다. 이때 재료의 특성에 따라서 선정하는 재료의 강도와 계산 응력이 상이하며, 연성재료의 경우 안전율을 계산하기 위한 기준으로 항복강도 및 von-Mises 응력을 이용하며, 취성재료의 경우 인장강도 대비 최대주응력의 비율로 안전율을 계산한다. Table 2에 HST 주요 부품들의 물성치를 보였다.

Table 2 Material properties

Parts	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Material	-
Shaft	773	932	SCM420	Ductile
Piston	686	834	SCM415	
Piston shoe	368	554	HB71	
Valve plate	235	415	SS41	
servo piston, Feedback lever	490	686	S45C	
Cylinder block	370	600	FCD600	Brittle

3. 유한요소해석의 방법

3.1 동역학 해석

샤프트가 실린더 블록에 의해 전달받는 축 방향 하중을 계산하기 위해 동역학 계산을 수행하였다. 동역학 계산은 각 부품을 강체로 가정하여 계산을 수행하였으며 각 부품의 운동방정식 및 해석조건은 선행연구를 참고하여 적용하였다.¹⁰⁾ 각 부품과 부품의 관계식은 Table 3에 나타내었고 해석의 일부를 Fig. 4에 나타내었다. Table 3에 Ground의 경우 글로벌 좌표계를 이용한 것이다. 해석의 범위는 피스톤이 9개이므로 실린더블록이 40°를 회전하는 조건으로 해석하였으며 적용 하중으로는 피스톤 직경에 35.5MPa의 압력이 작용하는 것을 고려하여 적용하였다.

해석 결과를 그림 Fig. 5에 나타내었으며, 이때 샤프트의 반력은 Table 3에 5번 조건의 축 방향 반력을 측정하였다. 동역학해석의 결과를 살펴보면 실린더 블록에 절반영역이 고압인 것을 고려하였을 때 5

Table 3 Part-part boundary condition

No	Part 1	Part 2	Joint
1	Piston	Piston shoe	Spherical
2	Piston	Cylinder block	Cylindrical
3	Piston shoe	Swash plate	Planar
4	Cylinder block	Valve plate	Planar
5	Cylinder block	Ground	Cylindrical
6	Valve plate	Ground	Fixed
7	Swash plate	Ground	Fixed

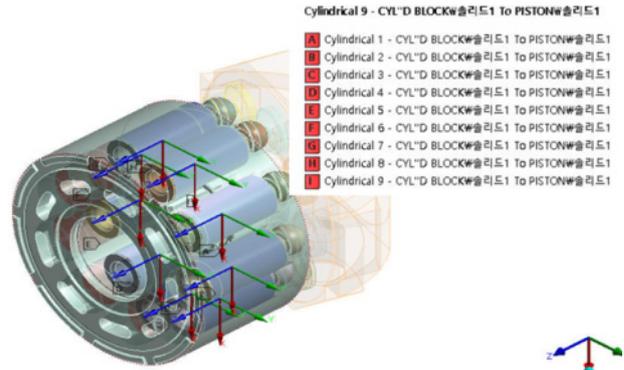


Fig. 4 Rigid dynamics boundary condition

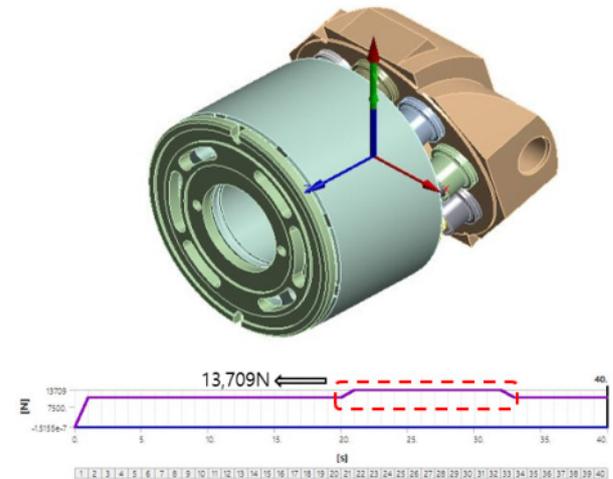


Fig. 5 Rigid dynamics for calculation of reaction force in shaft

개 및 4개의 피스톤이 번갈아 작용하므로 맥동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이때 동역학결과에서 나타난 축 방향 하중의 최댓값인 13,709N을 샤프트의 하중조건으로 적용하였다.

