

친환경 에너지 개발 기술 최적 조합 선정을 위한 구조적 방법론: 풍력 발전 기술 조합 선정을 중심으로

권오병^{1)*}·최남²⁾

A Structured Methodology of Optimal Combination of Eco-Energy
Development Technologies: Focusing on Wind Power Technology
Combination

Ohbyung Kwon and Nan Cui

1) 경희대학교 경영대학(College of Management, Kyung Hee University)

2) 경희대학교 기술경영학과(Department of Technology Management, Kyung Hee University)

제 출 : 2010년 10월 11일 수 정 : 2010년 12월 10일 승 인 : 2011년 3월 17일

국 문 요 약

현재 전 세계적으로 환경오염과 자원위기 등 문제를 해결하기 위한 친환경 에너지와 관련된 기술 개발 투자가 확대되고 있다. 이러한 기술 개발 프로젝트는 국가적, 대규모적일수록 단일 기술이 아니라 여러 가지의 요소 기술들이 같이 개발되는 형태를 취하게 된다. 그러나 어떠한 기술 조합을 개발하는 것이 좋은지에 대한 의사결정을 하여 주는 방법론은 거의 존재하지 않는 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 최적의 친환경 에너지 기술 조합을 선정하는 방법론을 제안하는 것이다. 개발 기술들을 여러 개의 카테고리로 분류한 다음, 가장 근간이 되는 기준기술을 정하고, 해당 기준기술과의 관련성과 개발 성공에 대한 위험성이라고 하는 두 가지 차원과 관련성 및 위험성의 상대적 중요도를 고려하여 각 카테고리 별로 최적의 기술을 선정하게 된다. 제안한 선정 방법론의 가능성을 검증하기 위하여 풍력 발전 기술 조합 선정에 대한 사례에 적용해 보았다.

■ 주제어 ■ 친환경 에너지 기술, 프로젝트 관리, 기술 가치 평가, 전문가집단법, 풍력 발전, 기술 조합

Abstract

Investment on technology to obtain green energy is prevailing all over the world. The technology development project is more likely to involve multiple sub-projects, each of which is related to develop elementary technology when the project is larger and nation-wide. However, the methodologies

* 교신저자: obkwon@khu.ac.kr

** 본 연구는 지식경제 프론티어 기술개발사업의 일환으로 추진되고 있는 지식경제부의 유비쿼터스 컴퓨팅및네트워크원천기술개발사업의 10C2-T2-11T 과제로 지원된 것임.

identifying optimal combination of elementary technologies among the candidates have been very few. Hence, the purpose of this paper is to propose a novel methodology which provides an optimal combination of green energy technologies. To do so, to-be developed technologies are clustered with multiple categories. Among the technologies, based on Delphi method, the experts select a representative technology, which is indispensable to the green energy system and has the highest connectivity with other elementary technologies. Then the methodology selects an elementary technology from each technology category based on two metrics: Relatedness with representative technology and project risk. To show the feasibility of the proposed methodology, we applied the methodology to an actual windmill development project.

Keywords | Green Energy Technology, Project Management, Technology Value Assessment, Delphi Method, Wind Power, Technology Combination

I. 서론

최근 기후변화와 에너지 위기 등이 환경문제로 등장하면서 전 세계적으로 친환경 에너지 관련 기술에 대한 개발 활동이 활발하게 진행되고 있으며, 그 중 국제협력체제를 구축하기 위한 신·재생 에너지 개발에 관심이 집중되는 추세이다. 즉, 경제 지속 발전을 목표로 탄산가스 배출 저감에 초점을 두고 있다. 현재 경제발전을 위한 에너지 기술 개발이 필수적이며 미국, 일본과 유럽 지역 등 선진국들은 물론 중국, 인도 등 국가에서도 대체에너지 개발과 보급에 대한 많은 국력을 투입하고 있다. 미국과 일본은 제반 에너지 기술 분야에서 선도적 역할을 꾸준히 추구하여 왔으며 태양열 발전, 풍력 발전, 우주 발전, 해양 에너지, 수소 에너지 등 그린 에너지 기술을 포함하는 모든 기술 분야에 광범위하게 투자하고 있다. 그리고 경제규모가 작은 OECD 선진국들은 각국의 실정에 따라 상용화 가능성이 높고 파급효과가 큰 분야에 한정된 자원을 집중 투자하고 있으며, 장기간 대규모 투자가 요구되는 첨단 미래 기술에 대해서는 공동연구 방식을 취하고 있다. 국제에너지기구(IEA)도 각 회원국이 공유할 수 있는 전략적 기술을 중심으로 회원국 간 에너지 기술 정보의 공유 및 공동연구를 통한 예산 절감 및 전문 인력 활용을 위하여 에너지 기술 공동연구 개발 사업을 활발히 추진하고 있다. 한국의 경우 모든 에너지 기술 분야에 광범위하게 투자하는 것보다는 국제적 에너지 사용 규제에 대비하여 자원 확보, 기술 파급효과 등과 같은 여러 요인들을 고려한 집중적인 투자를 위한 시도가 점차 이루어지고 있다.

