

함정용 가스터빈 압축기 블레이드 파손에 대한 원인분석 및 기술적 보완방안에 대한 연구

정운화*, 최시영
국방기술진흥연구소

A Study on the Cause Analysis and Technical Supplementation Plan for Damaged Blades of Gas Turbine Compressor for Navy ship

Un-Hwa Jung*, Si-Young Choi

Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT)

요약 한국 해군의 전투함에 가스터빈 엔진의 탑재가 많아지면서, 가스터빈 압축기 블레이드 손상에 대한 보고가 증가할 것으로 예측되고 있다. 가스터빈 압축기 블레이드 손상이 발생되어 날개 손상형태를 관찰하면 이물질이 유입된 것으로 판단되지만, 그 유입물질이 어디에서, 어떤 원인으로 발생했는지를 밝히는 것은 아주 어렵다. 왜냐하면 손상을 유발한 대부분의 이물질이 연소되거나, 소실되어 원인규명이 불가능한 경우가 대부분으로 외부 이물질에 의한 손상으로 간주하여 왔다. 하지만 미연방 항공정에서는 가스터빈 압축기 블레이드 이물질에 의한 고장을 두 가지로 분류한다. 첫번째는 외부물질손상(Foreign Object Damage)이며, 이는 해수, 모래가 섞인 흡입 공기 등과 같은 외부물질의 흡입으로 인해 발생한다. 두번째는 내부물질손상(Domestic Object Damage)으로 함정의 급기동(과속)과 같은 비정상적인 작동환경에서 유체유발 고주기 피로 및 플러터 현상 등에 의한 복합적 현상으로 피로 및 충격에 의한 터빈내부의 부품균열로 인해 블레이드를 손상하는 경우가 있다. 해군의 경우 이물질에 대한 대책으로 함정 승조원들의 철저한 절차 준수, 정비 교육, 예방적 조치 등을 실시하지만 여전히 가스터빈 압축기 블레이드 고장이 발생되고 있다. 따라서 그 대책으로 가스터빈 압축기 블레이드에 대한 플러터 건전성 평가 등, 관련 소프트웨어를 상시 함정에 설치하여 외부물질손상(FOD)대책 외에 내부물질손상(DOD)에 대한 예측·통제·관리를 통하여 이러한 문제점을 개선하고자 관련 기술적 보완방안을 제언하고자 한다.

Abstract As the number of gas turbine engines mounted on Korean naval battleships increases, reports of damage to gas turbine compressor blades are expected to increase. When the blades and wings of a gas turbine compressor is observed to be damaged, it seems to have occurred from foreign materials flowed into the compressor, and it is difficult to figure out where the material was generated. This is because most of the foreign material that causes the damage was burned or destroyed, and the origin could not be identified. However, the Federal Aviation Agency classifies into two categories the failures caused by a gas turbine blade that crushes debris. The first is foreign object damage(FOD), which is caused by the intake of foreign material such as seawater and air mixed with sand. The second is domestic object damage(DOD). In abnormal operating environments such as an emergency start-up or during overspeed conditions, the blade may be damaged due to cracks in the components of the turbine when complex situations occur, such as fatigue, fluid-induced high-cycle fatigue, and flutter. In those cases, navy ship crew members must act as countermeasures against foreign material intake by following predetermined procedures, maintenance training, and preventive measures. But turbine blades still fail. As another countermeasure, related software (e.g., flutter soundness evaluation) for gas turbine compressor blades is installed on the ship at all times to prevent these problems through prediction, control, and management of DOD, in addition to FOD countermeasures.

