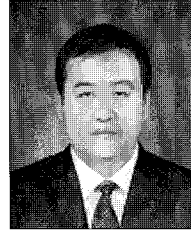
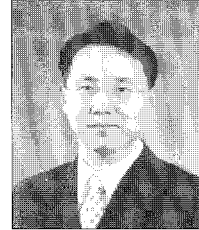


# 한국선급의 풍력발전시스템 설계적합성 평가과정 소개 (전산유체 및 구조해석 평가)

## Introduction to Process of Conformity Evaluation of the Wind Turbine System Design



이 강 수\*



이 장 현\*\*

\* (사)한국선급 에너지환경사업단 선임연구원  
\*\* 인하대학교 기계공학부 선박해양공학과 조교수

### 1. 서 론

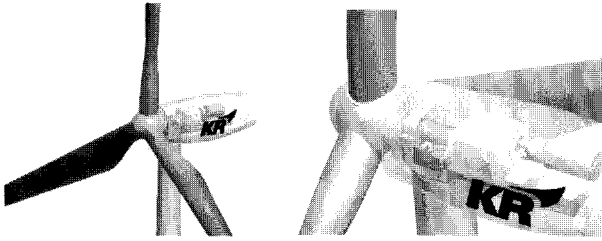
풍력터빈은 설계, 제조 및 설치가 완료되어 전력을 생산하기 까지 여러 단계를 거치게 되며 풍력터빈 제조자는 IEC 국제규격에 따라 인증기관(certification body)을 통해 각 단계에서 인증서(certificate)를 획득해야 한다. 인증서가 곧 풍력터빈의 보증서를 의미하는 것은 아니지만 특정한 풍력터빈 모델이 인정된 시험 기관에서 시험되고 평가되었으며 하중, 성능, 전력품질, 구조적인 완전성, 안전성 및 기타 특성 등이 국제적으로 공인된 기준과 부합됨을 풍력터빈의 구매자에게 확인시키는 것을 의미한다. 즉 인증은 풍력발전에 관심이 있는 전력회사, 정부, 개인 및 기관 투자자들에게 있어 투자를 결정하는 주요 지표 중의 하나이다.



인증시스템을 도입하는 이유는 제3자가 제품, 공정 또는 서비스가 지정된 요구사항(설계기준)에 적합하다고 서면으로 보증하는 절차(적합성 평가)와 풍력발전기의 성능평가를 수행하는 절차로 대별될 수 있으며 풍력발전기의 안정성 확보와 국제규격에 부합하는 풍력발전 시스템을 제작하여 국제무역을 촉진하고자 함에 있다.

현재 대표적인 국제인증기관으로는 GL, DNV, UL, 등이 있으며 이들 기관이 인증시장을 주도하고 있다. 한편, 주요 풍력터빈 제조업체인 Vestas, Gamesa, GE, Enercon 등이 세계 풍력터빈 시장의 약 75%를 점유하고 있다<sup>1)</sup>. 국내에서도 정부 지원으로 중대형 풍력발전기의 국내 보급을 목적으로 국산화 개발이 진행되어 현재 750kW급과 1.5MW급은 양산 단계에 있으며 2MW급과 3MW급이 평가 및 개발 중에 있다. 또한, 인증은 특성상 풍력터빈의 설계과정부터 제조 후 전력을 생산하기까지 인증기관이 참여해야 하므로 풍력터빈 제조회사의 육성과 더불어 정부의 지원 아래 풍력터빈의 인증과 관련하여 성능 평가 시험 시스템 및 설계적합성 평가 시스템이 구축 중에 있다.

여기서는 개정 중인 IEC WT01(풍력터빈의 적합성 시험 및 인증을 위한 IEC 체제) 및 개정중인 IEC 61400-22TS에서 규정하고 있는 인증기관이 수행해야 할 풍력터빈의 형식인증 절차 중에서 설계평가에 대해 소개하고, 이를 바탕으로 인증기관이 수행하는 설계평가 과정을 간략히 소개한다.



