

연성해석을 통한 (K)F-16 유량계 내부 링 기어 조립체의 구조 안정성 평가

조민성¹, 박종환¹, 장홍래^{2*}

¹창원대학교 메카트로닉스공학부, ²창원대학교 기계공학부

Evaluation of Structural Safety of Ring Gear Assembly inside Fuel Flow Transmitter Using Fluid-Structure Interaction Analysis

Min Seong Cho¹, Jong Hwan Park¹, Hong-Lae Jang^{2*}

¹Department of Mechatronics Engineering, Changwon National University

²School of Mechanical Engineering, Changwon National University

요약 링 기어 조립체는 국내에서 운용중인 (K)F-16 전투기 내부 유량계에 장착되는 핵심 부품으로, 유체의 하중을 받아 각 변위가 발생하면 센서부에서 해당 신호를 감지하여 유체의 유량을 실시간으로 확인할 수 있도록 하는 중요한 역할을 수행한다. 본 연구에서는 국내 생산의 필요성을 고려하여 현재 전량 수입에 의존하고 있는 링 기어 조립체에 대한 유한요소 모델을 활용하여 구조 안정성 평가 및 피로수명 평가를 수행하였다. 피로수명 계산을 위해서는 구조물에 가해지는 하중의 시간 응답이 중요하므로 구조물에 가해지는 유체의 하중을 면밀히 산정하기 위해 회전체의 유동 해석에 주로 사용되는 MRF(Moving Reference Frame) 기법과 SM(Sliding Mesh) 기법을 활용하여 과도 유동해석을 실시하였으며, 과도 유동 해석의 결과를 과도 구조 해석의 경계조건으로 사용하여 해석을 수행하는 단방향 과도 유체-구조 연성해석 기법을 도입하여 구조에 가해지는 하중의 시간 응답을 면밀히 확인하였다. 최종적으로 구조 및 피로 해석 결과를 종합적으로 검토하여 링 기어 조립체의 구조적 안정성과 높은 피로수명을 확인하였다.

Abstract The ring gear assembly is a critical component installed in the internal flowmeter of the domestically operated (K)F-16 fighter jet. It plays a crucial role in receiving the fluid load, detecting signals when displacements occur, and providing real-time confirmation of fluid flow through the sensor unit. Recognizing the need for domestic production, finite element modeling was used to perform structural safety assessments and fatigue life evaluations for the ring gear assembly, which relies heavily on imports. Calculating the fatigue life requires an understanding of the time response of the applied loads on the structure. Therefore, the fluid loads on the structure were estimated by performing excessive computational fluid dynamics (CFD) analyses using the moving reference frame (MRF) and sliding mesh techniques commonly used in rotational flow simulations. The excessive fluid flow analysis results were then used as boundary conditions for excessive structural analysis using a one-way fluid-structure interaction analysis technique. Ultimately, a comprehensive review of the structural and fatigue analysis results confirmed the structural stability and high fatigue life of the ring gear assembly. This underscores the feasibility of domestic production for the ring gear assembly, reducing the dependence on imports.

Keywords : Fatigue Analysis, Fluid Analysis, FSI, Fuel Flowmeter, Local Manufacturing, Structure Analysis

본 결과물은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.
(2021RIS-003)

*Corresponding Author : Hong-Lae Jang(Changwon National Univ.)

email: hjang@changwon.ac.kr

Received January 15, 2024

Revised February 26, 2024

Accepted March 8, 2024

Published March 31, 2024

1. 서론

국내에서 운용되는 (K)F-16 전투기 내부 연료계통에는 운전 중 엔진으로 투입되는 연료 흐름량을 실시간으로 확인할 수 있도록 유량계(Fuel Flow Transmitter; FFT)가 장착 되어 있다. 전투기는 작전을 수행하며 실시간으로 연료 흐름량을 확인하여 작전을 수행하기에 적절 한지, 연료 계통의 가동이 원활한지, 내부 연료 계통의 이상이 없는지 등의 다양한 정보를 고려하여 작전을 수행한다.

(K)F-16 전투기에 장착되는 유량계는 임펠러 질량 유량계로서 임펠러와 AC모터, 터빈과 검출부, 외부 하우징 등으로 구성되어 있으며 질량 유량계는 측정의 정밀성이 우수해 유량 측정에 널리 사용된다. 유량계의 유량 측정 방법은 입구부에 0~80,000 PPH 범위의 유량이 흘러들어오고, AC모터와 기어로 연결된 임펠러가 최대 2,600 RPM 으로 회전하며 추가적인 유동을 생성한다. 이러한 질량 흐름은 터빈을 회전시키고 터빈과 연결된 비틀림 스프링의 실시간 각변위 계산을 통해 질량 흐름량을 측정하게 된다. 이때 유량계를 구성하는 다양한 부품 중 유동을 생성하는 임펠러와 임펠러에 회전력을 부여하는 링 기어, 임펠러와 링기어를 연결하는 링기어 브라켓을 조립한 부품을 '링 기어 조립체' 라고 하며 이는 유량계의 핵심 부품으로 Fig. 1은 링 기어 조립체의 실제 형상이고 현재 전량 해외 원제작사의 주문을 통해 조달하고 있다.