3.2 샤프트

샤프트는 엔진의 동력을 받아 실린더 블록을 회전시키는 부품이다. Fig. 6은 샤프트의 경계조건 및 하중조건 적용을 위한 주요 체결부위를 나타낸 것이며 베어링이 조립되어지는 부분과 엔진이 조립되어지는 부분은 경계조건으로 정의하였다.

Fig. 7은 경계조건 및 하중조건을 적용한 유한요소 해석 모델을 나타낸 것이다. 샤프트에 발생하는 하중으로는 실린더블록이 샤프트에 전달하는 축 하중과 엔진의 비틀림 하중이 동시에 전달되는 상황이다. 여기서 축 하중은 앞서 동역학계산에서 나타난 13,709N을 적용하였으며 비틀림 하중은 엔진의 최대토크를 적용하였다.

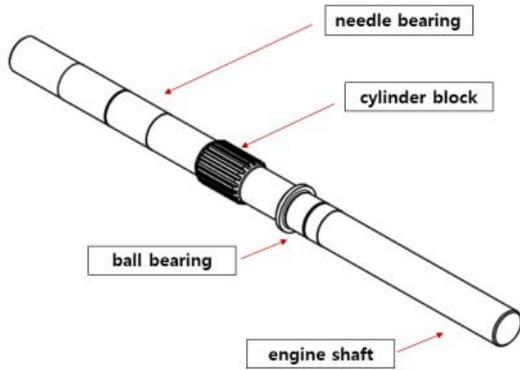


Fig. 6 Assembly conditions of piston and piston shoe

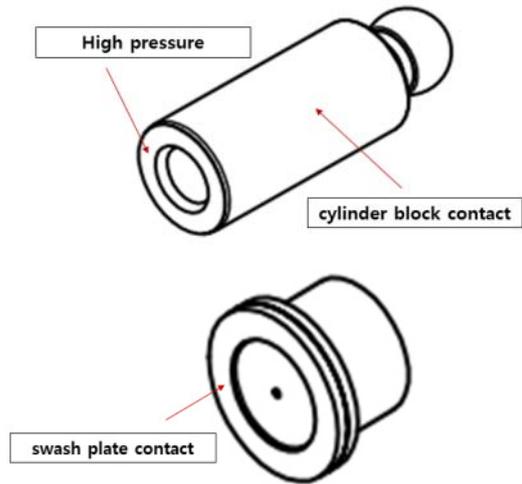


Fig. 8 Assembly conditions of piston and piston shoe

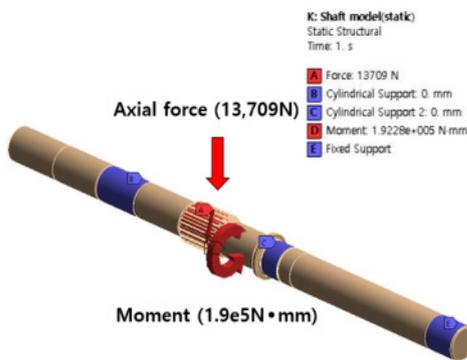


Fig. 7 Boundary conditions of shaft when working

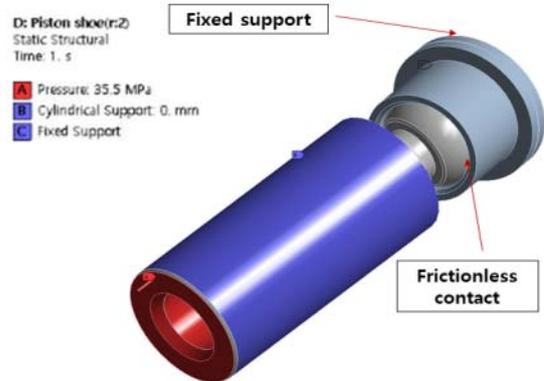


Fig. 9 Boundary conditions of Piston and Piston shoe at work

3.3 피스톤 및 피스톤 슈

피스톤은 고압의 유체에너지를 생성하거나 사용하는 부품이며 피스톤 슈의 경우 피스톤에 축 방향 하중을 사판 플레이트에 전달하여 힘의 평형을 유지하는 부품이다.