Keywords : Flutter, Foreign Object Damage(FOD), Domestic Object Damage(DOD), Gas Turbine, Compressor Blades

*Corresponding Author : Un-Hwa Jung(Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT))
email: 10780dtaq@krit.re.kr

Received September 22, 2022

Revised October 21, 2022

Accepted November 4, 2022

Published November 30, 2022

1. 서론

전투함의 경우 함정의 크기가 수 십년 전에 비해 2배 이상의 배수량이 필요할 만큼 커졌고, 그로 인해 추진동력 또한 더 많이 필요하게 되었다. 가스터빈 엔진과 디젤 엔진을 동일 출력으로 상호 비교하면 가스터빈 엔진이 디젤엔진에 비해 무게는 약37% 가볍고 체적은 약25%정도 적다. 세계적으로 1970년 이후 인도된 함정 461척중 89척 호위함을 분석해보면, 80% 정도가 가스터빈 엔진을 사용하고, 4천톤 이상의 호위함은 모두 가스터빈 엔진을 탑재하고 있다[1,2]. 그리고 가까운 미래에 레이저, 레일건 등 고출력 에너지를 요하는 무기체계와 레이더가 적용되면, 함정에서 요하는 전력 소비량은 현저히 증가할 것이다. 하지만 건조될 함정의 크기는 물리적으로 제한되어 있기 때문에, 결국에는 탑재면에서 무게 및 체적에서 유리한 가스터빈 엔진이 주추진/발전용으로, 향후 지속적으로 탑재 및 운영될 것으로 예상할 수 있다[3]. 최근 GE사에 따르면 한국 해군의 경우 107척 함정에 186기에 달하는 가스터빈을 탑재했거나 앞으로 공급할 예정이라고 한다[4]. 한국해군의 경우도 전투함에 가스터빈 엔진의 탑재가 많아지면서, 가스터빈 압축기 블레이드 손상증가가 예측되고 있다. 현장에서는 가스터빈 압축기 블레이드 손상이 발생되어 날개 손상형태를 관찰하면 이물질이 유입된 것으로 판단되지만, 그 유입물질이 어디에서, 어떤 원인으로 발생했는지를 밝히는 것은 아주 어렵다. 왜냐하면 손상을 유발한 대부분의 이물질이 연소되거나, 소실되어 원인규명이 불가능한 경우가 대부분으로 외부 이물질에 의한 손상으로 간주하여 왔다. 하지만 미연방항공청에서는 가스터빈 압축기 블레이드 이물질에 의한 고장을 두 가지로 분류한다. 첫번째는 외부물질손상(Foreign Object Damage)이며, 이는 외부물질, 해수, 모래가 섞인 흡입공기 또는 정비작업 수행 후 남겨진 도구나 함정부품 같은 물질의 흡입으로 인해 발생한다. 두번째는 내부물질손상(Domestic Object Damage)으로 함정의 급기동(과속)과 같은 비정상적인 작동환경에서 유체유발 고주기 피로 및 플러터 현상 등에 의한 복합적 현상으로 피로 및 충격에 의한 터빈내부의 부품균열로 인해 블레이드를 손상하는 경우가 있다[5-9]. 하지만 해군의 경우 이물질에 대한 대책으로 함정 승조원들의 철저한 절차 준수, 정비 교육, 예방적 조치 등을 실시하지만 가스터빈 압축기 블레이드 고장이 발생되고 있다. 따라서 과거부터 수립한 외부물질손상(FOD)[10]대책 외에 내부물질손상(DOD)에 대한 방안도 제시가 필요하며,

미해군의 경우도 이러한 연구를 오래 전부터 진행중이며 [11,12], 그 대책으로 가스터빈 압축기 블레이드에 대한 플러터 건전성 평가 등, 관련 SW를 상시 함정에 설치하여 내부물질손상(DOD)에 대한 예측-통제-관리[13]를 통하여 이러한 문제점을 개선하고 있어 관련 기술적 보완 방안을 제언하고자 한다.