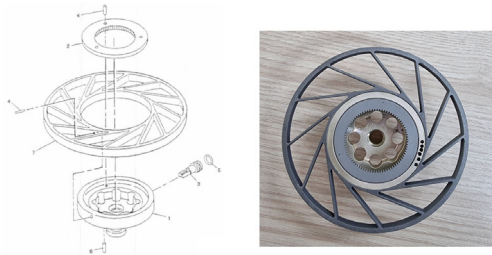


Fig. 1. Drawing of Ring Gear Assembly

최소 8,000 시간 이상 가동되어야 하는 전략화기의 특성상 부품의 내구성이 상당히 강조되며, 유량계의 경우 지속적으로 유체가 흐르며 구조물에 하중을 가하게 되므로 유체의 하중에 대한 내구성과 피로수명 그리고 구조적 안정성이 부품 성능의 주요 척도라고 할 수 있다. 해외 원제작사의 주문을 통해 조달하던 링 기어 조립체를 국내에서 조달하기 위해서는 기존 도입품과 마찬가지로 국내 제작품 또한 동일한 구조적 안정성을 가짐을 확

인해야 하며 이를 확인하기 위해서 유량계의 가동조건에서의 구조해석 및 피로해석을 통해 링 기어 조립체의 파손 가능성을 확인해야 한다.

링 기어 조립체는 임펠러 질량 유량계 내부에 장착되는 부품으로 이러한 유량계 내부에 장착되는 회전체의 구조적 안정성을 평가하는 연구는 다소 부족한 편이다. 따라서 본 연구는 기계 내부에서 유체 하중을 받는 펌프 및 터빈 등의 구조적 안정성을 평가한 연구의 방법론을 참고하여 링 기어 조립체가 충분한 구조안정성과 피로수명을 보유하고 있는지 확인하고자 하였다.

전투기의 연료 시스템은 다양한 부품들로 이루어져 있다. 그 중 유량계의 전단부에 장착되는 연료 균등 분배기(Fuel Flow Proportioner)는 엔진으로 공급되는 연료의 압력과 유량을 일정하게 조절하는 역할을 하는 부품이다. 따라서 연료는 각 연료탱크에서 배출되어 연료 균등 분배기에서 일정한 압력 및 유량으로 조절되고 유량계에서 유량 측정을 거쳐 최종적으로 엔진으로 유입되게 된다. Nam et al.[1]은 연료 균등 분배기의 가동 실험을 수행하여 실제 가동 조건에서 유량계로 유입되는 연료의 압력과 유량을 측정하였고, 연료 균등 분배기의 설계를 개선하여 토출 압력의 균일성을 향상시키는 결과를 도출하였다.

회전체에 의한 유체 내부의 정상상태 유동장을 MRF(MRF: Moving Reference Frame, 이하 MRF)기법으로 해석한 연구가 존재하였다. Patil et al.[2]와 Mittal et al.[3]는 교반기 내부 임펠러에 MRF 기법을 적용하여 정상상태 유동해석을 수행하고 그 결과를 실험값과 비교하여 교반기 내부 유동 해석의 방법론을 제시하였다.

유체를 이용하는 기계의 부품은 유동으로 인한 유체 하중을 받게된다. 이러한 유체 하중을 면밀히 산정하여 구조적 안정성을 검증하기 위해 유체-구조 연성해석을 이용한 다양한 연구가 진행되어왔다. Lee et al.[4]는 기계가 가동되는 상황에서 유체기계 하우징에 가해지는 유체 하중을 면밀히 산정하여 구조안정성을 확인하고자 하였다.

이러한 MRF 기법과 유체-구조의 연성해석방법을 이용해 회전체의 유체-구조 연성해석을 수행하여 공력 성능과 유체 하중에 의한 구조물의 안정성을 평가한 연구가 진행되고 있다. Wang et al.[5], Yuan et al.[6], Park et al.[7], Kwon et al.[8], Kim et al.[9], Kim et al.[10] 는 모두 유체-구조 연성해석을 이용하여 정상상태 유체 내부의 회전체를 구조적으로 평가하는 연구를 수행하였다. 이러한 해석 방법은 원심펌프, 풍력 터빈,

수력 터빈 등의 유체 기계에 적용되었으며 한 분야에 국한되지 않고 다양한 범위에서 활용할 수 있음을 보여주었다.

MRF 기법의 한계는 정상상태의 유동장만을 계산할 수 있다는 점으로 과도상태의 유동장을 계산하기 위해서는 SM(SM: Sliding Mesh, 이하 SM)기법을 이용해야 한다. 따라서 이러한 SM 기법을 이용하여 과도 유체-구조 연성해석을 수행하여 구조적 안정성을 확인하는 연구 또한 지속적으로 진행되고 있다. Kan et al.[11]과 Hoseini et al.[12]는 동적인 유체 하중이 가해지는 구조물의 구조적 안정성을 과도 유체-구조 연성해석을 이용해 평가하고자 하였다. 또한 실제 가동 환경에서 실험을 수행하여 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다.

진동 또는 유체 하중과 같이 구조물에 하중이 반복적으로 가해지는 경우, 정하중에 의한 파괴에서 안전하더라도 피로에 의한 파괴가 발생할 수 있다. Liu et al.[13]는 원심하중과 공기역학적 하중을 고려한 임펠러의 구조 유한요소해석을 수행하여 결과로 계산된 응력을 SN 곡선에 입력하고 피로수명을 평가하였고, Zheng et al.[14]은 바람, 파도, 전류에 의해 환경 하중을 받는 해상 풍력 부유식 터빈의 뿌리 부분 볼트 피로수명을 연구하였다. 이들은 구조물에 가해지는 유체 하중을 면밀히 고려하여 피로수명을 판단하고 파괴가능성을 연구하였다.