Fig. 8은 경계조건을 적용하기 위한 주요 부분을 나타낸 것이다. 피스톤의 경우 실린더블록과 접촉하는 부분 및 하단의 고압의 유체가 작용하는 면이 있으며, 피스톤 슈의 경우는 사판 플레이트에 접촉하여 하중을 전달하는 부분이 있다. 이때 피스톤과 실린더의 접촉하는 면적 부분과 피스톤 슈와 사판 플레이트가 접촉하는 면적을 경계조건으로 정의하였다.

Fig. 9은 경계조건 및 하중조건을 적용한 유한요소 해석 모델을 나타낸 것이다. 피스톤 하단에 적용한 35.5MPa의 압력은 제품의 최대허용압력인 릴리프밸브의 압력을 적용한 것이다. 피스톤과 피스톤 슈 사이에는 마찰이 없는 경우가 접촉부 응력이 더 높게 나타나므로 보수적인 평가를 위해 마찰이 없는 접촉 조건을 적용하였다.

3.4 실린더블록 및 밸브플레이트

실린더블록은 샤프트의 동력을 전달받아 피스톤과 실린더 사이의 내부면적에 고압의 유체를 형성하도록 유도하는 부품이며, 밸브플레이트의 경우 실린더블록과 하우징과의 소착을 방지하는 부품이다.

Fig. 10은 실린더블록과 밸브플레이트의 경계조건 적용을 위해 주요부분을 나타낸 것이다. 실린더블록의 경우 샤프트와 조립되어 회전하는 스플라인 가공부가 있으며 밸브 플레이트와 접촉하는 면적이 존재한다. 밸브플레이트의 경우 마찬가지로 실린더블록과의 접촉면과 반대편에 하우징과의 접촉면이 존재한다. 이때 밸브플레이트와 하우징의 접촉하는 부분과 실린더블록과 샤프트가 조립되어 회전하는 스플라인 부분을 경계조건으로 정의하였다.

Fig. 11은 경계조건 및 하중조건을 적용한 유한요소 해석 모델을 나타낸 것이며 이때 적용한 하중조건은 제품의 최대 허용압력인 릴리프 밸브의 압력을

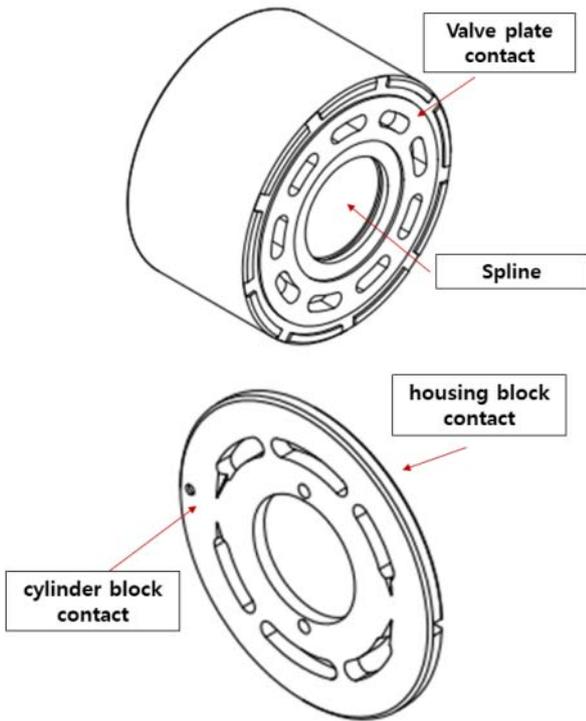


Fig. 10 Assembly conditions of cylinder block and valve plate

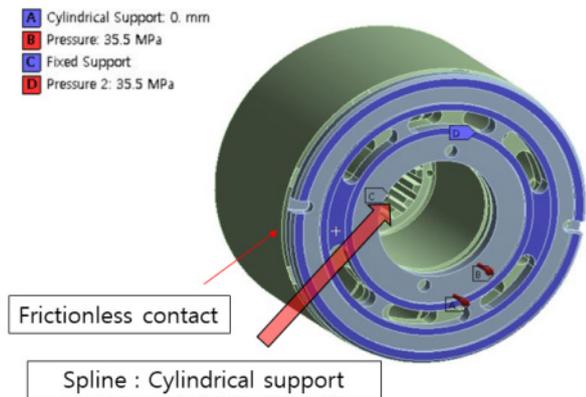


Fig. 11 Boundary conditions of cylinder block and valve plate when working

고압의 유체가 작용하는 면적에 적용한 것이다. 피스톤 및 피스톤 슈와 마찬가지로 두 부품의 보수적인 평가를 위해 마찰이 없는 접촉조건을 적용하였다.

