

유동-구조 연성해석을 활용한 외접 기어펌프의 성능 및 내구성에 관한 기초 연구

A Basic Study on Performance and Durability of an External Gear Pump Using Fluid-Structure Interaction

양현우* · 지상원*†

Hyun-Woo Yang* and Sang-Won Ji*†

(Received 06 August 2025, Revision received 25 October 2025, Accepted 27 October 2025)

초록 : 기존의 기어펌프 유동-구조 연성해석은 ANSYS와 같은 단일 플랫폼 내에서 해석을 함께 수행하는 방식이 일반적이었다. 본 연구에서는 펌프의 유동과 구조해석을 위해 특화된 별개의 상용 소프트웨어의 장점을 연계하여 기어펌프의 성능과 내구성을 효과적으로 평가할 수 있는 해석 방법론을 제안한다. 이를 위해 본 연구에서는 배제용적이 2.6 cc/rev인 외접 기어펌프를 대상으로 200 bar, 1500 rpm 작동 조건에서 유동-구조 연성해석을 수행하였다. 펌프 유동해석의 격자 품질과 해석 안정성 문제를 해결하기 위해 Simerics MP+의 구조화 격자와 비정합 격자 경계 처리법을 적용하여 정밀한 유동해석을 수행하였다. 이후, 도출된 압력 분포를 ANSYS의 경계 조건으로 활용하여 구조 및 피로해석을 수행하였다. 유동-구조 연성해석 결과, 평균 토출 유량은 약 3.41 L/min, 최대 등가응력은 약 38 MPa, 최대 변형량은 0.62129 μ m로 각각 확인되었고, 피로 수명은 약 1,000,000 사이클 이상인 것으로 나타났다.

키워드 : 외접 기어펌프, 전산유체해석, 유한요소해석, 유동-구조 연성해석, 피로 수명

Abstract : Conventional gear pump fluid-structure interaction analysis typically performed both fluid and structural analyses within a single platform such as ANSYS. This study proposes an analysis methodology that effectively evaluates the performance and durability of gear pumps by leveraging the advantages of specialized, separate commercial software for pump flow and structural analysis. To achieve this, a fluid-structure interaction analysis was performed on an external gear pump with a displacement volume of 2.6 cc/rev under operating conditions of 200 bar and 1500 rpm. To address mesh quality and analysis stability issues in the pump flow analysis, precise flow analysis was performed using Simerics MP+'s structured mesh and non-conforming mesh boundary treatment. Subsequently, the derived pressure distribution was utilized as boundary conditions in ANSYS for structural and fatigue analysis. The fluid-structure interaction analysis results confirmed an average discharge flow rate of approximately 3.41 L/min, a maximum equivalent stress of approximately 38 MPa, and a maximum strain of 0.62129 μ m. The fatigue life was found to exceed approximately 1,000,000 cycles.

Key Words : External Gear Pump, Computational Fluid dynamics, Finite Element Analysis, Fluid-Structure Interaction, Fatigue Life

*† 지상원(<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) : 교수, 국립
부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : jsw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6190

*양현우(<https://orcid.org/0009-0000-9072-7526>) : 대학원생,
국립부경대학교 기계시스템공학과

*† Sang-Won Ji(<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) : Professor,
Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National
University.

E-mail : jsw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6190

*Hyun-Woo Yang(<https://orcid.org/0009-0000-9072-7526>) : Graduate
student, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong
National University.

1. 서 론

기어펌프는 간단한 구조와 긴 수명으로 인해 산업 기계, 건설 장비, 농업 기계 등 다양한 분야에서 널리 사용되는 기본적인 유압 펌프이다.¹⁻³⁾ 성능 예측과 신뢰성 확보를 위해 유동해석과 구조해석의 통합이 중요하며, 전산유체역학(CFD)은 기어펌프 내부의 복잡한 유동을 예측하고 설계 기간을 단축하는 데 매우 유용한 도구로 자리매김하였다.⁴⁻⁶⁾

