

# 선형손상 누적법을 이용한 비틀림 진동을 받는 축의 수명 예측

## Estimation of the Shaft under Vibratory Torque using Linear Cumulative Damage Rule

한형석† · 이경현\* · 박성호\*\*

HyungSuk Han, KyungHyun Lee and SungHo Park

### 1. 서 론

최근 해군의 전투력 증강을 위해 많은 함정이 건조되고 있다. 특히 저속에서는 많은 함정들이 디젤기관을 주추진 시스템으로 사용하고 있다. 디젤엔진의 경우 크랭크축과 연결된 실린더의 폭발력으로 구동되는 기관으로 통상적으로 개스터빈 엔진과 추진전동기 엔진에 비해 변동 토크량이 크며 이러한 변동 토크에 의한 축 파손을 야기시키기도 한다. 특히 고출력을 요구하는 함정의 경우 디젤엔진은 V형 4행정 기관으로 고속엔진을 사용하고 있으며 감속기어를 채용하여 높은 정격토크를 출력하는 시스템을 도입하고 있다. 일반적으로 축에 대한 파손은 대부분 필렛, 챔퍼 등 응력 집중부의 동하중에 의해 발생되며 이에 대한 다양한 사례가 발표되고 있다.

본 연구에서는 파손이 발생했던 실제 함정의 디젤 엔진 감속기어 축에 대해 비틀림 진동을 스트레인 게이지와 텔레메트리 시스템을 이용하여 계측하였다. 또한 Rain Flow Cycle Counting 법과 Palmgren-Miner의 선형 손상 누적법(Linear Damage Summation Law)을 이용하여 축에 작용하는 손상을 계산하고 이를 통해 축의 수명을 예측하였다. 일반적으로 수명 예측을 위한 함 운전 조건은 일반 항해조건이지만 본 연구에서는 기동 및 지그재그 운전 등 과도 조건을 포함시켜 수명 예측을 수행하였다.

### 2. 비틀림 진동계측

#### 2.1 계측셋업

† 교신저자; 정회원, 국방기술품질원  
E-mail : hshan@dtaq.re.kr  
Tel : +82-51-750-2563, Fax : +82-51-758-3992  
\* 국방기술품질원 부산센터

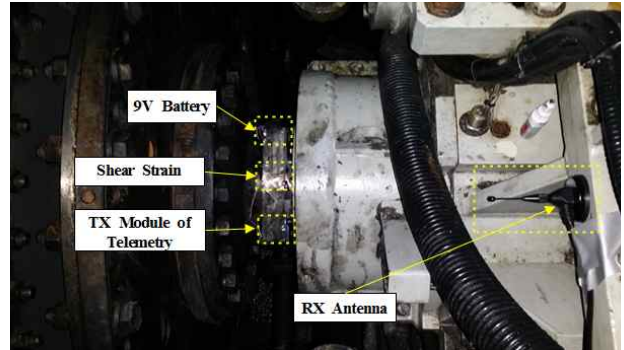


Fig. 1 Telemetry system measuring TV

Table 1 Test system

Test system	Maker	Model
FFT Analyzer	B&K	Pulse 3053-B12/0
Strain gauge	MM	CEA-06-250US-3 50
Telemetry	Binsfeld Engineering INC.	TT 10K-LP
Tachometer	Monarch Instrument	ROLS-P

본 연구에서는 현재 운용하고 있는 특정 함정의 디젤엔진 감속기어 출력축의 비틀림 진동을 Fig. 1 및 Table 1과 같이 전단응력 계측용 스트레인게이지와 Binsfeld사의 텔레메트리 모듈(10K-LP)을 이용하여 계측하였다.

#### 2.2 비틀림 진동 및 응력 계측

비틀림 진동은 Fig. 2~3와 같이 각 속도 레벨(PCL)에 대해 계측하였다. Fig. 2는 일반적인 항해 조건인 직진 항해 시 비틀림 토크이며 Fig. 3은 지그재그 항해 시 축에 발생하는 비틀림 토크 계측 결과이다. 본 연구에서 계측한 함정의 경우 디젤엔진

폐기구가 적외선 신호 감소를 위해 Fig. 4와 같이 수면 근처에 설치되어 있기 때문에 지그재그 운전과 같이 폐기구가 수면 하로 내려가서 배압 변동이 기준 이상으로 커지는 조건에서는 비틀림 진동 토크가 커질 수 있다. 이러한 배압 변화의 증가로 인해 Fig. 5와 같이 RPM 변화가 증가하게 되고 결국 Fig. 3의 PCL 10과 같이 비틀림 진동 토크 또한 Fig. 2의 PCL 10 대비 증가하게 된다.

Fig. 6은 기동 시 축에 발생하는 비틀림 진동 토크이다. 본 연구에서는 정상적인 항해조건 외에도 기동 및 지그재그 운전 등 과도 운전조건까지 고려하여 피로수명을 예측하고자 한다.

