

워터제트 추진기 임펠러 체결용 볼트파손 원인 분석 연구

정상진*, 오신일**, 허장욱*[#]

*금오공과대학교 기계시스템공학과, **주식회사 제우스 연구소 개발 1부

The Causes of Bolt Breakage During the Tightening of Impellers in Water Jet Propulsion Systems

Sang-Jin Jung*, Oh Shini Il**, Jang-Wook Hur*[#]

*Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology,

**Zeus Institute Development Division 1

(Received 3 June 2019; received in revised form 19 June 2019; accepted 4 July 2019)

ABSTRACT

A water jet propeller is a key component that generates propulsion during the start of a naval vessel. When failure or breakage occurs, the vessel cannot operate. Recently, a flow analysis and structural analysis were conducted to understand the cause of damage to a bolt on a water jet. In particular, the stress and strain acting on the fastening bolt (impeller shaft and tail shaft) were examined to determine the extent of misalignment between the impeller shaft and the tail shaft of the water jet propeller. The study determined that stress and strain were concentrated on the impeller shaft and the tail shaft bolt. The alignment of the propeller impeller shaft and the tail shaft increased significantly in response to the tail shaft bolt. Failure of the tail shaft bolt fastening can lead to misalignment between the impeller shaft and the tail shaft.

Key Words : Flow Analysis(유동해석), Structural Analysis(구조해석), Water Jet(워터제트), Bolt Breakage(볼트 파손), Shaft Alignment(축 정렬)

1. 서 론

최근 진동과 소음이 적고 환경적으로 쾌적한 합정 개발의 요구에 따라 전통적인 프로펠러 및 스크류 추진기의 한계를 극복할 수 있는 물분사(워터제트) 추진기가 차세대 추진기로 대두되고 있다^[1].

워터제트 추진기는 임펠러를 회전시켜 합정 밀박에 있는 흡입구로부터 물을 빨아들인 후에 합정 내부에 설치된 유도관을 거쳐 노즐을 통해 가속된

물을 합정 뒤쪽으로 분사하면서, 그 반작용으로 합정을 앞으로 밀어주는 힘(추력)을 발생시키도록 하고 있다. 이러한 워터제트 추진기는 합정 기동을 위한 추진력을 생성하는 구성품으로, 고장 혹은 파손시 합정 기동을 불가능하게 하여 합정의 운용을 좌우하는 핵심품목이다.

따라서 본 연구에서는 워터제트 추진기에 대해 유동해석과 구조해석을 수행하여 임펠러 축과 테일 축 체결용 볼트에 걸리는 응력과 변형률 등을 검토하였으며, 특히, 워터제트 추진기의 임펠러 축과 테일 축의 정렬편차에 따라 체결용 볼트(임펠러 축, 테일 축)에 작용하는 응력과 변형률의 변화를 확인

Corresponding Author : hhjw88@kumoh.ac.kr

Tel : +82-54-478-7399

하여 볼트파손의 원인을 분석하였다.

2. 해석방법

2.1 수치해석

워터제트 추진기 형상은 Fig. 1과 같으며, 엔진에 연결된 임펠러 축이 회전하면서 유도관을 통해 물을 흡입하여, 선체 내부로 물을 끌어들이고 후 흡입된 물이 임펠러를 통과하면서 합정을 추진시킬 수 있는 추력을 얻는다.

워터제트 추진기의 수치해석 모델을 Fig. 2에 나타내었으며, 임펠러 커플링 부분에 대한 단면도를 Fig. 3에 표시하였다. 임펠러를 중심으로 임펠러 축과 테일 축으로 구분되고, 2개의 축이 임펠러에 결

