

# 초대형 풍력발전기용 Yaw System의 기술동향

이용범 | 한국기계연구원

## [ 요약문 ]

전 세계적으로 대체에너지 개발이 활발해지면서 국내에서도 풍력발전에 대한 관심이 높아지고 있다. 풍력발전은 신재생에너지 중에서 가장 상업화에 앞서 있으며 급속한 시장 확대와 산업의 발전을 가져온 분야이다.

1990년대에 개발되어 설치 운용되고 있는 약 20만대의 0.5 MW ~3 MW급 중대형 풍력발전기가 세계 여러 곳에서 상업발전을 하고 있으며, 국내에서는 제주도 행원풍력발전단지에 1998년부터 2003년 4월까지 총 15기(약 203억 원 투입)의 풍력 발전기가 도입되어 세워져 있으며, 1998년 8월에 600kW 풍력발전기 1·2호기의 상업운전을 최초로 시작하였다.

최근 풍력발전기의 설치 환경이 육상에서 해상으로 변하면서 5 MW급 초대형 풍력발전기의 상용화가 시도되고 있으며 수요 또한 급증하고 있다.

본고에서는 전량 수입에 의존하고 있는 풍력발전기의 핵심 부품인 Yaw system (yaw bearing & drive)의 국내외 시장 동향과 초대형 요 베어링 및 고 강성 유성기어 감속기의 특성을 분석하였으며, 특히 전략적 국산화 개발필요성을 강조하였다.

## 1. 서론

풍력발전기용 Yaw system은 풍력발전기의 핵심부품으로 그림 1과 같이 나셀과 타워 사이에 위치하여 매우 큰 응력하중을 받음과 동시에 로터(rotor)가 바람방향을 향하도록 나셀(nacelle)을 회전시키는 장치이다.

현재 해상풍력 발전기용으로 개발을 활성화 하고 있는 초대형(5MW급) Yaw system의 구성은 그림 2와 같이 지

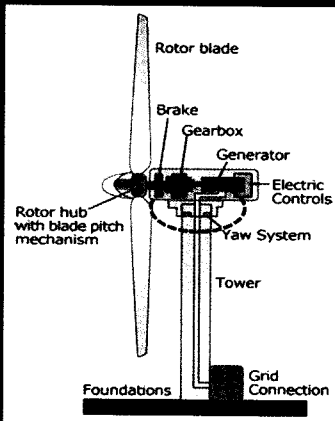


그림 1. 풍력발전기의 구조도

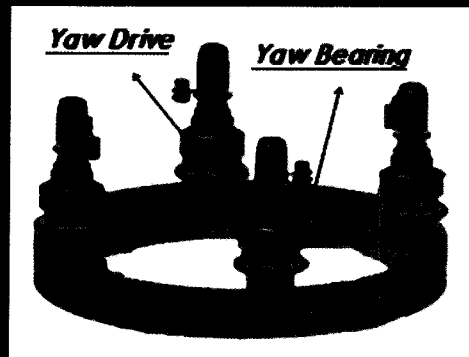
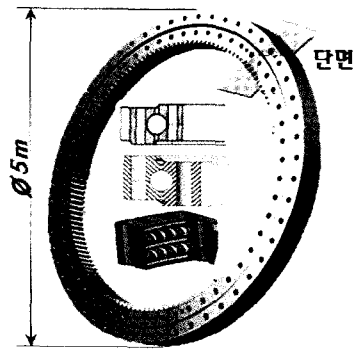


그림 2. Yaw system의 구성도



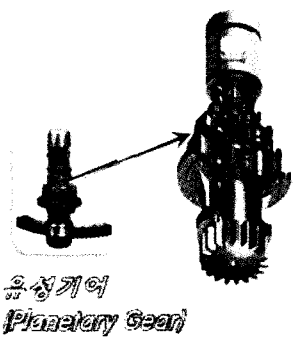
름이 약 5m이고 1개의 중량이 약 8ton인 초대형 요 베어링(yaw bearing)과 감속비가 약 2000 : 1 인 고 감속 고 강성 유성기어 감속기(yaw drive) 5~6개를 병렬로 설치한다.