## 2. 풍력발전설비의 인증

### 2.1 인증의 종류

인증은 풍력터빈이 설계평가에서 시운전 및 운전의 모니터링까지 풍력터빈의 형식, 주요 구성부품 형식 또는 지정된 위치에서의 1기 이상의 풍력터빈에 대해 제3자(인증기관)에 의한 적합성 평가로 구성되며, 평가의 결과로는 다음 4가지의 인증서가 발행된다.

- 형식인증서 (Type Certificate)
- 사업인증서 (Project Certificate)
- 부품인증서 (Component Certificate)
- 프로토타입인증서 (Prototype Certificate)

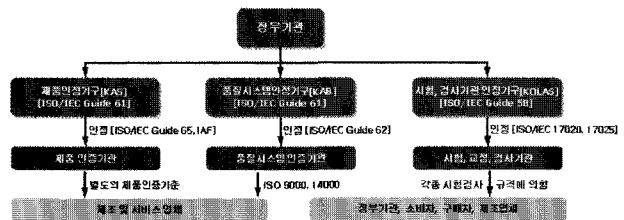
형식인증은 한 가지 형식의 풍력터빈에 적용되는 것으로서 타워 및 타워와 기초 사이의 연결형식을 포함하며 풍력터빈 형식이 설계가정, 지정된 규격, 기타 기술 요구사항에 적합하게 설계되고 문서화되며 제작되었음을 확인하는 것으로서 설계문서 대로 설치되고 운전되며 관리된다는 검증이 필요하다. 사업인증은 형식인증된 풍력터빈 및 특별한 기초설계가 해당사이트의 외부조건을 충족시키는지의 여부와 해당지역의 법규 및 사이트의 기타 요구사항과 일치하는지를 확인하는 것이다.

부품인증은 블레이드와 기어와 같이 풍력터빈의 주요 부품들이 설계가정, 지정된 규격 및 기타 기술 요구사항에 적합하게 설계되고 문서화되며 제조되는지를 확인하는 것이다. 프로토타입인증은 양산되지 않은 새로운 형식의 풍력터빈의 시험을 위한 인증절차로서 최대 3년의 유효기간을 갖는 인증서가 발행되며 안전에 영향을 줄만한 수정이 가해지면 새로운 인증서를 발급 받아야 한다.

### 2.2 인증기관

인증기관은 ISO/IEC Guide 65(제품인증기관의 운영요건)<sup>3)</sup>에 의한 요건을 갖추고 국가의 인정기구(creditation body)에 의해 인정된 제3자 제품인증기관을 의미하며, 공정하게

풍력터빈의 적합성을 평가하여 지정된 요구사항에 적합할 경우 인증서를 발행한다. 우리나라는 국제 기준에 부합하는 인정기구인 한국제품인증기구(KAS: Korea Accreditation System)를 산업자원부 기술표준원 내에 설치하여 제품인증기관에 대한 인정업무를 수행하고 있다.<sup>4)</sup> 특히 KAS는 국제다자간상호인정협정(IAF-MLA)에 가입되어 있어 KAS가 인정한 국내 인증기관에서 인증서를 발급받을 경우 체약국의 인증기관과의 협정에 따라 체약국가로부터 별도의 인증을 받을 필요가 없어 외국인인증기관의 인증에 따른 기간과 비용을 절감할 수 있다. 인증체제와 각 항목은 다음 표와 같다.



- ISO/IEC Guide 58 : 시험소 인정기구를 위한 일반기준
- ISO/IEC Guide 61 : 인증/등록기관의 평가 및 인정을 위한 일반요건
- ISO/IEC Guide 62 : 품질시스템평가 및 인증/등록 운영기구의 일반요건
- ISO/IEC Guide 65 : 제품인증시스템 운영기구의 일반요건
- ISO/IEC 17020 : 검사기관 운영에 관한 일반요건
- ISO/IEC 17025 : 교정 및 시험기관 자격에 관한 일반요건

IEC인증서는 다음과 같다.

