



## 중대형 풍력터빈의 주요재료

황병선, 엄종택, 이진우 | 재료연구소

### [ 요약문 ]

본 고는 중대형 풍력터빈의 핵심부품인 로터 블레이드, 대형베어링, 증속기, 발전기, 전력변환장치, 타워 등에 사용되는 주요재료에 대한 설명과 제조방법 및 평가방법 등에 대해 다루어 졌다. 일반적으로 풍력터빈을 구성하는 소재는 금속소재와 비금속소재로 구분되며, 비금속소재는 대부분 복합재료로서 풍력 블레이드에 적용되고 있다. 현재 육상용 풍력터빈의 한계를 극복하기 위한 대안으로, 해상용 풍력터빈에 대한 관심이 집중되고 있으며, 이러한 극지 해상의 대형 시스템에 활용되고 있는 금속소재의 경우, 고강도, 저온인성, 내피로, 내식성 등이 우수한 강재를 요구하기에 이르렀다. 이에 따라, 여러 소재 측면의 요구를 충족하기 위한 소재설계의 비중이 점차 고조되고 있으며, 이러한 시점에 본 고를 통해 풍력터빈에 활용되고 있는 소재의 전반적인 내용과 관련 소재부품의 제조 및 평가방법 등의 이해를 돕고자 한다.

## 1. 서 론

풍력발전기(혹은 풍력터빈, wind turbine)용 핵심부품은 로터블레이드(rotor blade), 대형베어링, 증속기(gearbox), 발전기(generator), 전력변환장치, 타워 등이다. 전력변환장치나 타워는 동적하중을 감당하는 구조물은 아니지만 대개의 핵심부품들은 대형구조물인 동시에 작동하는 회전구조물이다. 상기 핵심부품 이외에 그림 1에서 보는 바와 같이 스피너(spinner), 로터허브(rotor hub), 나셀(nacelle), 주프레임(main frame), 유압-냉각-윤활시스템, 브레이크, 커플링 등이 2차 부품으로 분류되고 2MW급 풍력터빈을 예로 들면 약 8000 여개의 개별 부품으로 구성되어 있다. 2MW급 풍력터빈의 경우, 블레이드의 무게는 개당 6톤 이상, 길이는 40m 내외이다. 타워는 하부 직경이 4m, 높이는 80 ~ 90m, 무게는 200ton에 이른다. 허브, 주축, 증속기, 발전기 등을 담고 있는 나셀의 무게는 70ton 정도이다.

풍력터빈을 구성하는 소재는 일반적인 기계시스템과 같이 금속소재와 비금속소재로 이루어져 있다. 비금속소재로서 크기와 무게면에서 풍력터빈을 구성하는 특징적인 재료가 복합재료이다. 특히 풍력터빈용 블레이드, 노즈콘, 나셀케이스 등은 초대형화, 경량화 및 고신뢰성을 만족하는 특성을 지녀야하며, 대형 부품의 개발을 위해서는 풍력터빈이 처하는 환경에서 오는 다양한 정적·동적인 하중에 대응하는 최적화 설계 기법과 맞춤형 소재 기술, 내구성 시험기술 등이 중요하다.

풍력터빈용 금속소재는 450만톤의 타워용 강재와 45만톤 정도의 베어링강재가 매년 요구되고 있고, 소요 강재량 중에서 극지 해상의 대형 시스템에서는 고강도, 저온인성, 내피로, 내식성이 우수한 강재가 필요하기에 이르렀다<sup>[1]</sup>. 또한 전통적 금속소재로서 가격의 20%이상을 차지하는 타워 무게는 지반 위 터빈의 무게 중 60%정도를 차지하기 때문에 고도로 정련된 경량, 고강도 재료가 사용되고 있다<sup>[2-3]</sup>. 본 절에서는 주요 풍력발전용 소재부품에 대해 살펴보고, 이러한 소재부품의 제조방법과 여러 파괴 및 비파괴검사 등에 대하여 소개하고자 한다.



독자의 이해를 돕기 위하여 터빈을 구성하는 개략적인 주요 재료의 무게비를 표 1에 요약하였다<sup>(4)</sup>.

표 1. 중대형 풍력터빈의 구성 소재의 비율(무게비)

Components	Permanent Magnetic Materials	Pre-stressed Concrete	Steel	Aluminum	Copper	GRP
Rotor Hub			100			
Blades			5	2		95
Gearbox			98			
Generator	small		63		35	
Frame & Machinery Shell			84	9	4	3
Tower		2	98			

## 2. 주요 풍력터빈용 소재부품

풍력터빈 블레이드는 대형기계의 기어와 같이 기계부품으로 인식되어야 한다. 소재의 측면과 기계부품으로써의 기능 측면을 고려해야 하는데, 정적 및 동적하중을 감당하는 구조물 설계기술과 경험에서 오는 노하우 등이 기술의 요체를 이루고 있다.

소재 측면에서 복합재료 블레이드의 경우, 유리섬유와 열경화성 수지인 에폭시(epoxy)와 폴리에스터(polyester) 수지를 사용하고 있으나 최근에는 저수축성 및 내피로 특성이 우수한 에폭시수지가 주류를 이루고 있다. 보강섬유로는 유리섬유가 주로 사용되는데, 대형이며 구조적 성능을 유지하기 위하여 방향성을 보유한 다축직조형직물(multi-axis non-crimp fabric) 이 많이 쓰이고 있다. 탄소섬유(carbon fiber) 또한 성능향상 및 경량화 등의 목적으로 사용량이 증가하고 있으나 가격대비 전체적인 성능향상에 대한 체계적 평가가 필요하다. 그 외 블레이드를 이루는 소재는 접착제 및 샌드위치 재료가 있는데, 접착제는 에폭시수지와 결합력이 우수한 에폭시계 접착제를, 샌드위치 재료는 발사우드(Balsa wood) 혹은 항공용 우레탄폼(urethane foam)을 사용하고 있다.

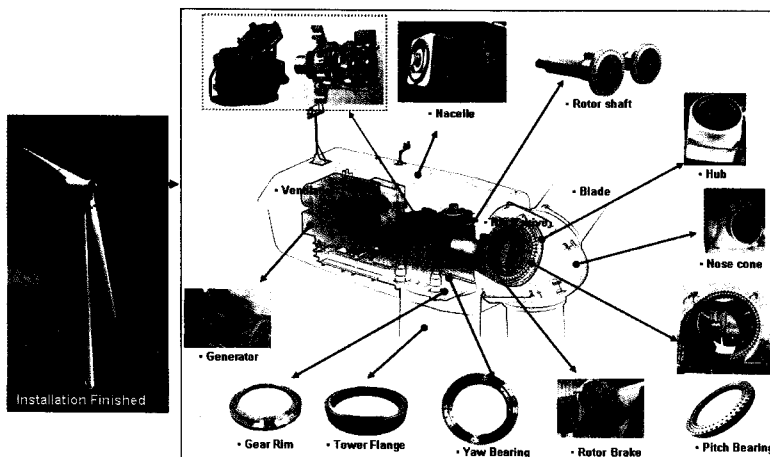


그림 1. 풍력발전용 주요 구성부품 및 소재부품

공정 측면에서 블레이드 제조기술은 항공기 산업에서 파생된 복합재료 공정기술인 autoclave기술과 수지액상주입기술(RTM 혹은 resin infusion method)이 활용되고 있다. 설계 및 시험기술 측면에서 볼 때, 전체 형상을 결정하기 위한 공력학적인 설계 및 해석기술은 풍력터빈 시장의 형성이 국내에서 늦어진 관계로 항공산업에서의 기술전이가 늦어졌다. 하지만 구조설계 및 해석 기술, 시험기술은 국내산업의 필요성에 의하여 국가의 연구개발 지원 등을 통하여 독자설계 수준에 이르고 있다. 국제 경쟁력이 있는 블레이드 부품의 완성을 위해서는 소재, 공력설계, 구조설계, 신뢰성 시험 기술 등이 고르게 발전되어야 한다.

풍력발전용 금속부품의 경우 허브, 주요프레임 등과 같이 고중량의 부품은 주조로 생산하고 있으며, 반복적인 피로하중을 받거나 과도한 하중을 받는 부분에는 대부분 단조품이 사용된다<sup>6)</sup>. 그림 1에 풍력발전에 사용되는 대표적인 구성부품 및 주요 소재부품을 나타내었다.

## 2.1 허브와 프레임(hubs and main frames)

풍력터빈의 허브 어셈블리는 로터 블레이드(rotor blade)에 작용되는 힘을 회전력(모멘트, moment)으로 변환시키는 모듈/부품으로 허브(hub), 3개의 블레이드와 연결되는 피치(pitch) 베어링과 링부품 등의 관련 단조부품으로 구성된다. 여기서, 허브는 로터 블레이드에 가해지는 굽힘모멘트(bending moment)로 인해서 용접법이 아닌 주조법으로 제조하게 되며, 그림 2에 허브의 자세한 모습을 나타내었다. 일반적으로 허브를 비롯한 프레임류 소재는 구상흑연주철(ductile iron, EN-GJS-400-18-LT, EN 1563)이 주로 사용되며, 그림 3에 구상흑연주철의 조직사진을 나타내었다.

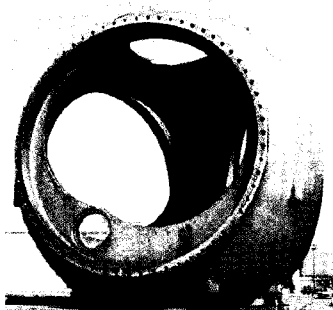


그림 2. 풍력발전용 허브

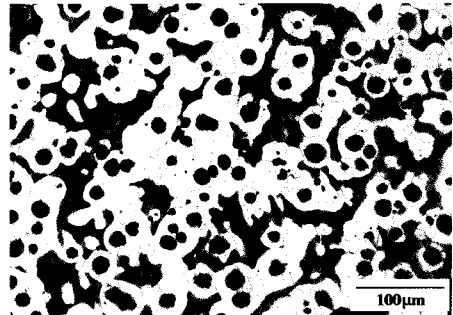


그림 3. 구상흑연주철의 조직사진

Bedplates 혹은 main frame도 구상흑연주철이나 steel S235JR 혹은 S355JRJ2G3 소재로 주조공정으로 제조된다. 그림 4의 경우 무게가 약 7톤, 3.9m(L) x 2.3m(W) x 1.36m(H) 크기의 bedplate이다.

