

# 풍력발전 구동계열의 트라이볼로지

한국과학기술정보연구원  
전문연구위원 조흥곤  
([chohungg@reseat.re.kr](mailto:chohungg@reseat.re.kr))

## 1. 풍력발전의 트라이볼로지

풍력발전 설비에는 다양하면서도 가혹한 동작을 하여야만 하는 마찰 부분이 많다. 따라서 이들 기계와 기구를 원활하게 상호 작동시키기 위해서는 트라이볼로지(tribology)가 반드시 적용되어야 한다.<sup>1,10</sup>

‘트라이볼로지’란 마찰(friction), 마모(wear), 윤활(lubrication) 등을 포괄하는 메커니즘을 다루는 학문과 기술 영역이다. 이는 ‘상대운동을 하면서 서로 간섭을 주고받는 2면과 더 붙어 이들과 관련된 여러 가지 문제와 실제 응용에 관한 과학과 기술’이라고 정의되고 있다<sup>1</sup>. 또한 그리스어로 마찰을 의미하는 ‘tribos’를 어원으로 하며, 1966년 영국의 기계공학자 H. Peter Jost가 영국 정부의 후원으로 발표한 ‘마찰과 마모에 의하여 생기는 손해를 추정한 보고서(Jost report)’에서 처음 사용한 용어다. 이 용어(트라이볼로지)는 현재 미국의 트라이볼로지·윤활기술인협회(Society for Tribologists and Lubrication Engineers: STLE), 영국의 트라이볼로지협회(Institution of Mechanical Engineers’ Tribology Group: IMechE Tribology Group), 독일의 트라이볼로지협회(German Society for Tribology: Gesellschaft für Tribologie), 일본의 트라이볼로지학회(Japanese Society of Tribologists) 등 많은 국가와 국제적 기구에서 사용하는 일반적인 과학기술용어로 정착되어 있다.

한편 영국의 ‘Jost report’에 대한 주요 내용은 ‘베어링이나 기어의 마찰면에는 미끄럼 접촉을 이루는 두 표면이 반드시 존재하며, 이의 부분 압력은 경우에 따라서 수만 기압에 달하기도 한다. 따라서 미끄럼 접촉을 하는 두 표면은 완전히 격리되지 않는 조건에서도 기계는 원활하게 운전되어야 한다’는 것이다<sup>1</sup>.

풍력발전 장치는 바람의 운동에너지를 블레이드에 의하여 기계적인 회전 운동에너지로 변환하고, 이를 이용하여 발전기를 구동하게 된다. 따라서 이 동력전달 기구의 저속 측, 고속 측의 베어링과 증속기에는 윤활이 반드시 필요하다. 또한 풍향에 대한 방위제어를 수행하는 요잉(yawing) 기구의 윤활도 중요하다. 기어의 경우를 예로 들면, 보통의 용도에서는 일정한 저·고속 회전을 일정한 고·저속 회전으로 증·감속하지만, 풍차의 경우는 풍속뿐만 아니라 풍향(wind condition)에도 의존된 비정상적 저속 회전을 아주 높은 기어비(gear ratio)로 증속하여야 하기 때문에 예측조차도 어려운 바람의 가혹한 활용조건이 형성된다. 따라서 윤활 등과 같은 트라이볼로지의 적용이 대단히 중요하다. 앞으로

풍력발전의 대응량화와 이에 따른 풍차의 대형화의 진전에 의하여 나셀(nacelle) 부분은 100m가 넘는 높이에 설치될 것이며, 이처럼 더욱 가혹해지고 있는 풍력발전 설비의 설치 및 운전조건 때문에 윤활유의 교환과 보수 등이 더욱 어려워질 것이다. 또한 해상 풍차가 많이 보급되면 이의 유지·관리와 수리는 물론, 염분을 포함한 해풍에도 철저히 대처해야 한다. 따라서 지금까지의 어느 기계 설비보다도 풍력발전의 구동계열(drive train)과 관련된 트라이볼로지의 중요성이 더욱 강조되고 있다<sup>2,3</sup>.

풍차의 트라이볼리지 적용에서 가장 중점을 두어야 할 부분은 증속기(gearbox) 및 이의 1차적 구동계열인 로터 주축 베어링(주 베어링)이다. 증속기에서는 축의 회전속도를 약 100배 혹은 그 이상으로 증가시켜야 하므로 각종 기어와 베어링을 가혹하게 운전할 수밖에 없기 때문에, 풍차의 설계와 운용 단계의 모두에서 마찰, 마모, 윤활 등을 망라한 트라이볼로지가 적용되어야 한다. 한편 증속기 이외의 구동계열에 대한 트라이볼로지는 실제적으로 설계 단계에서는 마찰, 마모, 윤활의 모든 항목이 고려되지만, 운용 단계에서는 윤활을 중심으로 이뤄지고 있다.