이러한 피로 파괴를 과도 유체-구조 연성해석에 응용하여 구조적 안정성과 피로 파괴 가능성을 모두 확인하는 연구 또한 계속해서 진행되고 있다. Zhang et al.[15]과 Badshah et al.[16]은 설계된 풍력 터빈 블레이드의 출력성능 평가와 구조적 안정성 및 피로수명의 건전성을 확인하기 위해 연성해석을 수행하고 결과를 확인하였다. Ubulom[17]은 발전용 터빈에 사용되는 블레이드의 구조 안정성 및 피로수명을 확인하기 위해 유체-구조 연성해석을 수행하였다.

본 연구에서는 앞서 제시한 연구들의 방법론을 참고하여 링 기어 조립체의 구조적 안정성을 확인하기 위해 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석과 FEM (Finite Element Method) 해석을 연성하는 유체-구조 연성해석을 수행하고 유량계 측정범위 내 최대 하중을 받는 상황에서 구조물에 가해지는 응력으로 파손 가능성을 확인하여, (K)F-16 유량계 내부 링 기어 조립체의 구조적 안정성을 판단하고자 하였다. 또한 응력의 시간 응답에 영향을 받는 피로수명 확인을 위해 과도 해석으로 수행하여 피로수명을 면밀하게 판단하고자 하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 유동 해석 모델

링 기어 조립체의 단방향 과도 유체-구조 연성해석(FSI: Fluid-Solid Interaction, 이하 FSI)을 수행하기 위해 ANSYS Fluent 와 ANSYS Workbench 23.2 를 사용하였다. FSI 과도 해석은 유동과 구조의 시뮬레이션이 각 time step 마다 함께 수행되므로 단일 해석을 수행하는 경우에 비해 해석 시간이 과도하게 길어지게 되고, 회전체 과도 FSI 해석의 경우 안정된 결과를 도출할 때까지 충분한 회전이 필요하여 많은 시간이 소모된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 과도 유동해석의 초기값으로 정상상태 유동 해석의 결과를 사용하는 방법을 선택하였다.

MRF 기법은 정상 상태 해석으로 격자의 움직임 없이 Rotating Domain에 각속도로 정의되는 원심력과 코리올리 힘을 부여하여 유동 해석을 수행하는 기법이고 SM 기법은 과도 해석으로 Rotating Domain에 해당하는 격자를 실제로 회전시켜 회전에 의한 유동을 나타내는 기법이다[18]. 추후 수행할 피로해석을 위해 응력의 시간 응답이 필요하므로 SM 기법을 이용한 과도 해석을 수행하였다. 유동 해석은 정상상태 유동 해석인 MRF 기법으로 초기 보존 방정식을 수립시키고 그 결과값을 과도 유동 해석의 초기값으로 사용하여 9 회전 이후의 결과를 FSI 해석에 사용하였다. 유동 해석에서 MRF 기법 및 SM 기법을 사용하기 위해서는 유체에 원심력과 코리올리 힘을 부여하는 영역(Rotating Domain) 과 부여하지 않는 영역(Stationary Domain)을 나누어 생성해야 하며 이러한 영역을 Fig. 2와 같이 나누어 생성하였다.

회전 영역은 실제로 회전하게 되는 부품인 링 기어 조립체가 포함되도록 적절한 크기로 모델링하였고 정지 영역은 해석의 용이성을 위해 유량계 내부 스테이터와 회전축을 포함하고 기타 부품을 생략하여 모델링하였다. 또한 관내 유동의 수렴성 향상을 위해 추가적으로 입구 및 출구부에 10D 길이를 가진 정지 영역을 추가로 생성하였다. 경계층 효과를 고려하기 위해 링 기어 조립체의 벽면에 경계층의 두께 방향으로 10개의 격자를 생성하였으며 표면의 y^+ 값은 0.32에서 1.25 이다. 난류 모델은 선행연구를 참고하여[7,9,15-17] SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다. 경계조건은 입구부에 압력 경계조건, 출구부에 유량 경계 조건으로 부여하였으며 모든 벽에는 점착조건을 부여하고, 유체는 항공기의 주 연료인 Jet A fuel로 하였다. Rotating Domain의

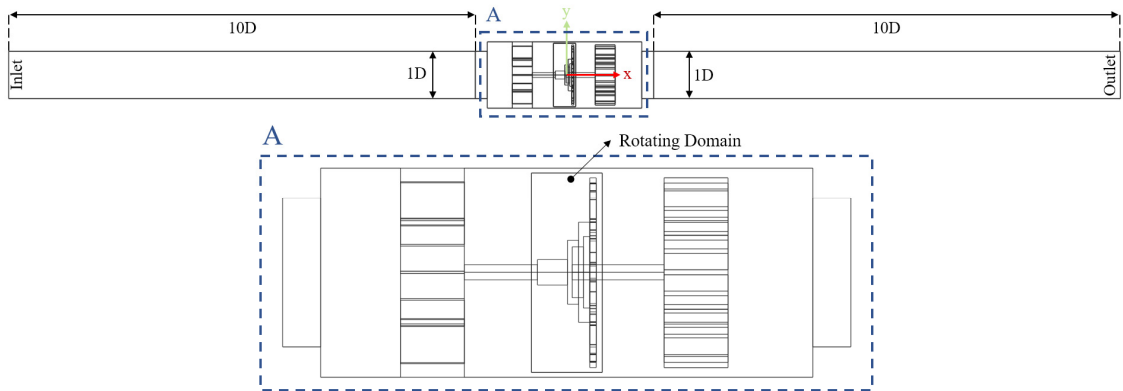


Fig. 2. CFD simulation modeling

회전속도는 2600 RPM 이고, 과도 해석시 사용하게 될 time step size 는 1 time step 당 3° 씩 ($\Delta t = 1.923E-4$ s) 회전하도록 설정하였다.