3. 서보피스톤 및 링크

피드백 레버는 페달 조작 및 서보피스톤의 위치에 따라 스펴을 이동시키는 부품이며, 서보피스톤의 경우 피드백레버의 위치를 이동시키고 0.2MPa의 파일럿 압력을 받아 사판의 경전각을 조정하는 부품이다.

Fig. 12은 피드백레버와 서보피스톤의 경계조건 적용을 위해 주요부분을 나타낸 것이다. 피드백레버의 경우 페달의 조작을 받는 링크부분이 있고, 파일럿 압력을 형성하도록 하는 스펴과의 조립부분이 있으며, 마지막으로 서보 피스톤의 위치를 피드백 하는 접촉면이 존재 한다. 서보피스톤의 경우 파일럿 압력을 전달받는 부분이 있고 외부의 하우징과의 접촉하여 축 방향운동을 접촉면이 있으며, 마지막으로 피드백 레버와 접촉하는 면이 존재한다. 이때 서보피스톤의 작용면을 경계조건으로 정의하였다.

피드백레버의 회전력에 의해 접촉부 응력이 발생하므로 Fig. 13와 같이 글로벌 좌표계를 활용하여 두 부품의 거동을 정의하였다. 하중조건인 경우 스펴의 단면적에 파일럿 압력인 0.2 MPa을 적용하였을 때의 작용력과 스펴의 위치에 따라 스펴이 압축되어 힘의 합력이 감소하게 되므로 Table 4와 같은 하중조건을 도출해낼 수 있다. 이때 힘의 합력이 가장 큰 시점은 스펴이 12.9mm일 때이므로 이 시점의 하중조건을 Fig. 14와 같이 적용하였다. 두 부품의 접촉면의 경우 보수적인 평가를 위해 마찰이 없는 접촉조건을 적용하였다.

Table 4 Total force according to spring displacement

Spool state	Spring force	Pilot pressure force	Total force
12.9mm	-60.9N	123.6N	62.7N
9mm	-120.05N	123.6N	3.5N

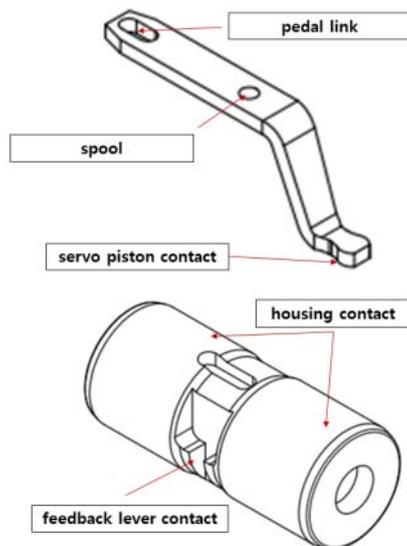


Fig. 12 Assembly conditions of feedback lever and servo piston

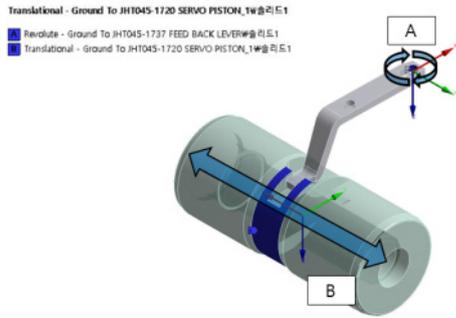


Fig. 13 Boundary conditions of feedback lever and servo piston when working

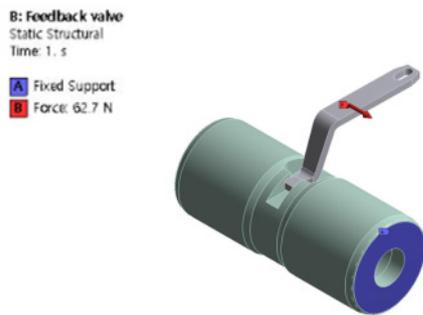


Fig. 14 Boundary conditions of feedback lever and servo piston when working

4. 구조해석 결과 및 고찰

4.1 샤프트

샤프트의 최대응력 발생지점은 Fig. 15와 같이 베어링의 조립경계면에서 나타났다. 즉 HST에 경우, 샤프트 응력발생의 주원인으로 축에 가해지는 엔진의 비틀림 하중보다 실린더 블록이 샤프트에 가하는 축 방향 하중이 응력발생의 주원인으로 파악된다.