2. 가스터빈 블레이드 손상

2.1 국외 손상 사례

미해군의 경우, USS 프리덤(LCS-1) 연안전투함에 탑재된 가스터빈 엔진에서 손상이 발생한 사례가 있었다 [14]. 그 원인은 해수흡입으로, 이런 경우 가동을 재개하기 전에 블레이드 손상정도를 육안검사를 통해 확인하는 것은 매우 중요하며, 특히 블레이드 상대편의 비회전 에어포일(Airfoil)인 베인(Vane)에서도 손상발생 가능성이 매우 높기 때문에, 육안 검사는 반드시 실시하여 그 손상정도를 알고 있어야 한다. 그리고 아래 Fig. 1에 따르면 2017년 말경 모함정에서 진행된 주기적 내시경 검사에서 스테이지10 압축기 블레이드 선단에서 손상이 발견되었다. 압축기 케이싱을 현장에서 개봉하여 손상정도와 원인을 파악하였고 단기간 안에 수리한 경우이다. 압축기를 육안으로 검사하여 추가적으로 10개의 압축기 블레이드에 경미한 손상이 있었고, 처리는 10번째 스테이지 블레이드는 교체하고 이외 블레이드는 그라인더로 연마해서 사용했다. 사고의 원인은 “미끄럼 방지” 갑판 조각의 일부가 날아가 흡입스크린에 불완전하게 장착되어 있던 나일론 커버를 통과했기 때문이다.



Fig. 1. FOD Damaged Compressor Blade

2.2 국내 손상 사례

한국 해군의 경우 최근 건조중인 검독수리급 호선에서 가스터빈 압축기 블레이드에 손상이 발생한 보고가 있

며, 그 내용은 아래 Table 1과 같다. 가스터빈 압축기 블레이드 손상내용은 '00년 11월 검독수리-B ○호정 등에서 발생되었다. 원인분석을 위해 압축기 Borescope검사를 진행하였으며, 그 결과 블레이드 찍힘 및 파손 현상이 관찰되었다. 블레이드에 발생한 손상은 가스터빈 전체에 악영향을 줄 수 있는 사항이기에 운용중인 검독수리-B 함정에 대해 전수검사 결과, 동일한 현상(블레이드 찍힘 또는 파손)이 아래 Fig. 2와 같이 확인되었다. 블레이드 손상은 임의의 단과, 임의의 위치에서 불규칙적으로 아래 Fig. 3과 같이 블레이드가 국부적으로 찍히는 현상도 있었다. 손상의 크기는 약 0.03mm ~ 0.04mm로 크지 않으며 다양하였다. 원인은 손상 위치, 손상 크기 등 손상현상을 살펴보면 고속으로 회전하는 블레이드와 작은 크기의 이물질이 부딪혀 발생한 것으로 추정되었다.

Table 1. Status of Patrol Boat contractor for ROKN

Contract number	Product name	Date of event	Place	Contractor
2014***	PKMR-B CRAFT	2020.0.0	OFleet PKMR-OCRAFT	HJ Heavy Industry
2016***		2020.0.0		
2017***		2020.0.0		



Fig. 2. Compressor of gas turbine on stage #1 through borescope

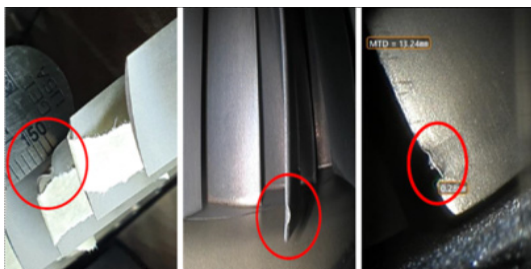


Fig. 3. Damaged blades in compressor of gas turbine

3. 원인분석 및 기술검토

가스터빈 엔진 압축기 블레이드에 이물질에 의한 손상이 발생하였을 때, 그 원인이 외부물질손상(FOD)인지 내부물질손상(DOD)인지 구별되지는 않지만, 엔진수리를 진행해야 한다. 지난 수십년 동안 해군은 FOD대책으로만 블레이드 손상을 해결하려고 했으나 계속적으로 완벽히 해결되지는 않고 있다. 따라서 DOD에 대한 대책이 필요하며, 플러터 현상과 직접적인 관계가 있다.