에너지 기술 프로젝트에 대한 투자 프로세스는 일반적으로 프로젝트 각각에 대한 에너지 절감액 예측, 미래의 에너지 비용 예측, 각 프로젝트의 투자액 추정, 각 프로젝트를 투자해야 하는 장점의 평가, 투자 우선순위의 결정, 그리고 프로젝트 실행 순으로 이루어지게 된다(Henry et al., 1980). 한편 에너지 기술에 대한 투자 효과에 대한 평가는 전통적으로 현재 가치 계산법(present value)과 투자회수율(rate of return), 그리고 투자회수기간(payback period) 방법 등이 사용되어 왔다. 현재가계산법은 장래에 발생할 모든 현금 흐름에 대해 특정 시점, 주로 현재 시점의 가치로 환산하여 그 값이 0보다 큰지 아닌지를 분석하는 방법이다. 또한 투자회수율 분석 방법은 미래의 현금 수입이 일정하다는 전제 하에 평균 투자액에 대하여 회수액의 비율을 측정하는 것이다. 이때 필요한 경우 감가상각과 지급이자 및 세액에 의한 지출 발생을 고려할 수 있다. 한편 투자회수기간 방법은 초기의 투자액을 회수하게 되는 시점이 언제인지를 예측하는 분석 방법이다. 그러나 이러한 방법들은 프로젝트 수준에서의 평가 방법이며 프로젝트에 속하는 개발 기술이 복수의 카테고리에 속할 때, 각 카테고리 안에서 어떠한 기술을 선택, 조합하여 개발해야 할 것인지에 대해서는 분석할 수 없다는 단점이 있다. 또한 이러한 기술 조합은 일반적으로 전문가들의 의견을 수렴하여 진행하므로 시간과 비용이 많이 들며 객관적인 측정이 어렵다는 문제점이 있는데, 이를 해결하기 위한 방편의 하나로 기술 조합을 위한 구조화된 방법론이 필요할 것이다.

구조화된 방법론은 먼저 기술에 대한 평가보다 기술 조합에 대한 평가가 이루어져야 한다. 대부분의 친환경 에너지 관련 투자는 여러 가지의 세부 기술 개발 과제로 이루어진다. 따라서 하나의 에너지 관련 기술 투자에 대한 효과보다는 투자되는 기술 그룹의 혼합적인 효과를 보아야 투자의 총체적인 효과를 알 수 있다. 그러나 이러한 측면을 모두 고려한 구조적 방법론은 거의 존재하지 않는다.

따라서 본 연구의 목적은 친환경 기술 개발에 적합한 구조화된 방법론을 제안하는 것이다. 특별히 하나의 기술 개발 과제가 아니라 여러 카테고리의 기술들이 존재하고 이들 카테고리에서 하나씩을 선택하여 최적의 조합을 구성하는 형태의 문제에 집중하고자 한다. 그리고 본 논문에서 제안한 방법론의 가능성을 평가하기 위해 풍력 발전기 개발 기술을 예로 하여 최적 기술 조합을 선정해 보았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 에너지 관련 기술의 대략과 기존의 기술 선정 방법론에 대한 문헌 연구를 기술하였다. 최적의 에너지 저감 기술 조합 채택을 위한 쾌락주의적, 효용주의적, 규범적 시각을 고려한 통합적 방법론을 3장에서 소개

하였으며, 방법론의 활용 가능성을 검증하기 위해 풍력 에너지 기술 채택에 대한 제안을 4장에 실시하였다. 그리고 본 논문의 공헌과 추후 연구 방향에 대해서 5장의 결론 부분에서 기술하였다.

II. 선행 연구: 개발 기술 선정 방법론

글로벌 경쟁이 심해짐에 따라 기술 선정은 기업 성장에 대한 의사결정에 도움을 준다(F.T.S. Chan, M.H. Chan & N.K.H. Tang, 2000). 기술 선정 방법은 주로 최적의 R&D 프로젝트 선정 또는 신제품을 개발하기 위한 최적의 기술 선정을 위해 사용된다. 기술에 대한 평가 방법인 투자회수기간(Traditionally payback period, PB), 투자수익(return on investment, ROI), 내부수익률(internal rate of return, IRR), 순현재가치(net present value, NPV) 등을 많이 사용하고 있다. Rygh(1981)는 자동창고(AS/RS)기술의 정당화를 평가하기 위한 투자회수 방법을 제안했다. 또한 Meyer(1982)는 로봇 기술에 대한 투자수익 방법(ROI)과 순현재가치 방법(NPV)을 결합한 방식을 사용해서 기술을 평가하여 선정하였다. Klahorst(1983)는 투자수익(ROI), 순현재가치(NPV)와 투자회수기간(PB)을 사용하여 탄성 생산 시스템(flexible manufacturing systems, FMS)을 평가하였다. Fotsch(1983)는 67개의 생산기업에 대한 조사를 통해 기술의 정당화 평가를 하기 위해 65%의 기업들이 투자회수기간(PB) 방법을 사용했고 26%의 기업들이 투자수익방법(ROI)을 선택했다. 그 외에도 Fox 등은 기술 개발에 필요한 요구사항을 고려한 현재가치를 측정하는 것을 제안했다.

Bard와 Feinberg는 다속성 효용이론(multiattribute utility theory)을 활용해서 기술 평가를 하였으며, Kirby와 Mavris는 이익, 활용 가능한 일정, 예산 자원을 고려한 기술 평가를 통해 최적의 개발 기술을 선택할 것을 제안했다. 또한, Krishnan & Bhattacharya 등은 신제품 개발과정에 기술을 선정하기 위한 신제품 개발의 불확실성과 디자인의 유연성 등 특성을 고려한 미래 기술들 중 적합한 기술을 선정하는 방법론을 제안하였다.