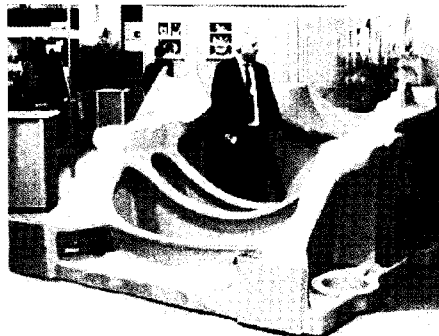


그림 4. 송대평 풍력터빈용 bedplate

## 2.2 로터 회전축(rotor shafts)

풍력 터빈의 나셀(nacelle)의 형태, 즉 발전기의 종류에 따라 간접구동형(g geared type)과 직접구동형(gearless type)으로 나누어진다. 현재, 대부분의 상용 풍력발전기에는 로터 회전축과 증속장치가 있는 간접구동형이 사용되고 있으며, 그림 5와 그림 6에 로터 회전축의 자세한 모습과 조질처리(quenching and tempering)에 의해 열처리된 미세 조직을 나타내었다. 이러한 로터회전축 소재의 미세조직은 텀퍼드마르텐사이트(tempered martensite)조직, 즉 솔바이트(sorbite)조직과 일부 탄화물이 석출된 형태를 보이며, 강도와 인성이 잘 조합된 특성을 부여하는 조직을 나타낸다. 로터 회전축은 블레이드의 회전 운동에너지를 증속장치에 전달하는 부품으로서 풍력발전기의 설계수명만큼 건정성이 유지되어야 하므로 초기 제작시 원소재의 선정부터 최종제품까지 엄격한 관리를 요한다. 로터 회전축의 재료로는 주로 34CrNiMo6강(대비규격 : AISI 4337, 4340)이 사용되고, 스페인의 풍력터빈제조사인 GAMESA에서 일부 42CrMo4 또는 36CrNiMo6 등의 소재가 사용된다. 또한 항복강도가 600N/mm<sup>2</sup>, 최대인장강도가 800N/mm<sup>2</sup> 이상, V-notch Charpy 충격치가 35J 이상인 30CrNiMo8 소재도 사용된다. 일반적으로 자유형 단조공정으로 제조후 조질처리(quenching and tempering)에 의해 열처리가 수행된다. 표 2는 로터 회전축에서 요구되는 기계적 특성과 현재 국내에서 생산되는 로터 회전축의 일반적인 특성을 나타내었다.

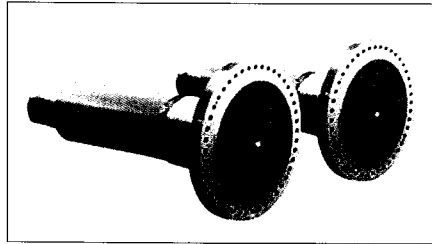


그림 5. 풍력터빈용 로터 회전축

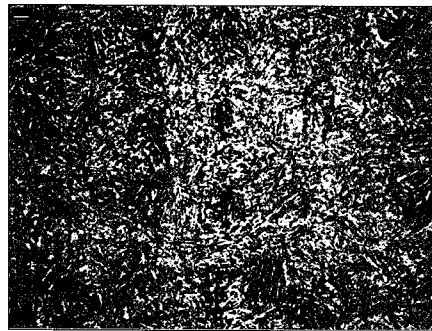


그림 6. 로터 회전축 소재의 광학 현미경사진(34CrNiMo6 steel)

표 2. 로터 회전축 소재의 기계적 특성

Property	Tensile				Impact at -40°C	FATT**	Hardness
	Y.S	T.S	EL	R.A			
	N/mm <sup>2</sup>		%		J	°C	Hv
Value	650	850~1000	13	55	min. 27	30	275~305
*Test Specimen	732.8	886.9	23.1	66.4	54.3	-3.6	288

\*test specimen : 단조가공 후 품질 열처리한 실제품

FATT\*\* : Fracture Appearance Transition Temperature(파면 형상 천이온도)

## 2.3 타워(towers)의 구조와 기능

풍력터빈용 타워는 중요부품인 블레이드와 허브 및 기어박스, 발전기 등 부품이 모두 조립된 나셀을 지지하는 구조물로서 현재 상용대형 풍력발전기는 강철튜브형(steel tubular) 구조를 가지고 있으며, 일정한 간격으로 원통을 제작하여 각 끝 부분에 플랜지와 볼트로 조립하는 형태로 제작이 되고 있다. 그림 7과 같이 원통형상의 타워 내부는 작업자가 안전하게 나셀까지 올라갈 수 있는 통로로 사용되기 때문에 이를 위한 사다리가 설치되며, 나셀 내부의 발전기에서 생산된 전기를 지상의 전기계통과 연결하기 위한 전력선들을 지지하는 케이블트레이(cable tray)가 설치된다. 최근에는 타워가 높아져서 작업자의 이동을 용이하게 하는 전동운반장치를 설치하기도 한다.

타워의 기능은 앞서서의 타워의 구조에서 알 수 있듯이 블레이드가 회전하면서 발생하는 추력과 나셀 및 블레이드 무게에 의한 자중 그리고 타워가 바람에 의해 받는 하중을 지지하는 역할과 함께 작업자, 전력선의 이동통로의 역할로서 풍력발전기를 이루는 다른 기계요소에 비하여 매우 간단하다. 그러나 풍력발전기를 이루는 다른 요소들에 비하여 파손에 의하여 유발되는 손실이 매우 크고 대형풍력터빈가격의 20~25%정도를 차지하여 타워 자체의 단가도 매우 높기 때문에 가격경쟁력이 있으면서도 안전한 타워를 개발하는 것은 매우 중요하다.



그림 7. 타워 내부의 형상

타워의 재료는 목재, 복합재료, 강철, 콘크리트 등 다양하고 강철 구조물의 고비용으로 인해 콘크리트 구조물과 강철과 콘크리트 구조물의 혼합 형태 등 여러 가지로 시도 되고 있다. 하지만 현재까지 강철 구조물을 가장 많이 사용되고 있으며 강철재료의 타워의 제조 방법은 일정한 간격의 셸(shell)을 만들어 플랜지로 이어 붙이는 shell type을 현재 상용화된 대형 풍력발전기에서 사용하고 있다.

## 2.4 타워 셸(tower shells)

타워의 강철재료는 보통 DIN규격의 S355를 많이 사용하며 항복강도는 약 355N/mm<sup>2</sup>이다. 그림 8과 같이 셸의 제조 방법은 원하는 두께의 강철판재를 대형 베어링(bending) 머신에 넣고 원통형으로 bending후에 용접을 한다. 그리고 각각의 양 끝단에 플랜지를 용접한다. 셸을 원하는 만큼 제작하여 셸을 풍력발전기 설치 예정된 장소로 운반 후에 이 셸을 하나씩 각 끝 부분의 플랜지 끼리 볼트로 연결하여 타워를 완성 시킨다.

타워는 상부로 갈수록 좁아지기 때문에 각 구성 셸은 원추(conical)형으로 테이퍼를 가지고 있다. 철판은 재단기술자에 의하여 미리 부채꼴형(혹은 banana peel형)으로 설계되고 재단된다. 재단할 때는 일반적으로 프로그램 레이저 절단기를 사용하여 정밀도를 유지한다. 원추형의 대형 셸을 굽히기 위해서는 강철롤러의 인장과 압축정도가 달라져야하므로 상당한 노하우가 필요하다.

대개 타워는 20~30m 섹션으로 만들어지고, 섹션 상하부에 플랜지를 용접으로 부착하여 섹션을 조립하여 타워를 완성한다. 대개 600kW급 중형 풍력발전기의 경우 로터직경이 44m인데, 타워 높이가 50m이며 약 40톤의 중량을 가지고 이때 2~3개의 섹션으로 이루어진다. 72m의 로터직경을 가지는 2MW급의 경우 80톤 무게와 60m 높이의 타워가 필요하다.

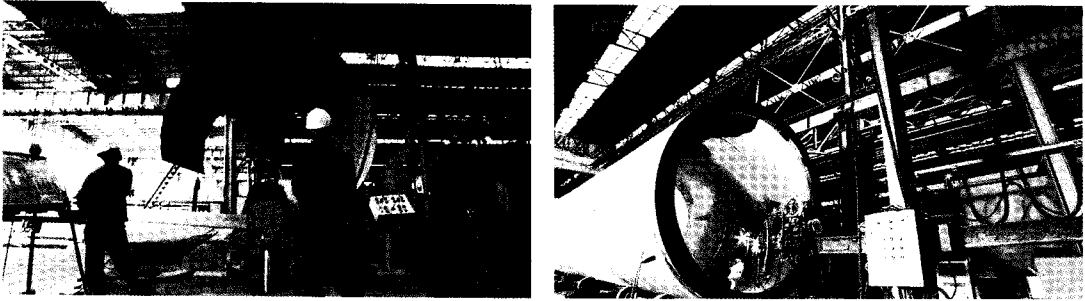


그림 8. 풍력터빈용 타워 셸의 제조를 위한 bending과 용접

### 2.5 타워 플랜지(tower flanges)

풍력발전용 타워는 풍력발전기를 지지하는 구조물로서 현재 건설되고 있는 상용 대형 풍력발전기의 타워구조는 그림 9에서 보듯이 주로 강 파이프식 타워(steel tubular towers)구조이다. 약 30m 단위로 용접을 통해 제작되며 각 끝 부분은 플랜지와 볼트로 연결되어 있다. 타워 플랜지는 앞서 말한 바와 같이 타워의 연결에 필요한 구성품으로서 6-7개의 플랜지가 한 세트를 이룬다. 지름이 가장 큰 bottom flange와 middle flange, top flange로 구분되며 그림 10에 실제 타워플랜지를 나타내었다. 일반적으로 타워 플랜지의 제조방식은 크게 용접(welding)에 의한 방식과 링 압연(ring rolling)방식으로 구분할 수 있다. 전자는 이음매가 있는 경우이고, 후자는 이음매가 없는 경우로 분류된다. 기존에는 용접에 의해 대형 플랜지를 제조하여 왔으나, 최근에는 대형 링 밀(ring mill) 설비의 증가와 더불어 후자에 의한 방식으로 많이 제작된다. 링압연 방식은 투입소재와 가공량의 절감, 작업시간의 단축으로 제작단가를 줄일 수 있고, 원주방향의 미세조직이 연신되어 내외압에 대한 저항성이 높아지는 등 양호한 기계적 특성을 얻을 수 있다. 또한 링압연 가공 전 업셋팅과 코킹공정을 통해 충분한 단조비를 가하기 때문에 요구 물성치를 만족시키기 위한 품질 열처리가 용접방식에 비해 간단한 장점이 있다. 더욱 자세한 내용은 다음절에 소개하고자 한다. 한편, 타워 플랜지는 S35NL(대응소재: A350 LF2N, A694 F42, F490G, ST52.3)과 같은 저합금강이 주로 사용되며, 소재특성으로 용접성이 좋고, 일반강에 비해 강도 및 충격치가 우수하며, Al 첨가를 통해 조직 미세화를 얻어낸 강종이다. 그림 11과 표 3에 실제제품에 대한 미세조직과 기계적 특성을 나타내었다.

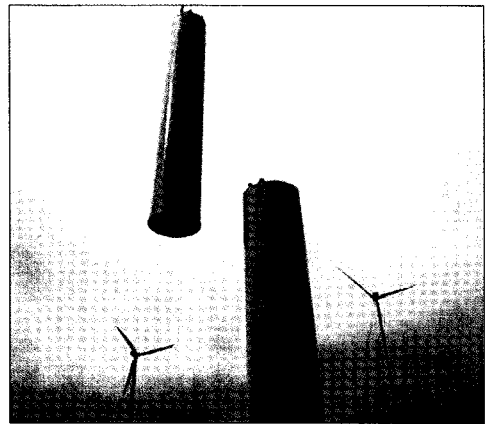


그림 9. 강 파이프식 타워

이러한 타워플랜지 소재의 미세조직은 미세 퍼얼라이트(pearlite)와 웨라이트(ferrite)로 구성되며, 충격에너지값은 50J 이상을 요구하고 있다.