## 2. 증속기의 트라이볼로지

### 2-1. 증속기용 윤활유

증속기는 풍력 터빈(풍차)의 로터 회전(7~25rpm 정도)을 발전기에서 필요로 하는 회전수(4극식 유도 발전기의 경우 1,500~1,800rpm)로 올리는 기어박스(gear box)로서, 베어링과 기어가 주요 구성 요소이다. 풍차의 주축 토크는 출력의 1.5승에 비례하는 것으로 알려져 있으며, 고출력화와 함께 증속기의 기어와 베어링에 대단히 큰 응력이 걸리게 된다. 이 때문에 대부분의 풍차 메이커들은 증속기용 윤활유(증속기유)로 AGMA(American Gear Manufacturers Association; 미국기어제조업자협회) 9005-02와 DIN(Deutsche Industrie Normen; 독일공업규격) 51517 Part III를 만족시킴과 더불어, 증속기 제조자와 베어링 제조자가 규정한 시험에 합격한 윤활제의 활용을 요구하고 있다.<sup>3,4</sup>

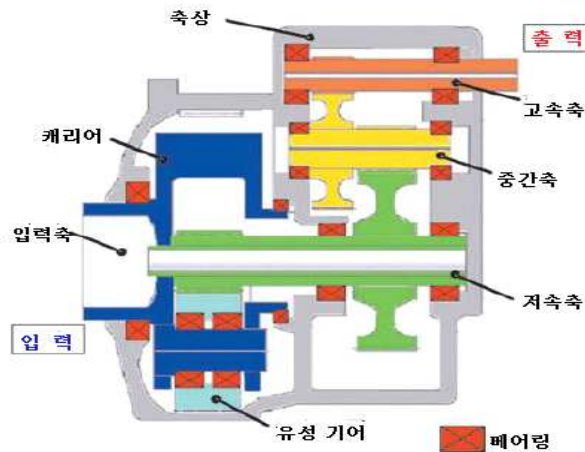
증속기유에 대한 세부 설계에는 기어의 마이크로피칭(micro-pitching; 미세 중형 요동운동), 피칭(중형 요동운동), 국부 과열에 의한 달라붙음, 베어링의 마모 등 여러 윤활조건에 대한 성능을 동시에 향상시켜야만 하는 어려움이 따른다. 또한 증속기유는 증속기에 물이 혼입되는 경우가 생길지라도 성능저하를 일으키지 않을 필요도 있다. 이에 대한 새로운 방법으로서 극압제(extreme pressure additives) 처방기술이 제안되어 있다. 이는 티오인산 에스테르 아민염(thiophosphoric acid ester amine salt)을 내마모제로 사용한 공업용 기어오일에, 알킬아인산(alkylphosphite acid)을 추가한 사례로서 마이크로피칭을 현저하게 감소시킨다.<sup>4</sup>

### 2-2. 증속기의 구조적인 트라이볼로지

풍차의 구동계열은 블레이드에서 증속기와 발전기로 연결되는 경로로 이뤄진다. 현재 가장 많이 활용되는 구동계열은 블레이드 측에 자동조심 롤러 베어링(self-aligning roller bearing), 발전기 측에 증속기의 입력 베어링이 설치되며, 증속기의 입력 베어링이 바람 하중에 의한 축 하중을 받지 않도록 설계된다. 또한 블레이드와 증속기 사이에 2개의 베어링을 배치, 블레이드로부터의 운동량과 반경 · 축 방향 힘을 분리시켜 증속기에 영향을 미치지 않도록 하는 특징이 있다.

증속기는 풍차의 구동계열 중에서 가장 중요한 역할을 함에 따라 이에 대한 규격화가 오래전부터 검토 · 실행되었다. 현재까지는 국제적으로 인정되는 대표적 지침서로서 AGMA(American Gear Manufacturers Association, 미국기어제조업자협회)에서 발표한 규격을 꼽을 수 있지만, 증속기의 구조적인 트라이볼로지를 새로운 국제적 공통 기술에 의하여 규격화된 내용으로 시행하려는 움직임에 의하여, IEC(International Electrotechnical Commission, 국제전기표준회의)와 ISO(International Organization for Standardization, 국제표준화기구)가 합동으로 새로운 규격을 책정하고 있다.