2.2 단방향 유체-구조 연성해석 모델

본 연구에서 수행된 유체-구조 연성해석은 구조 안정성 평가의 대상인 링 기어 조립체가 탄성 영역 내에서 거동 할 것이라고 가정하여 구조 해석이 유동 해석과 연성 되어 해석이 수행될 때, 구조 격자의 변형이 유동 격자에 반영되지 않는 단방향 유체-구조 연성(one-way Fluid-Structure Interaction) 해석으로 수행하였으며 아래 Fig. 3과 같은 절차로 수행하였다.

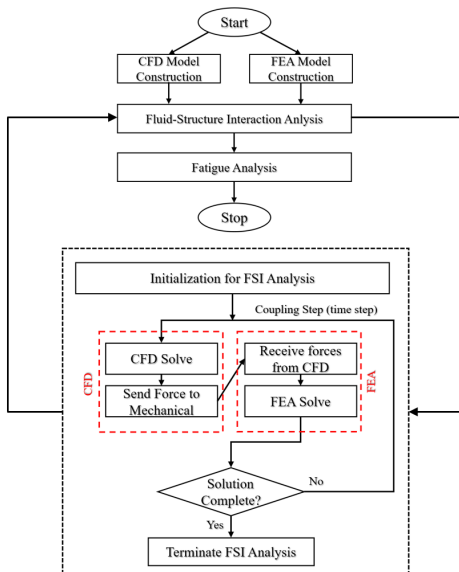


Fig. 3. Simulation workflow

연성해석은 CFD 모델과 FEA 모델로 나뉘어 수행되고 유동 해석의 결과인 표면에서의 힘 벡터가 구조 해석의 경계조건으로 적용되어 수행된다. 연성해석에서 사용된 CFD 모델과 FEA 모델의 기하학적 모델은 동일한 모델을 사용하였다. 전체적인 해석 프로세스는 각 time step ($\Delta t = 1.923E-4$ s) 마다 CFD 해석이 먼저 수행되고 CFD 해석으로 산출된 표면에서의 힘 벡터를 FEA 모델의 경계조건으로 적용하기 위해 매핑 과정을 거쳐 전달된다. 그 후 FEA 해석이 수행되고 구조의 변형 및 응력 결과를 계산한다.

FEA 모델은 유량계 전체 중 관심 영역인 링 기어 조립체만 모델링 하였고, 링 기어 조립체의 구성 부품인 임펠러, 링 기어, 링 기어 브라켓의 물성치는 실제 부품의 재질인 ADC12, A2024, A6061로 설정하였으며 그 물성치는 Table 1에 도시하였다. 이러한 물성치는 FEA 해석시 각 부품에 적용되어 부품의 물리적인 특성을 나타낸다. 링 기어 조립체의 경계조건은 링 기어 브라켓의 내부 축이 결합되는 부분과 링 기어 내부 기어와 맞닿는 부분에 대해 축 방향 회전만 가능하도록 자유도를 구속하였고 유체와 맞닿는 모든 부분에 유체-구조 데이터 전달 인터페이스를 정의하였다.

Table 1. Material property of Ring Gear Assembly

Property	ADC12	A2024	A6061
Young's Modulus [GPa]	74	73.1	68.9
Possion's Raio	0.33	0.3	0.33
Density [kg/m^3]	2700	2700	2700
Tensile Ultimate Strength [MPa]	250	310	469

2.3 유체 및 구조 해석용 격자 모델링

유동 해석 및 구조 해석을 위해 격자를 생성하였다. 유동 해석 격자는 Polyhedral 과 Hexahedral 격자로 구성하였으며 경계층 표면에서의 유동을 면밀히 고려하기 위해 10 개의 경계층 격자를 생성하였다. 유동 해석 모델의 Rotating Domain 격자는 1.4×10^6 개, Stationary Domain 격자는 5.9×10^5 개로 구성하였다. 구조 해석용 격자는 6.1×10^4 개의 Hexahedral 격자로 구성하였다. 유동 해석 및 구조 해석의 격자는 아래 Fig. 4,5와 같다.

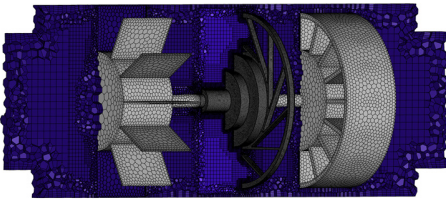


Fig. 4. CFD simulation grid

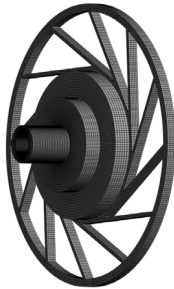


Fig. 5. FEA simulation grid

유체-구조 연성해석의 정확도는 유동 해석 및 구조 해석 모델 각각의 정확도에 지배적이다. 따라서 유동 해석의 정확성을 보장하기 위해 격자 독립성 검사를 수행하였다. 유동 해석은 유체의 유동장을 지배하는 Navier-Stokes 방정식을 수치 해석적 기법을 이용해 계산하는 것으로 격자의 크기 및 개수에 따라 결과의 차이가 발생할 수 있다. 격자 독립성 검사는 이러한 격자의 차이에서 발생하는 결과값의 변화를 줄이기 위한 것으로 Table 2와 같이 Coarse, Medium, Fine 의 3가지 경우로 격자를 구성하여 격자 독립성 검사를 수행하였다. Coarse, Medium, Fine 의 3 가지 격자 모두 대부분의 격자가 Rotating Domain 에 집중되도록 하고, 경계층의 격자 레이어 수와 y^+ 값을 일정하게 유지시켜 생성하였다.

