함정용 감속기어 소음진동 측정

우 승 태*
(두산중공업)

1. 머리말

함정용 감속기어는 고속으로 회전하는 추진기관의 동력을 적절한 회전수로 변환하여 추진기에 전달하여 함정의 기동 및 작전수행이 가능하도록 하는 장비이다. 일반적으로 신규 함정 설계 시, 적용되는 추진기관의 종류, 소요동력 및 회전수가 다양하고, 요구되는 함정의 속력 및 추진기 회전수 역시 상이하며, 추진기관 및 추진기의 설치 위치도 다르므로, 감속기어는 기존에 개발해 놓은 모델을 이용한 양산화가 어렵다. 대부분의 함정용 감속기어는 주문자 생산방식 개념에 의거하여, 신규 함정 설계시 맞춤형으로 설계 및 생산되므로, 초기 설계 및 설계 검증, 제작, 조립, 시운전 등에 많은 시간이 소요되는 특성을 갖고 있다.

감속기어는 함정 추진체계에서 추진기관 및 추진기와 함께 주요한 소음진동 에너지원 중 하나로서, 수중방사소음 및 함내 소음진동 관점에서 적절한 수준의 관리가 요구되며, 특히 전투를 기본으로 하는 함정의 경우에는, 대함/대잠 등의 작전수행 및 함정의 생존성 측면에서 낮은 수준의 수중방사소음이 요구되며, 이에 따라 감속기어 소음진동 역시 최소화되어야 한다.

이 글에서는 함정용 감속기어에 대한 이해를 돕고, 감속기어 소음진동 측정에 대하여 간략히 언급하고자 한다.

2. 함정용 감속기어

2.1 감속기어 본체

일반적으로 추진기관으로 디젤엔진을 사용하는 함정의 감속기어는 1단 감속 형태를 많이 사용하며, 추진기관으로 가스터빈을 사용하는 경우에는 2단 감속 형태를 많이 사용한다. 이는 디젤엔진의 회전수가 일반적으로 1,000 rpm 내외이기 때문에 1단 감속으로도 충분하지만, 가스터빈의 경우 회전수가 최소 2,000 rpm 이상에서 최대 10,000 rpm을 넘는 경우도 있기 때문에 1단 감속기어를 사용할 경우 감속기어의 크기, 중량 등을 비롯하여 많은 문제점이 발생하기 때문이다. 물론 추진기관의 회전수 및 함정의 목적에 따라 예외적인 경우도 존재한다.

감속기어 한 대에 추진기관 입력축 한 개와 추진기 출력축 한 개로 구성된 1기 1축 형태의 감속기어도 존재하지만, 많은 경우 감속기어 한대에 추진기관 입력축 두 개와 추진기 출력축 한 개로 구성된 2기 1축 형태의 감속기어를 사용한다. 2기 1축의 장점은 하나의 추진기관 이상 발생시 다른 하나의 추진기관으로 함정운용이 가능하며, 연료 절약 효과 및 두 개의 추진기관 동시 운용을 통한 함정 최대속력 증가가 가능하다.

2기 1축 형태의 감속기어는 추진기관의 조합에 따라 다양한 형태가 있다. 국내 함정에 적용되는

* E-mail : sungtae.woo@doosan.com / Tel : (055) 278-3809

대표적인 형태는 COGAG(COmbined Gas turbine And Gas turbine), CODOG (COmbined Diesel engine Or Gas turbine), CODAD(COmbined Diesel engine And Diesel engine) 등이 있다. 'And' 는 최대 속력에서 두 대 추진기관이 동시 작동되는 경우이며, 'Or' 은 한 대의 추진기관만 작동되는 경우이다. 이외에도 다양한 형태가 가능하지만, 최근에는 하이브리드 형태의 추진체계 시스템 채택이 증가하고 있는 경향이다.