풍차의 주축은 블레이드에 의해 회전하지만, 일반적으로 2.4MW 출력의 경우는 15rpm으로 회전되기 때문에 증속기에서 약 100배로 속도를 증가시켜야 한다. 대표적인 증속기의 구조는 <그림 2-1>과 같다. 블레이드의 회전이 유성 축(idle shaft)의 캐리어(carrier)를 구동하여 저속 축, 중간 축, 고속 축으로 운동이 전달된 다음, 출력으로 이어진다. 한편 대형 풍차의 증속기에는 최근 링기어(ring gear)와 선기어(sun gear)를 캐리어, 유성기어, 저속축 등과 연계시켜 작동시킴으로써, 높은 토크와 이의 증속에 대처하는 사례도 많아지고 있다.



<그림 2-1> 증속기의 내부구조<sup>4</sup>

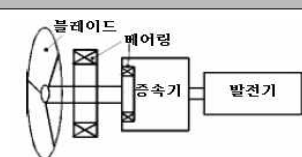
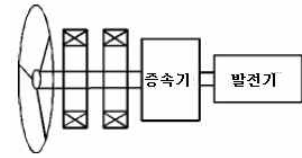
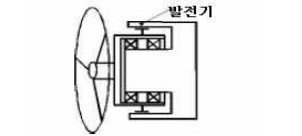
증속기 자체를 소형화하기 위해서는 최초의 저속단을 유성 기어로 설계하는 것이 일반적이다. 하지만 유성기어 부분에는 높은 토크가 주어지기 쉽기 때문에 기어의 강성을 고려해야 하며, 강성의 향상을 위하여 베어링을 집중화(베어링 외륜과 유성기어의 일체화 등)한 구조도 증가하고 있다.

AGMA 규격과 IEC/ISO 규격에는 트라이볼로지의 실현을 위한 조속기에의 사용 추천 기어를 제시하고 있다. 최근의 풍차 대형화 추세에 의하여 입력 토크가 커지고 캐리어 베어링과 유성 기어의 대형화가 이뤄지고 있으며, 경량화를 위한 복합적인 유성 기어의 활용이나 다축 출력방식이 이용되기도 한다.

증속기의 구조적인 트라이볼로지를 실현하기 위해서는 이의 주요 부품인 기어와 베어링에 관한 최적 설계·관리가 우선되어야 한다. 기어는 우선 현재 널리 이용되고 있는 침탄 기어(carburizing gear)의 장수명화가 필요하다. 이에 대처하기 위하여 FPB(fine particle bombarding) 등의 미세 샷피닝(shot peening)이라든가 진공 침탄(vacuum carburizing), 고농도 침탄(highly concentrated carburizing) 등과 같은 열처리법의 개선이 이뤄지고 있다. 기어 치면의 초정밀 다듬질 가공 기술도 적용해야 하며, 대형(현재 대부분의 기어 직경이 1~2m에 달함)을 가공하기 위한 효율적 설비의 개발도 필요하다. 한편 증속기 베어링에는 높은 신뢰성과 더불어 경량화와 소형화가 요구되고 있다. 특히 유성 베어링(idle bearing)와 중·고속 축에 대한 지지 베어링에는 반경방향 하중과 축방향 하중이 복합적으로 작용하기 때문에 베어링의 수명을 단축시키는 것으로 알려져 있다. 이를 방지하기 위하여 유성 베어링 등은 외륜을 줄이고 유성 기어 내면을 궤도면(orbital plane)으로 이용하는 방법도 적용되고 있다.

### 2-3. 증속기와 연계된 구동계열의 구조적인 트라이볼로지

블레이드로부터 증속기와 발전기를 걸쳐 주축에 의하여 연결된 구동계열은 모두 나셀(nacelle)의 내부에 장착되어 있다. <그림 2-2>에 대표적인 3종류의 주축과 구동계열을 설명하였다<sup>4,5</sup>.