해석결과를 Table 5에 나타내었으며 항복강도대비 안전율은 2.46으로 구조적으로 안정적인 것으로 파악된다.

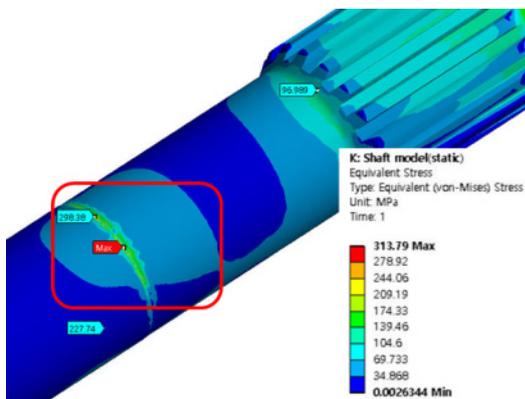


Fig. 15 Stress concentration region of shaft

Table 5 Structural analysis result of shaft

Shaft	
Material	SCM420
Yield strength[MPa]	773
Tensile strength[MPa]	-
von-Mises stress[MPa]	313.8
Safety factor	2.46

4.2 피스톤 및 피스톤 슈

피스톤의 최대응력 발생지점은 Fig. 16와 같이 피스톤의 목 부위에서 나타나고 있으며, 피스톤 슈의 경우 Fig. 17와 같이 피스톤 접촉부에서 발생하고 있다. 피스톤의 경우 구조 안전율이 피스톤의 목 지름에 크게 영향을 받을 것으로 예상되며, 피스톤 슈의 경우 접촉부 영역 및 접촉조건에 따라 큰 영향을 받을 것으로 예상된다.

해석결과를 Table 6에 나타내었으며 안전율이 1.89 및 1.55로 보편적 정적해석의 안전율 판단기준인 2.0보다 낮게 나타났다. 하지만 피스톤과 피스톤 슈 사이의 윤활조건 및 마찰조건을 고려하지 않은 보수적

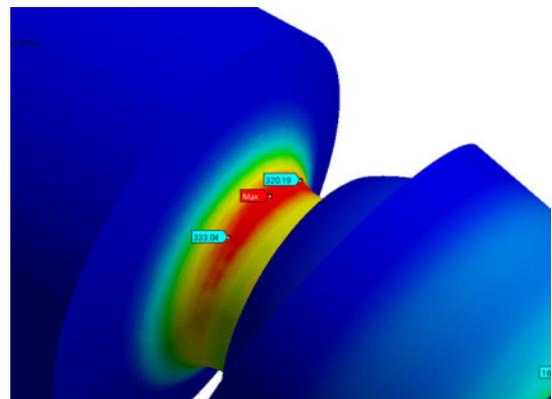


Fig. 16 Stress concentration region of piston

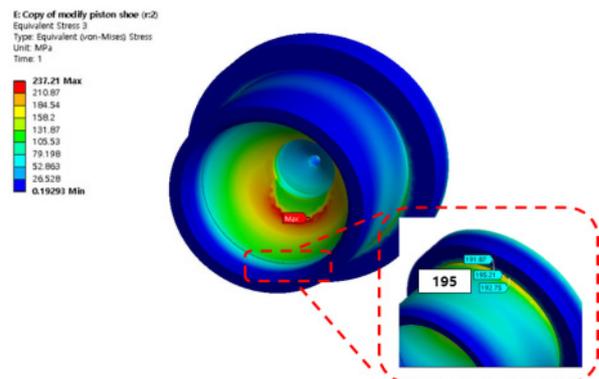


Fig. 17 Stress concentration at piston shoe when the friction coefficient is 0

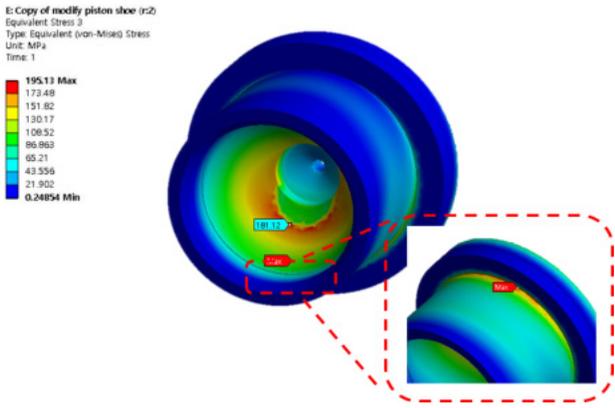


Fig. 18 Stress concentration at piston shoe when the friction coefficient is 0.12