Table 2. Grid independent test result

Grid	No of elements ($\times 10^6$)	Moment (N·m)	Difference (%)
Coarse	0.8	0.855	6.92
Medium	2.0	0.812	1.52
Fine	5.3	0.800	-

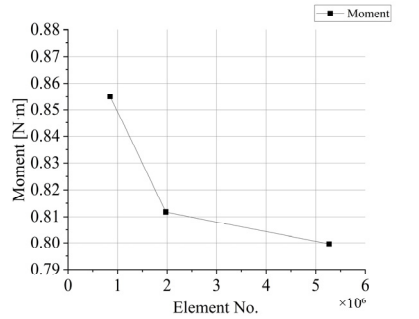


Fig. 6. Comparison of moment with grid changes

유동 해석은 MRF 기법을 이용하여 정상상태에서 수행하였고 격자 차이에 따른 결과를 확인하기 위해 임펠러의 회전모멘트 계산 결과를 비교하였다. Fig. 6는 격자 독립성 검사의 결과를 나타낸 것으로 격자가 세밀해지는 Fine 격자로 갈수록 회전모멘트가 일정한 값으로 수렴해감을 볼 수 있다. 회전모멘트는 Fine 격자에서 0.8 N·m로 계산되었고, 이를 Medium 격자와 Coarse 격자의 결과와 비교했을 때 1.52% 와 6.92% 의 차이를 보였다. 해석 결과의 신뢰성 측면에서는 가장 정확하다고 추정되는 Fine 격자를 이용하여 해석하는 것이 좋으나, 해석에 사용되는 격자의 수가 2배로 늘어나는 경우 해석 시간은 2배가 아닌 그 이상으로 늘어나므로 해석 신뢰성과 해석 시간을 모두 고려하여 회전모멘트가 Fine 격자 대비 1.52% 정도의 미미한 차이를 보이는 Medium 격자로 선정하여 유동 해석을 수행하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 유체-구조 연성해석 결과

단방향 유체-구조 연성해석을 1 time step 당 3° 회전하도록 설정하여 총 3 회전인 1080° 까지 해석하였다. 연성해석 결과의 분석을 통해서 유체 하중에 의한 링 기어 조립체의 구조 응답을 확인하였고 초기 1 회전의 결

과는 불안정한 결과로 관측되어 제외하고 2 회전부터의 결과를 제시하였다. 주된 응력 발생 지점은 노치와 인접한 부위인 P1, P2, P3, P4 이며 이를 Fig. 7에 도시하였다. 해석 결과 링 기어 조립체의 최대 등가 응력은 임펠러에서 발생하였으며 각도와 관계없이 P1, P2, P3, P4 중 P1 에서 가장 높은 응력이 계산 되었다. 이는 임펠러가 동일한 각속도로 유체 내부에서 회전할 때 최대 반경을 가지는 P3, P4 지점에서의 유체의 속도가 가장 빠르므로 최대 하중이 P3, P4 지점에 가해지게 되고 보의 지지대와 같이 작용하는 P1 지점에서 최대 반력을 가지기 때문으로 예상해볼 수 있다.

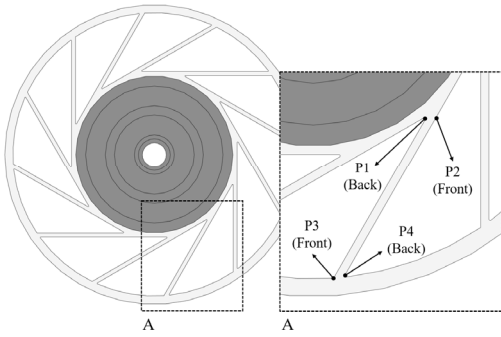


Fig. 7. Stress measure points at Impeller

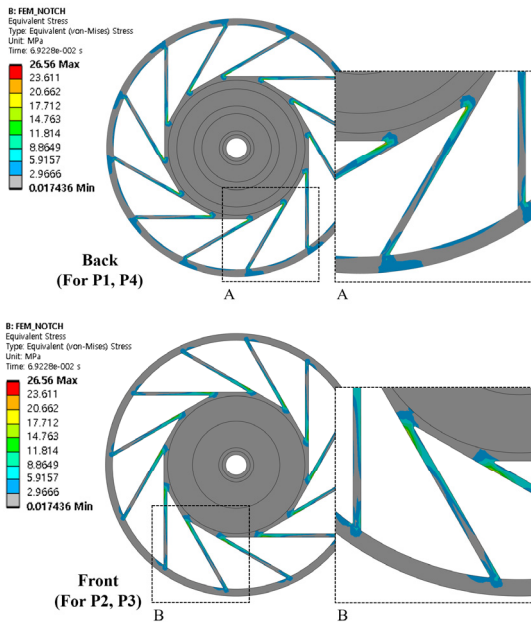


Fig. 8. Equivalent stress contour (at 1080°)

Fig. 8은 연성해석이 1080° 수행되었을 시점의 응력 컨투어로 전체 중 P1 지점에서 최대 등가 응력이 계산되

었음을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 9의 CFD 해석결과를 확인하였을 때 앞서 예상한바와 같이 압력과 속도가 P4 지점에서 가장 높게 계산되어 최대 하중이 가해지게 되므로 P1 점에서의 응력이 가장 높게 계산되었음을 알 수 있으며 이러한 유동 해석 결과가 구조 해석에 적용됨을 고려해 볼 때 해석이 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있다.