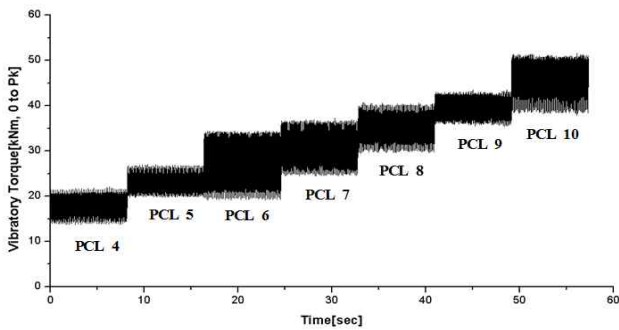


Fig. 2 Vibratory torque in accordance with speed at straight maneuver

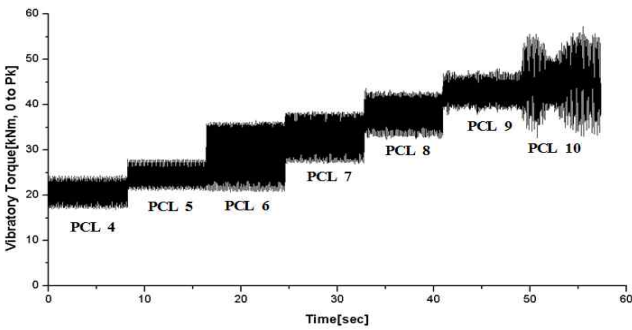


Fig. 3 Vibratory torque in accordance with speed at zigzag maneuver



Fig. 4 Outlet of the exhaust for a diesel engine of a typical naval vessel

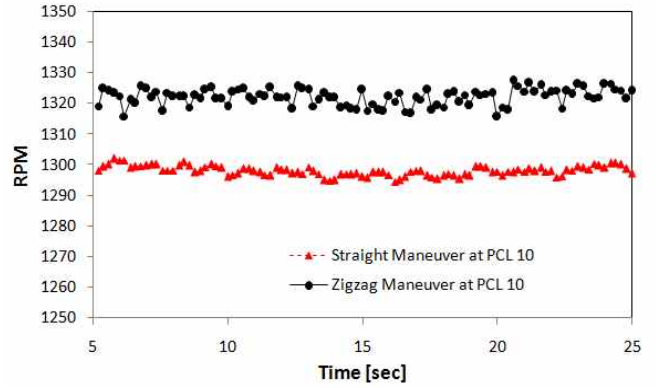


Fig. 5 RPM variation according to sailing conditions

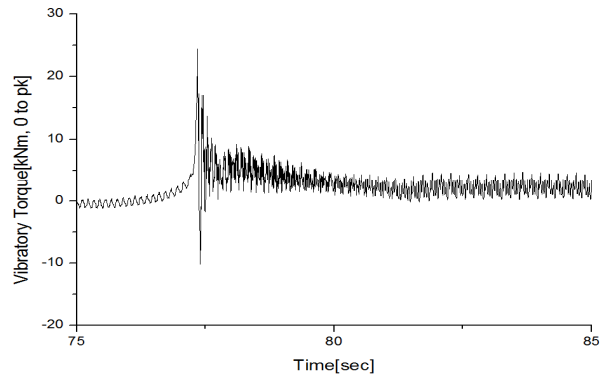


Fig. 6 Vibratory torque at engine starting state

### 3. 수명예측

#### 3.1 Rain Flow Cycle Counting

일반적으로 응력의 시간 데이터를 카운팅하는 방법으로는 Matsuishi와 Endo가 제안한 레인 플로어 싸이클 카운팅(Rain-flow Cycle Counting)법이 주로 사용되며 이는 응력의 진폭과 평균응력, 그리고 반복횟수를 측정하는 방법으로 Fig. 7과 같이 수행된다.

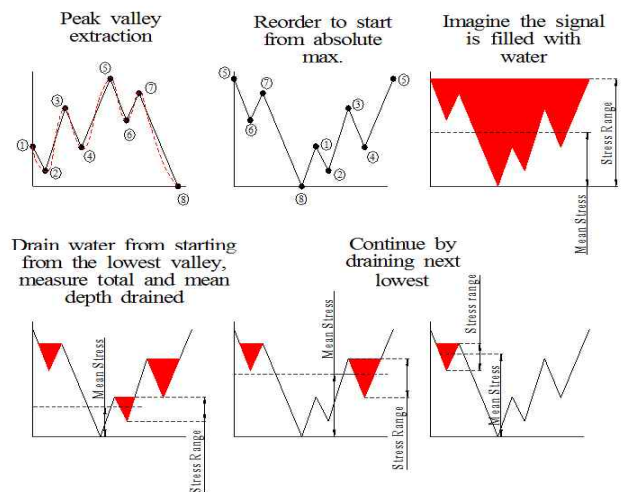
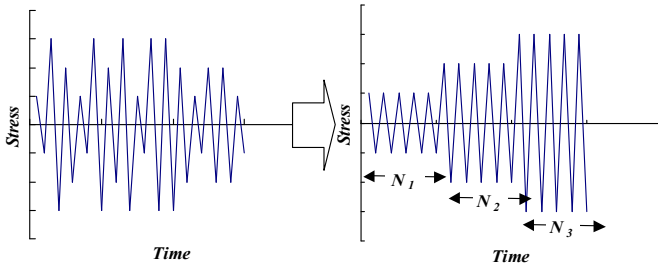