선행 연구에서는 주로 ANSYS Fluent와 같은 범용 CFD 소프트웨어를 사용하여 기어펌프의 유동해석을 수행하고, 그 결과를 ANSYS Mechanical로 연계하는 단일 플랫폼 기반의 유동-구조 연성해석(Fluid-Structure Interaction, FSI)을 시도해 왔다.⁷⁻⁹⁾ 그러나 동적 격자(dynamic mesh) 또는 오버셋 격자(overset mesh) 기법을 사용하는 CFD 접근법은 기어 이 사이의 미세 간극에서 격자 품질 저하나 음의 체적(negative volume) 발생 및 오픈 셀(orphan cell) 생성 등의 문제가 발생하기 쉬워 해석이 불안정하고 계산 시간도 크게 증가하는 한계가 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 이러한 이유로 기어펌프의 정확한 유동 특성을 도출하는 데 어려움이 있었다.⁵⁾

이에 반해 용적형 펌프 모터 전용 CFD 소프트웨어인 Simerics MP+는 기어펌프를 위한 전용 해석 기능을 제공하여 이러한 문제를 개선할 수 있다.¹²⁻¹⁵⁾ 특히 Simerics MP+에는 기어펌프 해석용 템플릿이 마련되어 있어 복잡한 기어 형상을 자동으로 구조화 격자로 생성하고, 안정적인 계산 기능을 제공한다.¹⁶⁾ 또한 비정합 격자 경계 처리를 위한 음해적 방법인 MGI(Mismatched Grid Interface) 기법을 활용하여 기어 회전에 따른 격자 불일치를 효과적으로 처리할 수 있으며, 이를 통해 정확한 유동해석을 기대할 수 있으므로, Simerics MP+의 기어펌프 템플릿은 격자수를 줄여 계산 시간을 단축하면서도 결과의 정확성과 신뢰성을 확보할 수 있다.¹³⁻¹⁹⁾

따라서 본 연구에서는 용적형 펌프의 유동해석에 특화된 Simerics MP+를 이용하여 유동해석을 수행하고, 그 결과를 ANSYS로 연계하여 구조 및

피로해석에 관한 연성해석을 수행한다. 기존에 단일 플랫폼 내에서 해결하려던 유동-구조 연성해석을 이원화된 도구로 분담함으로써 각각의 도구가 지닌 강점을 최대한 활용하고자 한다. 이를 통해 기존 단일 플랫폼을 이용한 방법에서 발생했던 격자 품질 저하와 해석 불안정성을 효과적으로 해소하고, 보다 정확한 구조적 평가 및 수명 예측을 가능하게 하는 통합 해석 방법을 제시한다.

2. 모델링

2.1 유동해석 모델링

Fig. 1과 같이 배제 용적 2.6 cc/rev 단방향 외접 기어펌프를 대상으로 Simerics MP+를 활용하여 유동해석을 위한 형상 단순화를 통해 Fig. 2와 같은 유동해석 모델을 구성한다.

기어펌프가 작동하면 기어는 서로 맞물려 회전하게 되므로 상대적으로 저압이 형성되는 입구 측 포트에서 유체를 흡입하고 부하에 의해 고압이 형성되는 출구 측 포트에서는 유체가 송출되어 유량이 형성된다.

기어의 회전에 따른 내부 유동 거동을 정확하게 반영하기 위해 MGI 모델을 적용하였다. 이후 자동 격자화 기능을 활용하여 기어 및 하우징 내부의 유동 영역을 Fig. 3과 같이 생성하였다. Fig. 3에서 기어 치형 주변부 등과 같이 비교적 복잡한 형상 부분은 비구조화 격자를 적용하였으며, 비교적 단순한 형상인 주요 유로 영역에는 구조화 격자를 적용하였다.

유동해석을 위한 경계조건으로 펌프 입구 측 압력은 1 bar, 출구 측 압력은 200 bar로 각각 설정하였다. 유동해석에 적용된 ISO VG 32 작동유의 물성치를 Table 1에 나타낸다.

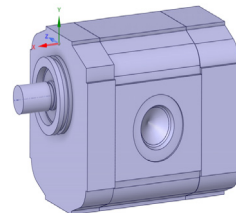


Fig. 1 3D model of gear pump

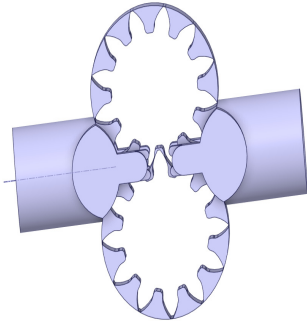


Fig. 2 3D model of the gear pump after cleanup

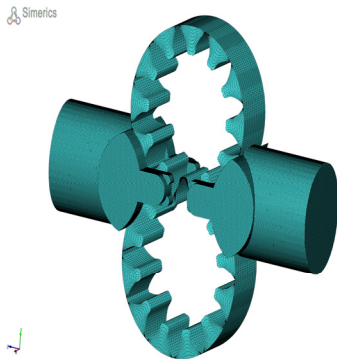


Fig. 3 3D model of the gear pump with mesh

Table 1 Flow analysis internal fluid properties

Parameter	Value	Unit
Oil	ISO VG 32	-
Density	860	kg/m ³
Cp(Specific Heat)	1880	J/kg·K
Thermal Conductivity	0.12	W/m·k
Viscosity	0.0275	kg/m·s
Operation Temperature	313	K