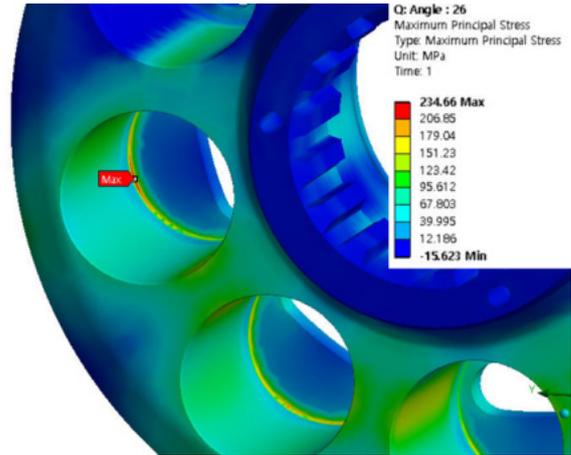


Fig. 19 Stress concentration region of cylinder block

Table 6 Structural analysis results of Piston and piston shoe

	Piston	Piston shoe
Material	SCM415	HB71
Yield strength[MPa]	686	368
Tensile strength[MPa]	-	-
von-Mises stress[MPa]	363.8	237.21
Safety factor	1.89	1.55

인 평가결과이다. Fig. 18 같이 두 부품 사이에 고려되어질 수 있는 운동마찰계수인 0.12¹¹⁾을 적용한 결과 기존보다 보다 넓은 면적에 응력이 분포하게 되어 최대 응력 값이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 즉 피스톤 및 피스톤 슈의 실제의 구조안전율은 마찰이 존재하므로 계산된 결과보다 높을 것으로 예상된다.

4.3 실린더블록 및 밸브플레이트

실린더블록 및 밸브플레이트의 최대응력 발생지점은 실린더블록의 경우 Fig. 19와 같이 고압의 유체가 작용하는 내부의 굴곡진 부위에서 나타나고 있으며, 밸브플레이트의 경우 Fig. 20와 같이 후면의 굴곡진 부위에서 최대응력이 나타나고 있다. 실린더블록에서 발생하는 응력은 유체의 압력에 의해 크게 영향을 받는 것으로 보이며, 밸브 플레이트의 경우 Fig. 20의 A지점에서 발생할 것으로 예상하였으나 후면의 하우징과의 접촉면 중에서 굴곡진 부위인 B지점에서 최대응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 실린더블록에 작동유 토출부위의 압부비에 의한 축 방향 하중이 발생하고, 발생한 하중이 고압영역에 편심되어 밸브플레이트에 전달되며 나타난 현상으로 보인다. 즉 밸브플레이트에 발생하는 응력은 실린더블록이 가

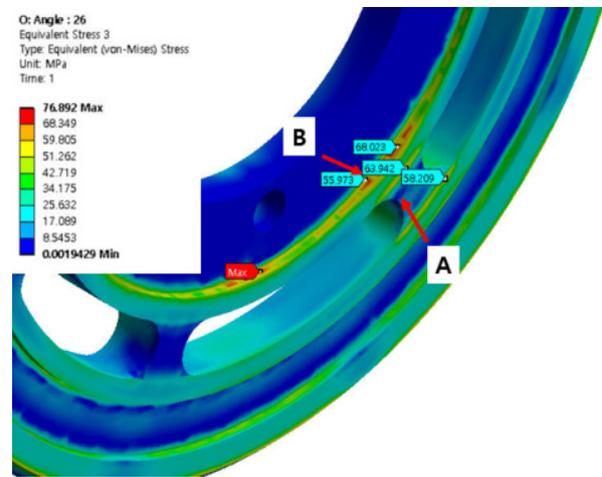


Fig. 20 Stress concentration region of valve plate

Table 7 Structural analysis results of cylinder block and valve plate

	Cylinder block	Valve plate
Material	FCD600	SS41
Yield strength[MPa]	-	235
Tensile strength[MPa]	600	-
Stress[MPa]	234.6	76.9
Safety factor	2.55	3.05

하는 하중에 의해 크게 영향을 받는 것으로 보인다. 해석결과를 Table 7에 나타내었으며 안전율은 인장강도 및 항복강도대비 실린더블록은 2.55, 밸브플레이트의 경우 3.05로 구조적으로 안전하다고 판단된다.