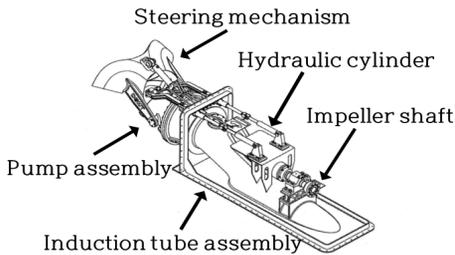


Fig. 1 Waterjet propulsion shape

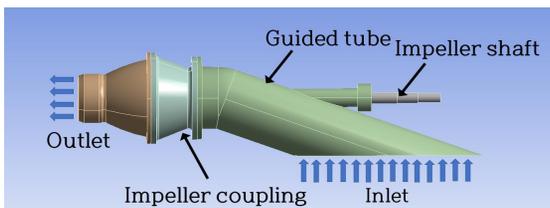


Fig. 2 Waterjet propulsion model

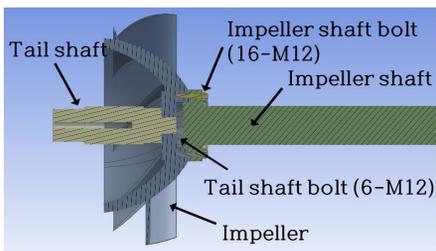


Fig. 3 Sectional view of impeller coupling part

합되어 일직선을 이루는 형상을 하고 있다. 테일 축의 좌측 끝단에 베어링 블록이 설치되어 단순 보 형태로 지지하고 있으며, 그림에는 표시하고 있지 않지만 임펠러 축 우측 끝단에 엔진과 연결되는 부위에도 베어링 블록에 의해 임펠러 축을 지지하고 있다.

2.2 해석절차

해석은 유체-구조물의 상호작용을 반영하는 FSI 기법을 적용하였으며, FSI기법은 유체-구조물 연계 해석이 가능한 특징이 있다. 유체는 일반적으로 압력, 온도 및 하중을 전달하며 이로 인한 구조체 변형에 대한 정보가 다시 유동장에 전달되어 이에 따른 유체의 해석결과에 영향을 받으면서 양방향 연성해석이 가능한 수치해석이다^[2]. 유동해석과 구조해석을 각각 독립적으로 수행하지 않는 이유는 유체-구조물 간 상호작용이 강한 경우 독립적으로 해석하면 실제 경우와 전혀 다른 기계적 특성을 보일 수 있기 때문이다.

해석을 워터제트 추진기에 적용하면 Fig. 4의 개념도에서 알 수 있듯이 유체유동으로 인하여 발생하는 압력을 임펠러에 유한요소 단위로 반영하여 구조해석을 진행할 수 있으며, 유동해석과 구조해석을 따로 진행하는 경우보다 더 정확한 결과를 기대할 수 있다. 따라서 ANSYS에서 FSI 해석방법을 적용하기 위해 Fluent의 결과값을 Structure의 Model에 모듈형식으로 연결하여 구조해석을 수행하였다^[3-4].

2.3 유동해석

유동해석의 격자 구조는 모델의 단차 영역에서 Surface 간의 근접성과 격자의 조밀도를 계산하여 격자를 생성하는 옵션인 Proximity와 복잡한 형상이