	구조도	블레이드측 베어링	발전기측 베어링	특징
A형식		SRB	CRB FCCRB	· 증속기부착유도발전기형식 · 발전기측 베어링은 증속기의 입력베어링 겸용
B형식		SRB TRB DTRB	SRB TRB CRB	· 증속기부착유도발전기형식 · 주축을 2개의 베어링으로 지지
C형식		TRB DTRB	TRB CRB	· 증속기가 없는 동기발전기 형식 · 외륜 회전

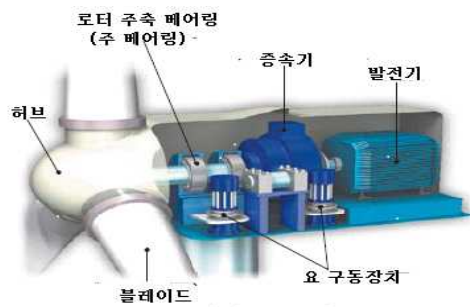
SRB: 자동조심 볼러 베어링, CRB: 원통 볼러 베어링, TRB: 단일 원추 볼러 베어링, DTRB: 복렬 원추 볼러 베어링, FCCRB: 총 볼러형 원통 볼러 베어링(full roller type cylindrical roller bearing)

자료: 참고문헌 4와 5에서 발췌 재구성

<그림 2-2> 주축과 구동계열의 구성 사례

<그림 2-2>에서 A형식은 현재 가장 많이 활용되고 있으며, 블레이드 측에 자동조심 롤러 베어링을, 발전기 측은 증속기의 입력 베어링이 겸용되도록 구성되었다. 증속기의 입력 베어링이 바람의 하중에 의한 축하중(axial load)을 받지 않는 설계로 이뤄졌기 때문에, 블레이드 측의 자동조심 롤러 베어링에 대한 축방향 이동량은 증속기 베어링보다 적게 할 필요가 있다.

<그림 2-3>은 <그림 2-2>에 나타낸 대표적인 3종류의 주축과 구동계열 중에서도 가장 일반적인 A형식을 수용하고 있는 나셀의 내부 구조를 나타내었다.



<그림 2-3> 주축과 구동계열의 구성 사례<sup>4</sup>

<그림 2-2>의 B형식은 블레이드와 증속기 사이에 2개의 베어링을 배치한 것이 특징이며, 블레이드로부터의 모멘트(moment)라든가 반경방향과 축방향의 힘을 분리함으로써, 블레이드의 부조화 외력이 증속기에 영향을 미치지 않도록 하고 있다. 또한 C형식은 베어링의 외측에 발전기 스테이터(stator)를 배치함으로써, 주 베어링으로 하여금 외륜 회전 이워지도록 한 특징이 있으며, 소형 풍차에 응용되고 있다.

풍력발전의 대형화 추세에 따라 2.5~5MW급의 풍차 구동계열과 주축용 베어링에는 접촉각 45도 정도의 급구배(severe gradient)를 가진 복수열의 테이퍼 롤러 베어링(taper roller bearing)을 사용하여 축 방향을 콤팩트화한 구조로 제조하는 사례도 많다. 이 경우는 베어링 외경이 2.5~3.5m이고, 이에 걸맞도록 주변 부품도 대형화되어 있다<sup>5</sup>.

현재 풍차 주축용 베어링의 선정에는 독일의 GL(Germanischer Lloyd) 규격치가 국제적인 기준으로 되어 있다. 또한 세계 각국에서 이 베어링과 관련된 심사나 검사가 필요할 경우에는 GL을 기본으로 한 자국의 기준을 제정하여 수행하는 사례가 많다. 한편 GL에는 베어링의 정적 안전율과 수명에 관련된 규격이 명시되어 있으며, 여기에는 풍차 주축용 베어링에 대해서는 20년의 설계수명을 요구하고 있다<sup>6</sup>.

증속기에 활용되는 기어의 설계에서는 종래의 AGMA 규격이 ANSI에 의해 원래 내용 그대로 받아 들여져 새로운 통합 규격으로 인정된 ANSI/AGMA 2101-C95에 의한 설계를 시행할 수 있다. 또한 풍차의 증속기와 관련된 IEC/ISO 규격은 ISO 6336으로 통일되었다<sup>6,10</sup>.



증속기 기어에 대한 안전율은 99%의 신뢰성을 바탕으로 하되, 내 피칭성(pitching resistance)을 위한 안전율은 1.25로 정하고 굽힘강도(bending strength)에 대한 최소의 안전율은 1.56으로 하였다. 이들 계수 자체는 종래의 AGMA 규격과 같다<sup>7</sup>.