하이브리드 추진체계란, 저속구간에서는 디젤 발전기에서 생산된 전기로 모터를 구동하여 추

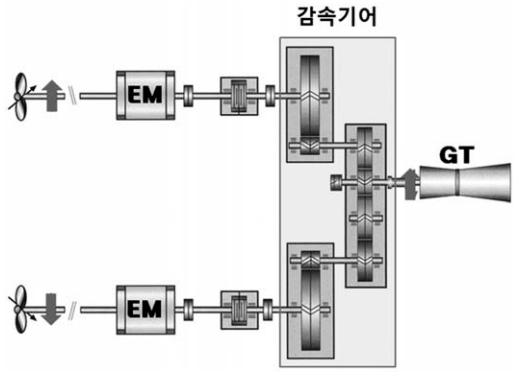

그림 1 CODELOG 추진체계 계통도 예(EM: 전기구동 모터)

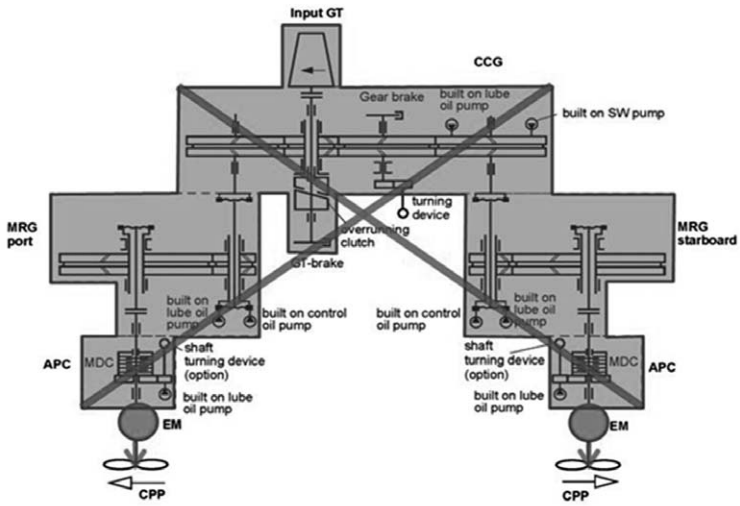

그림 2 전기구동모터 운전모드 예(CODELOG 추진체계, 저속 구간)

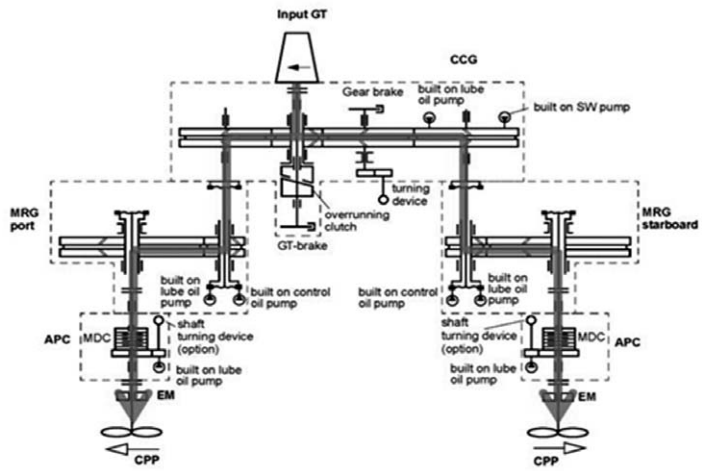

그림 3 가스터빈 운전모드 예(CODELOG 추진체계, 고속 구간)

진기를 움직이고, 고속구간에서는 추진기관(디젤엔진 or 가스터빈)에서 생산된 동력으로 감속기어를 통해 추진기를 움직인다. 이를 통해, 함정이 주로 작전을 수행하는 저속 구간에서 주요한 함정 소음원 중 하나인 감속기어 소음을 제거함으로써 작전수행능력 및 함정 생존성을 극대화할 수 있으며, 연료 절약 및 효율 측면에서도 유리하다고 알려져 있다. 대표적인 하이브리드 감속기어 형태는 CODELAG(COmbined Diesel-ELectric And Gas turbine)과 CODELOG(COmbined Diesel-ELectric Or Gas turbine) 등이 있다. 그림 1~3은 CODELOG 감속기어의 추진체계 계통도와 운전모드 사례를 보여준다.

2.2 기타 주요 장비

함정용 감속기어 본체 이외 주요한 장비는 윤활유/제어유 공급을 위한 전기구동 모터펌프 와 감속기어 국부 제어반 등이 있다.