표 3. 타워 플랜지 소재의 기계적 특성

Property	Tensile				Impact at -40°C
	Y.S	T.S	EL	RA	
	N/mm <sup>2</sup>		%		J
Value	295	450~600	21	-	min. 50
*Test Specimen	327.1	513.4	33.2	74.6	98.3

\*test specimen : 링압연 가공후 normalizing한 실제품

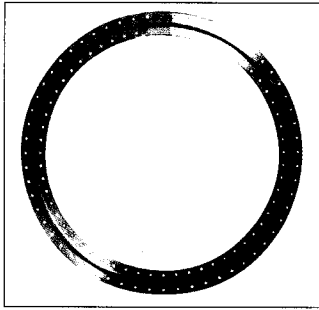


그림 10. 풍력발전용 타워 플랜지

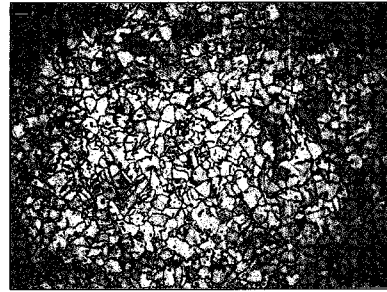


그림 11. 타워 플랜지 소재의 조직사진(S35NL steel)

### 2.6 피치 및 요 베어링(pitch and yaw bearings)

풍력발전용 피치 베어링은 날개의 경사각(pitch) 조절로 출력을 능동적으로 제어하며, 변화하는 풍력에 대응하여 최적의 출력을 나타내어야 하기 때문에 정밀 성형공정 및 가공기술이 필수적으로 요구된다. 피치 베어링의 소재는 42CrMo4(대응규격: SCM440) 등의 기계구조용 합금강이 주로 사용되며, 그림 12에 실제 피치 베어링의 형상을 나타내었다. 한편, 요 베어링은 바람의 반대방향으로 풍력터빈 로터(rotor)를 회전시키는 역할을 하는 요 시스템에서 고정된 타워와 회전하는 나셀을 연결하고 지지하는 기어타입의 핵심부품으로, 타워 플랜지 등과 같은 단순 링부품과 달리 요 오차설계, 성형 정밀도, 조직 균일성 등의 제품 요구특성이 까다로우며, 정밀 기계가공기술은 물론 고주파 열처리 등에 의한 표면 경화기술을 요구하고 있다. 요 베어링 소재는 피치베어링소재와 같은 42CrMo4(대응규격: SCM440) 등의 기계구조용 합금강이 주로 사용된다. 최근, 요 베어링소재의 충격치를 향상시키기 위해 V첨가 강종을 활용하고 있는 추세에 있다. 그림 13은 요 베어링의 실제 형상을 나타낸 것이고, 표 4에 요구되는 기계적 특성을 나타내었다.

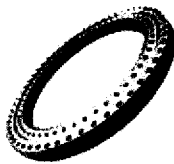


그림 12. 풍력발전용 피치베어링

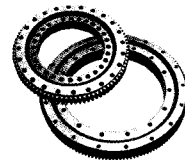


그림 13. 풍력발전용 요 베어링

표 4. 요 베어링 소재의 기계적 특성

Property	Tensile				Impact at -40°C
	Y.S	T.S	EL	RA	
	N/mm <sup>2</sup>		%		J
Value	min. 635	min. 825	min. 10	-	min. 19

### 2.7 주축 베어링(main bearings)

풍력발전용 핵심부품에서 동력전달체계에 있는 베어링류는 주축베어링과 기어박스 베어링을 들 수 있으며, 주축 베어링의 경우 축방향 하중과 반경방향의 하중을 수용해야 하고 축과 지지대의 변형에서 오는 정렬오차를 감당해야 한다. 주축과 지지구조물과의 비교적 큰 변형 때문에 정렬오차를 고려하여 주축베어링으로 사용되는 것이 그림 14와 같은 spherical roller bearing(SRB)이다. SRB는 outer ring 내부의 구형 raceway에 2열의 롤러로 배치되어 있다.



Inner ring raceway는 베어링 축에 대하여 기울어져 있다. 이 베어링은 자동정렬이 가능하여 하우징과 주축 굽힘 변형에 대한 축의 정렬시 에러가 발생해도 큰 문제가 없다.

이 베어링은 높은 반경방향 하중에 견디며, 양방향으로 축방향 하중도 받아들인다. 또한 각 베어링의 시리즈에 따라 다르겠지만 허용 angular misalignment는 1-2.5도 정도이다. 이 정도는 로터하중 때문에 발생하는 하우징과 프레임에서의 변형을 보상하여 베어링에 손상을 발생시키는 모서리에서 과도한 하중을 방지하기 위한 수치로는 충분하다.

주축베어링으로 고려되는 다른 형태의 베어링은 double thrust roller bearing(DTRB) 등이 있는데, 내부의 베어링 형태가 taper가 있는 롤러를 사용하는 등 설계자의 개념에 따라서 선택한다. 특히 taper가 있는 롤러베어링은 기어박스에서 나오는 output shaft(축, 고속축)과 연결되는 부분에서 사용된다.

Inner ring과 outer ring 재료는 핏치 및 요베어링의 재료와 유사하게 사용되고 있다. 이러한 주축 베어링 소재는 각 회사의 소유로 구체적으로 알려져 있지 않으나, 침탄(carburizing)으로 경화된 침탄 담금질강(case-hardening materials)이 사용되고 있으며, 경도는 59HRC이상을 요구하는 것으로 알려져 있다.

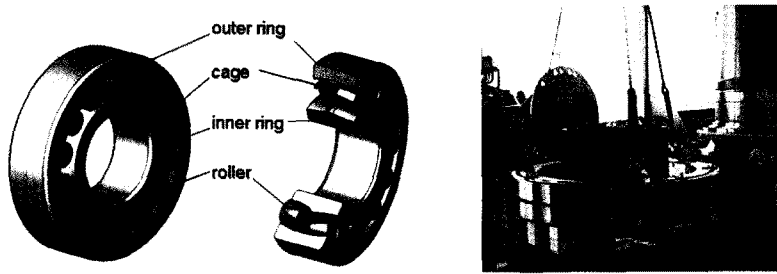


그림 14. Spherical roller bearing의 구조와 실제 부품의 형상(REpower 5MW형 내부직경 1.5m, 무게 2.7톤)

내부의 볼(ball)이나 롤러(roller)의 경우 축하중과 반경방향의 하중 등으로 볼(혹은 롤러)과 링, 볼 상호간의 마찰에 의하여 micro slipping 등에 의하여 손상이나 마모가 발생한다. 이를 보호하기 위하여 윤활시스템이 작동하기는 하나, 극한 하중에서 작동하는 베어링의 소재는 매우 중요하다.

베어링용 볼이나 롤러를 구성하는 재료의 정확한 조성은 각 제조사에서 엄격히 통제되고 있기 때문에 알기 어렵다고 언급하였으나, 표 5와 같이 문헌의 간접비교 자료를 통하여 짐작할 수 있다<sup>6)</sup>. 본 자료를 통한 silicon nitride 베어링 볼의 경우 경량이며, 강성이 높고, 방식성이 높고, 윤활성도 우수하며, 내마모성, 낮은 열팽창계수 등의 우수한 특성을 지니고 있음을 알 수 있다. 하지만 전통적인 HIP(hot isotropic pressing) 등을 활용하는 높은 제조비용, 대형 부품의 제조의 난점 등으로 현재 적용을 위한 연구단계에 있다.

표 5. Steel ball과 silicon nitride ball 재료의 특성 비교<sup>6)</sup>

Property	steel ball	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ball
Density[g/cm <sup>3</sup> ]	7.6	3.2
Hardness[Vickers]	700	1550
Elastic Modulus[GPa]	190	320
CTE(10 <sup>-6</sup> /K)[RT to 800°C]	12.3	2.9
Max. Usage Temp.[°C]	320	1000
Surface Finish Grade 5[micron]	0.02	0.05



### 3. 풍력발전용 단조부품의 제조공정

풍력발전용 소재부품, 특히 단조품의 경우 그림 15에 나타난 바와 같이 주로 자유형 단조와 링단조 및 링압연공정에 의해 제조된다. 이때 샤프트(shafts)류의 경우 소재의 잉고트 상태에서 가열로에 장입하여 목표 가열온도로 가열한 후 업셋팅공정과 코깅공정을 거쳐 충분한 단련비를 가하는 잉고트 파쇄공정을 거친후 자유형 단조에 의해 제조하게 된다. 한편, 링부품 제조의 경우 과거에는 링단조 혹은 멘드렐 단조에 의해 수행해 왔으나, 지금 현재는 대부분 링압연공정에 의해 링부품을 제조하고 있다<sup>7)</sup>. 링압연공정은 링단조공정에 비해 작업 속도가 빠르며, 온도유지가 가능하며, 수율향상 등을 꾀할 수 있고, 특히 결정립 유동선(grain flow line)이 원주방향으로 끊기지 않고 연속적으로 형성되기 때문에 우수한 특성을 발현할 수 있는 장점을 가진다. 본 절에서는 풍력발전용 단조부품의 제조공정에 대해 보다 자세히 다루고자 한다.

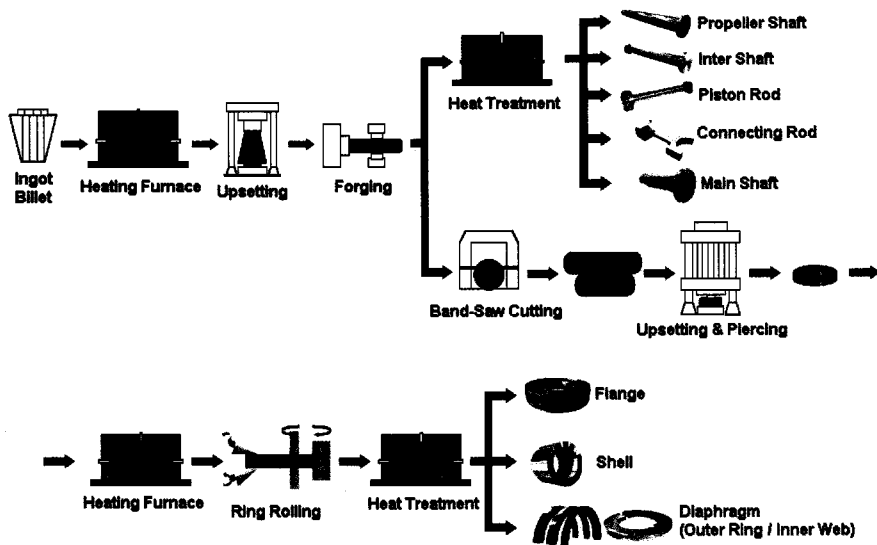


그림 15. 풍력발전용 주요 단조부품의 생산공정도

#### 3.1 자유형 단조

자유형 단조는 풍력발전용 대형단조부품에서 거의 대부분 활용되고 있으며, 먼저, 잉고트(ingot) 및 슬라브(slab) 상태의 소재를 내·외부가 균일하도록 목표온도로 가열하게 된다. 이때, 소재에 따라 다소 차이는 있으나 탄소강의 경우 통상 소재의 지름을 기준으로 30min./inch정도의 유지시간이 적용되며, 경우에 따라 스텝(step)가열을 수행하기도 한다. 그후 잉고트(ingot) 및 슬라브(slab) 등으로부터 업셋팅(upsetting), 코깅공정을 통한 잉고트 파쇄공정 및 단조형상 구현을 수행한다. 이때 업셋팅공정은 소재의 단면적을 늘리는 작업으로 주로 후속공정의 단조비 확보를 목적으로 하며, 후자인 코깅은 소재의 길이를 늘리는 작업으로 내부 단조효과 부여 및 제품 형상화 등을 목적으로 수행한다. 그밖에 단조품의 단차 형상을 만들기 위해 3각형 지그를 이용하여 일정 깊이의 홈을 만드는 작업인 단차구현(necking)공정 및 강피의 불건전부(주로, 잉고트의 상·하부)를 제품에 혼입되지 않도록 절단하는 절단(discarding)공정, 대형 링부품의 제작공정인 링단조 및 링압연공정 등도 자유단조의 종류로 분류되어 여러 풍력발전 부품의 제조시에 응용되고 있다. 대표적인 자유형 단조의 종류<sup>8)</sup> 등이 그림 16에 제시되었다. 다음절에서는 현재, 대형 링부품 제조공정에 주로 활용되고 있는 링압연공정에 대해 자세히 다루고자 한다.