4.4 서보피스톤 및 링크

피드백레버 및 서보피스톤의 최대응력 발생지점은 Fig. 21와 같이 두 부품이 접촉하는 부위에서 나타나

고 있다.

Fig. 21에 최대응력이 발생한 지점의 응력분포를 살펴보면 응력의 분포가 고르게 나타나는 것이 아닌 접촉부위의 국부적인 영역에 나타나고 있다. 이는 Fig.22와 같이 스톱의 작용점에서 피드백 레버의 변형으로 인해 서보피스톤의 접촉부에 응력이 집중되었기 때문에 나타난 현상이다. 즉 피드백 레버 및 서보 피스톤의 응력발생 원인으로서는 스톱에 작용하는 작용력 및 스프링의 강성을 생각할 수 있으며, 피드백레버의 강성 및 접촉조건이 최대응력에 크게 영향을 미칠 것으로 생각된다.

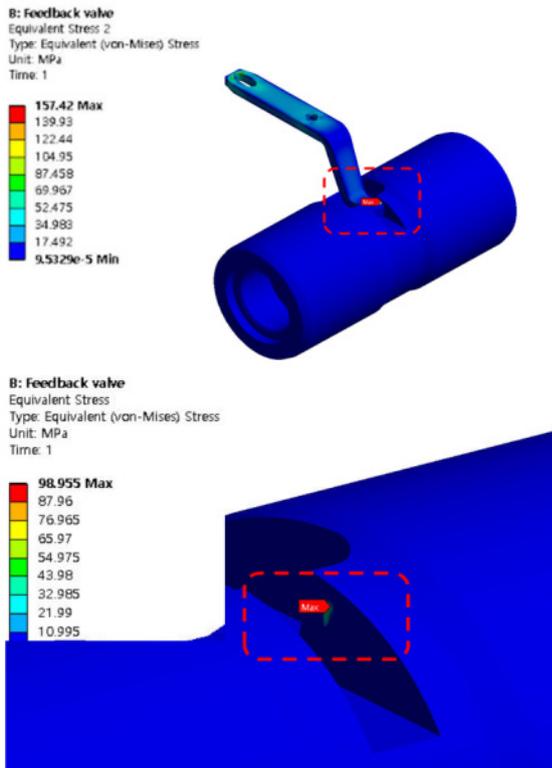


Fig. 21 Stress concentration region of feed back lever and servo piston

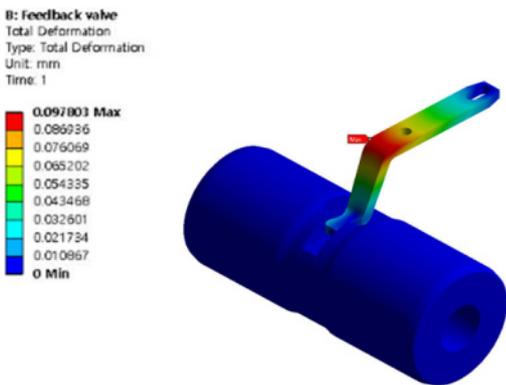


Fig. 22 Deformation of cylinder block and valve plate

Table 8 Structural analysis results of Feedback lever and servo piston

	Feedback lever	Servo piston
Material	S45C	S45C
von-Mises stress[MPa]	490	490
Tensile strength[MPa]	-	-
von-Mises stress[MPa]	157.4	98.9
Safety factor	3.11	4.95

구조해석의 결과를 Table 8에 나타내었으며 각 부품의 안전율의 경우 피드백 레버는 3.11, 서보피스톤의 경우 4.95로 구조적으로 안전하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 55마력급 서보식 정유압 무단변속기의 주요 핵심 부품에 대한 구조안정성 평가를 위해 동역학 해석 및 구조해석을 수행하였다. 동역학 해석을 통해 구조해석에 필요한 하중계산 및 특성을 분석하였으며 도출한 결과를 구조해석 입력조건으로 적용하였다.