그리고 감속기어 진동절연을 위하여 감속기어와 선체 받침대 사이에 마운트를 설치하여, 선체 및 수중으로 전파되는 진동에너지를 최소화 한다. 전투 및 중요 작전수행을 목적으로 하는 함정의 경우 대부분 탄성마운트(elastic mount)를 적용하고, 비전투용 함정의 경우 일반적으로 강체마운트(rigid mount)를 적용한다. 탄성마운트의 경우, 감속기어 소음특성을 감안하고, 공진 회피를 위해 마운트 강성은 적절한 수준에서 결정된다. 그림 4는 탄성마운트 사양의 예시를 보여주며, 그림 5는 마운트 하부의 선체받침대에서 측정된 감속기어 구조소음 수준을 진동속도 레벨로 보여준다.

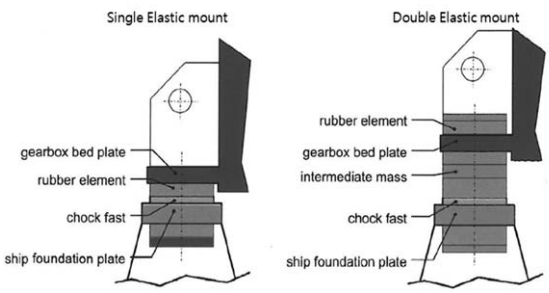

그림 4 감속기어 탄성 마운트 예

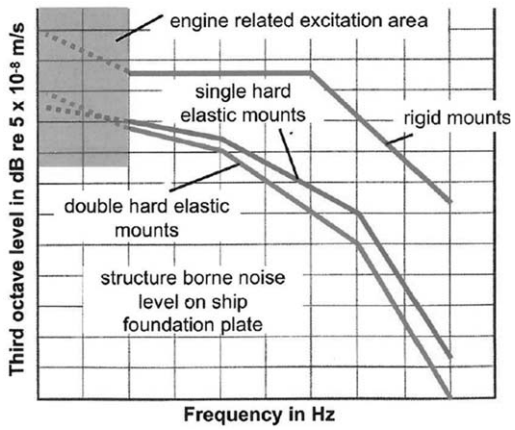

그림 5 선체받침대에서 감속기어 구조소음 수준 예(진동속도 기준)

2.3 함정용 감속기어 주요 소음원

감속기어의 주요 소음원은 기어 이빨 주파수이며, 특히 추진기 축과 연결된 기어를 불 기어(bull gear)라고 하는데, 질량과 크기가 감속기어 내에서 가장 크며, 전체 소음 크기를 결정한다고 할 수 있다. 그림 6은 불 기어의 예를 보여준다.

이외에도 감속기어 내부 요소로 입력, 출력, 중간축의 불평형 진동 및 추진기관, 추진축계 연결상태에 따른 베어링 궤적에 의한 영향이 있으며, 감속기어 외부요소로 추진기관, 프로펠러 자체 가진력 및 축계 정렬에 따른 영향 등이 있다.

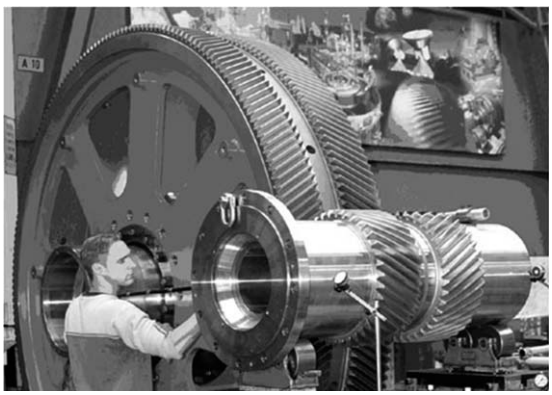

그림 6 불 기어 예

3. 감속기어 소음진동 측정

3.1 감속기어 소음진동 평가지침

함정용 감속기어 소음진동은 음압 레벨을 기준으로 하는 공기소음과 진동가속도 레벨을 기준으로 하는 구조소음으로 평가된다. 감속기어 본체의 경우 함정 장착 전에 공장수락시험을 통하여 소음진동 수준을 사전 평가하지만, 최종 평가는 함정 장착이후 추진기관 및 축계와 연결된 상태에서 국가공인기관이 실선시험 및 평가를 통해 완료한다. 윤활유/제어유 공급을 위한 전기구동 모터펌프와 감속기어 국부 제어반의 경우, 함정 장착 이전에 소음진동 성능평가 완료하여 공인된 성적서와 함께 납품된다.