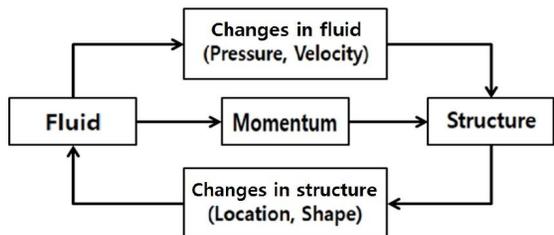


Fig. 4 FSI interpretations concept

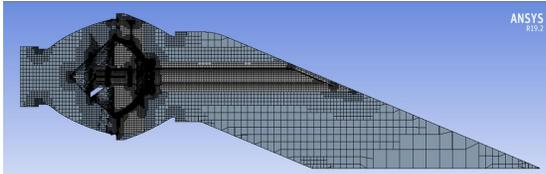


Fig. 5 Mesh division

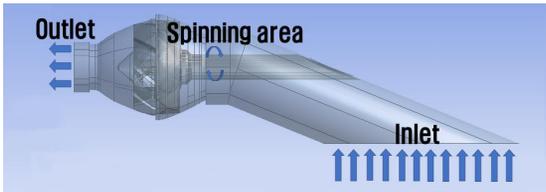


Fig. 6 Boundary condition

라도 매우 빠르게 격자를 형성해주는 Cutcell mesh를 사용하였고, Fig. 5와 같이 1,304,873개의 절점과 1,210,826개의 요소로 분할하였다. 경계조건은 Fig. 6과 같이 입구 영역에 Pressure inlet 조건과 출구 영역에 Pressure outlet 조건을 설정하고, 위터제트 추진기의 설치 위치를 고려하여 입구와 출구 조건에 1atm의 정압을 입력하였으며^[5-6], Reference 압력은 입구 부분으로 하였다. 또한, 위터제트 추진기를 구동하는 엔진의 제원은 출력 1,492kW, 회전속도 2,350rpm 및 기어비 2.03:1이며, 회전영역(Spinning area)에 Frame motion을 사용하여 1,158rpm을 부여하였다.

2.4 구조해석

유동해석에서 발생하는 압력이 위터제트 추진기의 구조물에 어떠한 영향을 미치는지를 FSI 기법을 이용하여 구조해석의 경계조건으로 적용하였다. 또한, 축의 회전력은 유동해석과 동일한 1,158rpm을 입력하였으며, 해석 모델은 Fig. 7에 나타낸 바와

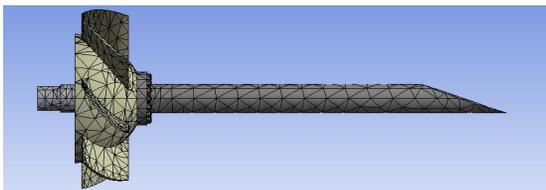


Fig. 7 Mesh division

Table 1 Material property

Type	Bolt (S45C)	Impeller/shaft (STS630)
Density	7850kg/m ³	7820kg/m ³
Poisson's ratio	0.29	0.272
Shear modulus	80GPa	77GPa
Yield strength	490MPa	869MPa
Tensile strength	686MPa	993MPa

같이 39,217개의 절점과 21,002개의 요소로 분할하였고, 해석에 적용된 재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다^[7]. 아울러, 위터제트 추진기의 축이 임펠러 축과 테일 축으로 구분되어 있으므로 이들 축의 정렬이 가장 중요한 요소로 판단되어, 축 정렬편차를 0mm, 0.15mm, 4.0mm의 3가지 조건을 대상으로 영향성을 분석하였다.

3. 해석결과

3.1 유동해석

위터제트 추진기의 유동해석에 따른 유체의 속도와 압력을 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다. 유체의 최대 속도는 임펠러 부분에서 72m/s를 표시하고 있으며, 유체의 최대 압력은 유도관과 임펠러 사이에서 정압 1.1MPa를 나타내고 있다.

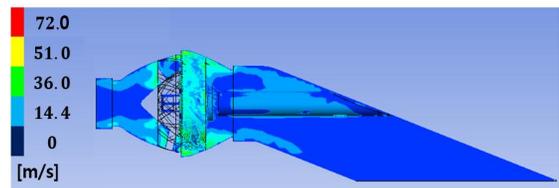


Fig. 8 Velocity of fluid

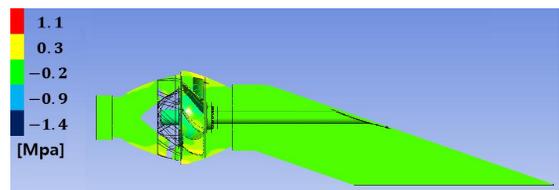


Fig. 9 Pressure of fluid

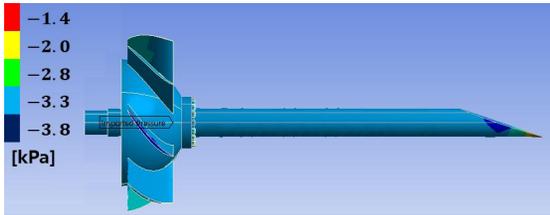


Fig. 10 Pressure acting on impeller

위터제트 추진기의 축(임펠러 축, 테일 축)과 임펠러 등에 작용하는 압력은 Fig. 10과 같고, 임펠러 회전속도로 인해 음의 압력이 발생하였으며, 이때의 최대 압력은 임펠러 날개 부분에서 정압 -3.8 kPa를 표시하였다.