5MW급 Yaw bearing은 나셀과 타워 사이에 위치하여 바람에 의한 블레이드에 작용되는 매우 큰 Moment(최대 30MN-m)와 자중을 포함한 동하중에 의한 Thrust force(최대 4MN)를 받음과 동시에 회전하는데 그림 3과 같이 단열 혹은 복열 Bearing 형식이 있다. 현재 국내에서 개발을 추진 중에 있는 제품의 구체적 사양을 검토하면, 베어링 형식은 복열 볼 베어링이고, 외경 4800mm, 내경 4100mm, 그리고 폭 260mm의 크기이며, 지름이 65mm인 고강도 Steel ball 360개를 사용한다. 또한 링 기어의 모듈(module)은 30mm 이고, 잇수(number of teeth)는 137개이며, 한 개의 중량은 7833kg으로 초대형 베어링이다.



- Bearing Type : two rows 기준
- Size : 4800\*4100\*260 (mm)
- Ball Size : 65 (mm), (360 EA)
- Module of Gear : 30 (mm)
- Number of teeth : 137
- Weight : 7833 kg (약 8ton)

그림 3. 5MW풍력 발전기용 Yaw bearing



유성기어  
Planetary Gear

- Rated output speed : 0.5 rpm
- Rated output torque : 100 kNm 이상
- Max. allowable torque : 200 kNm
- Gear ratio : 1/(1000~2000)
- Life : B<sub>10</sub> 20 year 이상

그림 4. 5MW풍력 발전기용 Yaw drive

Yaw drive는 풍력발전기 나셀을 회전시키는 구동기(drive)로서 전기모터 또는 유압모터를 사용하며, 고속 저 토크의 출력을 저속 고 토크로 변환하기 위하여 그림 4와 같이 최대 2000 : 1 큰 감속비를 같은 고 강성 유성기어박스를 사용하여 큰 토크를 발생시켜 로터가 바람의 직각방향을 향하도록 나셀을 회전시킨다. 일반적으로 콤팩트한 공간에서 큰 토크의 발생과 Yaw bearing의 링 기어에 하중을 분포시키기 위하여 5MW급의 경우 5~6개의 Yaw drive를 병렬로 설치하여 사용한다. 현재 5MW급 Yaw drive의 사양은 정격회전수가 0.5rpm 이하이고, 정격 출력 토크는 100kNm 이상이며, 최대 허용 토크(max. allowable torque)는 200 kNm이상으로 200%의 안전계수를 요구 하고 있다.

국내의 Yaw bearing 경우는 S사에서 2.5MW 이하의 베어링을 생산하고, T사 및 A사에서는 3MW이하의 정부기술과제를 수행하고 있으나 아직 시제품 제작단계이며, 전문 제작설비 미확보로 양산은 불가능한 수준이다. 또한 Yaw drive의 경우는 S사와 H사에서 정부기술과제를 수행하고 있으며 시제품 제작수준에 있고, W사의 경우 독자적인 투자를 하여 시제품을 제작한 수준이다.

따라서 초대형 풍력발전기용 Yaw system은 전량 수입에 의존하고 있는데, Yaw bearing의 경우는 독일의 Rothe Erde사, FAG사 스웨덴의 SKF사 및 체코슬로바키아의 PSL사 등에서 주로 공급하고 있으며, 고 강성 Yaw drive의 경우는 이태리 Bonfiglioli사, 독일의 Rexroth사 및 일본의 Nabtesco사 등에서 전 세계시장에 공급을 하고 있다.

Yaw system은 풍력발전기의 전체 소요예산의 약 1.25%로 가격비중은 낮지만 고장이 발생하여 정비를 하기위해서는 300~500ton 규모의 나셀을 해체해야하는 어려움 등으로 정비가 용의하지 못해서 매우 높은 신뢰성 확보(신뢰 수준 95%에서 B10 20년 이상 보증)를 요구 받고 있다.

특히 Bearing 개발을 해외에서 할 경우, 국내에서 개발한 풍력발전시스템의 기술적 Data가 Bearing 회사에 공급되어야 함으로서 많은 예산과 시간을 들여 획득한 국내기술이 외국으로 유출되는 전략적문제가 발생하는 제품이다.