AGMA 규격을 바탕으로 증속기 베어링의 간극을 선정하면 내륜과 외륜의 온도 차이에 의한 윤용상의 가이드라인을 ANSI 규격과 일치시킬 수 있다. 또한 증속기 기어에 관련된 요구 정밀도와 치면조도(roughness of tooth plane)도 이들 규격을 통하여 알아낼 수 있다.<sup>8,11</sup>

### 3. 풍차용 윤활제와 트라이볼로지

#### 3-1. 풍차용 윤활제의 사용 환경과 증속기용 윤활유

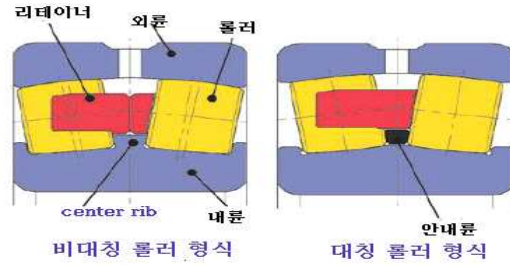
풍차용 윤활제가 사용되는 주요 기기로는 증속기[(step-up) gearbox], 주 베어링(로터 주축 베어링: main bearing), 발전기 베어링(generator bearing), 선회장치(slewing mechanism), 피치 제어장치(pitch control unit: 블레이드 베어링, 기어), 유압장치(hydraulic system) 등을 꼽을 수 있다. 이들 기기는 모두 타워 상부의 나셀(nacelle) 내부 혹은 로터헤드(rotor head)의 내부에 위치한다. 증속기와 유압장치에는 ISO에 규정된 윤활유 (각각 ISO VG 320, ISO VG 22~46)가 사용되며, 그 밖의 기기에는 그리스(grease)가 이용되고 있다.<sup>5,10,13</sup>

2MW급의 풍차 1대에 사용되는 윤활제는 모두 500~1,000kg 정도이며, 이의 절반 이상은 증속기에서 소요된다. 한편 풍차의 입지는 풍황을 우선으로 하기 때문에 원격지에 건설되는 경우도 많다. 또한 풍차의 기계 장치는 복잡한 하중변동을 받으며, 돌풍이나 벼락, 지진 등과 같은 자연환경에 의하여 예상 밖의 운전조건으로 바뀌는 경우가 많다.

트라이볼로지에서 가장 중요한 윤활제를 활용하는 대부분의 기기가 장착된 나셀은, 육상용 풍차라 할지라도 대부분 지상으로부터 높게 설치되어 있어서 보수와 일반적인 유지관리에 어려움이 따른다. 또한 풍차용 윤활제는 자연환경 중에도 장기간 동안 기계의 마모나 손상을 줄이거나 없도록 함으로써 시스템의 안정된 운전을 돕는 것이 중요한 물론, 윤활제 자신의 수명도 길 필요가 있다.

#### 3-2. 로터 주축 베어링과 피치 제어장치의 트라이볼로지

로터 주축 베어링(주 베어링)은 현재의 일반적인 풍차의 경우 15톤 이상의 로터 부문 중량을 지지하며, 바람의 변동에 따른 복잡한 하중 변화를 받는다. 주 베어링의 형식에는 자동조심 롤러 베어링(spherical roller bearing), 복열원추 롤러 베어링(double row tapered roller bearing), 원통 롤러 베어링(cylindrical roller bearing) 등이 주류를 이루지만, 이 중에서 정렬불량(misalignment)에 관한 보완 측면의 트라이볼로지에서 유리한 자동조심 롤러 베어링이 많이 활용된다.<sup>5,6</sup> <그림 3-1>은 트라이볼로지를 고려한 풍차용 자동조심 롤러 베어링의 일례를 나타내었다.



<그림 3-1> 풍차용 자동조심 롤러 베어링의 예<sup>4</sup>

한편 풍차의 대형화와 더불어 베어링의 외경은 점점 커지고 있는 추세를 보이고 있다 (6MW급 풍차의 베어링 외경은 3m를 넘음). 따라서 로터 주축 베어링용 그리스는 내하중 성이 우수한 고점도유(high viscous oil; 40℃에서 460mm<sup>2</sup>/s 정도)를 기저유(base oil)로 하는 극압 그리스(extreme pressure grease)를 사용하는 경우가 많다.<sup>8</sup>

주 베어링에는 바람의 변동이라든가 블레이드와 증속기 등의 미소 왕복동 때문에 부식이나 마모가 발생하는 프레팅 부식·마모(fretting corrosion-wear)가 생길 수 있다. ASTM(American Society for Testing and Materials: 미국재료시험협회)의 시험에서는 기저유의 동점도가 큰 그리스는 프레팅 마모가 큰 경향을 보였다. 따라서 프레팅 마모는 그리스의 첨가제에 의한 개선에는 한계가 있기 때문에 점증제(thickener)로서 리튬리튬 콤플렉스(lithium complex)를 사용하기도 한다.<sup>9</sup>