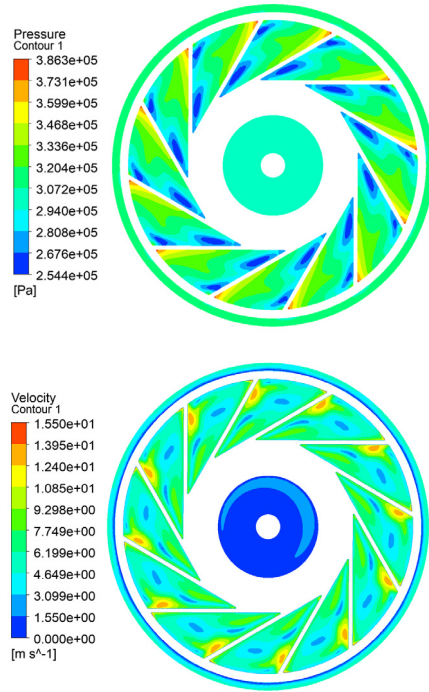


Fig. 9. Pressure and Velocity result in CFD simulation

임펠러 응력 측정 지점의 회전 각도에 따른 응력 결과는 Fig. 10와 같으며 일정 진폭과 주기를 가지고 있으나 진폭은 미미하였다. 이는 펌프, 블레이드 등의 회전체에 대해 과도 연성해석을 수행한 선행 연구[15,17]에서 제시한 결과와 유사한 양상을 보이며 해석이 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있었다. 각 응력 측정 지점 중 최대 등가응력은 각도와 관계없이 P1 지점에서 계산되었는데 이는 앞서 제시했듯 유동해석의 압력과 속도가 P4 지점에서 가장 크게 계산되었고 회전 각도에 따른 유동 변화가 미미하였기 때문이다. 해석 전체에서 최대 등가 응력이 계산된 시점은 840° 로 P1 지점에서 응력값은 약 26.6 MPa 으로 계산되었다. 이는 임펠러의 소재인 ADC12의 인장강도인 250MPa에 비하면 비교적 낮은 수치이며 탄성 영역을 벗어나지 않으므로 구조적 관점에서 충분한 안정성을 가짐을 확인하였다.

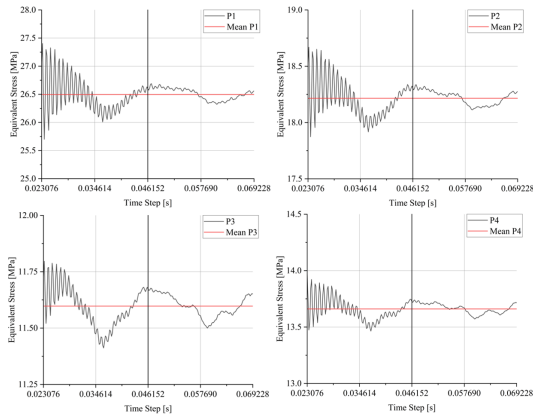


Fig. 10. Equivalent stress response at stress measure points

3.2 피로해석 결과

본 연성해석의 대상인 링 기어 조립체는 유량계 내부에서 지속적으로 하중을 받는 부품이다. 따라서 구조적 관점에서 충분한 안정성을 보이더라도 피로 관점에서는 설계 수명을 만족하지 못할 수 있다. 피로수명 계산에 사용되는 피로 파괴 이론은 Strain-Life 접근을 이용한 저주기 피로와 Stress-Life 접근을 이용한 고주기 피로로 나뉘며 일반적으로 피로수명이 10^4 일 때를 기준으로 달리 적용한다. 연구의 대상인 링 기어 조립체의 경우 구조 해석에서 최대 등가 응력이 약 26.6 MPa로 계산되었고 링 기어 조립체의 여러 부품 중 임펠러의 소재인 ADC12의 피로수명이 교반 응력 140 MPa에서 10^8 임을 고려하여[20-23] 고주기 피로 이론인 Stress-Life 접근을 이용하여 피로수명을 평가하였다.

앞선 과도 구조해석에서 주 응력축은 시간에 따라 변하지 않기 때문에 일정 진폭 하중으로 근사하였고 그 값을 Table 3에 나타내었다. 응력비인 R은 P1~P4 중 응력비가 가장 작은 P1의 응력비인 0.9379로 하였다. 피로 해석에 사용되는 SN 커브는 평균 응력이 없을 때의 응력과 피로수명의 관계를 나타낸 것으로 평균 응력이 0이 아니라면 평균 응력 효과를 고려해야 한다. 평균 응력 효과 계산에는 주로 Goodman 식이라고 불리는 Eq. (1)과 Gerber 식이라고 불리는 Eq. (2)이 사용된다[19].

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{S_a}{S_f} + \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

Where, S_a denotes alternating stress, S_m denotes mean stress, S_f denotes fully reversed fatigue strength, S_u denotes ultimate tensile strength.