3.2 구조해석

FSI 기법을 적용한 구조해석 결과를 Fig. 11~13에

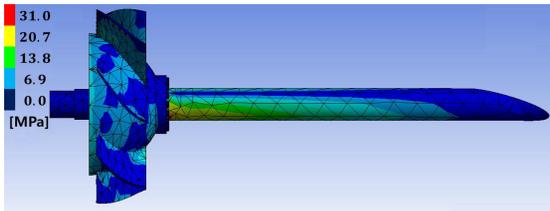


Fig. 11 Result of stress distribution

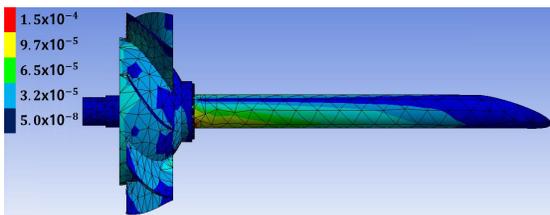


Fig. 12 Result of strain distribution

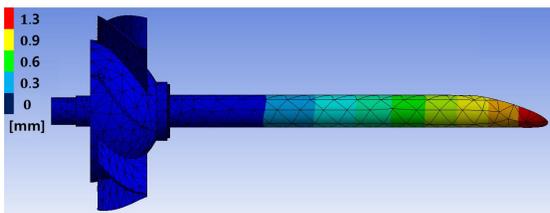
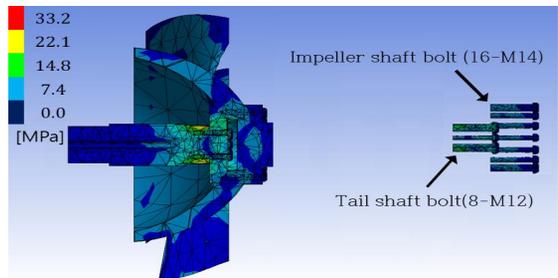


Fig. 13 Result of displacement distribution

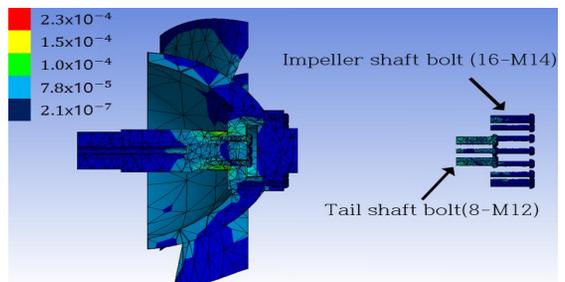
나타내었다. 임펠러 축과 테일 축의 정렬편차가 없는(0mm) 상태에서 최대 응력과 최대 변형률은 각각 31.0MPa 및 1.5×10^{-4} 을 나타내고 있으며, 모두 임펠러 축 부분에 발생하고 있다. 그리고 변위는 테일 축의 베어링 블록으로부터 이격된 부위에서 최대변위인 1.3mm가 계산되었다.

위터제트 추진기의 기술자료에 수록된 임펠러 축과 테일 축의 최대 허용 정렬편차를 가질 때 (0.15mm)^[8]와 실제 정렬편차(4.0mm)의 조건에 대해 응력과 변형률의 해석결과를 Fig. 14~15에 나타내었다. 그림으로부터 정렬편차가 4.0mm일 때의 응력과 변형률이 정렬편차가 0.15mm일 경우보다 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

특히, 그림에서 좌측 임펠러 커플링 결합체 중 임펠러 축과 테일 축 체결용 볼트를 분리하여 우측 그림에 표시하였다. 임펠러 축 체결용 볼트는 14mm의 직경으로 16개가 사용되고 있고, 테일 축 체결용 볼트는 플렌지부 지름이 작아 12mm 직경으로 8개를 적용하고 있다.