현재 기계 공구, 산업용 로봇, 또는 유연 제조 시스템 등 기술에 대한 잠재적 구매자들은 기술의 성능과 비용에 대한 많은 선택에 직면한다. Khouja(1994)는 기술 선정 문제에 대한 두 단계 프로시저 모델을 제안하였다. 먼저 자료포락분석 (Data Envelopment Analysis, DEA) 단계에서 기술을 식별하여 공급업자들이 제공된 기술들

의 기술 규격, 성능 파라미터 등을 맞게 최적 조합을 제공한다. 두 번째 단계는 다속성 결정 모형을 사용하여 첫 단계에서 제공된 기술 중에서 최적기술을 선택할 것이다.

또한 한국 국내 연구들 중에 에너지 기술에 대한 기술 평가 및 선정을 하기 위해 이덕기 등(2001)은 기술평가 및 선정 방법인 AHP(Analytic Hierarchy Process), CVM(Contingent Valuation Method), MAUT(Multi-Attribute Utility Theory) 기법을 비교해서 MAUT가 제일 저렴한 것으로 나타남에 따라 선정하게 되었다. MAUT는 여러 요인을 고려하며 여러 기술들을 한 번에 평가할 수 있으며 기술의 우위를 결정할 수 있다. 에너지 기술 속성은 3가지 대속성(환경성, 경제성, 자원성)과 6개의 세부 속성(CO₂ 저감; SO_x, NO_x 저감; VOC(휘발성 유기화합물) 저감; 에너지 이용효율 향상; 자원 공급 가능량; 기술과급효과)을 정해 평가하였다.

그러나 이상의 연구들은 기술 선택에 대한 예산, 비용, 경제적 가치, 효율 등을 근거로 해당 도메인의 최적의 단위 기술을 선택하는데 복수개의 기술 카테고리 중에서 각 기술간 연관성과 미래형 기술 개발의 위험성 등 요소를 종합적으로 고려하지 않고 최적의 조합을 이루지 못하는 한계를 가진다. R&D 프로젝트에 대한 최적 기술을 선택하는 기존의 연구가 있었으나 이것은 유비쿼터스 기술에 국한된 것이었으며, 위험도에 대한 분석을 응답자의 주관적인 답변에 의지하여 객관성이 떨어진다(이연님, 2008).

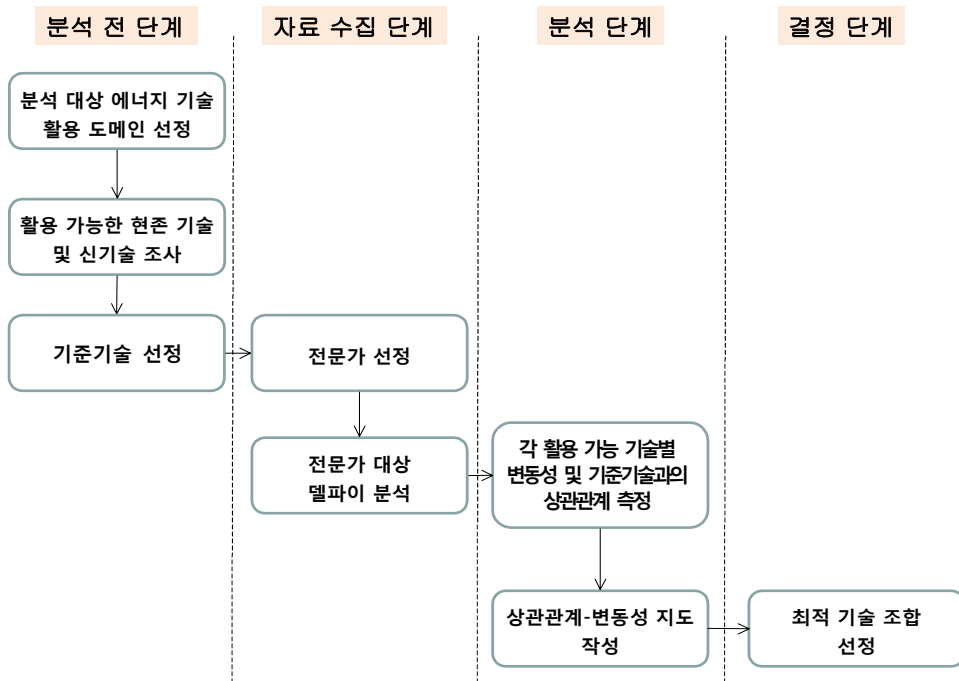
III. 최적 에너지 저감 기술 조합 채택을 위한 평가 방법론

1. 전체적 프레임워크

본 연구에서 집중하는 것은 에너지 관련 기술 선정이 아니라 기술 조합 선정에 있다. 에너지 저감이나 신재생 에너지 확보를 위한 신제품 개발이라는 차원에서 볼 때 하나의 카테고리에 있는 에너지 기술로만 개발되는 것이 아니라 복수개의 기술 카테고리가 존재하고 각 카테고리 내에서 한 개 이상의 기술을 선정하는 경우가 많다. 따라서 하나의 기술에서만 볼 때의 우수성이 반드시 제품 개발 차원에서 최적을 보장하는 것은 아니다. 도리어 다른 기술들과의 연관성 또는 상호 종속성 요인들을 살펴보고 전체 최적을 이룰 수 있도록 해야 한다. 한편 에너지 기술 조합을 선정할 때 고려할 수 있는 부분은 효율적 요인, 유희적 요인, 규범적 요인, 기술적 요인 등 다차원적이거나 본 논문에서는 기술적 요인에 초점을 두어서 고려하고자 한다.

