



Received: 2020/10/14
Revised: 2021/02/24
Accepted: 2021/03/12
Published: 2021/03/28

***Corresponding Author:**

Donghoon Kim

E-mail: brandon.kim.navy@gmail.com

잠수함 주요장비 진동에 대한 고속 푸리에 변환 분석 및 예지정비 적용

A Study on Applicability of Predictive Maintenance and Vibration Data Analysis by Fast Fourier Transform into Major Equipment of Submarine

김동훈^{1*}, 강상우², 이지훈¹, 남경모¹, 성성훈³, 이효진³

¹대한민국 해군 소령

²대한민국 해군 중령

³대한민국 해군 상사

Donghoon Kim^{1*}, Sang Woo Kang², Ji Hoon Lee¹, Kyung Mo Nam¹,
Seong Hun Seong³, Hyo Jin Lee³

¹ROKN Lieutenant commander

²ROKN Commander

³ROKN Senior chief petty officer

Abstract

정비전략은 고장장비에 대해서만 실시하던 고장정비에서 예방정비로 발전하였다. 이후 다양한 물리정보와 센서로 확보된 데이터를 분석하여 필요시에 정비를 수행하는 예지정비로 발전 중이다. 이를 바탕으로 대한민국 해군의 미래정비 전략(예지정비)은 기존 예방정비와 상태기반정비를 혼용하여 적용할 것으로 예상된다. 이 연구를 통해, 잠수함 장비에 잔존유효수명을 예측하고 진동 자동저장시스템을 통해 고속 푸리에 변환 분석하여 현 장비 상태를 파악할 수 있었다. 예지정비의 가능성에 대한 공감대를 확산시켜 해당 분야 사업반영을 통해 대상 함정과 대상 장비를 확대해 나가야 할 것이다. 예지정비를 해군에 적용 및 정착시키기 위해 필수요소인 예지정비 전문가(진동분석 등)에 대한 교육 반영 및 투자가 필요하다.

The maintenance strategy was improved from the Break-down maintenance strategy, which is only for broken-down equipment, to the Preventive maintenance strategy. The Proactive maintenance strategy involves doing maintenance when data and sensors indicate it is needed, rather than after the equipment has broken down. The ROK Navy may want to adopt Predictive maintenance, which includes both Preventive and Condition-based maintenance strategies, in the future. By this study, I predict the remaining useful life of the ship's equipment and obtain real-time descriptive data by fast Fourier transform. At-risk technologies identified by Predictive maintenance should be added to the naval ship upgrade plan. We should plan to train new experts in Predictive maintenance, especially vibration analysis, as soon as possible.

Keywords

고장정비(Corrective Maintenance),
예방정비(Predictive Maintenance),
예지정비(Proactive Maintenance),
상태기반정비(Condition-based Maintenance),
신뢰도중심정비(Reliability Centered Maintenance),
진동수치 분석(Vibration Data Analysis),
고속푸리에변환(Fast Fourier Transform)

Acknowledgement

이 논문은 2020년 해군사관학교 해양연구소 학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

이 논문은 2020년도 한국해군과학기술학회 추계학술대회 발표 논문임.

1. 서론

정비개념은 통상 고장정비(breakdown/run to failure maintenance), 예방정비(preventive/time-based maintenance), 상태기반정비(predictive/condition-based maintenance), 예지정비(proactive/prevention maintenance)의 4단계 세부개념으로 정비기술의 변화에 따라 함께 발전해 왔다.

가장 기본적인 정비개념인 고장정비는 해당 장비에 문제가 발생하여 완전한 정지로 기능을 수행할 수 없을 때, 손상된 부속을 수리하거나 교체하는 개념이다. 이 정비개념은 고장으로 인해 장비가 멈추어도 인적이나 물적인 손해가 거의 없을 때 적용할 수 있다. 쉽게 예상할 수 있듯이, 고장정비는 장비를 유지하는 데 가장 비효율적인 방법이다. 고장정비를 적용할 때 운전자 입장에서 할 수 있는 것은 결국 단가가 낮은 수리부속을 사용하여 수리원가를 낮춘다거나, 기능적인 장비의 정지상황이 더욱 악화되거나 장기화되기 전에 정비인원을 늘리는 방법뿐이다. 고장정비 시스템에서 정비인원은 고장상황 발생 시 초과근무를 할 수밖에 없고, 계속되는 장비고장에서 끊임없이 정비작업을 수행해야 하는 상황에 직면하게 된다. 과거 우리해군 창설기에 정비개념이 정립되지 않았던 시기동안 수행했던 많은 고장정비와 그에 따른 과도한 정비공수부여가 좋은 예가 될 것이다.

고장정비에서 한 단계 발전된 개념인 예방정비는 사전 결정된 장비 작동시간에 계획된 정비를 수행하는 정비전략을 말한다. 이러한 정비주기는 해당 장비의 장비고장간 평균 시간(MTBF: mean time between failure)의 분석 및 검토를 통해서 정해진다. 따라서, 다수의 경우 장비에 대한 정비행위나 수리부속의 교환은 확실한 장비의 기능적 고장이 발생하기 전에 이루어진다. 이러한 예방정비는 장비관리자가 예방정비를 수행하기 위한 충분한 시간, 기술 및 사전지식이 있을 때 적용이 가능하고, 연속적으로 작동하지 않고 주기적으로 휴지시간을 갖는 장비에 적용했을 때 가장 큰 효과를 볼 수 있다. 이러한 예방정비의 특성으로 인하여 작전 임무를 수행하고 일정기간 정비이나 수리기간 중 장비 휴지시간을 갖는 우리 해군함정에 PMS(planned maintenance system)라는 체계로 도입되어 현재까지 운용 중이다.