- 1. 인증서 (Certificate)**
  - 모든 사항을 만족한 경우 발행 (형식인증/프로젝트인증/부품인증/프로토타입인증)
  - 유효기간은 5년을 초과할 수 없음.
- 2. 적합확인서 (Conformity Statement)**
  - 인증의 각 단계가 평가된 후 발행
  - 유효기간의 연장은 없음.
- 3. 임시인증서 (Provisional Certificate)**
  - 안전에 중요한 영향을 미치지 않는 부적합사항이나 미결사항이 있는 경우 발행
  - 유효기간은 1년, 1년 이내에 부적합 사항 또는 미결사항을 완전히 처리해야 함.

## 3. 설계 평가

설계평가(design evaluation)는 형식인증 절차에서 의무사항(mandatory module)으로서 형식인증을 받고자하는 신청자가 인증기관에 제출한 설계문서<sup>2)</sup>를 바탕으로 풍력터빈 형식이 설계가정, 지정된 규격 및 기타 기술적 요구사항에

맞게 설계되고 문서화되었는지를 평가하는 것이다. 따라서 신청자가 제출하는 설계문서는 설계규격, 설계인자, 설계가정 및 제조, 이송, 설치 및 시운전과 관련된 요구사항 등을 포함해야 한다. 형식인증의 절차는 다음 표와 같다.

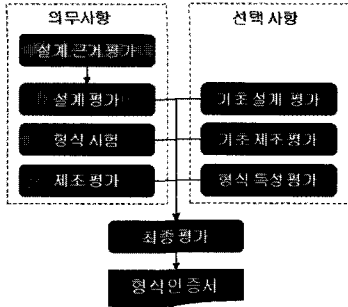


그림 1 형식인증 과정

### 3.1 설계관리 평가

설계과정을 관리하는 품질절차를 평가하는 것으로서 ISO 9001(4.4절 설계관리)<sup>5)</sup>을 따를 것을 요구하며, 모든 문서의 개정상태를 반영하는 문서관리를 요구한다.

### 3.2 제어 및 보호 시스템 평가

제어와 보호 시스템과 관련된 문서를 평가하는 것으로서 풍력터빈의 운전 모드, 모든 요소의 설계 및 기능성, 보호 시스템의 페일세이프 설계, 시스템 논리와 하드웨어 실행, 안전과 관련된 중요 센서의 신뢰성 입증, 제동 시스템 해석, 상태감시, 제어 및 보호시스템의 기능 검증을 위한 시험계획 등이 평가 대상이 된다.

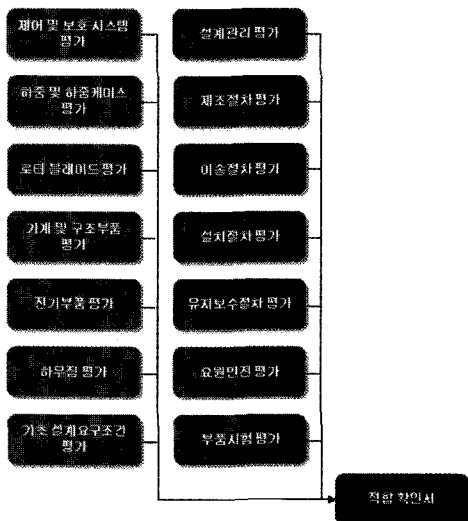


그림 2 평가대상 리스트

### 3.3 하중 및 하중 케이스 평가

하중 및 하중 케이스 평가에서는 인증기관의 독자적인 분석이 요구되며 IEC 61400-1<sup>6)</sup>에 적합한가를 평가한다. 평가과정 및 하중에 관한 종류와 하중 케이스의 예는 다음과 같다.