Table 3. Load fluctuation of stress measure points

Point	Mean Stress σ_m (MPa)	Stress Amplitude σ_a (MPa)
P1	26.5	1.70
P2	18.2	0.80
P3	11.6	0.39
P4	13.7	0.50

본 연구에서는 연성 재료의 평균 응력 효과 계산에 좀 더 보편적으로 사용되는 Gerber 식을 이용해 평균 응력 효과를 고려하였다.

구조 해석의 등가 응력을 이용하여 피로 해석을 수행한 결과는 모든 부분에서 10^8 이상의 수명을 가지는 것으로 나타났다. 응력의 진폭이 매우 낮으므로 모든 부분에 대해 높은 수명을 보이며 비철 금속의 특성상 무한 수명을 나타내는 피로 한도의 개념은 존재하지 않지만 일반적인 구조용 강철의 수명이 10^6 이상 일 때 무한 수명을 가짐을 고려하면 이에 비해 매우 긴 수명을 가지므로 본 연구에서 제시하는 유체 하중이 작용하는 상황에서는 무한 수명에 근접할 만큼 오랜 수명을 가짐을 확인하였다. Fig. 11은 임펠러의 피로 안전계수를 나타낸 그림이다. 설계 수명을 10^8 으로 하였을 때, 최대 등가 응력이 작용하는 P1 지점에서 국부적으로 9.44의 안전계수를 보였고 나머지 부분에서는 최대값인 15 이상을 보였다.

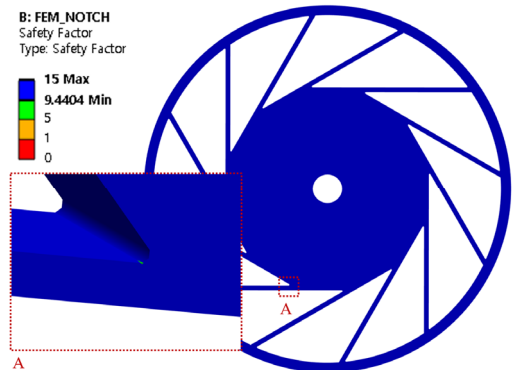


Fig. 11. Fatigue safety factor of Ring Gear Assembly

4. 결론

본 연구는 유량계 내부에 장착되는 링 기어 조립체에 대한 구조적 안정성과 피로수명을 평가하기 위해 단방향 유체-구조 연성해석과 피로 해석을 수행하였다. 면밀한 피로수명 평가를 위해 유동 해석과 구조 해석 모두 과도 해석으로 수행하였고 유동 해석의 경우 MRF 기법을 이용하여 수렴시킨 정상 상태 해석의 결과값을 SM 기법을 이용한 과도 해석의 초기값으로 사용하여 빠른 수렴과 안정적인 결과를 도출할 수 있도록 하였다. 단, 제약사항으로 유체에 의한 하중을 받는 링 기어 조립체의 변형이 크지 않을 것이라고 가정하여 구조 해석의 결과를 유동 해석에 반영하지 않는 단방향 유체-구조 연성해석으로 수행되었다. 이러한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 링 기어 조립체에 가해지는 최대 등가 응력은 임펠러의 P1 지점에서 나타났으며 그 값은 약 26.6 MPa 으로 임펠러의 소재인 ADC12 의 인장강도에 비해 현저히 낮은 값으로 계산되었다.
2. 회전 각도에 따른 응력의 변화는 일정한 진폭과 주기를 갖고 있으나, 그 진폭이 매우 낮아 정하중이 적용될 때와 유사한 응답을 보였다.
3. 구조 해석의 등가 응력을 이용하여 피로 해석을 실시하였으며 그 결과 전 부분에서 10^8 이상의 수명이 계산되었고, 피로 안전계수는 최대 등가 응력이 작용하는 P1 지점에서 국부적으로 9.44 의 안전계수를 보였다.