예방정비의 가장 큰 단점은 해당되는 정비를 필요한 시기보다 너무 빨리 또는 너무 늦게 할 수 있다는 것이다. 예방정비 시스템 하에서 장비는 일정한 작동시간이 지나면 충분해 정비(overhaul)를 해야 하며, 해당 정비 시 기능적인 고장이 발생하지 않았거나 발생할 가능성이 작음에도 수리부속을 교환해야 한다. 또한 MTBF의 적용에 따라 평균시간 이전에 장비고장이 발생할 수 있으며, 이는 고장정비와 동일한 문제를 가지게 된다.

이러한 단점은 불필요한 정비를 하게 됨에 따라 생산량의 감소, 우리 해군의 경우 전비태세의 저하가 발생할 수 있는 상황을 초래할 수 있다. 많은 경우 잘못된 수리나 정비로 인해 장비의 성능이 오히려 악화되기도 했고, 상태가 좋았던 장비를 굳이 분해하여 신품 수리부속으로 교체정비를 진행했을 때 새로 장착한 수리부속이 이후 문제를 일으키는 경우도 많다.

상태기반정비 개념은 오직 장비의 기능적 문제(functional failure)를 기준으로 실시했던 예방정비의 개념을 광범위하게 포함하고 있다. 장비의 작동상태가 주기적으로 감시되고 비정상적인 추세가 감지될 경우, 장비의 고장 가능성이 있는 수리부속을 확인하고 이에 따라 정비를 계획한다. 정비는 이후 고장났을 가능성이 큰 수리부속을 교환 가능한 적절한 시간에 정지 후 이루어진다. 만일 비정상적인 장비의 운전특성 추세를 내버려 둘 경우, 이 장비 고장은 더욱 긴 정비 기간과 수리비용이 필요한 2차 고장으로 확대될 수 있다. 상태기반정비의 장점은 정비행위 자체를 중요도에 따라 계획할 수 있다는 점이다. 또한, 수리에 필요한 수리부속을 사전에 구매할 수 있는 시간적 여유를 갖게 되고 이것은 곧 수리부속의 도입에 필요한 시간이나 저장에 필요한 적재공

간을 절약할 수 있게 해준다. 그리고 정비행위 자체가 오직 필요한 시기에 이루어지기 때문에 생산성이나 작업효율의 증대를 기대할 수 있다. 반면 상태기반정비의 단점은 장비 상태의 악화에 대한 잘못된 판단으로 불필요한 정비행위가 이루어질 수 있다는 것이다. 또한, 장비의 진동이나 온도, 윤활 정도 등 물리적 추세를 탐지, 저장 및 분석하기 위한 특수 장비와 전문인원이 필요한 것도 단점에 속한다. 하지만 이러한 단점은 장비 상태진단 및 분석을 위한 전문화된 외부 업체나 연구소에 위탁 수행하는 방법으로 해결 가능하다는 점에서 큰 단점으로 보기는 힘들다. 정비부서에서 상태기반 정비를 수행할 때 주의해야 할 점은 전문인원이 필요한 데이터를 충분한 기간 동안 수집해야 하고 문제점이 확실히 식별되었을 때 장비에 대한 정비를 계획하여 수행해야 한다.

마지막으로 예지정비에 대한 기본적인 개념은 장비가 가진 근본적인 문제점을 식별하기 위한 모든 작동오류나 이상 현상을 추적하여 근본적인 문제의 원인을 해결하는 것이다. 각각의 장비 이상은 철저히 분석되고 선제 조치들은 해당 장비 문제를 다시 반복적으로 발생하지 않게 해준다. 예지정비에서는 상기에서 언급한 모든 예방정비나 상태기반 정비 기술을 종합 적용하여 장비의 이상에 대한 근본 원인 해석(RCFA: root cause failure analysis)을 해야 한다. 장비 운용자는 장비 이상 근본 원인 해석을 통해 적절한 장비 설치나 정비기술을 선택하여 적용할 수 있다. 이는 또한 같은 문제의 재발생을 억제하기 위한 장비의 개조나 재설계 요구로 이어질 수 있다. 상태기반정비에서 정비자는 정비행위를 우선순위에 따라 실시할 수 있지만, 반복적으로 발생하는 잠재적인 장비 고장에 대해서는 이를 없애거나 줄이기 위한 추가적인 노력이 필요해진다. 이러한 근본적인 장비의 고장 원인을 파악하려는 추가 노력을 통해 장비에 대한 신뢰도를 향상시킬 수 있고, 이는 곧 궁극적으로 해당 시설의 실질적 생산성과 효율성 증가, 해군으로서는 전비태세의 향상으로 이어지게 된다. 예지정비의 단점으로는 예방정비, 상태기반정비와 예지정비에 통달한 고도의 전문지식을 갖춘 전문가와 예지정비 적용에 필요한 특수장비가 필요하다는 것을 들 수 있다.