3.1 플러터(Flutter) 현상

가스터빈 엔진을 운용할 때 대표적인 주제인 DOD는 압축기 실속(Stall)과 직접적인 관계가 있다. 자연상태에서 공기는 고압에서 저압으로 이동하지만 가스터빈 엔진은 자연법칙을 거스른다. 엔진으로 들어오는 공기는 아래 Fig. 4에서와 같이 팬에서 압축기를 지나 연소실쪽으로 갈수록 압력이 높아진다. 이것은 공기를 저압에서 고압으로 강제 이동시키는 것이다. 유입된 공기가 아래 Fig. 5에서와 같이 원활히 흐르지 못하면, 공기는 다시 자연법칙대로 흐르려고 하고, 그러면 압축기 내부를 지나던 공기가 팬 쪽으로 역류할 수 있는 것이다. 이때 유입된 공기가 압축기 블레이드 표면을 따라 잘 흐르지 못하고 박리되는 현상을 실속이라고 한다. 이 실속현상이 모든 블레이드에서 발생하면 공기가 갑자기 팬 쪽으로 역류하려 한다. 이를 서지(Surge) 현상이라고 한다. 서지현상이 발생하면 압축기 제어를 어렵게 하며, 여러가지 운전상의 제약을 가지고 오며 특정 속도에 블레이드 고유진동수와 상호작용에 의해 아래 Fig. 6과 같은 플러터(Flutter) 현상이 발생된다.

이러한 플러터(flutter) 현상은 서지가 원인으로 압축기 유동현상인 실속(stall)현상에 의해 매우 복잡한 변수를 가지는 데, 설계단계에서 고려되어야 할 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 이는 가스터빈 압축기 블레이드가 회전속도가 매우 빠르기 때문에 회전익의 끝단영역에서는 접선방향으로서의 속도가 매우 빨라서 대부분 음속에 가까워지거나 음속보다 커지게 되는데, 이렇게 고속으로 회전하는 회전익의 상대속도 차이 때문에 터빈내부에는 아음속, 천음속 및 초음속 흐름이 혼합된 불균일한 유동이 발생되고, 이로 인해 회전자와 진동의 비정상성을 야기하여 매우 복잡한 유동장이 형성하게 된다.

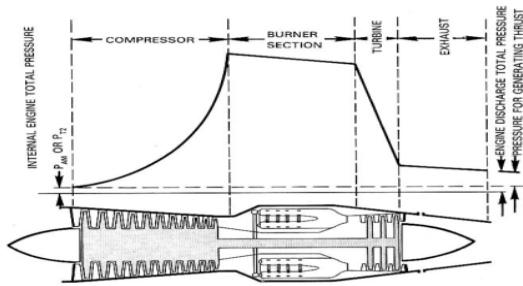


Fig. 4. Changes in gas turbine internal pressure

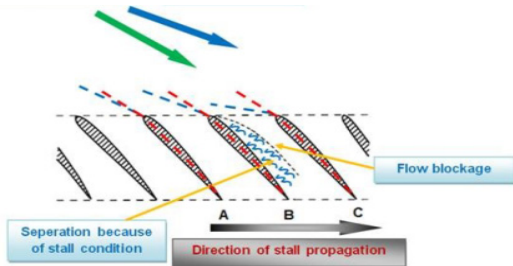


Fig. 5. Blades stall phenomenon on gas turbine



Fig. 6. Damaged blades by flutter in gas turbine

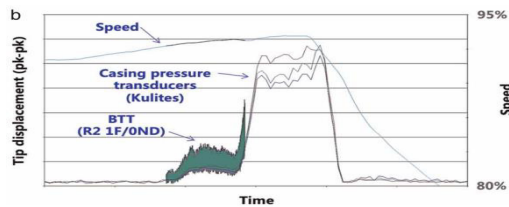
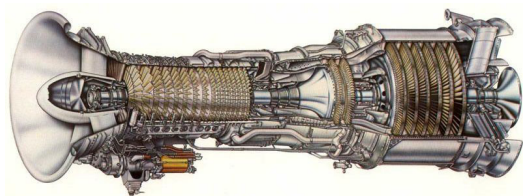