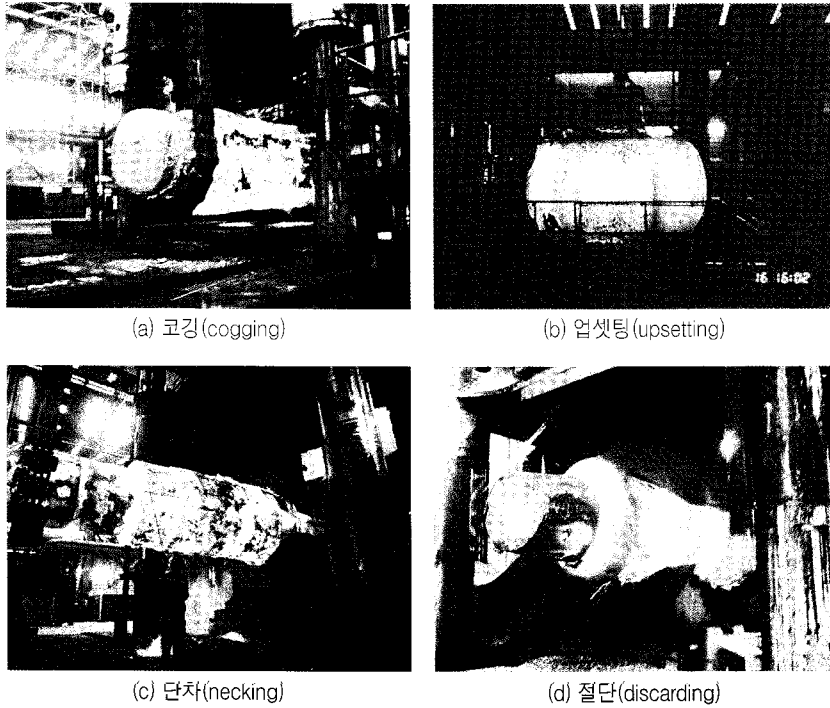


그림 16. 풍력발전용 단조부품 제조를 위한 자유단조의 여러 종류들

### 3.2 링압연공정 절차

링압연공정의 절차는 그림 17에 제시된 바와 같이, 먼저, 자유형 단조시 설명된 잉고트 파쇄(ingot breakdown)공정을 거쳐 잉고트상태의 조대한 결정립과 주조조직을 미세화하고, 표면가공을 통해 빌렛을 제조하게 된다. 이러한 빌렛을 활용하여 초기 링형상 즉, 블랭크(blank)를 제작하게 되는데, 이러한 블랭크 설계는 최종제품의 형상과 표면결함의 발생여부를 결정할 수 있는 중요한 단계이다. 블랭크는 빌렛을 부피계산에 의해 일정 크기로 절단하고, 가열 및 유지후 업셋팅공정을 거쳐 미리 준비된 펀치를 이용하여 내경을 피어싱(piercing)한 후 피어싱된 내경 표면을 가공하는 순서로 제작된다. 제작된 블랭크를 이용하여 링 압연공정을 거쳐 풍력발전용 플랜지, 요 및 피치 링 등이 풍력발전용 소재부품을 제조하게 되며, 최종적으로 제조된 링부품은 열처리 및 기계가공을 통해 최종 부품으로 생산하게 된다.

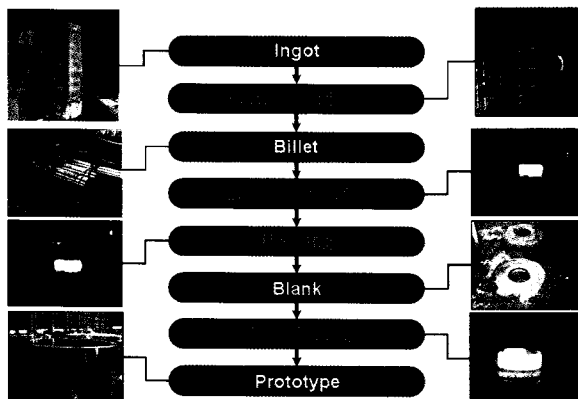


그림 17. 풍력발전용 주요 단조부품의 링압연 제조공정 순서도

### 3.3 링압연공정의 형상설계

링압연공정 형상설계<sup>[9]</sup>의 경우 가장 먼저 실제 링제품으로부터 링압연공정을 위한 형상으로의 변환이 진행되어야 하며, 링압연품의 형상은 다음과 같은 관계식에 따라 링압연 성형품의 세가지 표면부 허용치를 고려하여 결정하게 된다.

$$TOL = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

여기서,  $F_1$ 은 피할수 없는 표면결함,  $F_2$ 는 링직경의 팽창,  $F_3$ 은 링 높이 또는 두께의 팽창을 등과 관련된 허용치를 의미한다.

한편, 링압연공정에서 초기 형상(preform), 즉 블랭크(blank) 등의 형상설계는 링압연공정시 링두께의 감소율과 높이 감소율이 거의 균일하게 유지하도록 하기 위한 계산방법에 따라 이루어져야 하며, 만일 이를 충족시키지 못할 경우 그림 18에 제시된 여러 형태의 형상결함 및 fishtail과 같은 결함이 발생할 수 있다<sup>[10]</sup>.

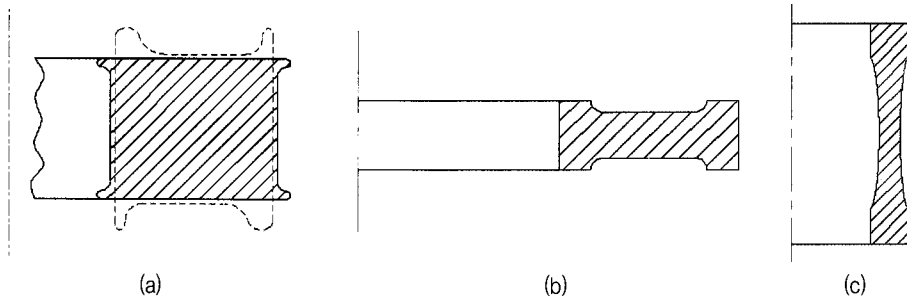


그림 18. 링압연공정의 여러 결함들; (a) fishtail 표면결함 (b) 와셔형태(washer-type) 형상결함 (c)슬리브형태(sleeve-type) 형상결함

링압연공정시 자주 발생하는 fishtail, folder 등의 표면결함을 최소화하기 위한 조건으로 링의 두께와 높이사이의 관계를 정의하는 다음과 같은 관계식이 활용된다.

$$h_1^2 - b_1^2 = h_2^2 - b_2^2 \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{d_{1o} - d_{1i}}{2} \quad (3)$$

$$b_2 = \frac{d_{2o} - d_{2i}}{2} \quad (4)$$

여기서,  $h$ 는 링의 높이,  $b$ 는 링의 두께이며, 아래첨자 1과 2는 각각 블랭크와 최종 링의 치수를 의미한다. 또한 아래첨자  $o$ 와  $i$ 는 각각 외경과 내경을 의미한다. 통상적으로, 링압연공정에서 피어싱(piercing)을 위한 펀치가 구비되어 있기 때문에 블랭크의 내경( $d_{1i}$ )은 자동적으로 결정된다. 따라서, 블랭크의 크기는 높이( $h_1$ )와 외경( $d_{1o}$ )의 계산을 통하여 결정할 수 있으며, 식 (2)에 나타난 부피분율이 일정하다는 가정과 함께 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d_{2o} + d_{2i}}{2(d_{1i} + b_1)} = \frac{b_1}{b_2} \sqrt{1 - \left(\frac{b_2}{h_2}\right)^2 + \left(\frac{b_1}{h_2}\right)^2} \quad (5)$$

결국, 이러한 계산방법에 의해 초기 블랭크 크기를 결정할 수 있다.



### 3.4 링밀 및 링압연공정

링압연공정 장비 즉, 링밀(ring mill)은 수직식 및 수평식 링밀과 함께 링의 형상을 구현하는 여러 맨드렐(mandrel)을 구비하고 있는 다중 맨드렐 링밀 등 다양한 종류가 있다. 과거 수평식 장비는 맨드렐에 의한 원주방향의 성형만을 수행하는 단일과정(single pass) 링밀이 주류를 이루었으나, 지금 현재는 원주방향의 성형과 함께 높이 감소를 꾀하는 두 가지 과정(two pass)을 수행하는 링밀이 대부분을 차지하고 있다. 이중 가장 많이 활용되고 있는 수평식 링밀에 대해 살펴보고자 한다. 그림 19는 지금 현재, 국내 링생산업체에서 사용되고 있는 전형적인 수평식 링밀을 나타낸 것이다. 장비의 구성은 구동력을 공급하는 회전롤(main roll), 공회전을 하면서 소재에 반경 방향의 성형하중을 가하는 맨드렐(mandrel), 소재의 축방향 소성변형을 제어하는 축롤(axial roll) 등으로 이루어져 있다. 이러한 장비를 활용하여 블랭크(blank)는 맨드렐과 회전롤사이에 놓여지며, 회전롤을 회전시키면서 맨드렐로 압축을 가하여 롤간의 거리를 좁힘에 따라 링의 두께가 얇아지게 된다. 이때 소재의 체적은 변형을 받는 동안 일정하므로, 링의 두께가 얇아지는 것은 링의 직경이 증가됨으로 보상된다<sup>[11]</sup>.

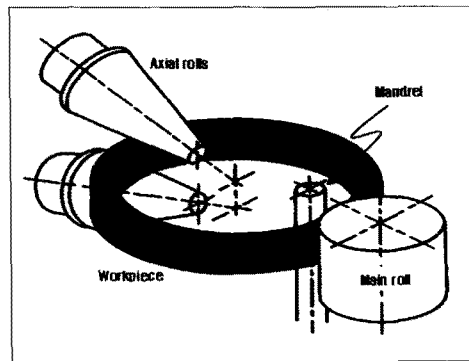


그림 19. 수평식 링밀의 개략도

## 4. 풍력 블레이드용 고분자 수지

풍력터빈 복합재 블레이드의 기지(matrix) 수지는 주로 불포화계 수지인 불포화 폴리에스터(unsaturated polyester) 및 비닐에스터(vinylester)와 에폭시(epoxy)가 사용된다. 과거에는 블레이드의 무게를 최대한 낮추면서 제작비를 고려하여 불포화계 수지가 사용되었으나 풍력 블레이드가 풍력터빈에서 점차적으로 경량, 저수축 및 우수한 노화특성, 고강도가 요구되면서 에폭시 수지의 복합재료로 전환되고 있는 추세이다. 특히 블레이드가 대형화되면서 수지는 복합재료의 성형 공정에 적합하도록 선정되어야 한다.