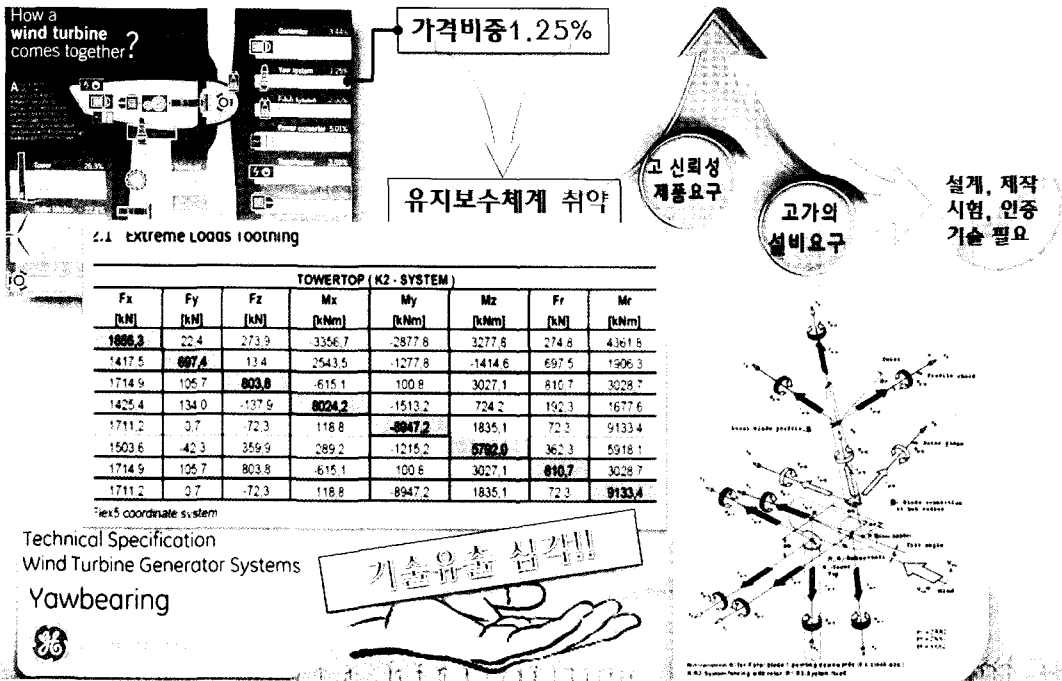


그림 5. 전략적 필요성 및 핵심기술 유출

현재 풍력발전기는 설치장소가 육상에서 해상으로 이동하고 있으며, 효율성을 높이기위해서 5MW급 이상으로 대형화 되고 있고, 국내수요의 전량을 매우 높은 가격으로 수입하여 사용해야하는 실정으로 국내생산 풍력발전시스템의 대외 경쟁력강화와 수입대체는 물론 고 부가가치 제품의 수출을 위해서는 국산화 개발이 절실하게 요구된다.

## 2. Yaw System의 국내외 기술 및 시장 현황

### 2.1 국내·외 기술 현황

#### 2.1.1 국내 기술 동향 및 수준

대용량(5MW급) 해상발전기풍력용 Yaw bearing & drive의 동시 제조기술개발 및 시험평가기술은 국내에는 경험이 전무 하고, 대형풍력발전기 Yaw system분야는 설계기술, 응력해석기술, 저온 고 응력소재개발, 열처리 및 표면처리 기술, 치면 Lead crowning설계기술, Force balance형 감속기 Mechanism설계기술, HRc 55이상 Hard cutting기술, Magnet chucking기술, 수명향상을 위한 베어링 열압기술 등의 설계 및 제작기술이 요구 된다.

풍력발전기의 핵심부품들인 Yaw bearing 및 drive 등은 20년 이상의 수명을 보증해야 하는 것들로서 성능, 내환경성 및 가속수명평가 등을 통한 신뢰성확보 기술과 국내 공인인증 체계가 미흡한 상태이고, 국내 여러 기업에서 풍



력단조 소재의 경우 세계시장을 선도하며 기술과 가격 경쟁력 우위를 확보하고 있으나, 대형 링 기어, Yaw bearing 및 고 강성 유성기어감속기 등의 경우, 기술기반 및 제조 환경이 취약한 실정이며, 육상풍력발전의 기술력은 선진국 대비 80%, 해상풍력발전은 60%수준으로 3~10년 이상의 기술격차가 존재한다.

전반적으로 대형 Yaw bearing 및 drive 등의 핵심부품은 기술개발 측면에서 국산화가 미미한 실정이고, 풍력발전 기술에 대한 시험, 평가인증 등의 관련기준 및 규격이 확보되어 있지 않으며, 관련 핵심기술의 부족으로 수입품을 사용하고 있다.