기술성을 위주로 한 에너지 기술 조합 선정 방법론은 먼저 현재 확보하려는 에너지 저감 기술이 의도하는 시점에 실용화가 가능한지와 관련이 있다. 그리고 확보하려는 기술 조합의 가장 근간이 되는 기준기술이 존재한다면 이 기준기술과 특정 후보 기술이 상호 관련성이 얼마나 되는지에 대해서 분석해야 한다. 이러한 요소들을 고려하여 다음과 같이 행복 지수 관점의 최적 기술 조합을 선정하기 위한 프로세스를 <그림 1>과 같이 제안한다.

그림 1 최적 에너지 기술 조합 선정 프로세스



첫 단계로 에너지 기술을 활용하게 될 도메인을 선정한다. 도메인은 도시나 주택단지과 같은 물리적 도메인, 운송이나 산업 생산과 같은 기능적 도메인, 그리고 국가나 기업과 같은 조직적 도메인 등을 다양하게 고려하여 결정될 수 있다. 본 논문에서는 풍력 발전 설비 분야에 집중하고자 한다.

다음으로 이러한 도메인에서 에너지 사용을 절감하거나 대체 에너지로의 이전 등과 같은 구성원의 에너지 관련 개선과 관련된 기술들을 채택하기 위해 기술 조사를 한다.

이때 사용 기술은 이미 개발되어 구매가 가능한 현존 기술일 수도 있으며 또는 직접 혹은 위탁 개발을 해야 하는 미래 기술일 수도 있다.

한편 특정 목적을 달성하기 위한 에너지 제품이 여러 가지 기술 카테고리의 조합인 경우라면 그 기술 조합에서 기준기술을 하나 선정하도록 한다. 기준기술이란 해당 기술 조합에서 가장 대표성을 가지는 기술로서 그 기술 조합을 설명하기에 가장 적합하며 그 기술이 존재하지 않으면 기술 조합 자체가 무의미해지는 기술을 의미한다. 또한 조합 내 여타 기술들은 얼마든지 다른 유사 경쟁 기술로 대체가 가능하거나 그것이 없을 경우 효율성이나 성능의 저하는 있겠으나 조합 자체의 의미가 사라지지 않는 핵심적 기술을 의미한다.

일단 기준기술이 정해지고 나면 앞서 수집된 모든 기술에 대해 변동성 및 기준기술과의 기술적 상관관계를 측정한다. 이후 측정된 값들에 기반하여 기술 분류별로 상관관계-변동성 지도(Correlation-Volatility Map, C-V Map)를 작성하고 기술성 요인 분석을 실시한다. 이때 변동성의 허용범위는 개발대상이 되는 도메인의 목적 및 의도에 따라 다르게 정해질 수 있다.

본 연구에서 최적 기술 조합 선정을 위해 변동성 또는 위험성, 그리고 기준기술과의 기술적 상관관계를 고려한 것은 다음과 같은 이유에서이다. 첫째로, 개별 기술별로 기술 수준을 등급화하는 연구는 의미가 있을 것이며 이는 본 연구와는 별도로 다루어져야 할 미시적 연구 분야임에도 불구하고, 이들은 기술 조합의 전체 최적화를 고려하지 않고 있다(박종오, 2000). 둘째로, 기술의 경제적 가치 평가에 많이 사용되는 현금할인법 등은 풍력 발전 기술과 같이 미래 기술에 대해서는 그 가치가 축소 왜곡되는 현상이 발견되어 적용하기 어려운 것으로 알려져 있다(Davis and Owens, 2003). 셋째로, 또한 풍력 발전 기술 평가에서 많이 인용되는 Siddiqui et al. (2005)나 이를 보완한 실물 옵션 접근법은 기술 개발은 절대로 실패하지 않는다는 가정을 하고 있기 때문에 현실성이 떨어진다는 약점이 있다(김경택, 2010). 다음으로 본 연구의 출발이 된 재무투자에서의 최적 포트폴리오를 위한 금융 상품 선정 방법을 생각할 수 있다. 이 방법론에서는 수익성과 위험성이라는 두 요인을 활용하고 있다. 그러나 수익성이라고 하는 인자는 각 상품들이 독립적으로 수익을 낼 때 사용하고 있으며 그렇지 않을 때에는 가장 근간이 되는 투자 상품을 선정한 후에 그 상품과의 관련성으로 수익성을 대체할 수 있다. 따라서 본 논문은 미래 기술에 대한 기업의 상용화 가능성을 중시하여 최적 기술 조합을 이루기 위한 그 선정 기준을 기술 연관성과 위험성으로 보았다. 다만 기술

연관성을 측정하기 위해서는 기준기술이 사전 선정되어야 하는데, 그런데 기준기술은 어느 과제나 가장 근간이 되는 기술 카테고리가 존재하므로 현실적으로 문제가 없다고 판단했다. 그리고 마지막으로 최종 선정된 기술 조합 결과에 대해서 전문가들의 높은 동의가 있다면 기술 연관성과 위험성 관점으로 평가한 것이 실제적일 수 있다고 검증할 수도 있을 것이다.

상관관계-변동성 지도에 의한 분석을 종료하고 나면 최적 기술 조합(optimal technology combination)을 구성한다. 이연남과 권오병(2008)이 제안한 상관관계-변동성 지도는 선정된 모든 기술 중에 기준기술(Base Technology)을 선정하는 것으로 시작한다. 그 다음 수집된 모든 기술에 대해 전문가 설문조사를 통해 변동성 및 기술적 상관관계를 측정하고 상관관계-변동성 지도를 작성할 것이다.

2. 분석 전 단계

기술적 요인의 분석은 확보하려고 하는 기술 조합 내 요소 기술들이 각각 기술적으로 성공 가능하며, 조합 내 요소 기술 간 보합성이 얼마나 높은지를 판단하는 것이다. 기술적 요인 분석은 다음과 같은 단계를 거친다.