### 4.1 불포화계 수지

불포화 폴리에스터, 그림 20은 무수프탈산(phthalic anhydride)과 같은 포화산과 무수말레산(maleic anhydride) 등의 불포화산을 프로필렌글리콜(propylene glycol) 또는 디에틸렌 글리콜(diethylene glycol)과 같은 디올(diol)과 공중합 시켜 제조한다. 이때 포화산은 가교 밀도를 조절하기 위해 투입되면 스티렌(styrene)과 같은 반응형 희석제를 사용하여 수지의 점도를 낮추게 된다. 경화는 과산화물에 의해 생성된 자유 라디칼이 비닐기를 반응시켜 이루어진다. 이 수지는 그 저렴한 가격으로 인해 복합재 블레이드뿐만 아니라 산업용, 스포츠 용품, 자동차 및 건축용에 사용되는 복합재료의 기지 수지로 광범위 하게 적용된다. 그러나 경화 시 열수축이 상대적으로 크고 고온에서의 열안정성이 취약하며 기계적 물성도 소폭 떨어지는 단점이 있다<sup>[12]</sup>.

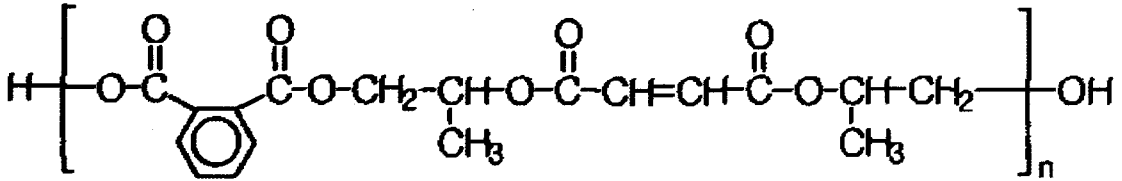


그림 20. 불포화 폴리에스터의 화학 구조

비닐에스터 수지, 그림 21은 일반적으로 메타 아크릴산(methacrylic acid)과 같은 불포화 카복실릭 산과 비스페놀(bisphenol) A형 에폭시 수지의 부가 반응으로 얻어진다. 이중결합이 불포화 폴리에스터와 달리 사슬 말단에 존재하며 가교 밀도가 비교적 적어서 유연하고 강인하다. 특히 사슬 내에 있는 히드록시기(-OH)가 존재하여 유리 섬유 표면에서 히드록시기와 강한 수소 결합을 형성할 수 있다. 이로 인해 수지와 섬유 간의 계면 결합력이 향상되기 때문에 유리 섬유로 보강된 복합재료의 경우 우수한 물성을 구현할 수 있다. 또한 에폭시 수지에 비해 가격이 저렴하며 기존의 불포화 폴리에스터 제조 공정을 그대로 이용할 수 있는 장점이 있다.

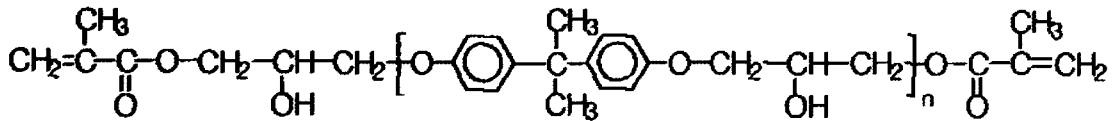


그림 21. 비닐에스터의 화학 구조

#### 4.2 에폭시수지

에폭시 수지는 보통 비스페놀 A와 에피클로로하이드린(epichlorohydrin)을 중합하여 만든 올리고머(oligomer) 형태의 수지를 말하며 대표적인 열경화성 수지로 그림 22와 같이 나타낸다. 가격은 기존의 불포화 폴리에스터나 비닐에스터에 비해 높으나 경화 수축률이 상대적으로 매우 낮고 내열성, 기계적 물성이 높다는 장점이 있다. 경화제를 통해 경화된 에폭시 수지는 기계적 물성뿐만 아니라 내수성, 내화학성 및 전기적 성질이 매우 우수하며 사슬 내의 분자 구조, 분자량 및 에폭시 당량 등을 변화시켜 다양한 특성의 수지를 제조할 수 있다. 경화제 또한 에폭시 기와 결합할 수 있는 반응성 관능기를 보유한 화학 물질이 다양하게 존재하기 때문에 특성에 따라 선택의 폭이 넓다. 그림 23은 대표적인 산무수물 계 경화제와 에폭시 수지와의 반응식을 나타내고 있다.

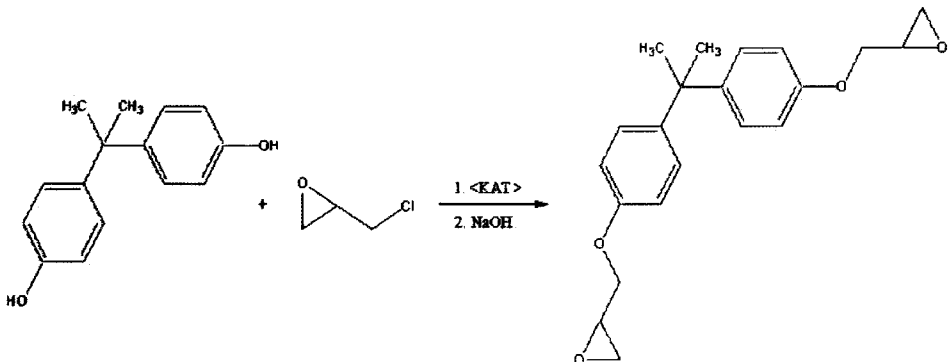


그림 22. 비스페놀 A와 에피클로로하이드린과의 반응식

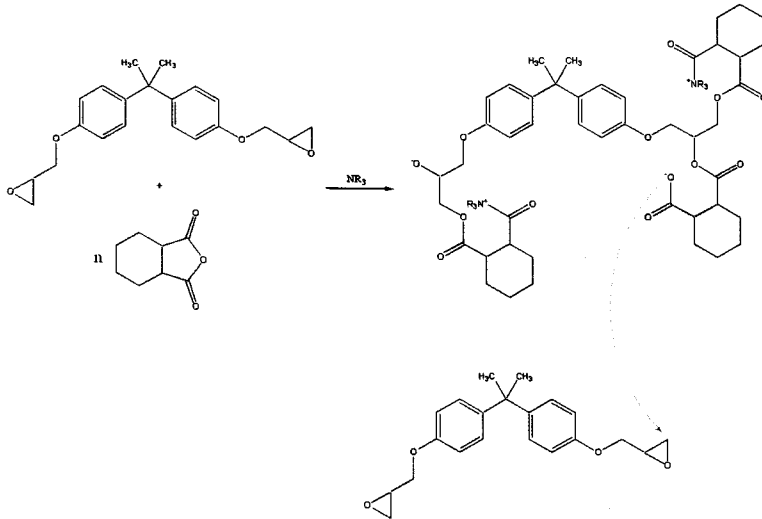


그림 23. 에폭시 수지와 산무수물 계 경화제와의 반응

### 4.3 블레이드용 수지 요구 특성

최근에 생산되는 풍력 블레이드는 대부분 수지주입공정으로 제조되고 있으며 블레이드가 대형화됨에 따라 다양한 특성 조절이 가능한 수지 시스템이 사용되고 있다. 표 6은 풍력 블레이드용 에폭시 수지의 수지주입공정에서 요구되는 대표적인 특성을 요약하였다. 대형 블레이드에서는 수지주입공정 시 유동 거리가 대폭 늘어나기 때문에 공정에 적합한 최적 점도의 수지가 요구된다. 그리고 블레이드가 대형화 되어 경화 시 높은 온도 조건을 구현하기 어렵기 때문에 낮은 온도에서 경화할 수 있어야 한다.

표 6. 풍력 블레이드용 에폭시 수지의 수지주입공정에 요구되는 특성

물성	가사 시간(상온/100g)	점도(상온)	경화 조건	피로 강도(Reversed bending, DLR Brunsw.)
요구 조건	500 min 이상	700 cps 이하	80°C, 10 hr 이내	exp. > 1 x 10 <sup>6</sup> (10%) exp. > 2 x 10 <sup>6</sup> (90%)

그러나 이런 경우 대부분 수지의 가사 시간이나 gel time이 짧아지기 때문에 적절한 경화 온도를 가지거나 경화제 시스템의 함량이나 조합을 통해 조절이 가능해야 한다. 수지/경화제 시스템은 보통 상온에서 700cps 이하의 점도에 가사시간과 가열조건을 고려하여 80~90°C에서의 경화 온도를 필요로 한다. 그림 24는 실제 풍력 블레이드 제조에 적용되고 있는 에폭시 수지 시스템의 점도를 측정된 자료(data)이다. 더하여 수지 자체의 인장/압축 강도, 신율 등과 같은 기계적 물성 또한 중요한 요소이며 특히 우수한 피로 강도가 요구된다.

에폭시 수지는 일반적으로 저점도의 비스페놀 A 또는 비스페놀 F계가 사용되며 경화제는 아민(amine)계를 적용하고 있다. 특히 저점도 아민 경화제 (~80 cps)를 투입함으로써 상대적으로 높은 점도를 가진 수지 (~1,100 cps)의 점도를 떨어뜨릴 수 있다. 경화 반응은 그림 25와 같이 일어나며 에폭시 당량비로 계산하면 보통 무게비로 100:30으로 혼합한다. 경화제는 단독으로 사용하기 보다는 경화 온도와 gel time을 조절할 수 있도록 2 종류 이상의 조합을 이용한다. 수지와 경화제 이외에 점도와 발열량 조절을 위해 소량의 반응형 희석제를 혼합하거나 탈포를 위해 소포제가 투입될 수도 있다.

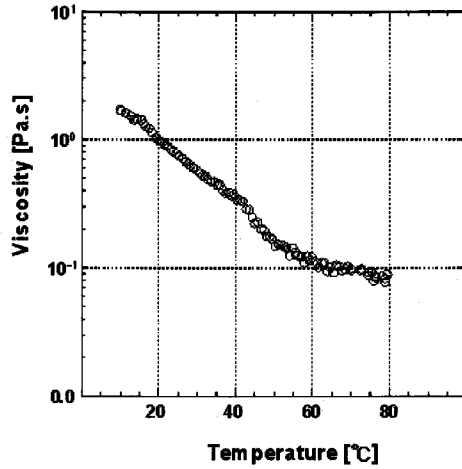


그림 24. 풍력 블레이드용 에폭시 수지의 점도(dynamic scan, 5°C/min)

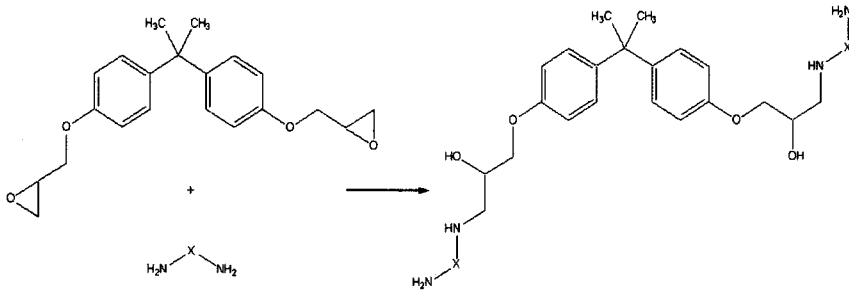


그림 25. 에폭시 수지와 아민 계 경화제와의 반응

## 5. 복합재 블레이드 보강 섬유

보강 섬유는 복합재료에서 구조적 성능을 결정하는 가장 중요한 요소이며 일반적으로 복합재료 부피 중 40% 이상의 부분을 차지하며 외부 하중을 직접 받는다. 복합재 풍력 블레이드에서 적용되는 보강 섬유는 보통 탄소 섬유와 유리 섬유가 주로 사용된다.

