

디퓨저 베인에 의한 공진조건에서의 임펠러 구조 안정성 평가

김용세* · 공동재* · 신상준*[†] · 임강수** · 박기훈**

Structural Stability Evaluation of Impeller in Resonant condition due to Diffuser vanes

Yongse Kim* · Dongjae Kong* · Sangjoon Shin*[†] · Kangsoo Im** · Kihoon Park**

ABSTRACT

Impeller blades in the centrifugal compressor are subjected to static loads due to the high-speed rotation and steady aerodynamic forces. At the same time, aerodynamic excitations by the interaction between the impeller and the diffuser vanes(DV) periodically excite the impeller blades in resonant conditions, which may lead to high cycle fatigue (HCF) and eventually result in failure of the blades. In order to predict the structural response accurately, the aerodynamic excitation and the major resonant conditions were predicted by performing the unsteady flow analysis and modal analysis using ANSYS. Next, a unidirectional forced vibration analysis was performed by using fluid-structure interaction (FSI) method, and the safety of HCF was evaluated based on the results.

초 록

원심압축기 임펠러의 블레이드는 고속회전과 정상유동 압력에 의한 정적하중이 가해진다. 동시에 임펠러와 디퓨저 베인 간 상호작용에 의해 발생하는 비정상 유동의 공력가진력이 공진조건에서 주기적으로 임펠러를 가진함에 따라 임펠러 블레이드의 고주기피로 파손이 발생할 수 있다. 이에 대한 정밀한 구조응답 예측을 위해 ANSYS를 이용한 비정상 유동 해석과 모드해석을 각기 수행하여 공력가진력과 주요 공진조건을 도출하였다. 이 후 공력-구조를 연계하는 단일방향의 강제진동 해석을 수행하고, 결과들을 토대로 고주기피로에 대한 안전도를 평가하였다.

Key Words: Impeller(임펠러), Diffuser Vanes(디퓨저 베인), SAFE diagram(SAFE 선도), Aerodynamic Excitation(공력가진력), Forced Vibration(강제진동), High cycle fatigue(고주기피로), Fluid-structure Interaction(유체-구조 연성)

* 서울대학교 기계항공공학부

** 한화테크윈 R&D 센터

[†] 교신저자, E-mail: ssjoon@snu.ac.kr

1. 서 론

고마력의 원심식 공기 압축기는 공기를 가속

시키는 임펠러(회전부)와 가속된 공기를 확산시키는 디퓨저 베인(고정부)으로 구성되어 있다. 이 중 임펠러의 블레이드는 운영 중 고속회전에 의한 원심력, 정상유동 압력 등 정적하중이 가해지는 동시에 임펠러와 디퓨저 베인 간 상호작용에 의해 발생하는 비정상 유동의 공력가진력이 불가피하게 발생하는 공진조건에서 주기적으로 가진하는 등 혹독한 환경에 노출되어 있다. 이러한 공진조건에서의 주기적인 가진은 고주기피로 (high cycle fatigue)가 발생하여 결국 피로파손을 초래할 수 있다[1]. 따라서 임펠러 초기 설계 단계에서 디퓨저 베인에 의한 공력가진력을 도출하고 공진이 발생이 예상되는 조건에서의 정밀한 구조 응답 예측이 필요하다.

본 연구에서는 원심압축기의 임펠러를 대상으로 정적 및 모드해석을 통해 공진이 발생할 수 있는 주요 공진조건을 도출하고, 임펠러와 디퓨저 베인 간 비정상 유동해석을 통해 공력가진력을 도출하였다. 이 후 공력가진력을 적용하여 주요 공진조건에서의 공력과 구조를 연계한 단일 방향(1-way FSI)의 강제진동 해석을 통해 구조응답을 예측하고, 예측 결과를 토대로 고주기 피로에 대한 안전도를 평가하였다. Table. 1은 임펠러와 디퓨저 베인의 주요 물성치를 나타낸다.

Table 1. Properties of analytical model

Impeller Blade No.	Main: 8EA, Splitter: 8EA
DV. No.	16 EA
Material	Stainless steel
RPM	High-speed(20,000 ↑)

2. 정적 및 모드해석

2.1 정적해석

임펠러(Fig. 1)에 대하여 원심력과 정상유동 압력에 의한 정적응력(평균응력)을 도출하였다. 정적응력이 재료의 항복응력 대비 충분한 safety margin을 가지고 있음을 확인하였다.

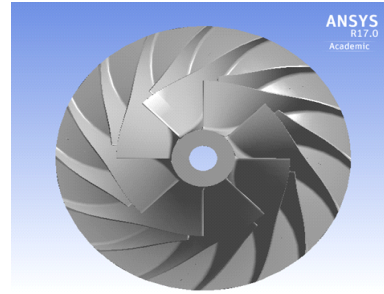


Fig. 1 Analytical model of impeller

2.2 모드해석 및 주요 공진조건 도출

정적하중에 의한 초기응력을 적용하여 모드해석을 수행하였다. 임펠러와 같은 디스크 형태를 가진 진동모드는 nodal diameter에 따른 고유모드가 발생하며, 해석 대상의 블레이드가 8개이므로 총 4개의 nodal diameter에 대한 고유모드가 도출되었다.