Fig. 7. Flutter measurement results by blade tip timing sense

위의 Fig. 7에 따르면 가스터빈 압축기내부를 Blade Tip Timing 센서 및 케이싱 압력변환기를 통하여 블레이드 진동 및 내부압력을 측정할 것으로, 속도가 증가할수록 진폭이 커지며 일정시간 이후 케이싱 내부압력 증가가 이루어지는데, 이 시기가 서지현상이 발생하며 이후 특정속도에서 플러터 현상으로 전환하는 과정을 볼 수 있고, 엔진이상에 의한 속도가 감속됨을 알 수 있다. 이는 블레이드 유체 유발진동이나 플러터(Flutter) 불안정성이 블레이드의 진동변형과 이에 기인한 유체역학적 비정상 하중사이의 지속적인 에너지 교환에 의해 유발되게 된다. 블레이드의 효율을 높이기 위한 역학적 설계관점에서 전통적인 방법으로 블레이드의 가로세로비와 비틀림정도는 점차적으로 증가되어 왔다. 하지만 이는 또한 운용영역에서 유체 유발진동현상의 발생가능성을 증대시키는 요인이 되는 것으로 알려져 있다. 최근의 압축기 효율의 높은 요구도는 운용선도(operational line)가 플러터 경계를 가로 지르게 되며 보다 높은 고압비와 경량화 요구도는 압축기 첫 단에서 플러터 발생 위험도를 한층 더 가증시키게 되었다. 아래 Fig. 8에 따르면 블레이드 손상파면을 보여주는 것으로, 파면은 유체 유발진동에 의한 피로영역과 플러터 현상에 의한 45도 전단을 가진 최종 단면 및 2차 단면 손상으로 나누어 볼 수 있다.



Fig. 8. Blade(Pressure side) damaged

3.2 기술개발 발전동향

압축기 플러터 현상은 블레이드 실속(stall), 블레이드 유로내부의 강한 충격파(shock wave), 그리고 비정상 운전시에 블레이드 팁 유동 불안정성으로 야기되며, 블레이드 특정 고유진동수에서 공진현상(resonance)으로 발생한다. 이를 공기탄성 불안정 현상(aero-elastic instability phenomenon)으로 정의되며, 정밀한 플러터 해석을 위해서는 물리적으로 유체-구조물 상호작용은 동시에 발생하기 때문에 정확한 Navier-Stokes 방정식

해석과 Forced Vibration 방정식을 시차지연(time lag) 없이 결합(Coupling)시켜 풀어야 한다. 일반적으로 Coupling 해석이 충실하지 못하면, 플러터 현상을 밝히지 못할 뿐만 아니라 플러터 발생으로 제품의 재설계에 따른 막대한 경제적 비용을 초래하게 된다. 대부분의 해외 가스터빈 원천기술 제조사 역시 플러터 해석기술의 어려움으로 인해 대부분 실험에 의존하고 있는 실정이다. 대부분은 One-Way Coupling 방법, 즉 유동해석으로 구조물 표면에 작용하는 힘을 계산하고, 이 값을 구조해석에 적용하여 진동해석을 수행하여 구조물의 안정성 여부를 판단하는 알고리즘으로 이 방법은 유체-구조물 상호작용이 무시된 방법으로 플러터 현상과 달리 구조물의 변형이 유체의 가진 만으로 일어나는 메카니즘인 고주기 피로(HCF, High Cycle Fatigue)해석에 적용되고 있다. 또 하나의 방법은 구조물, 예. 항공기 익형의 강제 피칭(Forced Pitching) 현상 해석에 사용되는 방법으로 구조물의 Mode Shape(eigen vector, 고유벡터)을 이용하여 특정 진폭(Amplitude)의 정현함수로 정의하여 유체가 구조물에 전달하는 에너지를 계산한 후에 이 결과를 바탕으로 구조물의 안전성을 판단한다. 즉 유체로부터 전달된 에너지를 구조물의 댐핑이 충분치 못하여 발산하는 overdamped reponse(unstable)인지 아니면, 충분히 흡수하여 진동이 일어나지 않는 underdamped response(stable)여부를 결정한다. 이 방법은 One-Way Coupling 해석 기법보다 진보되었지만 역시 유체-구조 상호작용 현상에 따른 구조물 불안정성 해석의 한계로 플러터 해석에 적합하지 못한 방법으로 알려져 있다.