### 5.1 유리 섬유

유리 섬유는 규사, 석회석 및 붕사 등의 원료를 적절히 배합하고 1,550°C에서 용융하여 섬유화 한다<sup>[13]</sup>. 그림 26과 같이 용융 유리는 백금과 로듐의 합금으로 만든 상자 모양의 부싱(bushing)으로 들어가 밀 부분에 있는 직경 1~2mm의 수백에서 수천 개의 노즐로 중력에 의해 흘러내리면서 섬유화가 이루어진다. 부싱을 통해 나온 유리는 그림 27에서 보는 바와 같이 연신, 냉각되고 직경이 5~24 $\mu$ m 정도의 미세한 필라멘트가 된다.

이렇게 제조된 유리 섬유 필라멘트는 집속하면서 섬유 표면에 윤활성을 부여하고 후 공정에서 섬유 표면이 손상되는 것을 방지하기 위해 사이징 (sizing) 처리를 한다. 또한 이러한 사이징 처리는 복합화 할 때에 유리섬유와 기지 수지와의 접착성을 향상시켜준다. 사이징은 보통 필름형성제 (film former), 윤활제 (lubricant), 정전기 방지제 (antistatic agent), 커플링제 (coupling agent) 등으로 구성되어 있으며 유기화합물의 혼합액에 의해 유리 섬유가 코팅 된다. 일반

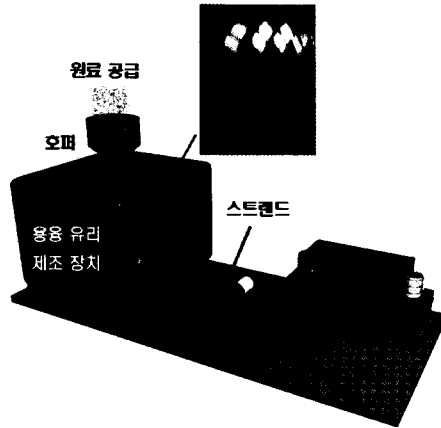


그림 26. 유리 섬유 제조 공정

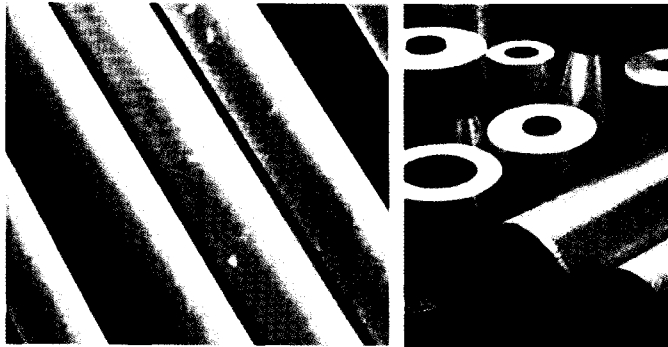


그림 27. 유리 섬유 필라멘트 및 로빙

적으로 사이징은 유기실란 (organosilane) 코팅제가 사용되며 유리 섬유 표면에 있는 하이드록실기와 유기실란이 물이 빠져나오면서 그림 28의 형태로 결합하게 된다. 사이징은 유리 섬유 무게대비 약 0.2~0.5% 정도에서 유리 섬유를 완전히 코팅할 수 있는 것으로 알려져 있으며 유리 섬유에서 요구되는 표면 특성에 따라 아민기, 비닐기, 에폭시 기 등 다양한 관능기가 포함된 유기실란을 선택할 수 있다.

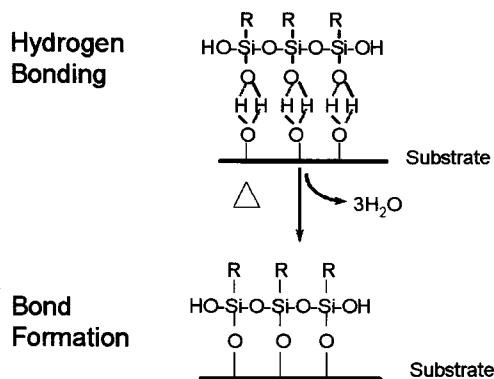


그림 28. 유리 섬유와 유기실란의 반응



## 5.2 탄소 섬유

탄소 섬유는 흑연 섬유 (graphite fiber)로도 지칭되며 탄소 원자의 결정구조를 이용한 고강도 섬유이다. 높은 기계적 물성이 요구되는 최신 복합재료에 강화제로 널리 사용되고 있다. 탄소 섬유 제조에 이용되는 전구물질(precursor)은 폴리아크릴로니트릴(polyacrylonitrile, PAN)과 석유정제 부산물인 피치 (Pitch)가 있으며, PAN을 이용한 탄소 섬유 제조공정의 개략도는 그림 29와 같다. 그림 30과 같이 먼저 전구 물질을 250~350℃에서 산화 공정을 통해 안정화 시킨 후 1,000~1,500℃에서 탄소화 공정, 2,000℃에서 흑연화 공정을 거쳐서 6~8 $\mu$ m의 탄소 섬유가 제조된다. 탄소 섬유 또한 폴리비닐알콜(polyvinylalcohol) 등의 표면 처리와 에폭시 사이징 처리 공정을 통해 기지 수지와의 결합력을 높이고 있다.

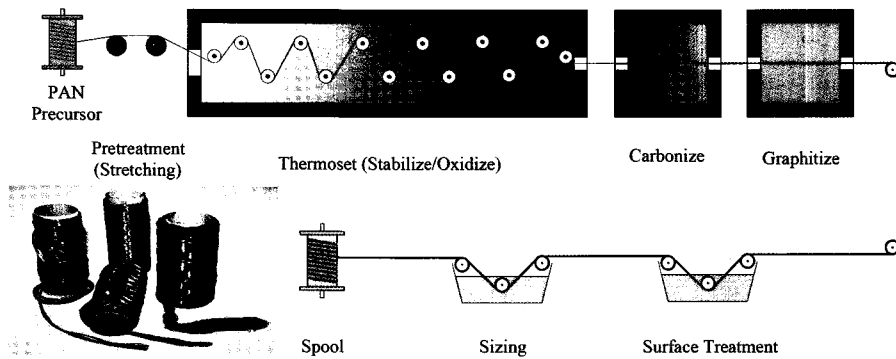


그림 29. PAN을 이용한 탄소 섬유 제조 공정

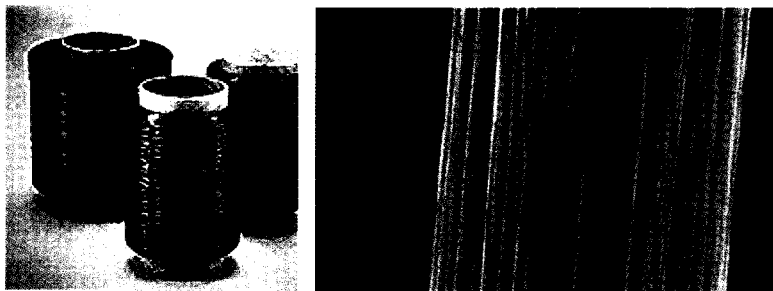


그림 30. 탄소 섬유 로빙 및 필라멘트

## 5.3 풍력 블레이드용 보강재

과거 풍력 블레이드는 비용 관점에서 경쟁력이 있는 유리 섬유를 보강재로 사용하였으나 초대형 풍력 블레이드의 대부분은 탄소 섬유 spar를 결합하거나<sup>[14]</sup> 탄소 섬유/유리 섬유 하이브리드 형태(그림 31) 및 전량 탄소 섬유 보강 복합재료가 사용될 가능성이 크다. 연구 보고에 의하면<sup>[15]</sup> 120m 로터에 탄소 섬유 spar를 적용하면 무게는 32~38%, 가격은 14~16% 정도 줄일 수 있다. 탄소섬유/유리 섬유 하이브리드를 적용한 경우, 동일한 부피 분율에서 유리 섬유와 비교하여 신율은 50% 정도 감소하나 강성이 2.5배 이상 향상되는 결과를 보였다<sup>[15]</sup>. 따라서 최근 블레이드 시스템들은 탄소 섬유 복합재료 spar를 적용하고 있으며 더 큰 블레이드를 제작하기 위해서는 다소간 탄소 섬유 복합재료를 사용해야 하는 것을 알려져 있다.

그러나 전량 탄소 섬유가 적용된 복합재 블레이드는 무게를 줄일 수는 있으나 가격이 문제가 된다. 보통 전통적인 유리 섬유 보강 복합재료에 비해 3~5배 정도 비싸고, 가벼운 블레이드라 할지라도 운송비용이나 설치비용이 줄어들

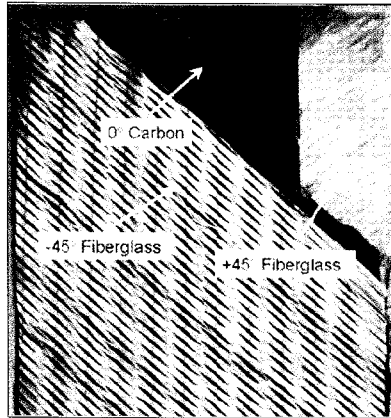


그림 31. 탄소 섬유/유리 섬유 하이브리드 보강재

지는 얇기 때문에 문제가 된다. 그리고 블레이드 무게가 가벼우면 전체 시스템에 걸리는 하중이 감소되어 허브나 타워의 구조적 요구 조건이 완화되나 이것이 탄소 섬유를 사용함으로써 인한 비용 증가의 보상 여부는 명확하지 않다.

블레이드에 있어서 강성이 매우 중요하지만 피로 강도 또한 중요한 요소인데, 유리 섬유 복합재료는 그 안정성이 검증되어 있으나 탄소 섬유 복합재료가 충분한 피로 강도를 보유하고 있는지 완전히 검증되지 않았다. 탄소 섬유 복합재료의 사용에 따라 부품이 더 얇아지면 낮은 하중에서도 좌굴(buckling)이 일어날 수 있으므로, 이러한 국부적인 좌굴을 피하기 위해서는 복합재료의 두께가 늘어날 수 있다<sup>[6]</sup>.