그럼 앞으로 우리 해군에게 적용가능하고 가장 효율적인 정비개념은 무엇일까? 예방정비와 예지정비를 혼용하는 정비전략이라고 할 수 있다[1]. 우리 해군이 창설 시기 초반 고장정비만 수행했던 시기에서 탈피하여 현재 완성되고 안정된 예방정비 체계를 갖춘 것은 사실이다. 또한, 작전임무 수행 후 정박하여 일정 기간을 보내는 해군 함정의 경우 예방정비의 장점을 극대화할 수 있는 대상이라 할 수 있다. 하지

x만 불필요한 충분해정비가 가져올 수 있는 장비의 신뢰도 저하나 기능적 고장이 발생하지 않았지만, 성능이 저하된 장비에 대한 정비는 고장정비에만 의존해야 하는 현실은 예지정비 도입에 대한 필요성을 증가시키고 있다. 예지정비 적용의 구분은 장비의 중요도나 운전환경에 따라 독립된 연구 및 분석을 통해 이루어져야 한다.

예지정비의 도입으로 우리 해군이 얻을 수 있는 긍정적인 영향은 다음과 같다.

- (1) 함정 가동률 향상: 예상치 못한 장비 고장으로 인한 고장정비 수행으로 발생할 수 있는 함정 수리 기간을 없애거나 줄일 수 있다.
- (2) 창정비(충분해정비, overhaul) 주기 증가: 장비 상태 추적으로 정밀 필요하면 정비를 수행하는 철저히 계획된 정비의 수행으로 창정비 주기를 늘릴 수 있다.
- (3) 모든 창정비에서 수행하는 “개방 후 검사 및 필요하면 정비” 항목을 줄일 수 있다. 장비의 상태를 확인하기 위한 모든 가능성을 조사하는 것보다 정확한 장비의 결함에 대한 정밀 조준식(pin point) 정비에 집중하여 효율성을 극대화할 수 있다.
- (4) 정비 기간의 효율화: 각 장비의 이상 상태를 사전에 파악할 수 있으므로 정비작업을 사전에 계획할 수 있다. 이러한 과학적인 근거를 통한 사전계획은 정비작업을 빠르고 원활하게 이루어질 수 있도록 한다. 장비의 기능적 고장 전에 정지시켜 정비를 수행하면 2차 연계고장이 발생할 가능성이 적고, 이는 곧 수리 기간의 단축으로 이어질 수 있다.
- (5) 장비에 필요한 자원의 효율적인 준비: 예지정비를 통한 장비 상태 이상에 대한 예측은 장비의 기능적 고장 시 필요한 고장정비 판단 시간을 줄여주고, 추가로 고장보고, 정비 인원 할당, 장비에 관련된 기술교범의 준비

및 필요한 수리부속과 공구 준비에 필요한 시간을 최소화할 수 있다.

- (6) 장비 사용 내구연한의 증가: 예지정비를 통해 잘 관리되고 정비된 장비는 일반적으로 더 오랜 기간 사용할 수 있다.
- (7) 정비소요 비용 절약: 예지정비의 작용을 통한 적합한 정비계획을 적용함으로써 통상 20% - 25%의 직접 정비비용을 절약할 수 있다는 것이 많은 연구에서 증명되었다.

2. 예지정비의 기본원리

예지정비는 기본적으로 장비 상태를 기반으로 한 예방정비라고 할 수 있다. 예측되는 장비의 기능적 고장시기를 산출하기 위해 예지정비를 통해 장비의 상태(물리적 신호)를 감시한다. 효율적인 예지정비의 적용을 위해 가격대비 성능비가 높은 감지 도구를 설치하여 작동되는 중요 장비의 각종 자료를 수집해야 한다. 이렇게 수집된 자료를 기초로 하여 정비계획이 수립된다. 예지정비에서는 진동분석, 유류 및 파편 분석, 초음파, 열 영상, 장비작동 평가 등의 장비 상태를 파악하기 위한 다양한 기술을 사용할 수 있다.

사실 예지정비기술은 의료계의 환자진단기법과 매우 유사하다. 환자가 아플 때 그것은 다양한 증상으로 드러나게 된다. 예지정비의 상태감시에 해당하는 단계에 해당하는 진단단계에서 의사는 많은 질문을 하고 질문의 결과 의심되는 부분에 대한 신경계통을 검사한다. 신경계통은 이러한 증상을 전달해 주는 역할을 하기 때문이다. 추가로 검사가 필요하다면 질환의 정확한 판단을 위한 각종 검사가 이루어진다. 이 모든 자료를 기초로 하여 적합한 치료가 이루어진다. 같은 방식으로 장비의 상태 이상은 진동이나 다른 물리적인 신호의 형태인 증상으로 나타난다. 하지만 인간의 인지능력(촉각, 시각, 청각 등)만을 통한 장비 상태의 진단은 쉽지 않은 경우가 많다. 이에 따라 추가적인 예지정비의 기술들이 필요해지고 이러한 기술을 통해 운용자는 장비의 이상증상에 대한 원인을 파악하고 정비계획 수립 등 필요한 조치를 할 수 있다. 대부분은 장비 결함의 정도까지도 예측할 수 있다[3].