주요 공진조건 도출을 위해 SAFE(Singh's advanced frequency evaluation) 선도를 작성하였다. SAFE 선도는 구조물의 고유진동수와 가진주파수의 일치뿐 아니라 모드형상과 가진력 형상의 일치, 즉 nodal diameter도 일치하는 실제 공진(true resonance) 조건으로 공진을 평가하는 방법이다[2]. Fig. 2는 모드해석과 가진주파수에 따른 SAFE 선도로서 가진주파수 대비 공진 margin이 10% 이내인 3개의 고유모드를 주요 공진조건으로 도출하였다.

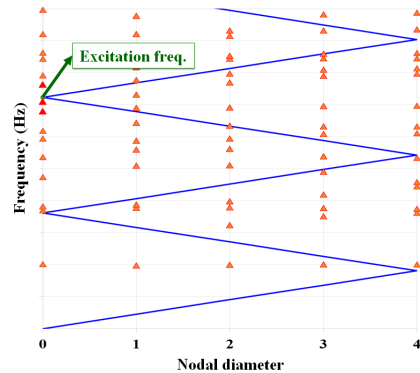


Fig. 2 SAFE diagram

3. 공력가진력 도출

임펠러와 디퓨저 베인 간 상호작용에 의해 발생하는 공진조건에서의 공력가진력을 도출하기 위해 운영조건에서 비정상 유동해석을 수행하였다. Fig 3.은 시간변화에 따른 정압 분포를 나타낸 것이다. 임펠러가 회전함에 임펠러 블레이드의 압력면에서 높은 정압이 형성되었으며, 블레이드의 앞전(leading edge) 대비 뒷전(trailing edge)에 압력이 집중되어 있음을 알 수 있다.

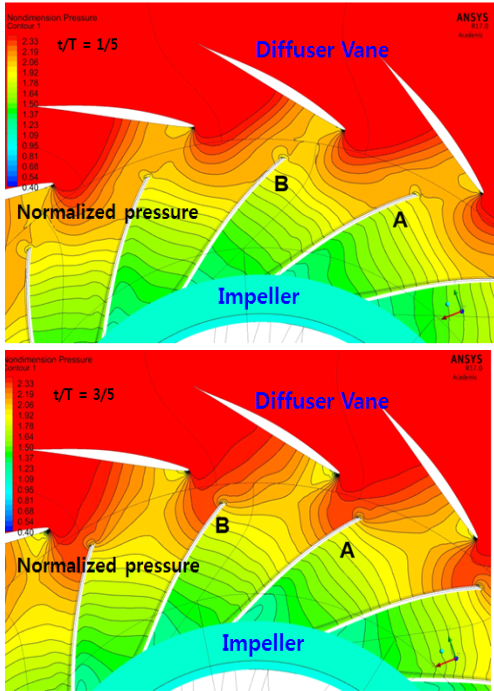


Fig. 3 Unsteady flow of impeller-diffuser vane

4. 강제진동 및 고주기피로 평가

4.1 공력-구조를 연계한 강제진동

공력가진에 의한 구조 응답을 예측하기 위해 공력-구조를 연계한 단일방향(1-way FSI)의 강제진동 해석을 수행하였다. 비정상 유동해석을 통해 도출한 공력가진력을 적용하고 주요 공진조건에서의 강제진동 해석을 통해 교변응력을 도출하였다.

4.2 고주기피로 평가

정적해석을 통해 도출한 평균응력과 강제진동 해석을 통해 도출한 교변응력을 기반으로 Fig 4.와 같이 modified Goodman 선도를 작성하였다. 이를 통해 임펠러 블레이드의 각 절점(node)에서 도출한 평균응력과 교변응력의 도시를 통해 고주기피로에 대한 구조 안전도를 평가하였다.

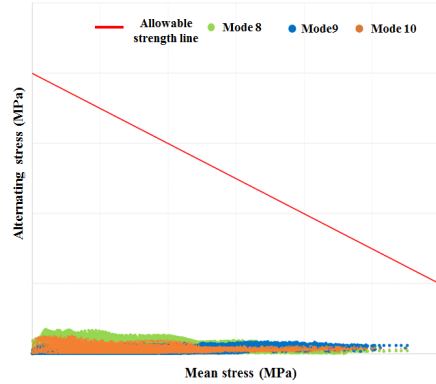


Fig. 4 Modified Goodman diagram

5. 결 론

원심압축기 임펠러가 운영 중 경험하는 정적 및 동적하중에 대하여 유동과 모드해석을 각기 수행하여 공력가진력과 주요 공진조건을 도출하고, 1-way FSI 방법을 이용하여 구조 응답을 예측하였다. 이를 통하여 임펠러 초기 설계단계에서 디퓨저 베인에 의한 구조 영향성을 예측하고 고주기피로 문제를 사전에 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 후 기

본 연구는 한화테크윈의 '에너지 시스템 핵심 기술 개발 과제'의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Zhang, M. and Liu, Y., "The fatigue of impellers and blades," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 62, Feb., 2016, pp.208-231
2. Singh, M., "SAFE-Diagram-A Design Reliability Tool for Turbine Blading," *Proceedings of the 17th Turbomachinery Symposium*, 1988, pp.93-101