(a) Stress



(b) Strain

Fig. 14 Analysis result according to axial alignment deviation (0.15mm misalignment)

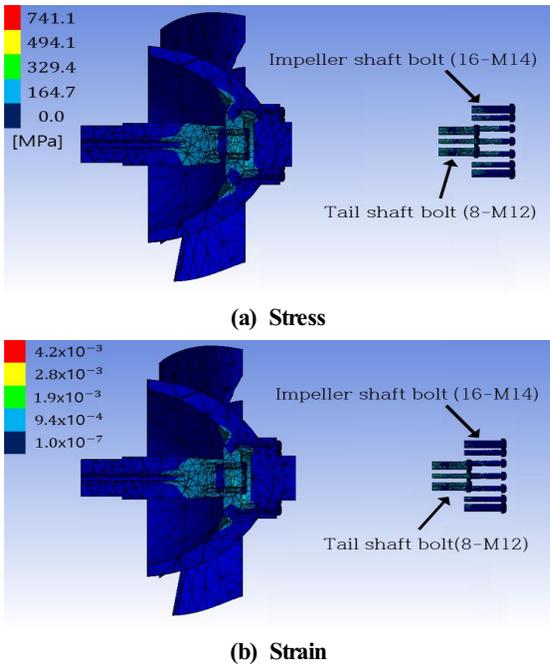


Fig. 15 Analysis result according to axial alignment deviation (4mm misalignment)

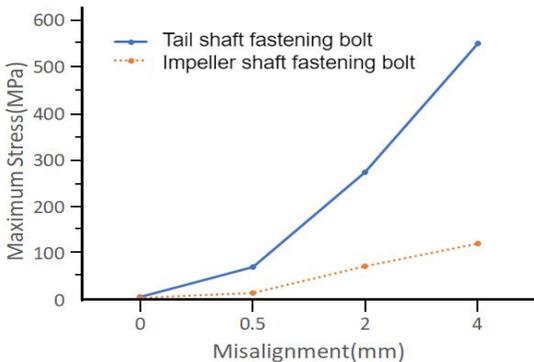


Fig. 16 Stress due to misalignment

워터제트 추진기에서 가장 큰 응력을 표시하고 있는 체결용 볼트(임펠러 축, 테일 축)의 최대응력과 정렬편차의 관계를 Fig. 16에 나타내었다. 정렬편차의 증가에 따라 임펠러 축과 테일 축 체결용 볼트의 최대응력이 선형적으로 증대하고 있음을 알 수 있으며, 특히 테일 축 체결용 볼트의 응력 증가가 임펠러 축 체결용 볼트보다 현저하게 크다. 이

는 임펠러 축과 테일 축의 플렌지 부 직경이 상이하고, 이로 인해 체결용 볼트 수가 다르기 때문으로 사료된다.

4. 고찰

워터제트 추진기를 정비하기 위해 유도관, 임펠러 축, 테일 축, 임펠러, 유압실린더 및 각종 체결용 볼트 등을 분해하였다. 분해전에는 확인이 곤란하였던 사항으로 Fig. 18에 나타낸 바와 같이 테일 축 체결용 볼트가 파단되어 있음을 알 수 있었다. 볼트의 파단 원인 분석을 위해 볼트에 작용하는 최대응력과 안전율을 Table 2에 나타내었다. 정렬편차가 0.15mm일 때에는 안전율이 16.3인 반면에, 정렬편차가 4mm일 때에는 안전율이 0.9로 계산되어 파손 위험이 높음을 알 수 있다^[9].