3. 예지정비 기술

예지정비에 대한 수많은 기술이 개발되고 사용되고 있다. 그중 주요 기술 7가지는 다음과 같다.

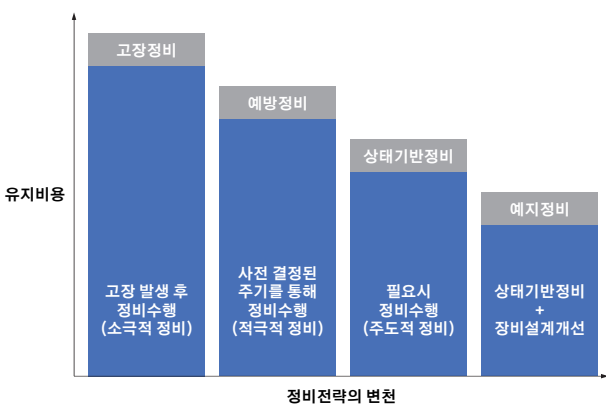


Fig. 1. 정비전략 변천과 유지비용과의 관계[2]

- (1) 진동 감시: 회전류 장비의 장비 이상이나 결함을 발견하는 데 가장 효과적인 방법이다.
- (2) 초음파측정: 구조물이나 각종 파이프 계통 내의 균열을 감시하고 발견하는 데 주로 사용된다.
- (3) 유류분석: 윤활유에 대한 물리분석이나 윤활유에 들어있는 베어링이나 기어의 상태와 관련된 성분 분석 방법이다.
- (4) 입자분석: 작동 중인 회전류 장비나 기어박스, 유압 시스템 내부에는 파편이나 입자가 존재할 수 있다. 이러한 파편, 입자의 수집과 분석은 해당 장비 성능 저하에 대한 주요한 정보를 제공할 수 있다.
- (5) 부식감시: 각종 파이프라인에 대한 초음파, 방사선 검사를 통한 두께측정은 부식 발생을 감시하고 해당 계통의 신뢰도 유지에 매우 중요하다.
- (6) 열 영상: 열 영상은 작동 중인 전자, 기계장비에 대한 분석에 사용된다. 이 방법을 통해 발전기, 보일러, 축 정렬이 불량한 커플링 등 다양한 열 발생 개소나 기계적인 결함을 감지할 수 있다.
- (7) 장비작동평가: 장비의 운전 관련 문제점을 파악하기 위해 가장 효과적인 방법은 장비작동평가라고 할 수 있다. 이 방법을 통해서 해당 장비 내부의 문제점에 대한 가장 좋은 개선방안을 찾을 수 있다.

위에서 언급한 여러 가지 예지정비 기술을 적용했음에도 실질적인 효과로 이어지지 않는 경우도 있다. 대개 이러한 예지정비의 적용실패는 부정확한 준비, 잘못된 계획, 정비 전문성의 부족에서 기인된다. 예지정비를 활성화하기 위해서는 장비 상태를 정확히 감시하기 위한 정확한 도구와 기술을 선택하는 것이 필수적이다. 이러한 선택에서 적용될 산업의 분야와 장비의 종류, 전문인력의 사용 여부를 반드시 고려해야 한다. 또한, 한가지 기억해야 할 것은 예지정비를 수행하는 데에 장비 감시와 진단에 필요한 상대적으로 큰 비용이 드는 특수도구와 전문가가 필요하다는 것이다. 여기서 많은 사람들은 특수도구나 전문인력에 대한 투자비용에 비해 예지정비가 얼마나 효과가 있을지 의문을 가질지도 모른다. 하지만 정확한 인원과 도구에 대한 적절한 투자를 통한 예지정비의 적용이 단기간 내에 매우 훌륭한 결과를 보여준다는 것은 많은 사례에서 증명되었다. 특히, 제품의 생산을 주목적으로 하는 제조기업과는 달리 영해수호를 위한 작전의 성공을 최우선으로 하는 해군에게 예지정비의 적용은 현재 정비 및 보급을 모두 포함한 군수 시스템을 혁신할 수 있는 가장 효과적인 방법이라 생각한다.

4. 진동 감시 및 분석 기술

예지정비의 핵심기술인 진동분석에 대한 기본적인 이론과 실제정비에 적용하여 예지정비를 수행한 사례를 설명하려고 한다. 진동 감시 및 분석 기술은 작동 중인 장비의 기계적인 상태를 진단하는 데 사용된다. 이 분석기법을 통해 장비의 이상상태가 확대되어 고장정비를 수행하기 전에 정비를 수행하는 것이 가능해진다. 지속적인 진동 감시를 통해 베어링의 상태 이상, 기어의 손상이나 기계적 느슨해짐을 감지할 수 있고 진동분석을 통해 이러한 베어링이나 샤프트 손상을 일으킬 수 있는 장비의 정렬 불량 문제를 사전에 알아챌 수 있다. 또한, 진동수치의 변화를 통해 베어링의 잘못된 설치나 교환, 부정확한 샤프트 정렬이나 로터 밸런스 불량 같은 정비작업 오류나 실수를 확인할 수 있다. 회전하는 모든 장비는 회전부위의 밸런스나 정렬상태에 따라 기계역학 함수형태의 진동을 발생시킨다. 어떠한 주파수 영역대의 진동치를 측정하는 것은 축 정렬이나 균형의 정확도, 베어링이나 기어의 상태, 장비 주변 부착물(하우징, 파이프 등)에 의한 공진현상에 대한 중요한 정보를 제공한다. 진동치 측정은 장비 시동 시, 정지 시, 작동 시에 해당 장비 상태를 감시하기 위한 효과적인 비파괴 검사 방법이다. 따라서 진동분석은 주로 스팀/가스터빈, 펌프류, 모터류, 기어박스 같은 장비에 사용된다. 최근에는 이러한 진동분석을 엔진이나 압축기 같은 왕복동 장비에 대한 상태감시까지 분석 영역을 확대하고 있다. 진동분석체계는 보통 다음의 4가지 구성으로 이루어진다.