보강 섬유는 풍력 블레이드 제조 공정과 물성 요구 사항에 따라 다양한 형태의 구조가 선택될 수 있다. 프리프레그 공법이나 wet lay-up 공정에서는 보강 섬유의 구조가 기계적 물성에 큰 영향을 미치나 생산성에는 차이가 없다. 수지 주입공정은 보강 섬유의 구조가 기계적 물성과 생산성과 밀접한 관계가 있는데, 블레이드의 대형화에 따라 복합재 블레이드에 쓰이는 보강 섬유 구조는 그림 32와 같이 특성이 우수한 다축 비굴곡 강화섬유 직물 NCF (multi-axis non-crimp fabric)가 널리 쓰이고 있다. 이러한 구조는 기존의 직조 직물을 대체하고 있으며 대형 블레이드의 80% 이상 적용되고 있다.

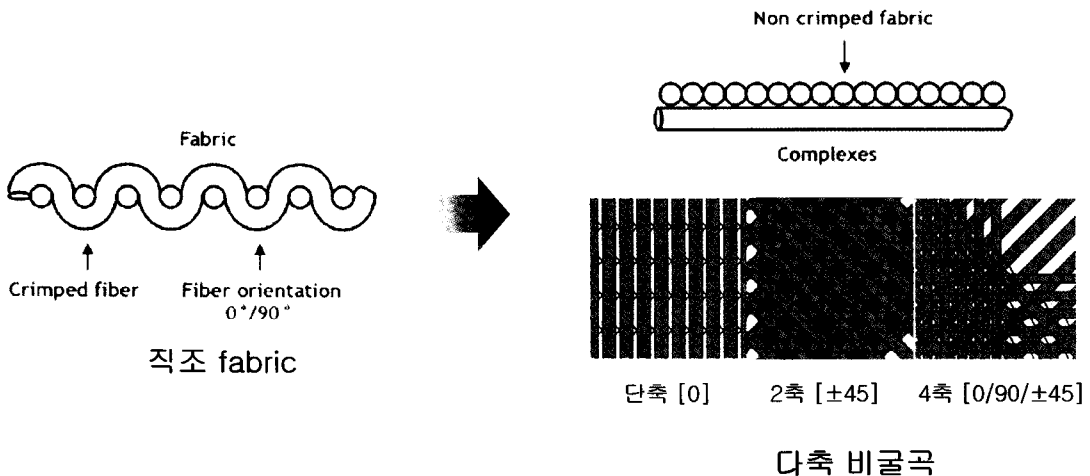
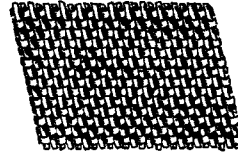


그림 32. 직조 직물과 다축 비굴곡 직물의 비교

다축 비굴곡 직물은 대형 블레이드 제조 공정인 수지주입공정에 적합한 특성을 가지고 있다. 직조 형태와 비교하였을 때, 굴곡된 섬유가 최소화 되어 있어 섬유의 직진성이 대폭 향상된다. 또한 섬유 체적율이 높아 우수한 기계적 물성 구현이 가능하며 수지주입공정에서 수지의 침투성이 직조 직물에 비해 매우 높아 블레이드 생산성을 높일 수 있다. 그림 33은 기존의 직조형 구조와 비굴곡 구조의 보강 섬유 내부에서 수지의 흐름을 도식화 한 것이다. 비굴곡 형태는 구조적으로 투과성이 높아 수지의 유동이 원활하게 진행될 수 있음을 보여주고 있다.

• 직조 fabric



• 다축 비굴곡

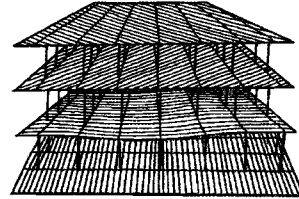


그림 33. 보강 섬유의 구조에 따른 수지 유동 비교

## 6. 블레이드 코팅용 도료

풍력 터빈은 보통 사용연한이 20년 이상이며 그 기간 동안 블레이드 또한 외부에 노출된다. 특히 복합재료 블레이드는 고분자 기지를 사용하기 때문에 폭로 환경에서의 열악한 내후성(weatherability)이 문제가 된다. 대기 중 산소에 의해 산화가 일어나거나 UV에 의해 고분자 사슬의 분해가 촉진될 수 있다. 이를 방지하기 위해 UV를 차단하고 산화를 방지할 수 있는 블레이드의 표면 처리가 필요한데 풍력 블레이드는 gel coat 나 도료를 사용하여 표면 처리를 하게 된다.

도료는 크게 안료, binder 수지 및 용제로 구성되어 있으며 풍력 블레이드에서는 TiO<sub>2</sub>와 같은 저가의 백색 안료가 쓰이며 산화방지제 또는 UV 안정제 등과 같은 첨가제가 투입 될 수 있다. 사용되는 binder 수지가 도료의 내후성, 내구성 및 내식성뿐만 아니라 풍력 블레이드 생산성과도 관련이 있다. 범용의 비스페놀 A계 에폭시 binder 수지는 가격은 저렴하고 내구성과 내식성은 우수하여 많이 사용되었으나 UV 환경에서 내후성이 취약하여 점차 아크릴 변성 에폭시 또는 실리콘 변성 에폭시 binder로 대체되고 있다.

아크릴 변성 에폭시 binder는 비스페놀 A계 에폭시 binder의 열세한 내후성을 극복하였으나 상대적으로 내식성이 취약하여 해상 풍력 터빈에서는 문제가 될 수 있다. 실리콘 변성 에폭시 binder는 기존의 에폭시 binder에 비해 내후성이 획기적으로 향상되었고 내구성 및 VOC(volatile organic compounds) 저감형 제품 설계가 가능하게 했다. 그러나 범용 binder에 비해 높은 가격과 도입 초기 단계이기 때문에 장기간의 사용으로 인한 검증된 자료가 부족한 것이 단점이다.

최근에 풍력 블레이드에는 환경 친화적인 수용성 도료의 사용이 확대되고 있다. 유기 용제와 같은 VOC가 인체와 환경에 많은 문제를 일으키고 있기 때문이다. VOC 감소를 위해 high solid 형 도료가 사용되는데 용제 함량이 10% 이하 또는 무용제형도 출시되고 있다. 이러한 high solid형 도료는 기존의 도료에 비해 코팅 두께가 커서 작업성이 매우 우수하여 풍력 블레이드 생산성 향상에도 기여하고 있다.



## 7. 기타 부품용 소재

대형 디스크형 브레이크도 구상흑연주철이나 steel S235JR 혹은 S355JR을 사용하고 있으며, 특히 브레이크 패드는 대형 토크에 우수한 저항력을 유지할 수 있으며, 디스크표면에 손상을 최소화하는 sintered bronze 혹은 organic non-asbestos 소재를 사용한다.

발전기는 직접구동형 동기발전기(synchronous generator)를 채용하는 경우가 많아져 영구자석(permanent magnet) 재료의 활용이 중요한 부분이다. 영구자석은 발전기의 성능을 유지하기 위해서는 높은 전류자기를 지녀야 하는데 온도상승과 단락이 될 때 발생하는 일시적인 전류에 의하여 자기 성능을 소실할 우려가 적은 재료가 필요하다. 합금자석, 산화물자석, 희토류자석 등이 있는데, 잔류자속밀도 및 자계보유력이 높은 희토류계인 neodymium magnet 재료로써 기계내부용 영구자석 동기모터에 많이 활용되고 있다.

## 8. 풍력발전용 소재부품의 파괴 및 비파괴 검사

### 8.1 금속부품의 검사

풍력발전용 소재부품의 제조공정후 제품의 품질은 파괴 및 비파괴 검사에 의해 평가되며, 파괴검사는 인장, 충격, 경도시험 등의 기계적 특성평가와 함께 화학성분 검사 및 마크로, 마이크로 등의 조직검사도 함께 수행한다. 이때, 인장특성의 경우 규격에 따라 차이는 있으나, 주로 유럽규격(EN 10113-2 (1994) 또는 EN 10025-3 (2004))에서는 항복강도의 규제를 제품의 두께에 따라 다르게 명시하고 있으며, 대표적인 플랜지(flange) 소재부품에 대한 두께별 요구되는 인장 및 충격특성을 표 7에 나타내었다. 조직관찰에서 가장 중요한 부분은 기계적 특성과 직결되는 결정립 크기로 파이프 플랜지의 경우 ASTM # 6 또는 그 이상을 요구한다.

한편, 비파괴 검사는 재료를 파괴하지 않고 그 실체의 결함을 조사하는 방식으로 단조품이 대형일수록 결함의 혼입 및 발생 가능성이 커지고 100% 완벽한 단조품을 얻는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 황삭가공후 단조품의 비파괴검사는 필수적이라 할 수 있다. 비파괴 검사는 초음파탐상법, 자분 탐상법, 액상 침투법(PT), 방사선 탐상법, 육안 검사법 등이 있으며, 자분 탐상법, 액상 침투법, 육안 검사법은 주로 표면결함을 검사하는 방법으로 흔히 풍력발전용 단조부품 비파괴 검사는 그림 34에 제시된 초음파 탐상법을 활용한다. 초음파 탐상법은 초음파 발생에 의해서 결함의 정확한 위치 및 상당한 두께의 미세한 결함도 검출할 수 있는 장점이 있어, 풍력발전용 단조품 뿐만 아니라, 여타 소재부품에도 흔히 적용되고 있다.

표 7. 풍력발전용 플랜지 소재의 인장 및 충격특성 요구치

Code	Steel quality and grade	Normal product thickness "t" (mm)	Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	El.(%)	Impact properties	
						Test Temp.	Avg. (J), L
EN 10025-3 (2004)	S355NL	16≤t	355	470-630	22	-50℃	Min.50
		16<t≤40	345				
		40<t≤63	335				
		63<t≤80	325				
		80<t≤100	315	450-600	21		
		100<t≤150	295				
		150<t≤200	285				
		200<t≤250	275				
ASTM A694	F42	0<t≤250	min. 290	min. 415	min. 20	-50℃	Min.50

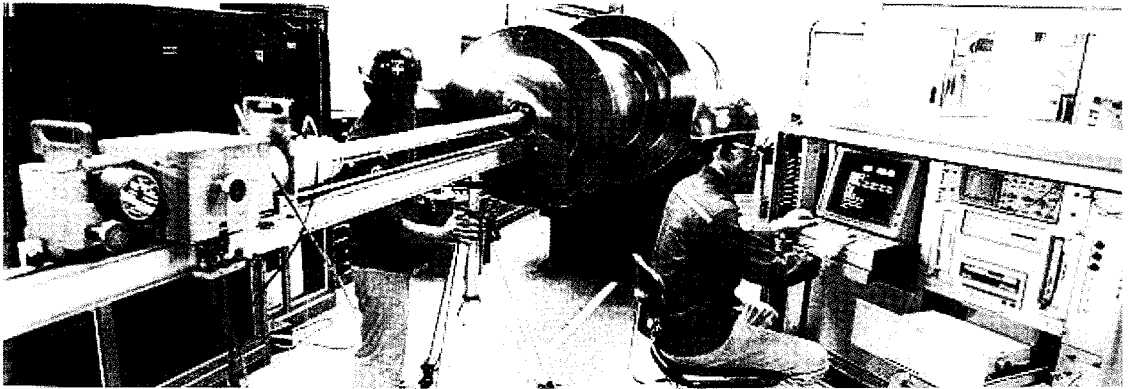


그림 34. 대형시스템 소재부품의 비파괴검사 현장

## 8.2 블레이드 비파괴시험

블레이드의 제조결함 대표적인 블레이드의 제조결함은 박리(delamination), 접착결함(adhesive flaws), 수지 부족(resin-poor 혹은 dry spot) 등이다.