유동해석을 통해 계산한 압력분포를 이용하여 구조해석 경계조건을 설정하도록 한다. 이때 요구되는 압력의 기준점은 각각의 입출구 포트와 각 TSV(tooth space volume) 지점으로 설정하였고, 이를 Fig. 4에서 붉은색 십자자로 표시하였다.

격자 민감도 분석(Mesh Sensitivity Analysis)을 수행하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2의 결과로부터, 격자수를 약 16만 개 이상으로

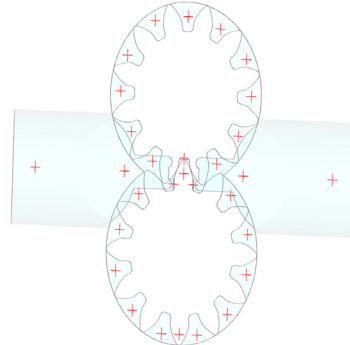


Fig. 4 3D model of the gear pump with points marked for each volume

Table 2 Mesh Sensitivity Analysis of Flow Rate

Cell size	Number of cells	Faces	Nodes	Flow Rate [L/min]
0.05	94261	198162	121841	3.40744
0.03	104251	379154	161765	3.41885
0.01	164181	590060	249397	3.41484
0.005	250821	888907	368155	3.41490
0.0025	2935557	8679753	2976411	3.41492

증가시켜도 해석 결과에 큰 차이를 보이지 않고 수렴하는 경향이 확인되었다. 따라서 해석 신뢰성을 확보한 상태에서 연산 효율을 고려하여 Fig. 3에 나타난 격자계로 유동해석을 수행하였다.

유동해석 지배 방정식은 3차원 비정상 비압축성 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 이용하였으며 RANS 방정식이 적용된 연속 방정식 및 운동량 보존 방정식은 식 (1)~(2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}[\mu \\ (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k})] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u'_i u'_j) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, u_i , u_j 는 속도 성분을 나타내며, p 는 압력, μ 는 분자 점성 계수, ρ 는 유체의 밀도, $u'_i u'_j$ 는 Reynolds 응력 항이다.

유압 시스템 및 난류 흐름 해석에서 널리 사용되며, 속도 및 압력의 난류 변동을 효과적으로 반영할 수 있는 표준 k- ϵ 난류 모델을 이용하여 Reynolds 응력 항을 모델링하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

여기서, k 는 난류 운동에너지이며, μ_t 는 난류 점성 계수, σ_k 는 난류 프란틀 수, G_k 는 난류 에너지 생성 항, ϵ 은 난류 소산율이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

여기서, 경험적 상수인 C_1 과 C_2 는 각각 1.44와 1.92이며, σ_ϵ 는 난류 프란틀 수이다.

난류 점성 계수 μ_t 는 다음과 같이 계산된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

여기서, C_μ 는 경험적 상수로 0.09이다.

본 연구에서는 수렴성 검토를 위해 해석을 반복 수행하여 정상 상태에서 출구 압력 및 유량 변동이 안정화된 해석 결과를 도출하였다.

2.2 구조해석 및 피로해석 모델링

본 연구에서는 기어펌프의 유동해석 결과를 바탕으로 단방향 유동-구조 연성해석 기법을 적용하여 구조 및 피로해석을 수행하였다. 이를 통해 유체의 내압이 구조에 미치는 영향을 평가하고, 피

로 수명을 예측하였다. 구조해석 및 피로해석은 ANSYS Mechanical을 활용하여 수행하였으며, Simerics-MP+에서 유동해석을 통해 도출된 압력 분포를 하중 조건으로 적용하였다.