감속기어 본체 공기소음의 경우, 함내 소음수준 및 승조원의 안락함 관점에서 중요하며 수중방사소음에 미치는 영향도는 크지 않은 것으로 알려져 있다. 일반적으로 감속기어 본체 공기소음 수준은 감속기어 제작사에 의해 1/1 Octave Frequency Band 값으로 제시되며, 평가방법 및 측정위치는 미해군 규격 MIL-STD-740-1 또는 국제규격 ISO 3746 등이 적용된다.

감속기어 본체 구조소음의 경우, 수중방사소음 및 함내 소음진동에 미치는 영향이 크므로 중요하게 관리된다. 일반적으로 선박용 감속기어 진동은 ISO 20283-4 및 ISO 10816-6 (1995), DNV Rules for Classification of Ships, Part 6, Chapter 15에서 최대 진동속도 기준으로 7.1 mm/s r.m.s를 적절한 수준으로 권고하고 있지만, 함정의 경우 이보다 더 낮은 수준에서 진동가속도 기준으로 관리되며 감속기어 제작사에 의해 1/3 Octave Frequency Band 값으로 제시된다. 다만, 함속이 빠른 소형 고속정의 경우, 선체 진동이 높게 나타나는 경향을 보이며, 이에 따라 감속기어 진동도 증가하는 경향을 보인다. 일반적인 구조소음 평가방법은 미군 군사규격 MIL-STD-740-2 등이 적용되지만, 측정위치는 예외적이다. MIL-STD-740-2에서 구조소음 측정위치를 마운트 상단으로 규정하지만, 함정용 감속기어 본체 구조소음은 마운트 하단에서 평가한다. 이는 함정 입장에서 볼 때, 감속기어 자체 구조소음보다는 수중방사소음 및 함내 소음진동 관점에서 마운트 감쇠 이후의 감속기어 구조소음이 더욱 중요하기 때문이다. 따라서, 감속기어 본체뿐만 아니라, 감속기어 특성에 맞는 마운트 제작도 중요한 요소 중 하나이다.

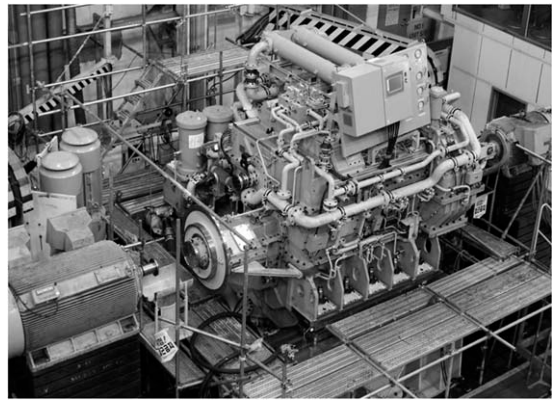

그림 7 감속기어 공장수락 시험 예

윤활유/제어유 공급을 위한 전기구동 모터펌프의 경우, 공기소음은 MIL-STD-740-1 Grade D, 구조소음은 MIL-STD-740-2 Type II+5dB(for resiliently mounted non sea connected pumps), 진동은 MIL-STD-167-1 Type II(내부가진)를 적용한다.

감속기어 국부 제어반은 MIL-STD-167-1 Type I(환경진동)을 적용하는데, 이는 장비 소음진동 성능을 보는 것이 아니라, 장비의 신뢰성 관점에서 특정 진동 환경에서 장비가 정상작동 하는지를 검증하는 규격이다.

3.2 함정용 감속기어 소음진동 측정 실례

감속기어 공장수락 시험을 그림 7에서 보여주는데, 일반적으로 감속기어 규모가 크기 때문에 대부분의 제작사는 공장수락 시험에서는 모터를 이용한 "no load spin test"를 수행한다.