외관상으로 보기에는 결함이 없어 보이는 블레이드도 외관만을 믿을 수 없다는 것은 전문가들은 알고 있다. 따라서 결함을 검색하기 위하여 전통적인 다양한 방법이 사용되고 있다.

앞장에서 언급한 바와 같이 블레이드는 주로 매트나 매쉬 형태의 유리섬유로 이루어져 있다. 수십미터의 블레이드를 제작하기 위하여 수백장의 유리섬유를 적층하여 수지로 함침시킨다. 조그만 섬유들의 불규칙성도 기포나 다른 형상의 결함의 원인이 될 수 있고 블레이드가 하중을 받으면 재료와 구조물에 기계적 응력을 유도한다. 이로 인하여 적층판이 찢어지고 블레이드 파손으로 이끈다.

## 8.3 육안검사

최근에 최신 NDT기술이 로터블레이드의 시험에 활용되고 있는데, 침투(penetrant) 시험, 소형카메라를 이용한 육안 검사 등이다. 현재 기계부품은 제조 시험은 수행하지 않고 있지만 손상원인은 조사하고 있다. 예를 들면 유성기어의 육안검사를 위하여 내시경을 통한 육안검사가 행해지고 있다. 하지만 손상된 부품은 주로 재료시험실에서 이루어진다.

## 8.4 초음파 NDT

초음파검사는 손상이 블레이드에 존재하는지를 검사하기 위하여 수행된다. 초음파검사는 이 결함은 빠르고 신뢰성 있게 찾아내고 비파괴적인 복합재료 검사방법을 사용한다. 초음파 주사법의 장점은 표면아래에 있는 부분을 볼 수 있게 하고 수지가 부족한 부분이나 박리(delamination)가 발생한 부분을 점검할 수 있게 한다는 점이다.

## 8.5 Tap 시험

두드리기(tap) 시험은 초음파시험의 결과를 증명하기 위하여 사용되거나 재료의 불균일성을 찾아내기 위하여 사용하는 방법이다. 그 기본 아이디어는 재료의 두께나 재료 종류가 변하거나 기공이 존재할 때 구조물을 두드리면 발생하는 소리가 변화하는 것이다. 블레이드의 스파와 스킨사이의 접착이 분리되었을 때도 소리의 변화가 발생한다. 이 때 사용되는 도구는 수동용 tapping hammer, "Woodpecker"라는 간이 접착시험기, 컴퓨터 tap tester(CATT, computer aid tap tester) 등이 있다. 자동화된 tap 시험은 손상영역을 인쇄해 낼 수 있다는 장점이 있어 손상을 기록화 할 수 있다. 단지 이 방법은 얇은 적층판, 하니컴 구조와 샌드위치 구조에서는 잘 되지지만 후판의 경우에는 효과적이지 않다.



## 8.6 적외선 thermography

접착제에 의한 접합은 블레이드 구조물에서 매우 중요한 사항이어서 주의해서 검사해야 하는데 육안으로 볼 수 없기 때문에 어렵고, 초음파 탐상이나 x-ray에 의한 결함의 검출 방법은 한계가 있다. 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 적외선을 활용한 결함의 검색 연구가 계속되어 왔다<sup>[17-19]</sup>.

최근에 독일의 프라운호퍼(Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Institut)에서 블레이드의 비파괴 검사를 위하여 개발한 적외선(IR, Infrared) thermography 방법이 대표적인 것이다. 전자석 대역(electromagnetic spectrum)에서 열을 발생하는 모든 물체는 또한 적외선을 방출한다. 적외선은 가시광선보다 긴 파장을 지니고 있어 우리는 볼 수는 없지만 기계적으로 검출은 가능하다. 물체로부터 방출되는 IR은 IR 검출기(Infrared detector)로 찾아서 칼러이미지로 나타낼 수 있다.

Active thermography는 열원(pulsed heat)을 주사하여 되돌아오는 신호를 이미지로 나타내는 방법이며, passive thermography는 자체적으로 방출되는 IR을 받아서 이미지로 나타내는 방법이다. 따라서 블레이드의 결함을 찾기 위해서는 active thermography개념을 사용한다. 그 원리는 IR 방출기(Infrared radiator)로써 간단히 표면을 가열하고 특수카메라로 표면의 열이 재료속으로 퍼지는 상황을 보여준다. 열의 전단 부분이 기포나 박리부분을 만나면 공기 속에서는 열이 연속 고체보다 적게 퍼져나가기 때문에 계속해서 축적이 된다. 이 축적된 열을 감지하여 화면으로 나타낼 수 있기 때문에 검사자는 수 센티미터 재료 속을 들여다 볼 수 있다. 적외선주사장치(IR scanner)는 블레이드의 길이 방향으로 시험을 하고 매번 같은 지점에서 정확하게 측정한다. 다시말해서 이 장치는 적층판의 두께를 투과하여 볼 수 있게 하고 접합 부위를 검사할 수 있게 한다. 이 장치에 의하면 접착부위의 온도차를 기록하는데 즉 결함을 탐지하여 사진으로 보관한다. 또한 확실하지 않은 부분이 있으면 그 부분만 집중적으로 전자이미지 처리과정을 거쳐서 분석할 수 있다. 그림 35는 독일 프라운호퍼 연구소에서 개발한 블레이드 비파괴 검사용 IR thermography 장치와 결함을 보여주는 예시<sup>[19]</sup>이다.



그림 35. infrared thermography 측정기와 결함의 예시

## 9. 결 론

풍력터빈의 핵심 부품에 사용되는 재료와 공정에 관하여 알아보았다. 대형기계시스템으로써의 풍력터빈은 전통적인 고강도와 고강성 구조재료를 사용하고 있다. 금속소재의 경우 이미 조선산업에서 사용되는 크롬-니켈-몰리 합금강을 주축의 소재로, 타워 플렌지는 S35NL과 같은 용접성이 우수한 저합금강, 베어링의 경우 크롬-몰리 합금강 등이 적용되고 있다. 이러한 합금강이 전체 소재의 대부분을 차지하고 있고, 약간의 Al이나 Cu가 사용되고 있다. 비금속 재료는 블레이드, 나셀커버, 노즈콘 등에 유리섬유 강화플라스틱이 거의 대부분을 차지하고 있다. 탄소섬유가 약간량 사용되기는 하나 미미한 수준이다. 강화플라스틱의 기지재료는 에폭시 수지가 압도적으로 많이 사용되고 있다. 주축은 자유형 단조 공법과 정밀 가공기술을 통하여 제조되고, 타워용 플렌지와 대형베어링용 링기어 등은 링단조 및 링

압연공정 등으로 제조된다. 대형 복합재료 구조물인 블레이드는 액상수지주입법(resin infusion)이 압도적으로 많이 활용되고 있으며, 나셀커버나 노즈콘 등 허우징부품은 수적층(hand layup)법을 사용한다. 대형 구조물의 비파괴검사 방법도 전통적으로 사용되는 x-ray와 초음파탐상법 등을 활용하고 있다. 특히 복합재료 블레이드의 비파괴적인 방법은 전통적이고 경험적인 육안검사와 tapping법, 부분 초음파검사법 등이 활용되고 있으며, 온라인 점검법으로 IR thermography방법의 도입을 위하여 노력하고 있다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] 한국철강협회, “세계 및 국내 철강산업 동향”, 2007-1호, 2007.
- [2] 한민족과학기술자네트워크(KOSEN), “청정 에너지 생산을 위한 풍력터빈: 기술 및 문제점” 한민족과학기술자네트워크(KOSEN) 웹진, 78호, 2008.
- [3] BTM consult ApS, “International Wind Energy Development World Market Update 2007”, 2008.
- [4] Dan Ancona and Jin McVeigh, “Wind Turbine—Materials and Manufacturing Fact Sheet,” Pinceton Energy Resources International LLC, 2001
- [5] 황창렬, 김중식, 김국주, 최승식, 염종택, “풍력발전용 단조부품 산업의 현황 및 전망”, 기계와 재료, 2007, p. 82-90.
- [6] Sreekunar Chockalingam and Vasntha R. W. Amarakoon, “Energy Efficient and Economical Processing of Silicon Nitride Ball Bearings for Wind Turbine Applications,” NYS College of Ceramics at Alfred University
- [7] 염종택, 최승식, 이종수, “대형 링 구조부품의 제조를 위한 링 압연공정기술”, 기계와 재료, 19권 3호, 2007, p.111-118.
- [8] 두산중공업 주단 BG 자료
- [9] R. Shivpuri. E. Eruc, “Planning and Simulation of the Ring Rolling Process for Improved Productivity”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, No.2, 1993, pp.153-173
- [10] R. Bolin, “Ring Rolling”, ASM Handbook, Vol. 14A, Metalworking; Bulk Forming, ASM Int., Materials Park, OH 44073-0002 (2005), pp. 136-155.
- [11] J. T. Yeom, J. H. Kim, N. K. Park, S. S. Choi, C. S. Lee, J. Mater. Process. Tech., Vols. 187-188, 2007, pp. 747-751
- [12] 이종문, 조동환, “불포화 폴리에스터/비닐에스터 블렌드의 경화 거동, 열안정성 및 굴곡 특성”, 폴리머, 제27권 제2호, p.120-128
- [13] 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱, 최신복합재료, 교학사, 1995
- [14] Chris Red, “Windmill Blade Production: Will Record Gains Push Automation?”, Composites Manufacturing, 2006
- [15] Dayton A. Griffin, Thomas D. Ashwill, “Alternative Composite Materials for Megawatt-Scale Wind Turbine Blades: Design Considerations and Recommended Testing”, Journal of Solar Energy Engineering, 2003
- [16] Barry Berenberg, “Redesigning Wind Blades”, High-Performance Composites, 2002
- [17] M. A. Drewry and G. A. Georgiou, “A Review of NDT techniques for wind turbines,” Insight Vol. 49, No. 3, March 2997
- [18] G.M. Smith, B. R. Clayton, A. G. Dutton and A. D. Irving, “Infrared thermography for condition monitoring



of composite wind turbine blades: feasibility studies using cyclic loading tests,” Wind Energy Conference 1993, Proceedings of the 15th British Wind Energy Association Conference, 6 – 8 Oct 1993, York(UK), pp 365–371

[19] P. Meinschmidt and J. Aderhold, “Defect Detection in Rotor Blades using Thermographic Inspection Techniques,” DEWEK 2006, 8th German Wind Energy Conference, Nov 22 – 23, 2006, Bremen, Germany



황 병 선

- 재료연구소 풍력핵심기술연구센터 센터장
- 관심분야 : 풍력발전시스템, 복합재료 블레이드 제조 및 시험
- E-mail : hbs@kims.re.kr



염 중 택

- 재료연구소 특수합금연구그룹 선임연구원
- 관심분야 : 고온소재 소성가공기술, 특수합금 성형 해석 및 평가기술
- E-mail : yjt96@kims.re.kr



이 진 우

- 재료연구소 복합재료연구그룹 선임연구원
- 관심분야 : 고분자 재료 개발, 기능성 복합재료 개발
- E-mail : yjw0628@kims.re.kr