피치 제어장치는 블레이드의 비틀림각(twist angle)을 풍속에 맞도록 제어하여 안정적인 로터의 회전이 이뤄지도록 하는 시스템이다. 블레이드 베어링(피치 베어링이라고도 함)과 이를 작동시키는 기어 시스템으로 구성되며, 피치 제어장치는 로터헤드(rotor head)의 가운데에 있어서 외기 온도의 영향을 받기 쉽다.<sup>10,11</sup>

근년에는 운전 상황에 맞도록 실시간의 피치 제어를 시행함으로써, 바람을 효율적으로 받아들여 나셀의 진동을 억제하는 방식을 이용한다. 이 방식은 필연적으로 피치 제어의 동작 빈도수를 늘릴 수밖에 없으므로 그리스의 내구성도 이에 맞도록 하여야 한다. 피치 제어장치의 기본적인 작동원리는 메이커와 관계없이 거의 비슷하나, 그리스 기저유의 동점도(40℃)는 17~460mm<sup>2</sup>/s(cSt: centistokes)로서 폭이 넓으며, 이는 피치 제어장치의 메이커에 따라서 저온 특성, 내하중성, 윤활 장소의 유종 통일 등이 서로 다른 기준에 따라 선정되는 경향이 있기 때문이다.<sup>12</sup>

### 3-3. 발전기 베어링과 선회·유압장치의 트라이볼로지

발전기 베어링의 운전 중 온도는 발전에 따른 발열에 의하여 70~90℃에 달하며, 순간적으로는 120℃에 이르기도 한다. 따라서 여기에 사용되는 그리스에는 다른 윤활 장소에 비하여 고온에서의 장수명 특성이 요구되며, 베어링으로는 깊은 홈 볼베어링(deep groove ball bearing)이 활용되는 경우가 많다. 발전기 베어링 용도의 그리스는 동점도(40℃)가 60~150mm<sup>2</sup>/s(cSt)인 기저유에 리튬 콤플렉스 그리스(lithium complex grease), 요

소(urea) 등의 내열 증강제를 조합시킨 윤활제가 많이 이용된다. 발전기는 종류에 따라서 베어링의 전식(electrolytic corrosion)이 문제가 되는 경우가 있으며, 이에 대한 대책으로 세라믹 재료의 붙을 활용한 베어링이라든가 세라믹을 외륜에 용사(thermal spraying)한 베어링 등이 권장되고 있다.<sup>13</sup>

선회장치는 바람이 불어오는 방향에 로터의 정면이 향하도록 나셀의 각도를 조절하는 장치로서, 주로 선회 베어링과 구동용 기어 시스템으로 이뤄져 있다. 기어의 윤활성을 확보하기 위하여 극압제가 배합된 그리스를 사용한다.

유압장치는 풍차 각부의 작동용으로 이용되며, 윤활유로는 동점도(40℃)가 20~50mm<sup>2</sup>/s(cSt)이며 저온특성이 우수한 유압작동유(hydraulic oil)가 사용된다. 합성유 혹은 저온특성을 중요시하여 설계된 광물유 계통의 유압작동유가 이용된다.<sup>13,14</sup>

### 3-4. 풍차의 보수·관리에 대한 트라이볼로지

증속기 내부를 관찰하면 베어링의 전동면과 기어에 마모 분말에 의한 손상을 확인할 수 있다. 증속기의 베어링과 기어는 로터 주축과의 큰 토크에 의한 회전으로 마모 분말이 많이 발생한다. 이와 같은 현상 때문에 풍차의 보수·관리 측면에서의 트라이볼로지도 대단히 중요한 과제로 취급되고 있다. 겉보기에는 아무런 문제점이 없이 운전이 이뤄지고 있는 풍차일지라도 롤러 표면에는 마모 분말에 의한 긁힘 현상이 확인되기도 하고 윤활 중이었던 그리스에서도 금속성 마모 분말이 많이 존재하는 경우가 많다. 특히 조속기의 베어링이나 기어라든가, 로터 주축 베어링은 큰 토크에 의하여 회전되기 때문에 마모 분말 입자가 많이 함유된 윤활제를 사용한다 해도 순조롭게 운전되는 것처럼 보일 수 있다.<sup>13</sup>

풍차의 보수·관리에서는 윤활제의 분석 등에 의한 예방보전 기술도 중요하다. 풍차의 고장을 방지하여 설비 이용률을 높이기 위해서는 고성능의 윤활제 활용과 더불어 적절한 보수·관리를 시행함으로써, 이상의 유무를 조기에 발견하고 이에 대처하여야 한다. 따라서 마모 입자가 섞인 증속기유의 열화 과정에 따른 극압제의 변질과 마모에 의한 기능 저하와 함께, 마모 분말에 의한 운전 중의 베어링과 기어의 손상을 조기에 검지하는 것이 풍차의 보수·관리에 관한 트라이볼로지의 기본이라 할 수 있다.