기어펌프의 전체 형상을 활용하여 해석을 수행할 경우, 계산 비용이 과도하게 증가할 수 있다. 따라서 해석의 정확성을 유지하면서 계산 효율을 높이기 위해 불필요한 세부 형상을 제거하는 형상 단순화를 수행하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 내부 유동과 맞는 부분과 기어의 주요 형상은 유지하고 외부 형상의 단순화를 통해 구조해석의 정확도를 확보하고 연산 부담은 줄이고자 하였다.

형상 단순화 3D 모델을 바탕으로 격자 민감도 분석을 수행하고, 그 결과를 Table 3에 나타냈다. Table 3의 결과로부터, 격자수가 약 320만 개 이상부터는 해석 결과에 큰 차이를 보이지 않고 수렴하는 경향을 확인하였다. 따라서 해석 신뢰성을

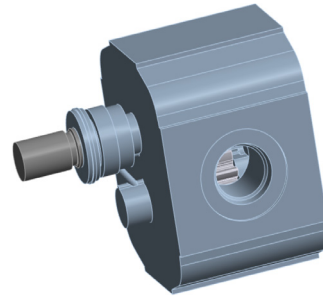
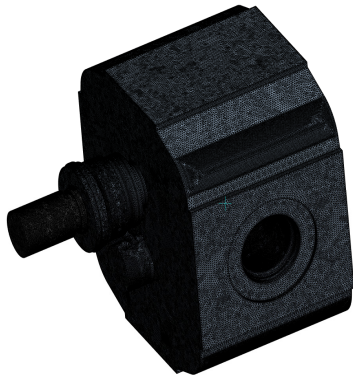


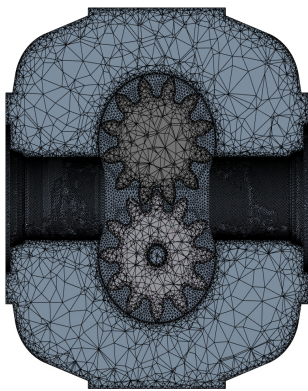
Fig. 5 Pre-processing for structural analysis

Table 3 Mesh Sensitivity Analysis of Stress and Displacement

Element size [mm]	Nodes	Element	Total Deformation [μ m]	Equivalent Stress [MPa]
0.5	2137969	1148710	0.6212	32.233
0.4	3383294	1789823	0.6215	34.737
0.3	6167032	3232405	0.6216	38.192
0.2	7205740	3763236	0.62161	38.1921
0.25	9242459	4755957	0.62161	38.1921



(a) External view

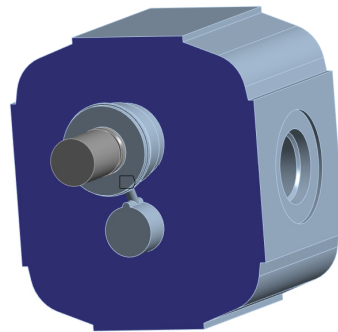


(b) Internal view

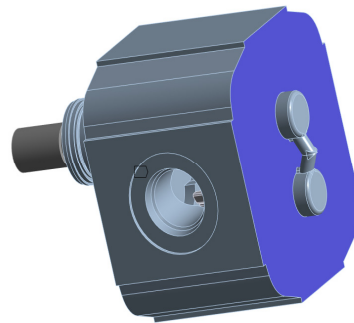
Fig. 6 3D model of the gear pump with mesh generated using ANSYS

확보한 상태에서 연산 효율을 고려하여 Fig. 6에 나타난 격자계로 구조해석을 수행하였다. 경계조건으로는 고정 지지 및 내압 조건이 각각 적용되었다. 펌프 하우징의 실제 고정 상태를 모사하기 위해 Fig. 7에 나타난 바와 같이 하우징의 외부 고정 영역에 고정 지지 조건을 적용하였다.

기어와 하우징 사이의 베어링 접촉 영역, 기어 간 맞물림 영역 등 물품 간의 접촉은 Ansys 상에서 자동으로 감지된 접촉 조건을 사용하였다. 유동해석에서 도출된 내압을 입출구 유동 영역과 TSV에 각각 맞는 표면에 정하중을 적용하여 실제 운전 환경을 모사한 환경에서 기어펌프의 구조적 특성을 분석하였다.