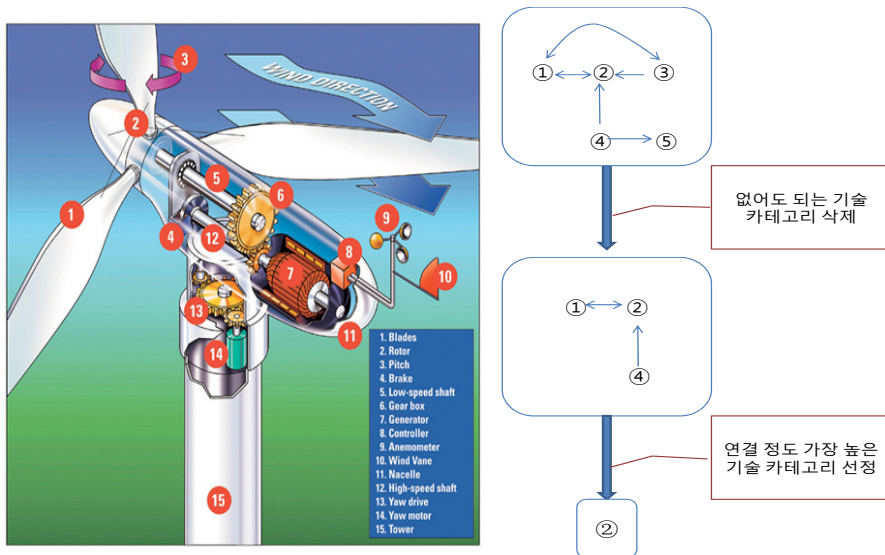
[단계 1] 분석 대상 제품 선정: 특정 조직에서 확보하려고 하는 제품의 유형과 요구 사항을 정리한다. 예를 들어 유형으로는 에너지 저감용이나 청정에너지, 에너지 재생산 등이 있을 것이다. 요구 사항은 목표로 하는 성능이나 내구성 등이 그 예가 될 것이다.

[단계 2] 관련 현존 기술 및 신기술 현황 조사: 제품의 유형과 요구 사항이 정리되면 그에 부합하기 위해 활용 가능한 현존 기술 및 현재 개발 중이거나 개발 계획 중인 신기술의 목록을 작성한다. 이때 현존 기술의 목록은 현존하는 모든 기술이 아닌 현재 상용화되어 가장 일반적으로 사용되고 있는 기술이나 해당 서비스 제공을 위해 표준으로 채택된 기술들을 중심으로 정리한다. 반면 신기술의 목록은 현재 국내외적으로 해당 서비스와 동일한 혹은 유사한 서비스를 제공하기 위해 추진 중인 대표적인 신기술 개발 프로젝트들을 조사하여 이를 중심으로 작성한다. 이 단계의 결과로 기술 카테고리 및 카테고리 내의 신기술이 분류된다.

[단계 3] 기준기술 선정: 제품 개발에 가장 핵심적인 요소에 해당하는 기술을 하나 이상 선정한다. 여기서 기준기술이란 대상 제품 개발 시 어떠한 상황적 변수가 발생하더라도 반드시 해당 제품에 포함되어야 하는 기술로 최적 기술 조합 선정 시 기준으로 활용된다.

기준기술을 선정하는 순서는 다음과 같다. 먼저 대상으로 하는 제품의 기술 카테고리별로 연관도를 작성한다. 연관도는 기술 종속관계에 따라 단방향의 화살표나 양방향의 화살표로 표현한다. 단방향의 화살표는 가리키는 쪽이 종속적인 기술 카테고리가 된다. 두 번째로 기술 카테고리 중에서 반드시 필요하지는 않은 카테고리를 제외시킨다. 물론 제외된 카테고리에 연결되어 있던 화살표들도 같이 삭제된다. 다만 이의 판단은 고려하고 있는 개발 제품에 따라 달라질 것이다. 세 번째로 남겨져 있는 기술 카테고리 간 연관도에서 각 카테고리 별로 연결 정도를 계산한다. 단 연결 정도 계산에서 종속적인 것으로 연결된 것은 계산하지 않는다. 만약 최대 연결 정도가 동일한 기술 카테고리가 복수개인 경우에는 임의로 선정하게 된다.

그림 2 기준기술 선정 예



예를 들어 <그림 2>와 같이 풍력 발전기 제작을 위해 1~5번까지의 기술 카테고리만으로 제품을 제작한다고 하자. 그리고 우측 상단과 같이 다섯 기술 카테고리의 연결성이 파악되었다고 하자. 본 예에서는 3, 5번이 필수적이지는 않은 기술 카테고리

선정된 것이다. 그러면 남은 1, 2, 4번 기술 카테고리 중에서 1번은 연결 정도가 1, 2번은 2, 그리고 4번은 0이 된다. 따라서 가장 연결 정도가 높은 2번 카테고리를 기준기술로 선정하게 된다.

3. 자료 수집 단계

자료 수집 단계는 확보된 기술 분류표 상의 각 평가 대상 기술들에 대해 몇 가지 중요한 척도를 평가하기 위한 기초 자료를 수집하는 단계이다. 그런데 이는 친환경 에너지 기술이 아직 일반인들이 보유하기 어려운 지식 분야일 뿐더러, 사전 검증이나 모의 실험에 들어가는 비용이 크므로 서베이나 실험실 실험 관찰과 같은 비교적 객관적인 수집 방법을 사용하지는 못하고, 전문가 집단법이나 문헌에 대한 내용 분석 등을 활용해야 한다. 이에 본 논문에서는 전문가 집단법을 채택하였다.