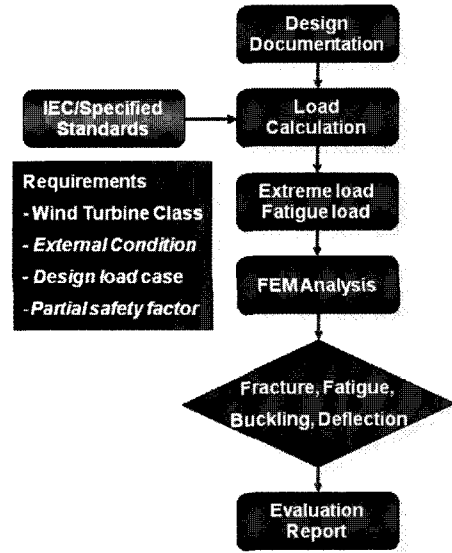


그림 3 설계평가 과정

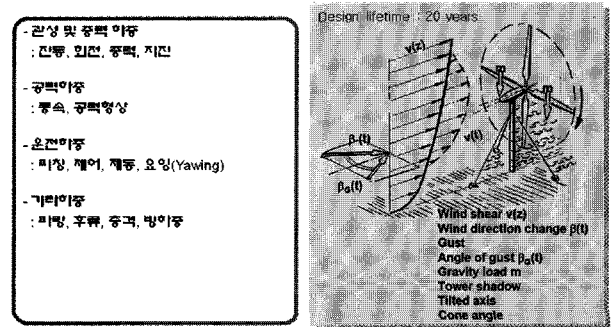


그림 4 풍력터빈 하중의 종류

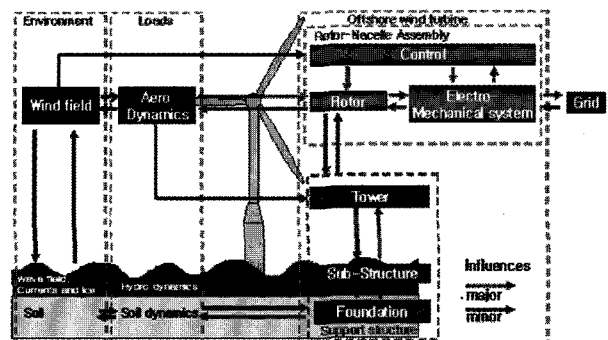


그림 5 공탄성해석

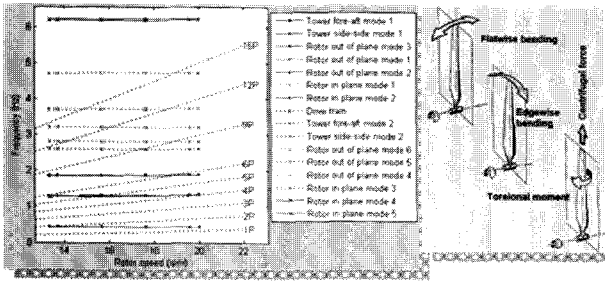


그림 6 진동특성 평가

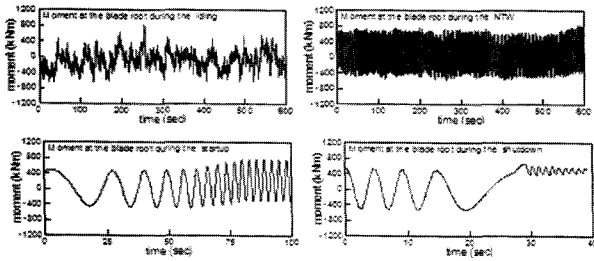


그림 7 힘과 모멘트

Load case		Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	
		kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	
Mx	Max	6.1a	-2260.3	-536.4	-8.8	-18.2	-110.6	15.2
Mx	Min	6.1a	-1773.0	126.8	-12.3	18.1	111.4	65.1
My	Max	1.6a	980.1	3298.3	-52.8	174.8	-69.2	429.0
My	Min	1.6a	137.8	-1531.2	-12.2	-71.8	-12.5	456.8
Mz	Max	1.5a	-833.1	2056.8	12.1	110.2	65.2	377.7
Mz	Min	7.1a	253.6	1541.9	-42.0	100.5	-24.4	-49.6
Fx	Max	1.6a	946.7	3283.7	-31.6	175.4	-65.8	437.6
Fx	Min	1.5a	602.9	-1519.4	-12.2	-74.4	-61.2	362.1
Fy	Max	6.1a	-1653.7	119.6	-19.5	14.6	121.6	58.6
Fy	Min	6.1a	2147.4	-543.7	-2.3	-29.4	-120.8	-48.9
Fz	Max	1.6a	56.6	834.9	-13.8	59.3	-0.79	-547.6
Fz	Min	6.1a	277.6	73.1	-13.0	11.5	-2.0	-61.9