(a) Gear shaft side



(b) Opposite side of the shaft

Fig. 7 Fixed support conditions

Table 4 Material properties of Structural Steel

Parameter	Value	Unit
Density	7,850	kg/m ³
Elastic Modulus	200,000	MPa
Poisson's Ratio	0.30	-
Shear Strength	300	MPa
Shear Modulus	80,000	MPa

구조해석 결과를 통해 등가응력 및 총 변형량을 확인하고, 이를 바탕으로 안전 계수를 산출한다. 또한 기어펌프의 장기적인 내구성을 평가하기 위해 응력-수명 선도 기반 방법을 적용하여, 반복적인 하중에 따른 피로 수명을 예측하였다. 해석에 사용된 기어 및 하우징의 재료는 구조용 강 재료로, 그 물성치를 Table 4에 나타내었다.

3. 유동 및 구조해석 결과

본 연구에서는 Simerics MP+를 활용하여 단방향 기어펌프의 유동해석을 수행하고, 해당 결과를 ANSYS로 연계하여 구조 및 피로해석을 진행하였다. 이를 통해 기어펌프 내부의 유동 특성과 이에 따른 구조적 거동을 정량적으로 평가하였다.

3.1 유동해석 결과

유동해석은 Simerics MP+를 활용하여 수행하였으며, 기어펌프 내부의 유동 특성을 분석하여 압력 분포 및 토출 유량을 평가하였다.

기어펌프의 유동해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 8과 9에 각각 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 압력분포 결과로부터 기어 회전에 따라 입구 측에서는 약 1 bar 정도의 저압이 형성되고, 출구 측에서는 약 200 bar 정도의 고압이 형성됨을 확인하였다.

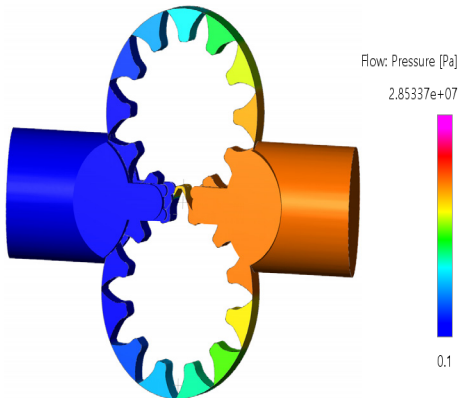


Fig. 8 Pressure distribution of the gear pump

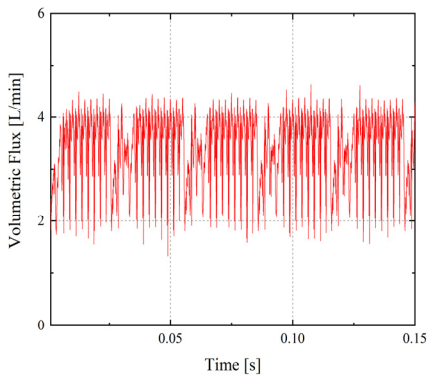


Fig. 9 Volumetric flow rate of the gear pump

기어의 맞물림 구간에서는 유체의 누설에 의한 압력 차이가 발생하였으며, 이 과정에서 유체의 압력 차이가 발생하였으며, 이 과정에서 유체가 기어 치형을 따라 이동하면서 압력이 점진적으로 증가하여 출구 측에서의 압력 값이 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

Fig. 9에 나타낸 기어펌프의 토출 유량은 기어의 회전으로 인해 주기적인 맥동을 보이거나 지속적으로 유체를 배출하여 평균 토출 유량이 약 3.41 L/min임을 확인하였다.

3.2 구조 및 피로해석 결과

본 연구에서는 유동해석을 통해 산출한 내압

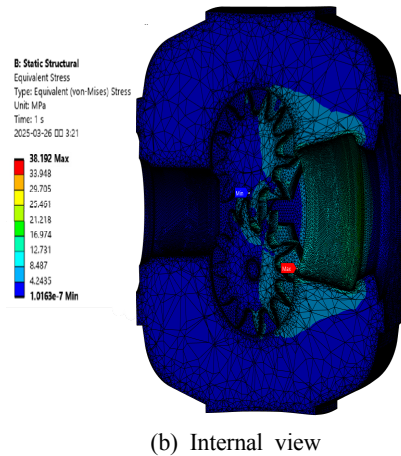
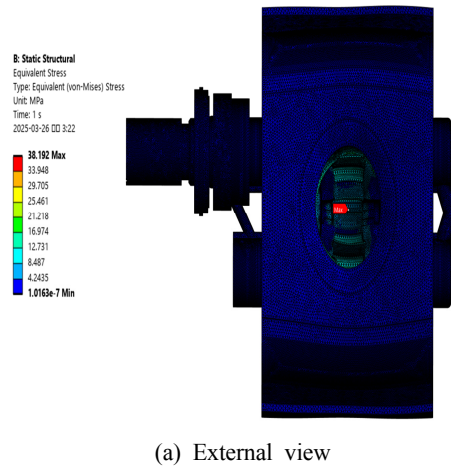


Fig. 10 FSI analysis results - equivalent stress

분포 결과를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석을 통해 기어펌프의 주요 구조적 응력 분포 및 변형량을 평가하였으며, 이를 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 나타낸다.