[단계 4] 전문가 선정: 해당 친환경 에너지 기술의 전문가를 복수 선정한다. 이를 위해 해당 기술에 대한 전문 학술 논문의 저자들이나 연구보고서, 강연자들에 대한 정보를 웹과 같은 공개된 자원으로부터 획득하여 후보자 군을 구성한 다음 이메일로 접촉하여 수락 여부를 확인한다. 설문 분석 시 본인들이 특정 기술 카테고리 별로 어느 정도의 전문가인지에 대해서 답변하게 하며, 그 답변 결과는 의견 취합 시 가중치로 반영, 전문 정도에 비례하여 영향을 미치도록 한다.

[단계 5] 전문가 대상 델파이 분석: 신재생 에너지 기술은 전문적 기술이며 이것에 대한 평가 및 기술 조합 선정은 전문적 한계가 있기 때문에 본 연구에서 기술별 위험도 및 기준기술과의 상관관계를 측정하기 위한 전문가 분석을 실행한다. 결과의 정확성을 확보하기 위한 전문가들을 대상으로 설문조사를 3회 수행하게 된다.

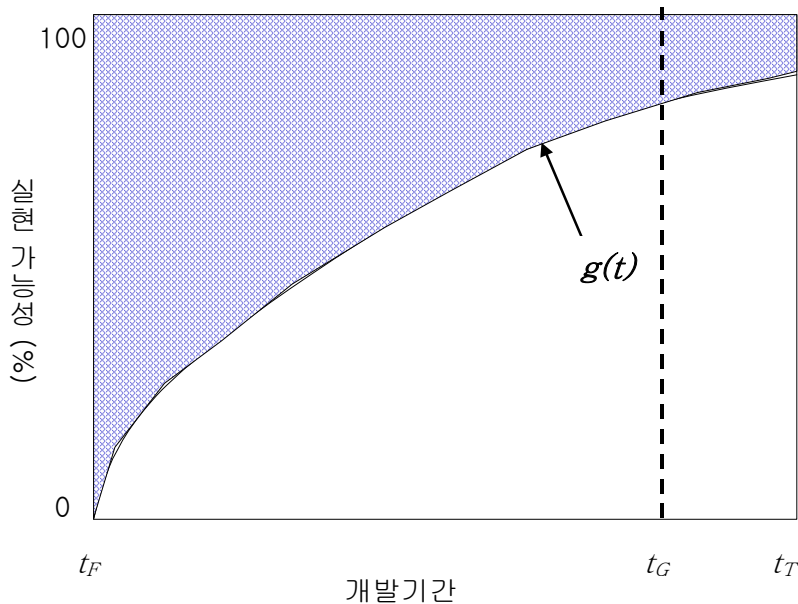
4. 분석 단계

분석 단계는 전문가들이 합의한 의견 자료를 근간으로 하여 몇 가지 중요한 척도에 대해서 계산을 하는 단계이다. 본 논문에서는 기술 조합 선정을 위해 상관성과 위험성이라는 두 가지 척도를 고려했으며, 이를 토대로 상관관계-변동성 지도를 사용하여 종합 판정을 하게 된다.

[단계 6] 상관성 및 위험성 측정: 본 논문에서 상관성이란 기준기술 개발이 평가 대상 기술의 개발 결정에 얼마나 긍정적인지를 수치화한 것으로 보완적일수록 1의 값으로, 대체적일수록 -1 값으로 가게 된다. 보완적이라 함은 기준기술 개발로 인해 획득된 노하우나 결과 보고서가 평가 대상 기술 개발에도 도움이 되는지, 양쪽 기술 개발자들의 유사성으로 서로 인적 교류가 가능한지 등 대상 평가 기술이 기준기술의 발전에 얼마나 긍정적 영향을 주는지를 수치화한다. 반면 -1로 가면 갈수록 평가 대상 기술이 기준기술 확보 시 예상되는 목표 결과물에 합치하지 않아 병행하여 적용할 수 없어도리어 기준기술 개발을 방해하게 되는 경우를 의미한다. 한편 0으로 간다는 것은 서로 기술적 관련성이 없는 경우이다.

한편 위험성은 기술 개발이 목표 시한 내에 실용화에 성공하지 못할 가능성을 의미한다. 그런데 목표 시한은 과제의 성격에 따라 변동 가능하기 때문에 한 시점에서의 성공 가능성을 보지 않고 기간 관점에서 위험성을 분석하려고 한다. 그래서 이론적으로는 다음 <그림 3>에 해당하는 면적이 전체 면적에서 차지하는 비율을 의미한다.