감속기어 본체 공기소음 및 구조소음의 실선평가는 계약적 요구조건에 의하여 특정 함 속력에서 수행되는데, 일반적으로 쾌적 속도와 최대 속

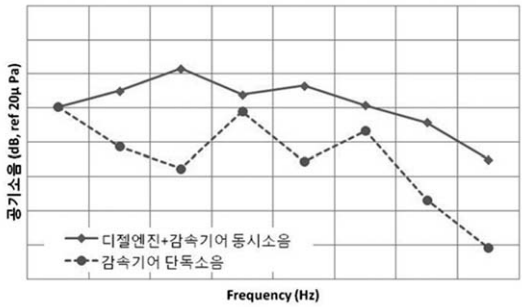

그림 8 감속기어 격실 내부 공기소음

도에서 수행된다. 감속기어 본체 공기소음은 측정 이후에 배경소음 보정(K1, background noise correction) 및 환경보정(K2, environmental correction)이 평가에 반영된다. 많은 경우 동일한 격실 내에 추진기관과 감속기어가 같이 설치되는데, 이 경우 감속기어 공기소음 계측시 추진기관 성분이 상당부분 유입된다. 이론적으로는 배경소음 보정(K1)을 통해 감속기어 본체 공기소음 평가가 가능하지만, 실질적으로 감속기어 본체 공기소음 계측은 함정이 특정 속력으로 운항중일 때 수행되므로, 함정 속력을 유지한 상태에 감속기어만 정지한 배경소음 측정이 어렵다. 그림 8은 동일한 격실 내에서 '디젤엔진+감속기어 동시소음' 수준과 '감속기어 단독소음' (가스터빈이 다른 격실에서 동력 전달) 수준을 환경보정만 적용하여 보여준다. 비록 추진기관 및 회전수('감속기어 단독소음' 시 회전수가 더 높음)가 다르기는 하지만, 동일 격실 내에서 디젤엔진 공기소음이 감속기어 공기소음에 비하여 영향도가 큼을 알 수 있다.

감속기어 본체 구조소음은 그림 9에서와 같이 감속기어 마운트 하단 선체 받침대에서 평가된다. 이 경우 감속기어 본체 구조소음 뿐만 아니라, 선체 및 유압배관, 주변 기타 장비 에너지도 상당부분 유입되며, 주파수 분석을 통하여 감속기어 이외 성분은 평가에서 제외된다. 이때, 감속

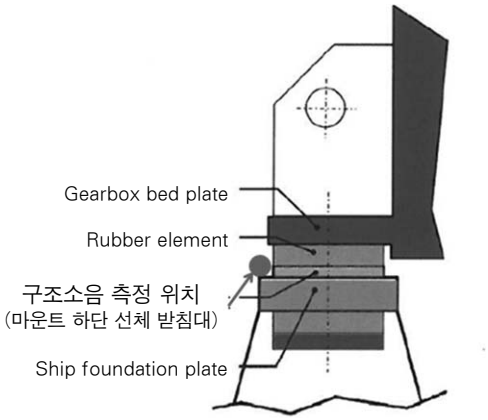

그림 9 감속기어 본체 구조소음 측정위치

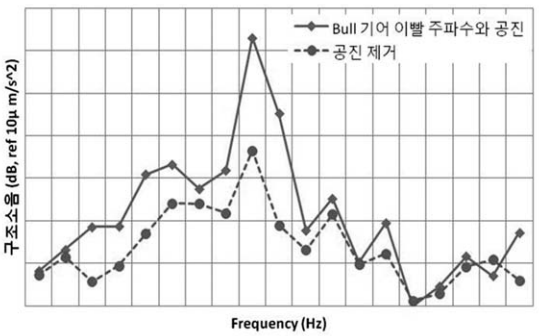

그림 10 불 기어 이빨 주파수 공진 사례

기어 운전 영역 내에서 감속기어 이빨 주파수와 기타 주변 장비간 공진이 발생하지 않도록 유의해야 한다. 그림 10은 감속기어 불 기어 이빨 주파수 대역에서 공진 발생으로 인하여 구조소음 증가한 사례를 보여준다.

3. 맺음말

이와 같은 함정용 감속기어 대한 간단히 소개하였고, 소음진동 측정지침 및 사례에 대해 살펴보았다. 다만 보안상의 사유로 인하여, 소음 레벨과 상세 주파수 및 기타 중요 정보에 대한 상세 자료를 수록하지 못함을 아쉽게 생각한다. KSNVE