시스템 하중해석기술은 선진국에 비해 해석기술이 부족하고, 자체 개발한 시스템에 대한 운용 이력의 축적과 경험이 부족한 수준으로 국내주요 풍력발전업체들은 750kW, 2MW 시스템 위주 기술개발과 실증, 상업운전실적 확보를 통한 시장진입단계에 있으며, 대형 해상풍력발전용 3MW는 실증단계, 5MW형 시스템은 기술개발단계에 있다. 국내 중대형 풍력시스템산업 관련 참여기업은 시공업체를 제외한 시스템제작, 설계, 풍력발전 부품 생산, 단지개발 기업 등 50여개 업체가 있다.

Yaw bearing의 경우 국내업체 중에서는 S사가 1.5~3MW급 생산기술을 확보하고 양산 중이나 원천 설계기술 및 신뢰성평가 기술을 확보 하지 못한 상태로 국내의 대규모 해상 풍력발전단지 조성 및 해외의 급격한 요구에 부응하여, 핵심요소부품의 국산화가 절실한 시점에 풍력발전기의 핵심요소 중 하나인 Yaw system에 대한 기술개발이 시급히 요구된 분야이다.

### 2.1.2 국외 기술 동향 및 수준

국의 해상풍력발전기 기술 동향 및 수준은 현재까지의 풍력발전 시장은 유럽의 주요 8개국이 주도하고 있으나 향후 미국과 중국 시장이 대규모로 형성될 전망이다. 이 두 나라는 국가적 차원으로 해상풍력 발전단지 개발을 추진 중에 있으며, 독일, 덴마크 등 국가별로 검토 하면 다음과 같다.

독일의 E112 4.5MW 풍력발전시스템 개발을 완료하였으며, Repower는 5MW 풍력발전기 상용화개발 사업을 완료하고, 벨기에에 5MW급 60기(300MW)를 해상풍력 단지에 건설 중이며, 덴마크의 Vestas는 V120 4.5MW Prototype test를 완료 하였으며, Siemens는 SWT 3.6MW 107모델을 Up-scaling 중이고, 미국의 GE Wind는

표 1. 해상용 풍력 발전기 시스템 현황

제조사	국가	해상용 풍력발전 시스템				
		4MW급	5MW급	6MW급	7MW급	8MW급 이상
REpower	독일		5MW	6MW		
Multibird	프랑스		5MW			
Enercon	독일	4.5MW		6MW		
Bard	독일		5.2MW		7MW	
Vestas	덴마크	4.5MW				
GE Wind	미국		5MW			8MW
Gamesa	스페인	4.5MW				
Siemens	독일	3.6MW를 Upscaling 중				
Clipper	미국		5MW			
Darwind	네덜란드	4.7MW				
Mitsubishi	일본			6MW		
Sinovel	중국		5MW			
기타	Upwind					8~10MW
	ENC					10&20MW

DOE와 협력하여 5~7MW 해상용 풍력발전기를 개발 중이며, 8 MW 해상 풍력발전시스템용 동력전달장치 설계를 진행 중이고, Clipper는 2010년에 5MW 해상용 풍력 발전시스템 설계 완료예정이다.

향후 풍력발전산업은 표 1과 같이 육상에서 해상으로 이동과 함께 5MW급이 주력이 될 것으로 예상되며, 7MW 이상급 개발이 진행 중이다.

풍력발전기의 핵심 부품인 초대형 Yaw system의 주요생산기업은 베어링분야에서 독일의 Rothe Erde사, FAG사 스웨덴의 SKF사 및 체코슬로바키아의 PSL사 등이 주로 공급하고 있으며, 고 강성 Yaw drive의 경우는 이태리 Bonfiglioli사, 독일의 Rexroth사 및 일본의 Nabtesco사 등에서 전 세계시장에 공급을 하고 있다. 이와 같이 선진국 4~5개 기업들이 독과점을 형성하여 수요가 공급을 크게 초과 하고 있는 제품이다.