그림 8 극치하중 평가

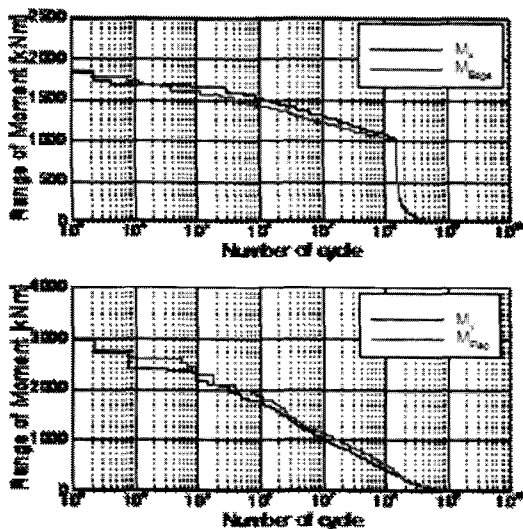


그림 9 피로하중 평가

이때 하중 케이스에 대한 설명, 계산모델 및 공기역학관련 인자, 구조적 특성값, 제어와 관련된 인자들이 입력 값으로

인증기관에 제공되어 하중계산에 이용된다. 하중계산은 IEC 61400-1에 규정된 풍력터빈의 운전상태와 외부조건을 포함한 여러 가지의 설계하중케이스(DLC)에 대하여 수행하며, 풍력터빈 후류 및 타워에 의한 유동장의 섭동(perturbation) 3차원 유동장에 의한 블레이드의 공기역학적 특성(3차원 실속 및 공기역학적 tip 손실), 비정상 공기역학적 영향, 공탄성(aeroelastic) 영향 및 풍력터빈의 제어 및 보호시스템의 거동 등을 고려해야 한다. 또한 설계된 풍력터빈에 대해 극한 강도 해석(ultimate strength analysis), 피로파괴(fatigue failure), 안정성(stability) 및 임계 변형 해석(critical deflection analysis)을 수행하여 설계수명 (보통 20년) 동안 구조적으로 완전할지를 평가한다. 하중계산에는 공탄성(aeroelastic) 해석 프로그램이 사용되며 허브 높이에서의 바람의 통계적인 난류스펙트럼 모델과 Coherency 모델을 사용하여 풍력터빈 블레이드가 sweep 하는 공간에 대해 시간에 따른 난류분포를 생성한 후<sup>6),7)</sup> 설계문서의 풍력터빈 데이터를 입력 값으로 공탄성 해석을 수행하여 관심 영역의 하중을 계산한다. 하중의 시간 분포로 Rainflow counting을 거쳐 Markov matrix가 구해지고 Goodman diagram 및 Palmgren/Miner rule<sup>8),9)</sup>을 사용하여 피로해석을 수행한다. 블레이드의 극한강도해석의 경우 Puck 식<sup>10)</sup>과 같은 섬유파손모델(fiber failure model)을 이용하여 파손 여부를 결정한다. 강도 평가 시 Puck 식과 유한요소 해석을 이용한 블레이드의 강도해석 결과이다. 하중계산으로부터 얻은 하중을 유한요소해석에 사용하고 Puck 식을 이용하여 파손여부를 판정하는 과정을 보여 준다. 이때 블레이드는 적층(laminate) 순서대로 shell 요소를 이용하여 모델링 한다. 다음은 그 결과를 보여주고 있다.