최근에 개발된 대표적 Coupling 방법[15,16]은 유체-구조물 상호작용 비선형 해석을 진동 Modal Equation과 Fluid Solve를 하나로 통합(Integration)시켜 유체-구조해석시 흔히 발생하는 시차지연(time lag)을 없애거나 최소화시키는 방법으로, 그 해석의 정확도가 앞서 두 가지 방법에 비해 매우 우수한 것으로 알려져 있다. 이 통합(Integration) 알고리즘을 근거해서 loosely/strongly coupled, Fully coupled 방법으로 구분되는 데, 성질이 다른 두 Solver간 시간통합(time intrgration) 방법에 따라 시차(time difference)가 존재하면 loosely coupled라고 하며, 이에 반해 fully coupled 방법은 시차지연(time lag)없이 거의 완벽하게 유체-구조물 상호작용 해석이 가능하여 플러터 해석에 적합한 방법이라고 알려져 있다.

3.3 플러터(Flutter) 방지 방안

함정용 가스터빈의 경우 발전용 가스터빈이나 스팀터빈과 달리 급기동(과속)에 의한 비정상적인 작동환경에 노출되어 있어 불안정 진동이나 플러터 현상이 발생할 가능성이 높다. 그리고 그러한 현상은 주로 압축기 끝단 저압단에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 플러터 현상을 방지하기 위해서는 서지제어를 효과적으로 제어할 수 있는데, 그 방법은 통과유량의 증대와 필요한 헤드저감, 압축기 회전수 감속 등이 있다. 이 세 가지 방법 중에서 통과 유량을 증대 시키는 방법이 주로 사용되는데, 처리 방법은 압축기 주변의 공기를 재순환 시키거나, 공기를 대기 중으로 분출시키는 바이패스(Bypass) 밸브를 열어, 통과량을 증가시키는 방식으로 이루어진다. 하지만 플러터 현상은 순식간에 발생하는 현상으로 현장에서 사람의 판단으로 제어하기는 매우 어렵다. 그리고 실속 및 서지현상 발견 이후 조치를 하려면 엔진은 이미 정지한 상태이다. 이러한 플러터 발생을 억제하기 위해 서지현상에 대한 연구가 이루어지고 있지만, 실험장치와 기반구조에 어려움이 많아 주로 해석적 방법위주로 진행이 되고 있으며, 실험장치와 기반구조에 어려움이 많아 주로 해석적 방법에 의지하는 경향이 많다. 시간 영역에서 유체-구조 간의 관계를 연계하여, 전산유체역학(CFD, Computational fluid dynamics)기법과 전산구조 동역학(CSD, Computational structural dynamics)기법을 도입하고 유체와 구조 간의 에너지 상호작용 효과를 염두에 두고 연계해석을 수행한다. 이를 토대로 시험을 실시하여 그 결과로써 입증하는 방식이 병행 되어야 한다. 시험을 통한 플러터 경계 도출 방법에 대하여 입증하는 방법을 살펴보면, 압축기 1단 블레이드는 낮은 고유 주파수와 높은 입구 유속으로 인하여 플러터에 취약하다. 따라서 가스터빈 압축기 1단 블레이드를 대상으로 압축기 성능(운전)맵 도출시험, 과도 작동시험, Stall Flutter boundary 도출시험으로 구성한다. 압축기 성능(운전)맵을 통하여 각 속도(Corrected speed)와 성능곡선(Operation line)을 도출하고, 도출된 성능곡선을 기반으로 배압 증가를 통하여 대략적인 고진동이 발생하는 위치를 정의하며, 해당 위치를 기반으로 고정된 속도에서 배압을 증가 시키면서 플러터가 발생하는 위치를 정의할 수 있다.