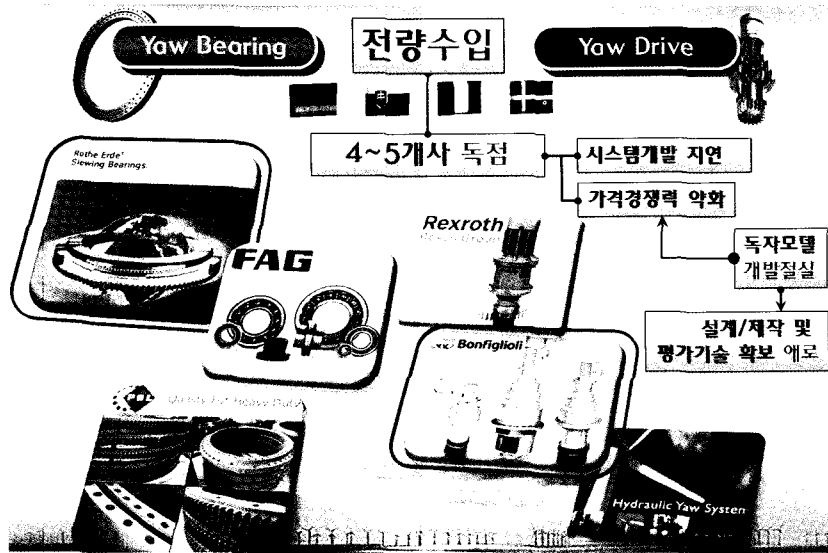


그림 6. 선진국 Yaw bearing & drive 현황

## 2.2 국내 · 외 시장 현황

NREL (national renewable energy laboratory, 2010)에 따르면, 해상 풍력발전기는 덴마크 (project명 : vindeby)에서 1991년에 최초로 설치한 이래, 2010년까지 유럽중심으로 약 830개가 설치되어있다.

프랑스는 10여개 지역에 3GW (600여기) 규모 해상풍력단지 건설계획을 가지고 있으며, 2020년까지 200억유로 투자하여, 6GW 규모를 설치할 계획이다. 영국은 2020년까지 32GW 건설계획을 가지고 있으며, 현재 국의 해상풍력 발전기는 2.6GW가 건설 중이고, 승인된 계획은 24GW이며, 세계 각국이 준비하고 있는 규모는 총 154GW 수준이다.

2010년 현재 국내의 풍력발전기 설비용량은 약 0.38 GW (세계시장의 0.2%)에 불과하며 모두 육상에 설치되어 있다. 국내 해상풍력로드맵, 실증단지사업 및 풍력허브구축 사업 등 해상풍력 추진을 위한 움직임이 정부주도로 가시화되고 있

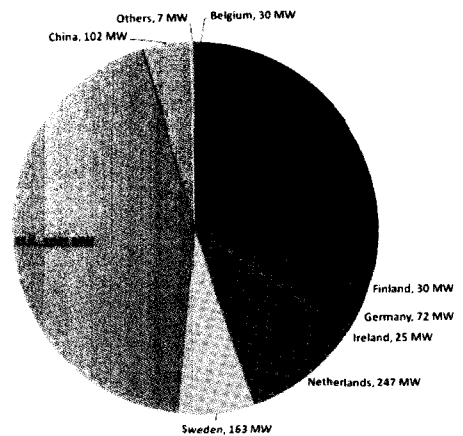


그림 7. 해상 풍력발전 설치 현황 (NREL, 2010)



으며 2019년까지 세계 3대 해상풍력강국으로 도약하기 위해 민관합동으로 총 9.2조 원을 투자하여 서남해안에 2.5 GW규모의 대규모 해상풍력단지가 2013년까지 부안 영광지역 해상에 100MW (5MW급 20기) 국산 해상 풍력발전 실증단지를 조성한 후, 2016년까지 900MW (5MW급 180기) 시범단지로 확대하고, 2019년까지 1.5GW (5MW급 300기) 해상풍력 발전단지를 추가 건설키로 하였으며 단계적으로 조성되고 있다.

표 2. 국가별 해상 풍력시장 전망 및 목표 (BTM, 2009)

Country	Plans/Targets(MW)	Timeframe (Year)	Source
덴마크	5,000	2025	Energistyrelsen(2007)
네덜란드	6,000	2020	Ministerie van Economische Zaken(2002)
영국	8,700	2018	Crown Estate(2030)
프랑스	4,000	2015	Ministère de l'économie des finances et de l'industrie(2006)
독일	25,000	2030	Bundesministerium
스페인	8,000	2030	Ministerio de Industria(2005)
이탈리아	2,000	2020	Presidenza del Consiglio Del Ministri(2007)
미국	5,300	2030	U.S Department of Energy(2008)
중국	1,000	2020	China the National offshore Oil Corporation(2008)