- (1) 신호측정장치(signal pickups, transducer)
- (2) 신호분석장치(signal analyzer)
- (3) 분석 소프트웨어(analysis software)
- (4) 컴퓨터: 자료 분석 및 저장

이러한 구성요소들은 실시간 지속감시체계나 휴대용 측정 장비를 통한 주기적 분석체계, 사전결정된 시간 간격으로 진동치를 측정하는 체계의 형태로 구분할 수 있다. 장비 부착형 진동측정체계는 측정 개소의 숫자가 늘어남에 따라 도입단가가 상승하게 된다. 따라서 어떠한 형태의 진동감시체계를 설치할지는 해당 장비의 유형이나 작동환경에 따라 결정될 것이다.

장비 운용자나 정비 요원이 본인들이 관리하는 장비에서 평소와는 다른 소음이나 진동을 느꼈다고 가정해 보자. 장비에 심각한 문제가 있는지 아닌지 결정하기 위해 그들은

진동분석기술을 사용할 수 있다. 문제점이 발견되었다면 추가적인 진동스펙트럼 분석을 통해 정확한 고장개소를 파악하고 해당 장비의 기능적 고장 전까지 얼마나 작동 가능한지 예측할 수 있다. 단순히 진단만을 위한 진동차이에 대한 느낌을 토대로 한 정비는 예지정비를 종합적으로 적용하기에 예사이나 전문인력이 부족할 때 효과적으로 사용할 수 있다. 하지만 이 방법은 평소와는 다른 진동 및 소음을 감지할 수 있는 운용자에게 크게 의지하고 있으므로 다양한 진동과 소음의 집합체인 대형장비나 고진동 및 고소음 부위에 적용이 힘들다. 더욱이 문제점을 식별할 때까지 걸린 시간 동안 상당한 장비 손상이 발생할 수도 있다.

진단진동분석은 장비 수리 후에 수리품질을 확인하는 시험절차로도 사용될 수 있다. 이때 진단진동분석은 베어링이나 기어 설치, 정렬 및 밸런싱이 허용범위 내에서 수행되었는지 확인할 수 있다. 매일 또는 매 분기의 주기를 기준으로 진단진동분석을 하는 것도 장비 상태의 변화를 확인하기 위한 좋은 방법이다. 이 분석결과를 통해 장비 운용자는 장비의 기능적 고장으로 인한 계획되어있지 않은 긴급고장정비 전에 계획된 예방정비를 수행할 수 있다.

진동분석을 통해 베어링의 설치나 교환 미숙, 부정확한 샤프트 정렬, 로터 밸런싱 같은 잘못된 정비나 수리결과 및 장비 상태를 감시 및 예측할 수 있다. 거의 80% 이상의 일반적인 회전류 장비의 문제점은 정렬이나 밸런싱 불량과 연관되어 있으므로 진동분석은 지속해서 발생하는 장비의 문제점을 줄이거나 없앨 수 있는 매우 효과적인 도구이다. 즉, 진동 감시 및 분석은 예지정비를 적용하여 장비의 신뢰도를 상승시키는데 사용되는 핵심적인 기술이다[4].

5. 잠수함 주요장비 진동에 대한 고속 푸리에 변환 분석 및 예지정비 적용

예지정비라는 고유명사 자체가 정비 분야에서 4차 산업혁명의 핵심 키워드라고 말할 수 있지만, 기타 관련 기술과의 융합을 통해 기존 방식을 보완하여 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 센서에 IoT(Internet of Things) 기술의 개념을 적용하여 장비의 상태를 실시간으로 감시할 수 없는 구형 장비에 고정된 무선진동 및 온도측정 장비를 구성함으로써 수작업으로 발생 가능한 오차를 최소화할 수 있다. 또한, 매 5초 단위의 진동치 측정으로 분석대상 장비에 대한 데이터 자체를 big data화하여 수작업 측정 진동데이터 경험식의 단점인 R-square 값 및 계수 오차를 큰폭으로 개선할 수 있다. 마지막으로 진동 방향성을 측정할 수 있는 센서를 적용

하여 과거 단순 진동 크기(scalar) 비교에서 벗어나 x, y, z 축에 대한 진동수치 저장 및 이를 통한 진동 방향성(vector)의 분석으로 해당 장비의 유효잔존수명에 대한 예지뿐만 아니라 장비 상태에 대한 세밀한 관리가 가능하다. 예를 들어, 회전자를 포함한 장비에 대하여 시간의 변화에 따라 일정한 축(axis)으로의 진동변화가 감지된다면 회전자 균형에 문제가 있다는 합리적인 추론이 가능한 것이다.