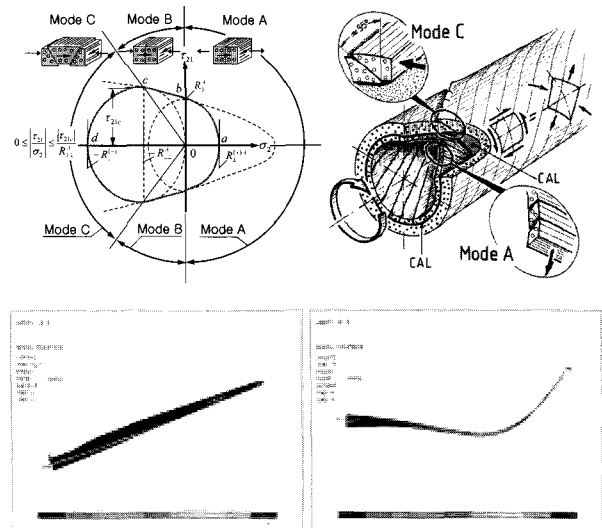


그림 10 블레이드 파손 및 좌굴 평가

### 3.4 기계 및 구조 구성부품 평가

하중계산 결과를 이용하여 하중이 가해지는 기계와 구성품의 설계를 평가해야 한다. 대상에는 주조, 단조 혹은 용접구조, 나셀 프레임, 타워, 피치(pitch) 및 요(yaw) 시스템, 베어링과 엘라스토머 부상, 기어박스, 브레이크, 커플링 및 잠금 장치, 연결 볼트, 냉각 및 가열 시스템, 유압시스템 등이 포함된다. 아래의 그림은 타워의 출입문, 허브, 축 및 베어링 하우징에 대한 유한요소 해석결과를 나타낸다.

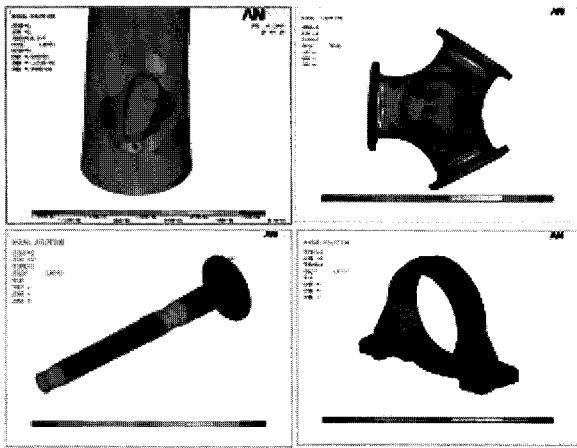


그림 11 구성품의 건전성 평가

### 3.5 기초 설계 요구사항 평가

설계문서에 기술된 기초(foundation) 설계 요구사항이 기초설계에 적합한지를 평가하는 것으로써 타워와 기초의 경계면에서의 수직, 수평력 및 모멘트와 같은 설계하중과 특성하중이 설계평가에 이용된다. 또한 조합 가능한 모든 하중케이스를 이용하여 극치 동적 하중과 피로 하중이 고려된다. 한편, 풍력터빈의 고유진동수 및 진동모드에 영향을 줄 수 있는 기초의 내구성(resistance)과 유연성(flexibility)이 풍력터빈이 설치될 사이트의 토양조건을 고려하여 평가되어야 한다. 아래의 그림은 유한요소 해석을 이용하여 기초부의 응력분포를 나타낸다.