각 속도(corrected speed)별로 플러터(Flutter)가 발생하는 위치를 정의하면, 아래 Fig. 9와 같이 플러터 경계선(Flutter boundary)을 정의할 수 있다.

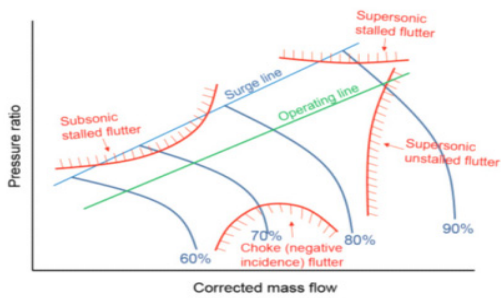


Fig. 9. Compressor map and stall flutter boundary

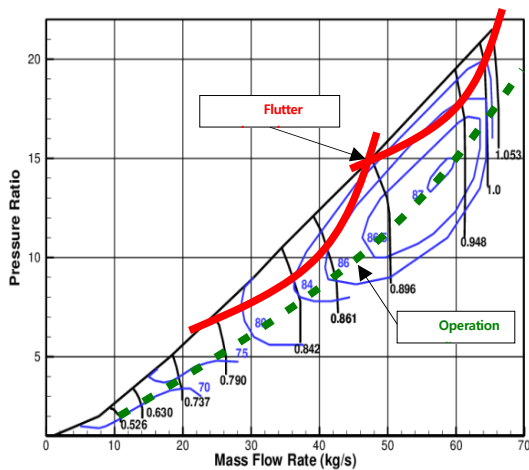


Fig. 10. Flutter boundary to compressor performance curve of LM2500

블레이드의 진동은 Blade tip timing 센서를 통하여 측정하며, 실속(Stall)은 Dynamic sensor를 사용하여 측정한다. 플러터(Flutter)현상과 Clearance 상관관계는 Capacitance probe를 활용하여 측정하며, 구조물의 건전성 모니터링을 위하여 Vane(strain gauge)와 축계(Accelerometer)의 진동을 측정한다.

한국 해군함정에 탑재된 LM2500, LM500, MT30 등에 대하여 위의 Fig. 10과 같은 성능곡선에서 플러터 경계선을 확보하여 급기동이나 정상 운전조건을 벗어나 운전 시 승조원에게 경보음/엔진 정지 등, 알림/조치 가능한 압축기 블레이드 플러터 예방시스템 개발이 필요하다.

4. 결론

한국해군 전투함에 가스터빈 엔진의 탑재가 많아지면 서, 가스터빈 압축기 블레이드 손상에 대한 보고가 증가

할 것으로 예측되고 있다. 이 물질에 의한 손상이 압축기 블레이드에 발생하였을 때, 그 원인이 외부물질손상(FOD)인지 내부물질손상(DOD)인지 구별되지는 않지만, 엔진수리를 진행해야 한다. 지난 수십년 동안 해군은 FOD 대책으로만 블레이드 손상을 해결하려고 했으나 계속적으로 완벽히 해결되지는 않고 있다. 따라서 DOD에 대한 대책이 필요하며, 그 주요 원인인 플러터 현상 방지를 위해 다음과 같은 기술적 보완방안을 제안하고자 한다. 첫 번째로 가스터빈 압축기 성능곡선에 플러터 현상이 발생할 수 있는 경계선을 추가로 확보하기 위해 블레이드 압축기 플러터 건전성 평가방안 기술개발이 필요하며, 두 번째로는 Blade tip timing 센서를 통하여 플러터 현상 발생유무를 측정할 수 있는 센서를 구비하는 것이다. 이를 통해 DOD로 인한 우발적인 고장을 예측·통제·관리하고 관련 소프트웨어를 상시 함정에 설치하므로 불특정 시간에 발생하는 치명적인 고장을 사전에 정비하여 전투함 가동률 향상, 정비비 절감, 함정 승조원의 업무부하 저감효과 달성과 더불어 차세대 가스터빈 엔진 설계기술 확보가 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] GE Korea, "The Report on future and present propulsion system of vessel in MADEX 2019(1)", GE Korea, c2019 [cited 2019, Nov. 26], Available From: http://www.gereports.kr/ge_at_madex2019_01/ (accessed July 26, 2022)
- [2] GE Korea, "The Report on future and present propulsion system of vessel in MADEX 2019(2)", GE Korea, c2019 [cited 2019, Nov. 27], Available From: https://www.gereports.kr/ge_at_madex2019_02/ (accessed July 26, 2022)
- [3] Korea Nuclear Power Times, "MT30 Selected again for Korean FFX batch-III Program", KNPT, c2017 [cited 2017, May 25], Available From: <https://www.knpnews.com/news/articleView.html?idxno=13173>
- [4] GE Korea, "The Report on future and present propulsion system of vessel in MADEX 2019(3)", GE Korea, c2019 [cited 2019, Nov. 26], Available From: https://www.gereports.kr/ge_at_madex2019_03/ (accessed July 26, 2022)
- [5] H. S. Kang, "A Flutter Reliability Evaluation of Industrial Large Gas Turbine Axial Compressor Blade", *Journal of Mechanical Science and Technology Conference*, pp.2,759-2,761, Nov. 2017.
- [6] S. J. Ahn, "Development Flutter Evaluation by Test Method for Large Gas Turbine Compressor Blade",