Figs. 2-3는 성능이 보완된 자체 구성 진동, 온도측정 및 자동저장장비(WVTMS: wireless vibration & temperature monitoring system)를 보여주고 있다. 임무수행 중 이 측정 장비를 현재 해당 장비에 적용하여 방향성을 가진 진동수치를 5초 간격으로 지속해서 저장하였다. 이러한 향상된 진동측정결과를 이용하여 더욱 신뢰도 있는 잔존유효수명 분석으로 예지정비를 수행할 수 있을 것이다. 이렇게 구성된 WVTMS를 활용하여 장비 A와 장비 B에 설치 후 자동 저장된 실시간 진동 및 온도에 대한 분석을 진행하였다. 다빈도 고장 장비임과 동시에 고장 시 함행동에 영향을 줄 수 있는 장비를 선정하였으며 장비 진동 및 온도에 대한 정보를 일정 기간(약 2개월)동안 저장한 데이터를 사용했다. 매 5초 단위로 저장된 이 데이터는 각 축(x, y)당 속도, 온도, 시간으로 구성되어 있으며 총 3,038,720건의 정보를 포함하고 있다.



Fig. 2. 진동 및 온도 센서(2 wire type)



Fig. 3. 게이트웨이 및 노드

신규 수집한 진동 자료에 관한 연구는 해당 기간 중 각각의 축(x, y)에 대한 진동 변화량에 대한 분석(Figs. 4-5)과 진동 스칼라($\sqrt{x^2 + y^2}$) 변화에 대한 분석(Fig. 6)을 했다. 또한, 시간대별 진동의 변화를 주파수 관점으로 변환시켜주는 고속 푸리에 변환(FFT: fast Fourier transform) 기법을 사용하여 장비 상태를 분석했다(Figs. 7-8). Figs. 4-5에서 그래프 x 축은 시간(초)이고 y 축은 진동치(mm/s)이다.

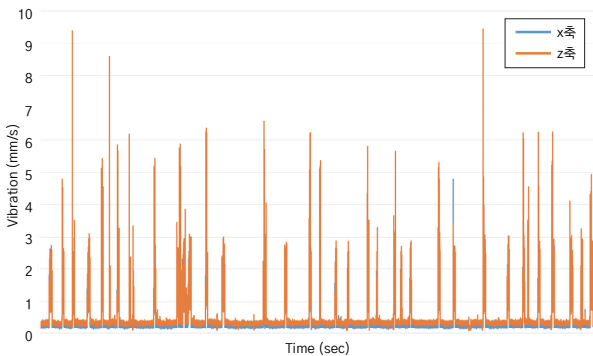


Fig. 4. 장비 A의 x, z 축에 대한 진동변화

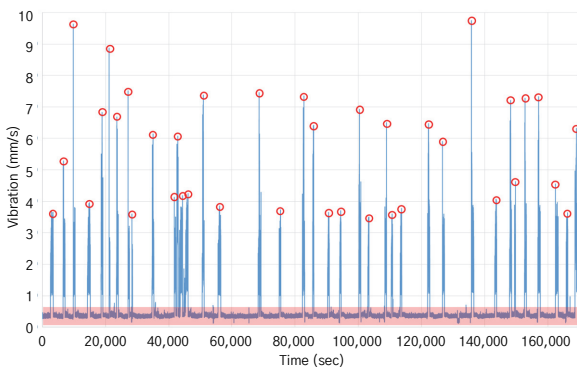


Fig. 5. 장비 A의 x, z 축에 대한 진동변화(스칼라)

먼저 장비 A에 대한 분석을 실시했다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 각각의 축은 같은 변화율을 보인다. 같은 위치에 부착된 센서이기에 당연한 결과라 판단된다. 단, 전반적으로 z 축의 진동 수치가 x 축보다 0.1 mm/s 정도 크게 나타나고 있는 이유는 회전자가 있는 전기모터류의 장비 특성상 회전 방향의 진동인 z 축의 값이 x 축의 값보다 상대적으로 크게 나타나기 때문이다.

Fig. 5는 장비 A에 대한 자료수집 기간에 대한 진동 스칼라 수치 변화를 보여준다. Fig. 4의 각각의 축에 대한 진동치와 같은 변화를 보인다. 적색 원으로 표시된 부분은 그래프 하단의 투명 적색 상자 부분보다 순간적인 높은 진동치를 보인다. 이는 디젤엔진 공기흡입 및 배터리 충전 중 전류 상승으로 인한 고점(peak)이 발생한 것으로 판단된다. 다른

조건에서의 장비작동은 예지정비를 위한 잔존유효곡선 경험식 개발에 많은 오차를 주기 때문에 안정된 진동 수치를 보이는 투명 적색 부분에 대한 분석을 Fig. 6와 같이 선택적으로 실시했다.