Fig. 10의 등가응력 해석 결과로부터, 기어펌프 내부의 구동기어 출구 포트 부분에서 약 38.192 MPa의 최대 등가응력이 발생하는 것으로 나타났다. 해당 영역에서 최대 등가응력이 발생하는 것은 출구 포트에서의 높은 압력과 기어 회전에 따른 응력 집중에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig 11의 변형량 해석 결과로부터 출구 포트 내부에서 $0.6216 \mu m$ 의 최대 변형이 발생하였으며, 이는 출구 포트 주변의 급격한 형상 변화 구간에서 응력 집중이 발생해 변형이 집중되는 것으로 판단된다.

일반적으로 안전 계수가 1.2 이상이면 구조적으

로 적절한 설계로 판단되며, 해석을 통해 도출된 최대 등가응력 값과 재료의 항복강도를 이용하여 안전 계수는 약 6.55로 계산되었다.

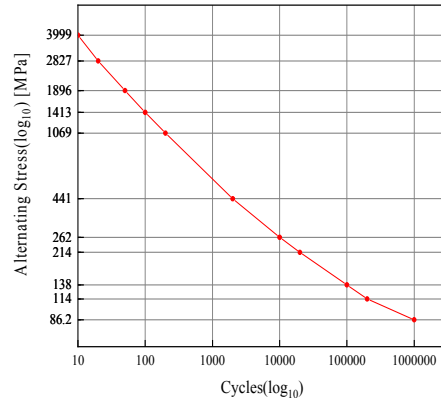
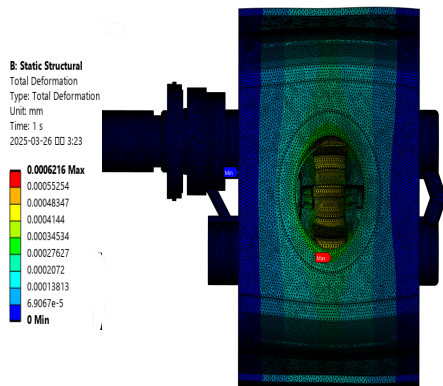
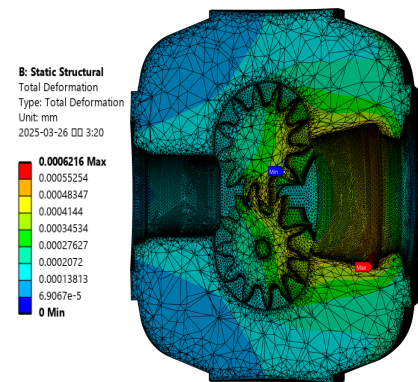