그림 3 대상 기술의 위험성

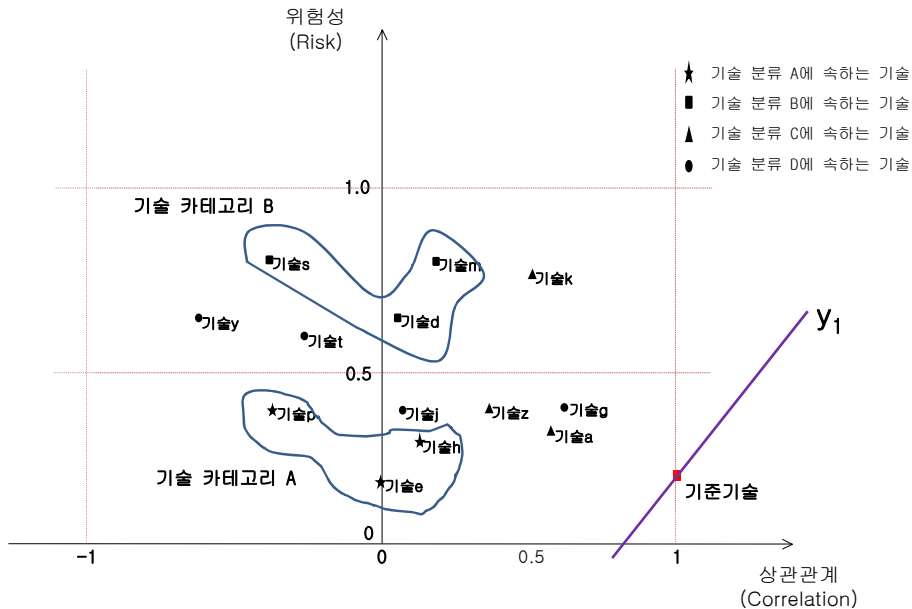


$$\sigma = 1 - \int_{t=t_F}^{t_G} g(t)dt \quad \text{----- (1)}$$

단, $\int_{t=t_F}^{t_T} g(t)dt = 1$ 이며, 여기서 t_F 는 개발 시작 시점, t_G 은 목표 개발 종료 시점, 그리고 t_T 는 개발이 허용되는 최종 시점을 의미하며, 당연히 $t_F \leq t_G \leq t_T$ 이다. 개발 시작 시점과 목표 개발 종료 시점이 동일한 것은 외주로 확보하는 경우를 뜻한다.

[단계 7] 상관관계-변동성 지도 작성: 각 후보 기술들에 대해 상관성 및 위험성이 계산되고 나면 상관관계-변동성 지도를 작성할 수 있다. 상관관계-변동성 지도는 본격적인 최적 기술 조합 탐색을 위해 <그림 4>와 같이 고려하는 모든 후보 기술들의 기준기술과의 상관관계 및 변동성을 표현하는 그림이다(권오병, 2008).

그림 4 상관관계-변동성 지도



5. 결정 단계

[단계8] 최적 기술 조합 선정: 상관관계-변동성 지도가 작성되면 최적 기술 조합을 선정하기 위해 모든 카테고리에 대해서 특정 기술을 확보하는 데 소요되는 비용을 추정한다. 소요비용은 다음과 같은 요소들로 이루어진다.

상관관계 저하로 발생하는 비용 상승분과 변동성 상승으로 발생하는 비용 상승분은 다음과 같은 초평면(hyperplane) y_1 과 특정 기술의 위치 사이의 거리로 계산한다. 여기서 $\omega_\rho, \rho, \omega_\sigma, \sigma$ 은 각각 상관관계에 대한 의사결정자의 상대적 고려 가중치, 상관관계의 크기, 변동성에 대한 의사결정자의 상대적 고려 가중치, 그리고 변동성의 크기이다. ω_ρ 값이 크다는 것은 기준기술과의 상관관계를 중시하는 것으로 기준기술이 전체 개발 프로젝트에서 차지하는 위상이 높거나 구현해야 할 목표 결과물이 이미 확정되어 있어 변동이 어려운 경우를 시사한다. 한편, ω_σ 값이 크다는 것은 보통 개발할 기술에 대한 확보 필요 시점이 매우 견고하거나 보유하고 있는 예산이 확대될 가능성이 적어서 기술 개발에 있어 시한 연장 가능성이 낮을 때에 해당된다.

$$y_1 = \omega_\rho \rho - \omega_\sigma \sigma \quad \text{-----} \quad (2)$$

위 식에서 상대적 가중치는 개발하는 제품 개발 목적 및 개발 의도에 따라 변동될 수 있다. 예를 들어 상용화를 목표로 하는 경우에는 안정적인 기술이 선호되므로 변동성에 대한 고려 가중치를 보다 높게 설정할 수 있다. 또한 실험적이거나 선도적인 목적으로 개발되는 경우는 성공적인 구축 자체가 가장 큰 목적이 되므로 상관관계에 대한 상대적 가중치를 보다 높게 설정할 수 있다.

결국 각 후보 요소 기술별 기술적 요인(f_T) 평가는 다음과 같이 기술 i 의 개발 기간 중 발생하는 총 예상 개발 비용(DC_i)과 해당 기술 i 의 위치와 y_1 과의 최단거리 (d_i)의 함수로 정의한다.

$$f_T = (DC_i \times d_i)^{-1} \text{----- (3)}$$

그러면 각 카테고리 별로 f_T 가 가장 작은 기술들을 선정한다. 그리고 그 기술들이 모여면 최적 조합으로 인식한다.