아울러, 볼트의 재질을 강성이 높은 STS630(σ_y :



Fig. 18 Photograph of bolt breakage

Table 2 Maximum stress and safety factor of bolt

Misalignment	Maximum stress (at system)	Maximum stress (at bolt)	Safety factor (at bolt)
0.15mm	33.2MPa	30.1MPa	16.3
4.0mm	741.1MPa	545.8MPa	0.9

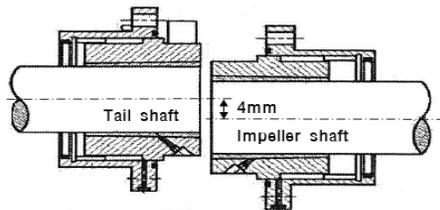


Fig. 19 Shaft misalignment

869MPa)으로 교체시 안전율은 1.6으로 기존 재질인 S45C($\sigma_y : 490\text{MPa}$)보다 다소 개선되나, 회전체의 피로파괴 관점에서 볼 때 안전하다고 볼 수 없다. 또한, 테일 축 체결용 볼트 8개 중 4개가 파단된 것과 관련하여 파단위치는 해석에서도 유사한 경향을 확인할 수 있었다.

이러한 임펠러 축 체결용 볼트 파손 원인을 분석한 결과, 위터제트 추진기의 임펠러 축과 테일 축을 임펠러에 결합하기 전에 Fig. 20과 같이 약 4mm 수준의 정렬편차를 확인할 수 있었다. 그 이유는 오랜시간 진동과 충격조건에서 용접 구조물인 유도관을 사용함에 따라 휨 현상이 발생하였으며, 이로인한 축의 정렬편차 발생을 억제할 수 있는 유니버설 조인트의 채용이나, 분리 축이 아닌 일체형 축 등의 미적용이 주요 원인으로 판단된다.

5. 결론

위터제트 추진기에 대해 유동해석과 구조해석을 수행하여 임펠러 축과 테일 축 체결용 볼트에 걸리는 응력과 변형률 등을 검토하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 위터제트 추진기의 임펠러 축과 테일 축 체결용 볼트에 응력과 변형률이 집중되고 있다.
2. 위터제트 추진기 임펠러 축과 테일 축의 정렬편차가 증가시 테일 축 볼트에 부가되는 응력이 선형적으로 크게 증대된다.
3. 위터제트 추진기 테일 축 체결용 볼트의 파손은 임펠러 축과 테일 축의 정렬편차에 기인한 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R111A3A01063935).

REFERENCES

1. Sun, M. C., "The Study of Design and Nonlinear

Analysis for Marine Water-jet Propulsion System," A Thesis for a master, Konyang University, Republic of Korea, 2014.

2. Park, S. C., Kim, H. J., Han, S. E., "A Study on the Wind-Induced Response Characteristics of Freeform Shaped Tall Building using FSI Analysis," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 27, No. 4, pp. 223 - 230, Aug. 2014.
3. Antoci, C., Gallati, M., Sibilla, S., "Numerical Simulation of Fluid-structure Interaction by SPH", Computers & Structures, Vol. 85, No. 11-14, pp. 879-890, 2007.
4. Hou, G., Wang, J., Layton, A., "Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction - A Review", Communications in Computational, Vol. 12, No. 2, pp.337-377, 2012.
5. Kim, K. B., "A Study on the Development of a Small-size Water-jet Propulsion System for Naval Ships," A Thesis for a Doctorate, Korea Maritime and Ocean University, Republic of Korea, 2011.
6. Sun, M. Y., Oh, Y. C., Jo, G. H., "Water-jet Propulsion System Design and Nonlinear Analysis Research," Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers 2013 Spring Conference on IT Convergence, pp. 77-82. 2013.
7. Kim, J. H., Lee, J. H., "A Case Study on the Bolt Failure of the Moving Parts of a Marine Diesel Engine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 41, No. 1, pp. 118-124, 2017.
8. Daesung MarineTec, "Water Jet Propulsion System XDSWJ-200S," TM 1-40-01(313)-04, pp. 4-14, 2011.
9. Kim, S. E., Kim, S. B., "Safety Evaluation of Horizontal and Vertical Bolted Connection between PHC Piles Using Finite Element Analysis," Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 30, No. 2, pp. 97-104, 2018.