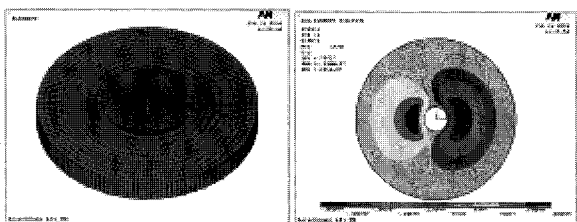


그림 12 기초부의 건전성 평가

### 3.6 기타 평가 사항

제작절차 평가에서는 설계문서에 명시된 품질 요구조건에 따라 풍력터빈이 제작될 수 있는지를 검증하는 과정이다. 이송절차에 대해서는 풍력터빈이 요구조건에 따라 이송될 수 있는지를 평가하며 요구조건에는 이송에 필요한 기술규격, 제한조건, 필요한 도구 및 하중조건이 포함된다. 설치절차와 관련된 설계문서에는 설치 인력 및 필요 기술에 대한 요구조건, 접지 시스템을 포함한 토목 및 전기 건설 작업에 필요한 기술규격 및 연결부, 특정 도구 및 리프팅 설비, 품질관리 항목, 측정 및 점검, 요원 안전 조치 및 계획된 환경보호 방법, 설치 매뉴얼, 시운전 절차 및 점검 리스트, 품질 기록 및 기록 보관 절차 등이 명시되어야 한다. 유지(관리) 절차 평가에서는 관리계획이 검증되어야 한다. 관리계획은 점검주기와 일상조치를 포함한 관리 스케줄, 모든 안전관련 운전절차 등을 포함해야 한다. 요원 안전과 관련 설계문서에는 안전교육, 등판설비, 접근통로, 서있는 위치, 난간, 조명, 전기 및 접지 시스템, 내화, 비상정지버튼, 해상 풍력터빈의 경우 대체 탈출로와 1 주일 동안 머물 수 있는 장소와 특별 안전장치 등이 명시되어야 하고 평가되어야 한다.

### 3.7 설계평가 적합 확인서

인증기관은 설계평가보고서를 평가한 후 적합 확인서를 발행한다. 풍력터빈의 형식, 신청자, IEC 61400 규격번호, 풍력터빈 클래스 및 외부조건, 평가보고서 관련 참고문헌 등이 적합 확인서에 포함된다.

### 3.8 최종 평가

설계평가를 포함하여 형식인증서의 각 항목들에 대한 평가가 끝난 후 각각 적합 확인서가 발행되며 모든 평가결과를 종합하여 최종 평가가 수행되며 최종 평가 보고서가 신청자에게 제출 된다. 또한 보고서가 완전하고 정확하다고 판단되면 최종적으로 아래의 그림과 같이 형식인증서가 발행된다. 한편, 최종 보고서에는 참고문헌, 문서 및 형식시험 결과가 제출된 설계문서의 요구사항에 부합되는지에 대한 평가결과 등이 포함되어야 한다.

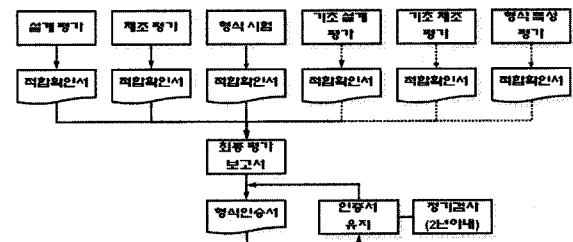


그림 13 최종 형식인증서 발급 과정

#### 4. 한국선급의 전산해석을 통한 통합 평가 시스템

에너지환경사업단에서는 자체 업무의 효율성을 높이고 업체들에게 높은 수준의 기술서비스와 인증기간을 단축시키기 위해 상용해석 S/W인 ANSYS를 기반으로 커스터마이징을 통하여 해석업무를 통합하고 있다. 즉, 새로운 인터페이스를 개발하여 제출 받은 도면만 가지고 새로 개발된 GUI에 입력하여 해석을 자동화할 수 있는 시스템을 추진하고 있다. 각 분야별 전용 전문가시스템을 구축하고 있는 중이다. 현재는 풍력발전기 블레이드 건전성평가에 관한 모듈 개발을 완료하였다. 인증을 받고자 하는 업체에 이러한 통합시스템을 제공함으로써 업체에서 먼저 이 시스템을 통하여 얻은 결과물의 건전성을 확인하고 우리 에너지환경사업단에 제출한다면 업무의 효율성을 높일 수 있을 것이다. 경쟁하고 있는 인증