## 4. 맺음말

세계 풍력발전 시장의 확대와 풍차의 대형화 추세에 의하여, 풍차의 구동계열 증속기와 제어기기를 비롯한 풍력발전 장치의 설계·개발에 종래보다 더욱 폭 넓고 발전된 최첨단 공학 분야의 지식이 응용되고 있다. 트라이볼로지도 이 기술의 발전과 응용에서 필수적 기능을 수행하고 있다.

풍차용 윤활제는 주로 타워 상부의 나셀 내부 혹은 로터 헤드 내부에 설치되어 있는 주요 기기에 사용되며, 2MW급의 풍차 1대에 사용되는 윤활제는 모두 500~1,000kg 정도로서, 이의 절반 이상은 증속기에 활용된다. 한편 증속기와 유압장치에는 ISO에 규정된



윤활유가 이용되며, 그 밖의 기기에는 ISO와 AGMA 지침서에서 규정하는 그리스가 활용되고 있다. 윤활제(윤활유, 그리스, 고체 윤활제 등)의 활용은 트라이볼로지의 필수적 요건이다.

우리나라의 국가규격(KS: Korea industrial Standard)에도 풍력발전과 트라이볼로지에 관련된 내용이 최근 많이 제정 공포(예를 들면, KS C IEC 61400-1, KS C IEC 61400-2, KS C IEC 61400-11, KS C IEC 61400-12, KS C IEC 61400-21 등)되어 있다. 이들 풍력발전 관련 KS는 모두 세계적 국제 규격인 AGMA, IEC, ISO 등의 지침에 준하여 최근에 제정·개정·등록·확인된 특징이 있으므로, 풍력발전의 설계와 운용 기술에 관한한 이에 적극 따를 필요가 있다.

풍력발전은 장래 경제와 고용을 지원하는 성장산업이 될 것이라 판단하여 각국은 적극적으로 도입을 확대하고 있다. 특히 유럽, 미국, 중국, 일본 등은 장기적으로 해상 풍력발전의 비율을 크게 늘릴 계획이다. 트라이볼로지는 마찰을 기본으로 하여 이에 따른 마모와 윤활에 관한 과학기술 영역을 다루는 학문이다. 풍력발전 장치에는 어느 기계 혹은 플랜트보다 베어링, 기어 등 다양한 마찰 부분이 존재하며, 이들의 상대운동 또한 어느 기계 혹은 플랜트보다 가혹하게 이뤄진다. 따라서 풍력발전의 성장에는 최신의 발전된 트라이볼로지가 필수적으로 접목되어야 한다.

참고로 본고에서 언급한 풍력발전 트라이볼로지 관련 국제 규격과 KS의 내용을 <표 4-1>에 요약하여 나타내었다.

<표 4-1> 본고 내용의 풍력발전 트라이볼로지 관련 국제 규격과 KS의 요약

규격명	규격 번호	규격 요약
AGMA	9005-02	산업용 기어의 윤활에 관한 세부 기준
DIN	51517 Part III	윤활제의 청정, 윤활, 보존에 관한 최저 요구기준
ANSI/AGMA	2101-C95	임블루트 평기어와 헬리컬기어의 이에 대한 기본 정격 설계·계측
ISO	6336	평기어와 헬리컬기어의 부하 용량 계산방법
	VG 320,	동점도의 범위가 288~352mm <sup>2</sup> /s(cSt)(40℃)인 산업윤활유 기준
	VG 22~46	동점도의 범위가 19.8~50.6mm <sup>2</sup> /s(cSt)(40℃)인 산업윤활유 기준
KS	C IEC 61400-1	풍력발전시스템의 안전 요구 사항
	C IEC 61400-2	풍력발전시스템 설계·설치·운전의 안전, 품질보증, 완전성 확보
	C IEC 61400-11	풍차의 소음 측정 대처 방법
	C IEC 61400-12	풍력발전의 출력 성능 측정 방법
	C IEC 61400-21	계통 연계형 풍력발전의 출력품질특성에 대한 측정과 평가

<참고문헌>

1. "Tribology", Wikipedia, the free encyclopedia English edition, 2017
2. Carlos M.C.G. Fernandes, Ramiro C. Martins, Jorge H.O. Seabra, "Friction torque of thrust ball bearings lubricated with wind turbine gear oils", Tribology International, 58(Feb), 2013, pp.47~54