결과적으로 구조적 측면에서 링 기어 조립체는 충분한 안정성을 보임을 확인하였고 피로수명 또한 10^8 이상의 수명을 가지는 것으로 확인되어 최종적으로 구조적 안정성 및 피로 파괴에 대한 안정성을 보임을 확인하였다. 이러한 방법으로 확인된 안정성을 바탕으로 전량 해외에서 조달되던 링 기어 조립체의 국산화 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. S. Nam, T. H. Kim, N. S. Jeong, "A Study on Optimal design of T-50 Aircraft FFP system through a case of F-16 Aircraft." *Journal of Aerospace System Engineering* vol. 4, No. 1, pp. 10-14. 2010.
- [2] H. Patil, H. J. Pant, A. Patel, V. V. Ananthula, "CFD simulation model for mixing tank using multiple reference frame (MRF) impeller rotation." *ISH Journal of Hydraulic Engineering* vol. 27, No. 2, pp. 200-209. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1535921>
- [3] G. Mittal, R. I. Kikugawa, "Computational fluid dynamics simulation of a stirred tank reactor." *Materials Today: Proceedings* vol. 46, pp. 11015-11019. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.102>
- [4] K. H. Lee, H. H. Jang, "Lightweight Design of a Main Starting Air Valve through FSI Analysis." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* vol. 14, No. 11, pp. 5371-5376. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.11.5371>
- [5] C. Wang, W. Shi, Q. Si, L. Zhou, "Numerical calculation and finite element calculation on impeller of stainless steel multistage centrifugal pump." *Journal of Vibroengineering* vol. 16, No 4, pp. 1723-1734. 2014.
- [6] J. Yuan, J. Shi, Y. Fu, H. Chen, R. Lu, "Analysis of Fluid-Structure Coupling Dynamic Characteristics of Centrifugal Pump Rotor System." *Energies* vol. 15, No. 6, 2133. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en15062133>
- [7] T. G. Park, H. T. Chung, H. B. Kim, J. Y. Park, "Numerical Study on the Aerodynamic Performances of the Turbo Blower Using Fluid-Structure Interaction Engineering Method." *Journal of the Korea Society For Power System* vol. 15, No. 6, pp. 35-40. 2011.
- [8] S. G. Kwon, Y. S. Lee, Y. C. Bae, "Static Fluid-Structure Coupled Analysis of Low-Pressure Final-Stage Turbine Blade," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A* vol. 34, No. 8, pp. 1067-1074 2010.
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2010.34.8.1067>
- [9] B. S. Kim, K. S. Lee, M. E. Kim, "Design of a 2MW Blade for Wind Turbine and Uni-Directional Fluid Structure Interaction Simulation". *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, vol 33, No. 12, pp. 1007-1013. 2009.
- [10] I. G. Kim, W. C. Park, S. S. Sohn, Y. N. Kim, "A Study on Development of Mechanical Vapor Recompression Turbo Blower based on Wastewater Treatment" *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* vol. 24, No. 1, pp.318-324. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.1.318>
- [11] K. Kan, Y. Zheng, H. Chen, J. Cheng, J. Gao, "Study into the improvement of dynamic stress characteristics and prototype test of an impeller blade of an axial-flow pump based on bidirectional fluid-structure interaction." *Applied Sciences* vol. 9, No. 17, 3601. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app9173601>
- [12] S. S. Hoseini, G. Najafi, B. Ghobadian, A. H. Akbarzadeh, "Impeller shape-optimization of stirred-tank reactor: CFD and fluid structure interaction analyses." *Chemical Engineering Journal* vol. 413, 127497. 2021
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127497>

[13] S. Liu, C. Liu, Y. Hu, S. Gao, Y. Wang, H. Zhang, "Fatigue life assessment of centrifugal compressor impeller based on FEA." *Engineering Failure Analysis* vol. 60, pp. 383-390. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.035>

[14] T. Zheng, N. Z. Chen, "Time-domain fatigue assessment for blade root bolts of floating offshore wind turbine (FOWT)." *Ocean Engineering* vol. 262, 112201. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112201>

[15] Y. Zhang, Z. Liu, C. Li, X. Wang, Y. Zheng, "Fluid-Structure Interaction Modeling of Structural Loads and Fatigue Life Analysis of Tidal Stream Turbine." *Mathematics* vol. 10, No. 19, 3674. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3390/math10193674>

[16] M. Badshah, S. Badshah, J. VanZwieten, S. Jan, M. Amir, "Coupled fluid-structure interaction modelling of loads variation and fatigue life of a full-scale tidal turbine under the effect of velocity profile." *Energies* vol. 12, No. 11, 2217. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en12112217>

[17] I. Ubulom, "Influence of fluid-structure interaction modelling on the stress and fatigue life evaluation of a gas turbine blade." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* vol. 235, No. 5, pp 1019-1038. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0957650920967559>

[18] P. Gullberg, R. Sengupta, "Axial Fan Performance Predictions in CFD, Comparison of MRF and Sliding Mesh with Experiments," *SAE Technical Paper* vol. 1, No. 0652, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0652>

[19] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, H. O. Fuchs, *Metal fatigue in engineering*, p.452, John Wiley & Sons, 2000, pp. 74-79

[20] S. K. Sundaram, K. Rahul, D. Roshan Ram Dayal, S. Survesh, R. Swamenathan, "Fatigue life estimation of preloaded Aluminium (Al2024-T6) aircraft fasteners using finite element method." *Materials Today: Proceedings* vol. 62, pp. 1369-1374. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.083>

[21] C. J. Lee, R. I. Murakami, M. S. Chang, "Fatigue properties of aluminum alloy (A6061-T6) with ultrasonic nano-crystal surface modification." *International Journal of Modern Physics B* vol. 24, No. 15n16, pp. 2512-2517. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1142/S0217979210065180>

[22] S. Bai, X. Li, Z. Xie, Z. Zhou, J. Ou, "A wireless fatigue monitoring system utilizing a bio-inspired tree ring data tracking technique." *Sensors* vol. 14, No. 3, pp. 4364-4383. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s140304364>

[23] A. Ueno, M. Nishida, S. Miyakawa, K. Yamada, S. Kikuchi, "Fatigue limit estimation of aluminum die-casting alloy by means of \sqrt{a} area method." *Journal of the Society of Materials Science, Japan* vol. 63, No. 12, pp. 844-849. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.2472/jsms.63.844>

조민성(Min Seong Cho)

[준회원]



- 2023년 8월 : 국립창원대학교 기계공학부 기계설계전공 (공학학사)
- 2023년 9월 ~ 현재 : 국립창원대학교 메카트로닉스공학부 기계설계전공 석사과정

<관심분야>

최적설계, 철도차량 충돌안전

박종환(Jong Hwan Park)

[준회원]



- 2023년 2월 : 국립창원대학교 기계공학부 기계설계전공 (공학학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 국립창원대학교 메카트로닉스공학부 기계설계전공 석사과정

<관심분야>

최적설계, 철도차량 충돌안전

장홍래(Hong-Lae Jang)

[정회원]



- 2008년 8월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학학사)
- 2015년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 2019년 8월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : 국립창원대학교 기계공학부 부교수

<관심분야>

최적설계, 철도차량 충돌안전