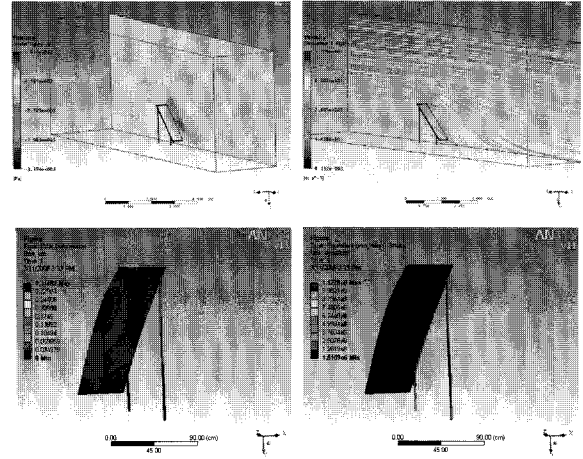


그림 16 Solar panel의 유체 및 구조해석

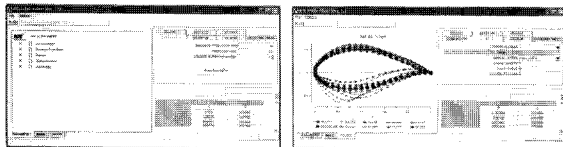


그림 14 한국선급의 통합 평가프로그램

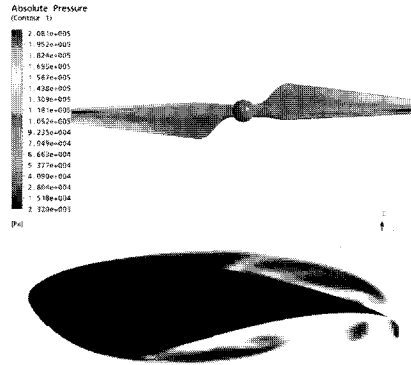



그림 17 조류발전기 블레이드의 성능해석

기관을 포함하여 해외 유명제조업체도 아직 이러한 통합해석 시스템을 도입하고 있지는 못하고 있다. 또한, 해양에너지 관련 분야의 연구도 수행하고 있다. 조류발전기의 CFD 및 FSI해석과 Solar panel의 유체, 구조해석을 수행하여 관련 분야에서 공헌을 하고 있다.

#### 5. 결론

지금까지 풍력터빈의 설계평가에 대해 간략히 소개하였다. 현재까지 국내에는 풍력발전인증과 관련하여 국제적으로 공인된 인증기관이 없는 상태이다. 따라서 국내에서 개발되고 있는 풍력발전기에 대한 인증을 외국의 인증기관에 의존하고 있다. 이에 현재 정부의 지원으로 국내에 풍력발전시스템의 인증기관구축을 위해 기술기준이 마련 중에 있다. 또한 향후 상호인정 체제를 구축하기 위해서 꾸준한 연구를 통해 국제적인 경쟁력을 갖추어야 할 것이며 한국선급은 기술적으로는 이미 세계적인 경쟁력을 갖추고 있다. 

[담당 : 이장현, 편집위원]

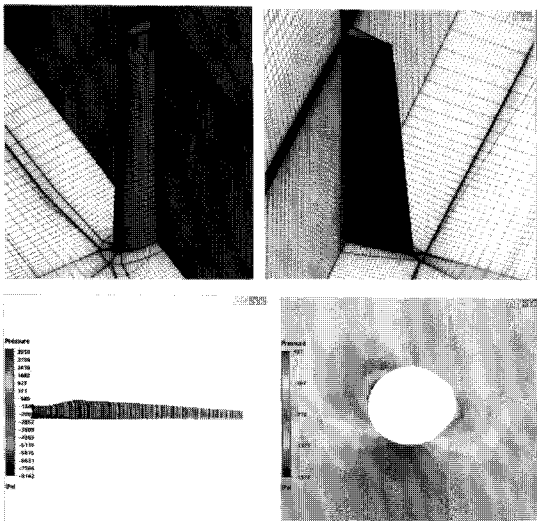


그림 15 블레이드의 CFD 및 FSI 연구결과