3. Carlos M.C.G. Fernandes, Ramiro C. Martins, Jorge H.O. Seabra, “Friction torque of cylindrical roller thrust bearings lubricated with wind turbine gear oils”, *Tribology International*, 59(Mar), 2013, pp.121~128
4. 八木壯一, 二之湯伸幸, “風力發電機用軸受の技術動向”, *NTN Technical Review*, (76), 2008, pp.111~117
5. 東崎康嘉, “風力發電裝置用増速機とトライボロジー”, *トライボロジスト*, 56(6), 2011, pp.340~346
6. 安達丈博, “風力發電裝置のドライブトレーンと軸受”, *トライボロジスト(日本)*, 56(6), 2011, pp.347~353
7. 藤浪行敏, 岡田太平, “風車 増速機用 高性能 潤滑油の開発”, *風力エネルギー*, 33(4), 2009, pp.67~70
8. I. Tzanakis, M. Hadfield, B. Thomas, S.M. Noya, S. Austen, “Future perspectives on sustainable tribology”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 2012, pp.4126~4140
9. W.H. Roberts, Rongjuan Sui, “Some current trends in tribology in the UK and Europe”, *Tribology International*, 19(6), 1986, pp.295~311
10. <http://www.tribology.jp/conference/sentan/sentan59.html>, 日本トライボロジー學會 “先端講座: 風力發電を支えるトライボロジー”, 風力エネルギー利用シンポジウム, 34, 2012, pp.307~310
11. 東崎 康嘉, “小特集-未來を開く潤滑劑-風力發電裝置のトライボロジー”, *ペトロテック*, 35(3), 2012, pp.168~175
12. 松信 隆, “大型化する風車とトライボロジー”, *BMT(bearing & motion tech)*, 4(Jan), 2017, pp.7~13
13. 藤浪行敏, “風力發電を支えるトライボロジー- 風力發電裝置用潤滑劑”, *トライボロジスト*, 56(6), 2011, pp.354~359
14. Marques P.M., Fernandes C.M., Martins R.C., Seabra J.H., “Efficiency of a gearbox lubricated with wind turbine gear oils”, *Tribology International*, 71(Mar), 2014, pp.7~16

#### <관련기술목록>

1. Hamilton A., Van Rensselar J., “Detailed State of the Art Review for the Different Online/Inline Oil Analysis Techniques in Context of Wind Turbine Gearboxes”, *Journal of tribology*, 133(4), 2011, pp.44~51
2. Carlos M.C.G. Fernandes, Pedro M.T. Marques, Ramiro C. Martins, Jorge H.O. Seabra, “Gearbox power loss. Part I: Losses in rolling bearings”, *Tribology*

- International*, 88(Aug), 2015, pp.298~308
3. Mengyan Nie, Ling Wang, “Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies for Wind Turbine Gearbox”, *Procedia CIRP*, 11, 2013, pp.287~290
  4. Shu-Xin Li, Peng-Cheng Zhao, Yun-Shuai Su, Shu-Rong Yu, “Investigation of the root cause of subsurface damage in wind turbine gearbox bearings”, *Tribology International*, 102(Oct), 2016, pp.546~554
  5. Mendibil Z. E., Galindez J. A., Sevilla P., Pombo R. I., Fernandez S. A., Villani, J., Goethals H., “Tribo-mechanical Characterisation of Wear Behaviour for Manufacturing of Wind Turbine Gearbox Structural Parts”, *Procedia engineering*, 132, 2015, pp.918~925
  6. Van Rensselar J., “Extending wind turbine gearbox life with lubricants”, *Tribology & lubrication technology*, 69(5), 2013, pp.40~49
  7. Shuangwen S., “Monitoring of Wind Turbine Gearbox Condition through Oil and Wear Debris Analysis: A Full-Scale Testing Perspective”, *Tribology transactions*, 59(1), 2016, pp.149~162
  8. Kotzalas M. N., Doll G. L., “Tribological advancements for reliable wind turbine performance”, *Green tribology*, 2010, pp.4829~4850
  9. Errichello R., Budny R., Eckert R., “Investigations of Bearing Failures Associated with White Etching Areas (WEAs) in Wind Turbine Gearboxes”, *Tribology transaction*, 56(6), 2013, pp.69~76
  10. 小林一博, “風力發電機用軸受および軸受用鋼”, 山陽特殊製鋼技報(Sanyo technical report), 13(1), 2006, pp.73~76

이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.