Korean Society for Fluid Machinery Conference, pp.239-240, July 2018.

- [7] S. W. Lee, "Flutter Analysis of Composite Small Aircraft", *Korean Society for Noise and Vibration engineering Conference*, pp.665-666, Nov. 2009.
- [8] S. W. Lee, "Flutter Analysis of the Quad Tilt Prop UAV", *Journal of Mechanical Science and Technology Conference*, pp.108-109, May 2019.
- [9] D. H. Kim, "Flow-induced Vibration(FIV) Analysis of a 3D Axial Compressor Blade", *Korean Society for Noise and Vibration engineering*, Vol19, No.6, pp.551-559, June 2009.
DOI: <https://doi.org/10.5050/KSNVN.2009.19.6.551>
- [10] D. J. Shin, "Study on FOD prevention improvement for the application of the human factors", *Korean Society for Aviation and Aeronautics Conference*, pp.551-559, June 2009.
- [11] US Navy, LM2500 Gas Turbine Condition Monitoring Development Experience, US Navy, 1980, pp. 1-9.
- [12] D. Caguiat, "Applied neural network for navy marine gas turbine stall algorithm development", IEEE, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1109/AERO.2006.1656129>
- [13] K. W. Oh, "Development of Korean Condition Based Maintenance Systems to Monitor Naval Weapon Systems", *Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol00, No.0, pp.67-74, Dec. 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.20910/JASE.2016.10.4.67>
- [14] GE Korea, "Cost savings and availability improvement with GE LM2500 gas turbine", GE Korea, c2021 [cited 2021, April 30], Available From: <https://www.gereports.kr/cost-savings-and-availability-improvement-with-ge-lm2500-gas-turbine/> (accessed July 26, 2022)
- [15] X. Y. Chen, "Numerical simulation of 3-D wing flutter with fully coupled fluid-structural interaction", *Journal of Computer & Fluids*, Vol. 36, No. 5, pp 856-867, June 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2006.08.005>
- [16] H. Doi, "Fluid/Structure coupled aeroelastic computations for transonic flows in Turbomachinery", 8, ASME, 2003, pp 787-794.
DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2002-30313>

정 운 화(Un-Hwa Jung)

[정회원]



- 2010년 2월 : 부산대학교 조선해양공학과 (공학박사)
- 1993년 4월 ~ 2020년 12월 : 국방기술품질원(DTaQ) 책임연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소(KRIT) 책임연구원

<관심분야>

해상/수중 기술기획, 물분사추진기, 선박프로펠러.

최 시 영(Si-Young Choi)

[정회원]



- 2011년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (학사)
- 2014년 8월 ~ 2020년 12월 : 국방기술품질원 연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

기계설계, 시험/평가, 국방기술기획/품질보증