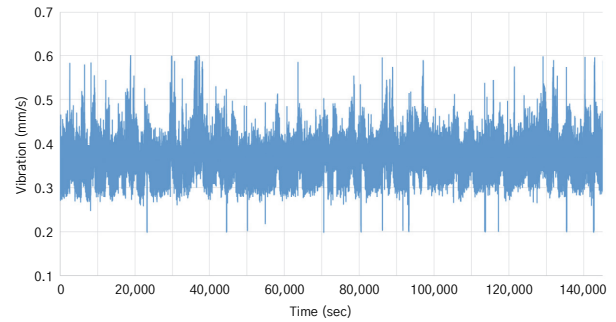


Fig. 6. 장비 A의 진동 스칼라($\sqrt{x^2 + y^2}$) 변화

Fig. 6에서 보는 바와 같이 해당 기간 내에 평균 진동 수치는 0.364 mm/s를 보인다. WVTMS 설치 후 약 2개월의 제한된 기간 집중적으로 데이터를 저장하였기 때문에 기존 14년간 수기 누적자료에서 사용된 Box Lucas Model[5]이 아닌 선형식(linear equation)으로 근사했다. 이를 통해 식 (1)과 같은 최종 경험식(empirical equation)을 도출하였다.

$$y = 6 \times 10^{-8}x + 0.3601 \quad (1)$$

여기서 x 는 단위 시간(초), y 는 진동 수치(mm/s)를 나타낸다. 위 식 (1)을 기반으로 계산하면 해당 함정의 장비 A는 매월 평균 0.151 mm/s의 진동이 증가하고 있으며, 14개월 내 위험 진동치(2.11 mm/s)까지 도달 가능한 것으로 판단된다. 이를 통해 이 함정의 해당 장비는 14개월 이내에 수리해야 한다는 합리적인 판단이 가능하다.

WVTMS 설치 후 저장된 약 300만 건의 데이터를 이용한 Fig. 7과 같은 고속 푸리에 변환(FFT: fast Fourier transform) 분석을 통해 현재 장비 상태를 진단했다. 고속 푸리에 변환을 통해 시간대별 진동의 변화를 주파수 관점으로 변환시키고 변환된 주파수 파형 분석으로 현 장비 상태에 대한 분석이 가능하다.

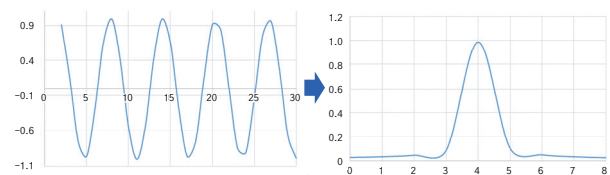


Fig. 7. FFT 예시

장비 A에 대해 누적된 진동 자료로 고속 푸리에 변환을 통해 얻은 주파수 파형은 Fig. 8과 같다. 이는 팬이 설치된 직류 모터의 전형적인 스펙트럼을 보여주고 있다[5].

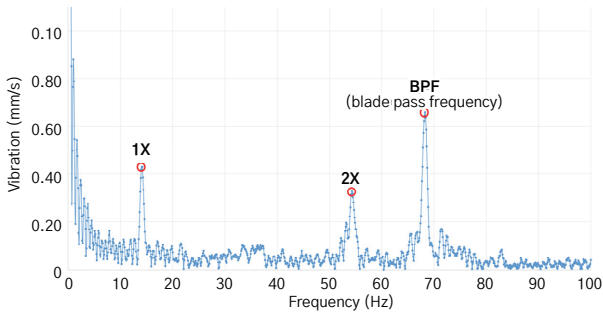


Fig. 8. 장비A 고속 푸리에 변환 결과

여기서, X라 표시하는 주요 주파수에서 1X는 장비 기본 작동 진동 주파수(running speed)이고 2X는 하모닉(harmonics)이라 통칭하는 공진 주파수이다. 통상 공진 주파수는 기본주파수보다 작다.

마지막으로 BPF(blade pass frequency, 날개 통과주파수)를 확인할 수 있다. 이는 팬에 공기가 통과할 때 발생하는 진동 주파수로 기본적으로 팬의 블레이드 수와 팬 회전수에 비례한다. 종합적인 판단결과 해당 장비의 현 상태는 양호한 것으로 판단된다.

다음으로 주요장비인 장비 B에 관한 진동분석을 했다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 해당 기간 내에 저장된 진동 수치에 대해 선형식(linear equation)으로 근사했다. 이를 통해 식 (2)와 같은 최종 경험식(empirical equation)을 도출하였다.

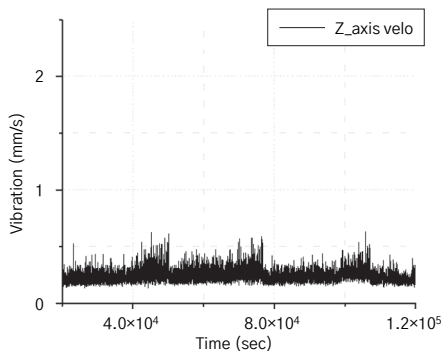


Fig. 9. 장비B의 진동 스칼라($\sqrt{x^2 + y^2}$) 변화

$$y = 4.48 \times 10^{-8}x + 0.2376 \quad (2)$$

관련 경험식 분석으로 장비사용 기간(x; sec)에 따른 진동치 변화(y; mm/s)를 예측할 수 있다.

다음으로 실시간 장비 상태의 점검을 위해 누적된 진동

데이터를 기반으로 고속 푸리에 변환을 실시했다. 장비 B에 대해 누적된 진동 자료를 고속 푸리에 변환을 통해 얻은 주파수 파형은 Figs. 10-11과 같다.