Fig. 7 Rain-flow cycle counting



**Fig. 8** Schematic diagram for calculating the damage with Palmgren-Miner's linear damage summation law

### 3.2 선형손상누적법

일반적으로 랜덤 하중 하에서 피로 수명 예측은 Palmgren-Miner의 선형 손상 누적법(Linear Damage Summation Law)을 적용한다. Palmgren-Miner의 선형 손상 누적법(Linear Damage Summation Law)은 랜덤 신호에 의해서 얻어진 응력 데이터를 Fig. 8과 식 1과 같이 응력 레벨(Level) 별로 군집화(Grouping) 한 후 각 응력이 연속적으로 발생했을 때의 피로 한도에 대한 실제 카운팅(Counting)된 횟수의 비를 계산하여 결과 값이 1.0을 초과할 경우 피로 파괴가 발생한다는 이론이다.

$$D_T = \frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} \cdot \cdot \cdot = \sum_{i=1}^N \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (1)$$

여기서,  $D_T$ 는 총 데미지(Total Damage),  $N_i$ 는 응력  $\sigma_i$ 에 대한 실제 카운팅 된 반복 횟수,  $N_{fi}$ 는 응력  $\sigma_i$ 에 대한 피로 한도를 나타낸다.

### 3.3 수명계산

3.1~3.22절의 Rain Flow Cycle Counting 법과 선형손상누적법을 통해 2.2절에서 측정된 비틀림 토크를 가지고 수명예측을 수행하였다. 여기서 측정된 토크에 대한 평균 응력은 식 (2)를 통해 계산하였고 비틀림 진동 응력은 식 (3)을 통해 계산하였다.

$$S_r = \sqrt{S_c^2 + (2S_s)^2} \quad (2)$$

$$S_c = 0, S_s = \frac{Q_T d}{2J}, J = \frac{\pi d^4}{32}$$

$$S_{ar} = \sqrt{K_{f,B} S_b^2 + (2K_{f,T} S_{as})^2} \quad (3)$$

$$S_b = \frac{M_b}{Z}, Z = \frac{\pi d^3}{32}, S_{as} = \frac{T_a}{T_{max}} S_r$$

**Table 2** Estimation of the life cycle of the shaft

PCL	Life Time[Hr]	
	Straight Maneuver	Zigzag Maneuver
Starting	Infinite	Infinite
4	Infinite	Infinite
5	Infinite	Infinite
6	Infinite	Infinite
7	Infinite	Infinite
8	Infinite	Infinite
9	Infinite	Infinite
10	Infinite	970

여기서  $S_c$ 는 압축응력,  $S_s$ 는 비틀림 응력,  $J$ 는 면적관성모멘트.  $d$ 는 축직경,  $Q_T$ 는 정격 비틀림 하중,  $S_{ar}$ 는 교번 합성 비틀림 응력,  $S_b$ 는 자중과 횡진동을 고려한 교번 굽힘응력,  $S_{as}$ 는 교번 비틀림 토크에 의한 비틀림 응력,  $K_{f,B}$ 는 굽힘응력에 대한 실제 응력 집중 계수  $K_{f,T}$  비틀림 응력에 대한 실제 응력 집중 계수,  $M_b$ 는 자중 및 횡진동에 의한 굽힘모멘트,  $T_a$ ,  $T_{max}$ 는 교번 비틀림 토크 및 최대 정격 토크이다.

식 (3)에서 비틀림 토크에 의한 진동 응력 계산 시 굽힘응력은 고려하지 않았다.

수명 예측 결과는 Table 2와 같으며 최대속력 지그재그 운전 시 수명이 무한수명을 가지지 못함을 예측할 수 있었다. 하지만 이러한 운전 모드는 제한된 상황에서만 발생되며 특히 2장에서 언급한바와 같이 배압 변화증가에 의해 발생되므로 조정실에서 배압 변화 모니터링을 통해 배압 불량 발생 시 속도를 줄임으로써 이 조건을 피할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구를 통해 축에 걸리는 비틀림 진동을 측정하고 이를 가지고 Rain flow Cycle Counting 및 선형손상누적법을 이용하여 특정 함정의 디젤엔진 감속기어 축에 대한 수명을 예측하였다.

수명 예측 결과 일부 과도 운전 조건에서 축이 무한수명을 가지지 못함을 파악하였으며 이러한 수

명 예측 결과를 통해 축의 수명 분석 및 정비 주기를 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 국방기술품질원 품경본부 자체과제로 실시된 것으로 군사보안상 문제가 없음을 확인함.