(1) 국내·외 시장 규모 및 수출·입 현황

(단위 : 백만 원)

년도	2011년	2015년	2017년
세계 시장 규모	-	50,500	147,600
한국 시장 규모	-	27,700	55,000

(2) 국내·외 주요 수요처 현황

수요처	국명	수요량	2017년
VESTAS	DENMARK	111 EA	Tower 111기
SIMENS	GARMANY	55 EA	Tower 55기
REPOWER	GARMANY	6 EA	Tower 6기

### 3. Yaw System의 국산화 개발의 필요성

전량 수입종인 Yaw system의 수급 문제는 국내풍력발전기업체의 개발기간지연 및 국제가격 경쟁력 약화의 주요 원인이 되며, 설계, 제작 및 시험평가 기술의 배타성에 의해 Outsourcing이 극히 제한적이어서 관련기술의 독자 개발이 불가피하며, 국내기업에서 소재 및 베어링 등 소형 단품만을 생산하여 수출하고 있어, Bearing, Drive 및 시험평가 기술에서 세계 최고수준의 기관에 비해 그림 8과 같이 기술적 격차가 높아, 국제경쟁력 있는 대용량의 풍력발전시스템의 국산화 개발을 위해서는 해외 선진사와 동등한 수준으로 기술개발이 요구된다.

세계최고 수준의 기술개발을 위해서는 관련기술 저변확대와 기존인프라 활용하여, 풍력발전기용 Yaw system의 그림 9와 같이 극한 하중의 경우(extreme load case)와 피로 하중의 경우(fatigue load case)에 대하여 해석, 설계, 구조해석, 제작 및 신뢰성 검증에 필요한 기술 확보를 이룩하여 대용량 고효율 풍력발전기의 개발에 적용할 수 있다.

대용량 풍력 발전기용 Yaw bearing & drive의 초대형 링 단조기술, 기어 가공기술 등은 세계수준에 근접한 상태

평가 및 주요성능 항목	단위	세계 최고 수준 (Spec)		현재 국내 수준
		성능 수준	보유국 / 기업	
1. Bearing Life	year	20		8
2. Bearing 설계기술	%	100		60
3. 대형 링 소재제조기술	%	100		85
4. 기어/베어링 가공기술	%	100		40
5. 초대형 Bearing Test Mechanism 설계/제작기술	%	100		40
6. Bearing 시험평가기술	%	100		40
7. Drive Life	year	20		12
8. Drive Rated Output Speed 설계기술	rpm	0.5		8.5
9. Drive Rated Output Torque 설계기술	kNm	100 이상		65
10. Max. Allowable Torque 고 강성 설계기술	kNm	200 이상		120
11. 성능시험	%	100		40
12. 내환경성 시험	%	100		30
13. 가속 수명 시험	%	100		10

그림 8. Yaw bearing & drive 시험평가 기술의 국내수준

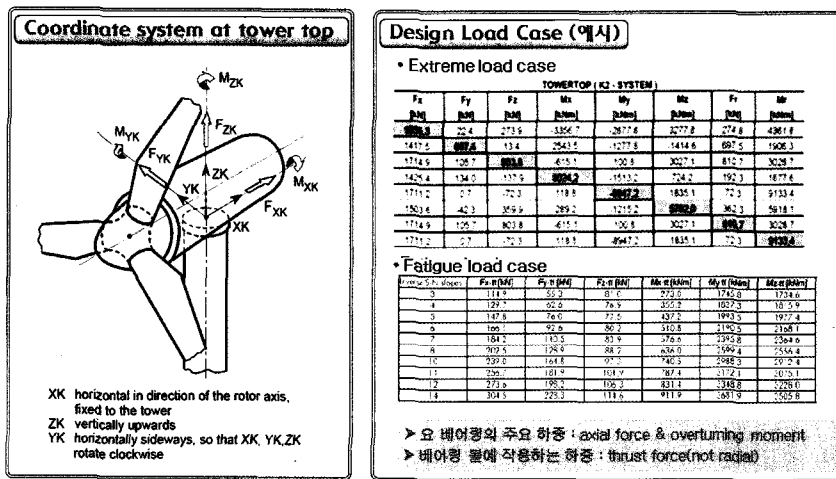


그림 9. Yaw system에 작용되는 하중해석

로 설계 및 시험기술개발 성공되면 즉시시장을 확보할 수 있어, 풍력발전기의 핵심요소 부품 중에 상업화가 가장 확실한 분야이다.