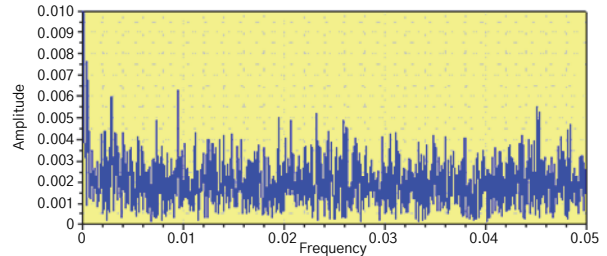


Fig. 10. 장비B 고속 푸리에 변환 결과(장비 안정화 이전)

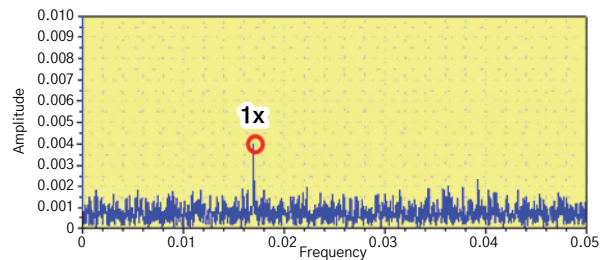


Fig. 11. 장비B 고속 푸리에 변환 결과(장비 안정화 이후)

Figs. 10-11에서 알 수 있듯이 장비 안정화 이전에는 불규칙한 장비 진동 주파수 파형을 보였다. 이는 장비 B 계통 내 입력이 안정화될 때까지의 파형이며 이후 장비 안정화 이후에는 장비 고유진동(1X)을 제외한 진동 주파수는 발견되지 않았다. 이 분석결과를 통해 장비 B의 현재 상태는 양호한 것으로 판단된다.

6. 결론

장비 A와 장비 B에 연쇄 곡선 근사를 통해 예지정비의 핵심인 기간과 진동수치 간의 경험식 도출 후, 잔존유효수명을 예측했다. 또한, 진동 자동저장시스템을 통해 고속 푸리에 변환 분석하여 현 장비 상태를 파악할 수 있었다. 이를 통해 더욱 더 신뢰성 있는 예지정비를 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 예지정비 적용 가능성과 효과성은 입증되었다고 판단되지만 연구 과정에서 다음과 같은 개선 및 보완사항이 식별되었다. 약 2개월 동안 자동 저장된 자료의 한계로 실험식의 R-square 값이 0.67에 머물고, 각 계수에 대한 오차가 8%를 보이게 되었다. 이를 개선하기 위해 먼저 지속해서 진동치를 저장하여 많은 진동데이터를 확보하는 것이 필요하고 자료 분포 불균일성에 기인한 피팅(fitting) 오차는 노이즈 필터링이나 스무딩 방법(data noise filtering & smoothing method)을 이용하여 줄여나가고자 한다.

또한, 장비 진동수치 분석결과에 대한 공감대를 확산시켜 해당 분야 사업반영을 통해 대상 함정과 대상 장비를 확대 나가야 할 것이다. 진동 분석결과에 관한 내용을 대한민국 해군이 수행하고 있는 표준정비항목 내용에 반영하여 승조원의 수리신청이 없어도 정비를 진행할 수 있는 체계적 기반을 만들 예정이다. 앞서 강조했다듯이 예지정비를 해군에 적용 및 정착시키기 위해 필수요소인 예지정비 전문가(진동분석 등)에 대한 교육 반영 및 투자가 절실하다. 예지정비 관련 체계의 도입은 신규함정 도입 시 설계 반영하거나, 기존 함정은 전력지원체계 중기계획에 반영함으로써 상대적으로 이른 시간에 적용할 수 있지만, 이 체계를 통해 저장된 데이터를 책임의식을 가지고 분석하여 의미 있는 결과를 도출하기 위해서는 전문가 양성이 무엇보다 더 중요하기 때문이다.

감사의 글

잠수함 도입 후 15년간 관련 장비의 진동을 묵묵히 측정하여 예지정비 개념의 초기 데이터를 제공해 주신 대한민국 해군 잠수함사령부 및 예하 잠수함수리창 요원들, 함정승조원의 희생과 노력에 진심으로 감사드립니다. 또한, 이러한 연구를 허락해 주신 해군 함정(기관) 예하 선후배, 동기분들께 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

- [1] Sethiya, S. K. "Condition based maintenance (CBM)." Secy. to CME/WCR/JBP, 2006.
- [2] Javed, K., Gouriveau, R., Zerhouni, N., and Nectoux, P. "Enabling health monitoring approach based on vibration data for accurate prognostics." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015. 62(1), 647-656.
- [3] Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004) *Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*. Elsevier.
- [4] Kim, D., et al. "A Study on Applicability and Development Strategy of Predictive Maintenance into ** Ship with Equipment Vibration Data Analysis". *Journal of the KNST 2019; Vol.2, No.2; pp. 061-065.*
- [5] Xu, M., & Marangoni, R. D. (1994) *Vibration analysis of a motor-flexible coupling-rotor system subject to misalignment and unbalance*. *Journal of sound and vibration*, 176(5), 681-691, 1994.