Fig. 12 Structural Steel S-N curve

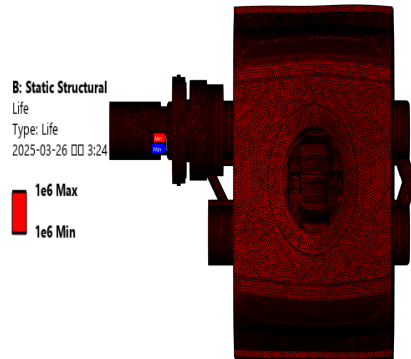


(a) External view

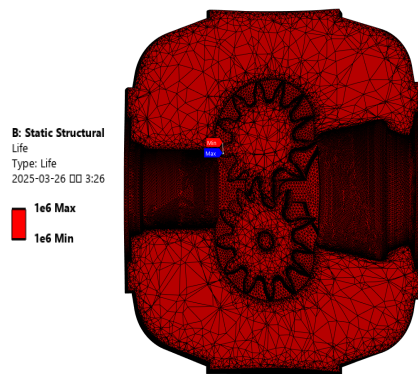


(b) Internal view

Fig. 11 FSI analysis results - total deformation



(a) External view



(b) Internal view

Fig. 13 Fatigue analysis results of gear pump

기어펌프의 반복 하중 조건에서의 내구성을 평가하기 위해 Fig. 12와 같은 구조용 강도의 응력-수명 선도를 활용하여 피로 수명을 예측하였다. 피로해석 결과, Fig. 13에 나타낸 바와 같이 최소 100만 사이클 이상의 무한 수명을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 기어펌프의 유동 및 구조적 거동을 보다 정밀하게 분석하기 위해, Simerics MP+를 활용한 유동해석 결과와 ANSYS Mechanical 기반의 구조 및 피로해석을 연계하였다. 연구의 대상이 되는 기어펌프는 2.6 cc/rev의 배제용적을 가지며, 200 bar의 작동조건을 가진다.

본 연구를 통한 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 유동해석 결과, 기어 회전에 따라 입구 측에서 출구 측으로 압력이 점진적으로 상승하는 패턴을 확인할 수 있었으며, 이는 기어 맞물림으로 발생한 압력이 주변 TSV로 점진적으로 전파되는 현상 때문으로 해석된다. 기어의 회전 속도에 따라 유량이 일정한 패턴을 형성하며, 평균 토출 유량은 약 3.41 L/min으로 나타났다. 이를 통해, 수행된 유동해석이 기어펌프의 내부 유동 특성을 안정적으로 예측하고 있음을 확인하였다.

2) 구조해석 결과, 최대 등가응력은 출구 포트 부근에서 38.192 MPa로 나타났다. 이는 출구 측에서의 높은 압력과 기어 맞물림 과정에서 발생하는 응력 집중 효과 때문으로 해석된다. 최대 변형량은 기어 치형과 하우징 접촉부에서 $0.62129 \mu\text{m}$ 로 나타났으므로, 해당 부위가 기어 회전 시 내부 압력이 가해지면서 구조적으로 가장 큰 변형이 나타나는 영역임을 확인하였다. 또한 구조용 강이 사용된 해당 펌프의 안전 계수는 6.55로 계산되어 충분한 구조적 안정성이 확보됨을 확인하였다.

3) 피로해석 결과, 수명이 약 1,000,000 사이클 이상의 무한 수명을 가지고 있음을 확인하였다. 이를 통해 해당 기어펌프의 구조가 비교적 균일하게 하중을 분산하고 있으며, 설계된 작동조건에서 안정적으로 유지되고 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 정밀 유동-구조 연성해석 결과를 통해, 기어펌프 내부에서 발생하는 응력 분포와 변형량의 크기를 정량적으로 평가할 수 있었으며, 이는 향후 기어펌프 설계 최적화 및 내구성 확보를 위한 중요한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

향후 온도 변화, 고속 회전, 압력 변동 등 다양한 작동조건에서의 성능 변화를 분석하여 보다 현실적인 운용 환경을 반영할 수 있는 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2025년도 산업통상자원부 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20018662, 기계장비산업기술개발사업).

Author contributions

S. W. Ji; Conceptualization, Formal analysis, Funding acquisition, Project administration, Supervision, Validation, Writing-review & editing. H. W. Yang; Data curation, Investigation, Methodology, Resources, Software, Visualization, Writing-original draft.

References

1. E. Frosina, A. Senatore and M. Rigosi, 2017, "Study of a High-Pressure External Gear Pump With a Computational Fluid Dynamic Modeling Approach", *Energies*, 10(8), 1113-1125. (<https://doi.org/10.3390/en10081113>)
2. J. Ivantysyn and M. Ivantysynova, 2001, *Hydrostatic Pumps and Motors: Principles, Design, Performance, Modelling, Analysis, Control and Testing*, Academic Books International, 1-512.
3. H. S. Jang and S. W. Ji, 2023, "A Numerical Study of Continuous Contact Helical Gear