샤프트의 최대응력 발생지점은 베어링의 조립부에서 나타났으며 이는 실린더블록이 샤프트에 전달하는 축 방향 하중에 의해 나타난 것이므로 축의 지름 및 길이가 중요한 설계인자로 판단된다.

피스톤 및 피스톤 슈의 안전율의 경우 각각 1.89 및 1.59로 비교적 낮은 안전율을 나타냈지만 이는 부품에 작용되는 윤활 조건 및 마찰조건을 고려하지 않은 보수적인 평가를 진행한 것으로 실제의 조건을 고려한다면 안전율은 이보다 높을 것으로 예상된다.

실린더블록의 최대응력 발생지점은 고압의 유체가 형성되는 실린더 내부에 발생하는 일반적인 양상을 나타내었다.

밸브플레이트의 경우 하우징과의 접촉면 부근에서 최대응력이 발생하였다. 이는 실린더블록이 축 방향 하중으로 밸브플레이트에 하중을 전달하였기 때문이므로 구조안정성 확보를 위해서는 밸브플레이트의 접촉 면적이 중요할 것으로 판단된다.

피드백레버 및 서보피스톤의 경우 최대응력이 두 부품의 접촉면적 중 국부적 영역에서 발생하였는데 이는 피드백 레버의 변형에 의해 응력집중 현상이 나타난 것이다. 따라서 서보피스톤 시스템에서 두 부품의 구조안정성에 큰 영향을 미치는 인자로는 두 부품이 정밀하게 조립되어 넓은 영역에 스트레스를 분포시킬 수 있는 조밀한 공차관리 및 레버의 변형

을 최소화하는 설계가 중요 설계인자로 파악된다.

HST의 주요부품에 대한 구조해석을 수행하여 얻은 결과로써 각 부품의 주요 설계인자를 분석할 수 있었으며 이를 토대로 유압펌프 등 유사 산업기기의 설계에 가이드를 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

이 연구는 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원이 지원하는 ‘구매조건부 신제품 개발사업(과제 번호 : S2946317)’의 지원을 받아 연구되었음을 밝힙니다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) S. U. Park et al., “Development of Hydro-Mechanical Continuously Variable Transmission for Forklift,” *Journal of Drive and Control*, Vol.15, No.1, pp.61-69, 2018.
- 2) KAMICO (Korean Agricultural Machinery Industry Cooperative), KSAM (Korea Society for Agricultural Machinery), *Agricultural Machinery Yearbook Republic of Korea*, 2019.
- 3) Ministry of Trade, Industry and Energy, *Industrial Technology R&D Strategy Smart Machinery*, 2019.
- 4) M. Mattetti et al., “Optimal Criteria for Durability Test of Stepped Transmissions of Agricultural Tractors,” *Biosystems Engineering*, Vol.178, pp.145-155, 2019.
- 5) D. S. Jung et al., “Development of Hydro-Mechanical Transmission for Tractor,” *Journal of Drive and Control*, Vol.15, No.1, pp.70-76, 2018.
- 6) H. Jung et al., “A Study on Structural Analysis for Stability Evaluation According to Design Parameters of a Fire Ladder Vehicle,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 8, pp.64-72, 2020.
- 7) C. W. Moon et al., “Fracture Prediction of Ductile Materials Using Finite Element Methods,” *Magazine and Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.19, No.3, pp.29-34, 2017.
- 8) S. W. Choi et al., “A Study on the Structural Analysis and Design Verification of Variable Swash Plate Piston Pump Case for Wheeled Armored,” *Journal of Drive and Control*, Vol.16, No.2, pp.43-50, 2019.
- 9) ANSYS 2020 R1, *Structural Analysis Guided*, ANSYS, INC. 2020
- 10) Y. J. Nam, “Hydraulic and Dynamic Analysis of Bent-Axis Piston Motor for 5~8 Tonnage Wheel Type Excavators,” *Journal of Drive and Control*, Vol.18, No.3, pp.45-49, 2021.
- 11) GL Noble Denton, 0013/ND REV8 Guidelines for load-outs, <https://rules.dnv.com/>