Yaw bearing test mechanism 구축을 위해 Yaw bearing에 작용 하는 하중을 분석하면 극한하중(extreme load)과 피로하중(fatigue load)으로 다음과 같이 분석된다. 극한하중시험은 극한설계하중조건으로 수행하는 것으로 Yaw bearing 시험 체의 중심에 Fx, Fy, Fz, Mx, My 등 5개 하중성분 부가하여 시험하중은 하중성분이 최대 및 최소 값을 갖는 16개 Load case의 조합하중(combination load)조건으로 적용된다.

피로하중시험은 사용기간 중 Yaw bearing은 불규칙적인 다양한 크기의 변동하중을 받도록 하는 시험으로 변동하중은 하중형태와 크기 및 작용시간(또는 사이클 수)에 대한 하중분석을 통하여 부하 사이클(duty cycle) 또는 하중 스펙트럼(load spectrum)을 만들며, 부하하중 Pi에 대한 부하 사이클 수 Li에 대하여 Goodman선도를 이용하여 평균응력을 고려하고, Palmgren-Miner의 선형누적손상 법을 적용하면 손상등가하중(damage equivalent load, DEL)을 구할 수 있다.



가속수명시험은 기본 피로하중조건으로 시험을 수행하기 위해서는 상당히 많은 시간이 소요되므로 가속 수명시험 실시하여 Yaw bearing이 축 방향하중 (Fa), 반경방향하중 (Fr) 및 모멘트하중을 받을 경우, 피로수명은 NREL DG03 (2009)에 따른다.

초대형 (5MW급) Yaw bearing의 경우 Moment (30MN-m) 이상과 Thrust force (4MN) 이상을 구현 할 수 있는 그림 10과 같은 개념의 Test mechanism을 구축하여 성능시험 및 가속수명시험을 실시함으로써 제품의 고 신뢰성확보가 가능할 것으로 예측된다.

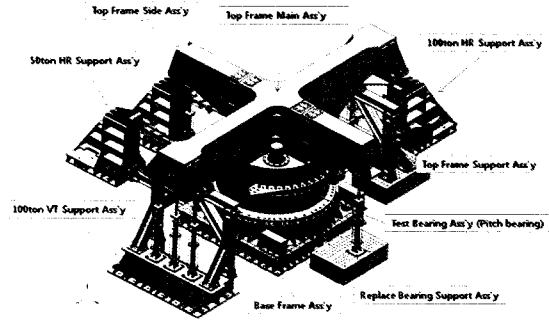


그림 10. Yaw bearing test mechanism의 개념도

## 4. 결 론

최근 고유가시대를 맞이하여 전 세계적으로 신재생에너지개발 및 대체에너지개발 등에 관심이 고조되고, 국내에서는 국가적 차원의 대규모 해상풍력단지개발 등을 추진되고 있어, 향후 국내의 풍력발전기기 제작업체의 시장진입 가능성이 높을 것으로 판단된다.

풍력발전시스템 및 핵심기기들은 20년 이상 수명을 보증하여야 함으로 매우 높은 수준의 신뢰성을 입증하여야만 한다. 그러나 국내 풍력발전시스템의 실증기간이 매우 짧아서 현실적으로는 신뢰성입증이 어려운 상황이다.

따라서, 선진국 4~6개사가 독과점을 형성하여 전 풍력세계시장에 공급을 하고 있는 고가의 핵심모듈인 Yaw system (초대형 베어링, 고 강성 고 감속 유성기어박스 등)의 국산화개발을 선행한다면, 큰 신규시장 확보는 물론 고 부가가치 창출이 가능 할 것으로 판단되어서, 국가연구개발 선정의 정책적 우선순위가 필요하다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] 에너지 관리공단, 신재생에너지 백서, 2010
- [2] 에너지 관리공단 신재생 에너지 센터, 신재생 에너지 R&D 전략 2030 풍력, 2008
- [3] ISO, ISO 281-2007 (E), "Rolling Bearings - Dynamic load ratings and rating life", 2007
- [4] GWEC, "Global wind energy outlook 2010," 2010
- [5] Rothe Erde, "Kugeldreh Verbindung Ball Bearing Slewing Ring", 2010



이 용 범

· 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 책임연구원  
· 관심분야 : 신재생에너지, 건설기계, 유압시스템  
· E-mail : lyb662@kimm.re.kr