- Pump: Model Development and Application”, *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, 27(4), 84-93.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2023.27.4.084>)
4. J. Zhou, A. Vacca and P. Casoli, 2014, “A Novel Approach for Predicting the Operation of External Gear Pumps Under Cavitating Conditions”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 45, 35-49.
(<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.03.009>)
5. W. Strasser, 2007, “CFD Investigation of Gear Pump Mixing Using Deforming/Agglomerating Mesh”, *Journal of Fluids Engineering*, 129(4), 476-484.
(<https://doi.org/10.1115/1.2436577>)
6. D. del Campo, R. Castilla, G. A. Raush, P. J. G. Montero and E. Codina, 2012, “Numerical Analysis of External Gear Pumps Including Cavitation”, *Journal of Fluids Engineering*, 134(8), 081105.
(<https://doi.org/10.1115/1.4007106>)
7. J. E. Matsson, 2022, “An Introduction to ANSYS Fluent 2022”, SDC Publications, 1-494.
8. R. Castilla, P. J. Gamez-Montero, N. Ertürk, A. Vernet, M. Coussirat and E. Codina, 2010, “Numerical Simulation of Turbulent Flow in the Suction Chamber of a Gearpump Using Deforming Mesh and Mesh Replacement”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(10), 1334-1342.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.06.009>)
9. Y. Yoon, H. Kim and Y. O. Han, 2017, “Numerical Simulation of Three-Dimensional External Gear Pump Using Immersed Solid Method”, *Applied Thermal Engineering*, 118, 539-550.
(<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.014>)
10. R. Castilla, P. J. Gamez-Montero, D. del Campo, G. Raush, M. Garcia-Vilchez and E. Codina, 2015, “Three-Dimensional Numerical Simulation of an External Gear Pump With Decompression Slot and Meshing Contact Point”, *Journal of Fluids Engineering*, 137(4), 041105.
(<https://doi.org/10.1115/1.4029223>)
11. M.Y. Cho, B. Sengupta, P. Larwence Raj and R.S. Myong, 2020, “Trajectory Prediction of Ice Shedding From an Aircraft Using CFD and Rigid Body Dynamics”, *Journal of Computational Fluids Engineering*, 25(2), 13-24.
(<https://doi.org/10.6112/kscfe.2020.25.2.013>)
12. H. S. Hassani, A. Jafari, S. S. Mohtasebi and A. M. Setayesh, 2010, “Fatigue Analysis of Hydraulic Pump Gears of JD 955 Harvester Combine Through Finite Element Method”, *Journal of American Science*, 6(7), 62-67.
13. E. Frosina, A. Senatore, D. Buono, M. Pavanetto, M. Olivetti and I. Costin, 2014, “Improving the Performance of a Two Way Flow Control Valve, Using a 3D CFD Modeling”, *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 7: Fluids Engineering Systems and Technologies*, V007T09A085, 1-8.
(<https://doi.org/10.1115/IMECE2014-38201>)
14. E. Frosina, G. Marinaro, A. Senatore, 2019, “Experimental and Numerical Analysis of an Axial Piston Pump: A Comparison Between Lumped Parameter and 3D CFD Approaches”, *Proceedings of the ASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference*, V001T01A042, 1-7.
(<https://doi.org/10.1115/AJKFluids2019-5406>)
15. C. W. Schleih, E. Viennet, M. Deeken, H. Ding, Y. Xia, S. Lowry and H. Murrenhoff, 2014, “3D-CFD Simulation of an Axial Piston Displacement Unit”, *Ninth International Fluid Power Conference, Aachen, Germany*, 3, 332-343.
16. P. Mazzei, E. Frosina, S. Bulleri and A.

- Senatore, 2024, “Numerical Modeling of Helical External Gear Pump Through a Novel CFD Approach Using Simerics MP+”, 2022 Global Fluid Power Society Ph.D. Symposium – October 12-14, 2022 in Naples, Italy, 69-87.
(<https://doi.org/10.13052/rp-9788770047975.004>)
17. E. Frosina, A. Senatore, D. Buono, M. Unicini Manganelli and M. Olivetti, 2014, “A Tridimensional CFD Analysis of the Oil Pump of a High Performance Motorbike Engine”, Energy Procedia, 45, 938-948.
(<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.099>)
18. U. Duzel, S. Dhar, H. Gao, H. Ding and M. Zecchi, 2022, “CFD Simulation of Helical External Gear Pump With Asymmetric Tooth Profile: Development of 3D Helical Mesh Generation and Motion Algorithm and Experimental Validation”, Global Fluid Power Society PhD Symposium, Naples, Italy, 1-6.
19. R. V. Godavarthi, D. Maiti and H. Ding, 2023, “Performance Prediction of a Swash Plate Piston Pump Using 3D CFD Simulation”, Proceedings of the ASME 2023 Gas Turbine India Conference, V001T01A003, 1-8.
(<https://doi.org/10.1115/GTINDIA2023-118395>)