IV. 사례 분석: A사의 풍력 발전기 개발 기술 조합 최적화

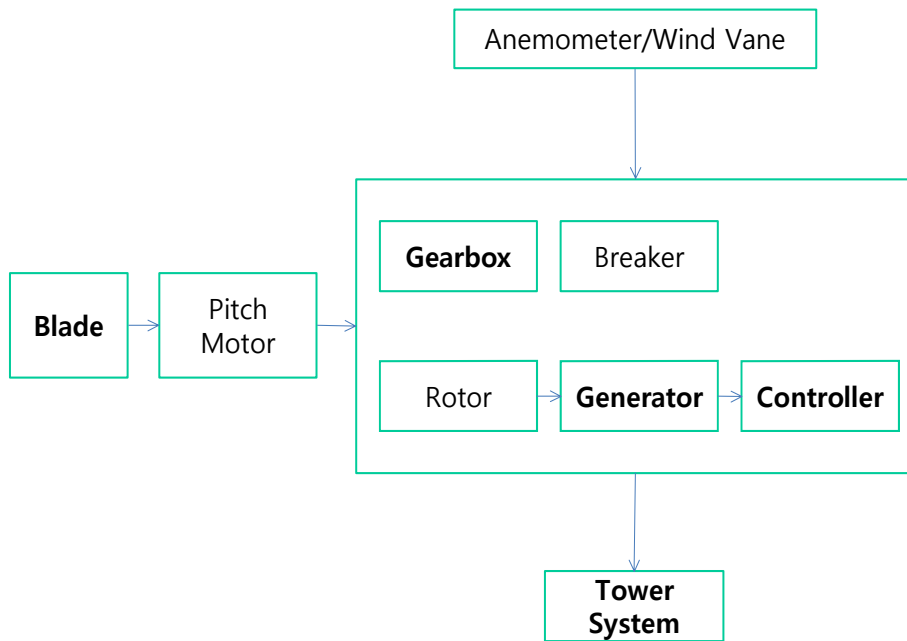
풍력은 대표적인 친환경 에너지에 해당한다. 그러나 현재 풍력 발전 기술은 대외 의존도가 아주 높으며 외국 풍력 발전 장치 제조수준이 현지 풍력 발전 사업에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 보인다(Lewis & Wisser, 2007). 현재 미국에서 활발하게 진행하고 있는 스마트그리드시티 프로그램에서도 화력 발전소에만 의지하는 것이 아니라 풍력 에너지 등 분산된 에너지를 활용하고 있다(박승창, 2009). 따라서 본 연구에서는 전형적인 친환경 에너지 기술로서의 풍력 발전에 집중하였다. 그리고 미국의 한 풍력 발전 개발 업체인 리카도(Ricardo)사(이하 A사)의 풍력 발전기 제조 기술 개발 프로젝트로 최적 조합 선정 방법론의 합리성을 검증하여 보았다. A사는 글로벌 멀티 사업 엔지니어링 업체이며 주요 사업 분야는 기술 컨설팅, 전략 컨설팅, 소프트웨어 개발, 기술 지원, 정보 지원 등이다. 해양 에너지, 풍력 에너지, 태양 에너지, 열 병합 에너지 등 청정에너지 기술과 에너지 저장기술 등 분야에 고품질 엔지니어링 해결법, 저탄소 및 고효율 연료 기술 등을 제공한다. 풍력 발전 기술에 대한 동력 시스템 기술 개발, 기어박스, 발전기 및 컨트롤, 전자 및 모니터링 시스템 등 시스템 구성과 터빈 장치에 관한 모든 기술 분야에 대한 연구 활동이 활발하게 진행되고 있다.

1. 적용 대상

풍력 발전은 바람이 갖고 있는 운동 에너지를 기계 에너지로 1차 변환한 후 터빈에서 생산된 안정적 회전속도를 발전장치에 전달하며 안정적인 운행으로 기계 에너지를 전기에너지로 전환할 것이다. 일정 속도의 바람만 불면 어느 곳에서도 발전이 가능한데, 풍력 발전기의 날개는 3m/s 이상의 바람만 불면 자동으로 돌아가나 40m/s 이상이

되면 발전기의 과부하 우려로 속력을 줄여야 하므로 브레이크나 변속 기능이 필요하다. 날개에 의해 변환된 바람의 힘은 동력 전달 장치를 통해 발전기를 돌려 전기로 변환된다. 또 바람의 세기에 따라 고감도 센서가 풍력을 측정, 발전량을 제어한다. 이렇게 만들어진 전기는 전력선을 통해 공장과 가정에 공급되며, 소규모 독립형 전원의 경우에는 축전지에 저장되어 일반 수요자에게 공급된다.

그림 5 풍력 발전 기술 연관도



풍력 발전기의 개략은 위의 <그림 5>와 같다. 풍력이 가진 에너지를 흡수, 변환하는 운동량 변환 장치, 동력 전달 장치, 동력 변환 장치, 제어 장치 등으로 구성되어 있으며, 각 구성 요소들은 상호 연관되어 전체적인 시스템으로서 작동된다. 일반적으로 풍력 발전기는 풍력 발전 터빈 덮개인 나셀(Nacelle), 발전기, 타워 세 가지 부분으로 구성된다. 나셀은 풍력 에너지를 기계 에너지로 전환하는데 중요한 부분이며, 기어박스, 주축(저속축, 고속축), 발전기, 제어부, 브레이크로 구성된다. 터빈에 포함된 블레이드는 블레이드로 들어오는 공기에 의해 블레이드의 양력과 회전력이 발생한다. 그러나

회전자의 회전속도는 상대적으로 낮으며 풍력의 강도와 방향도 자주 변동적이기 때문에 회전속도가 안정되지 않는다. 그러므로 회전속도를 발전기 정격 속도로 제고할 수 있는 기어박스과 속도 조정 장치를 필요로 한다. 그 다음에 발전기와 연계할 것이다. 타워는 터빈과 발전기를 지탱하는 부분이다. 통상적으로 더 강력하고 안정된 풍력 에너지를 얻기 위해 타워를 높게 설치한다. 바람의 속도는 지상으로부터 높이에 따라 증가하므로, 타워가 높으면 더 많은 전기를 생산할 수 있다. 일반적으로 소형 풍력 발전기의 타워 높이는 6-20m이며 발전력 2MW 풍력 터빈의 경우 80m 이상이다.

A사는 <그림 5> 상의 풍력 발전 요소 중에서 블레이드, 기어박스, 발전기, 컨트롤러, 타워 시스템에 집중하여 개발하고, 나머지는 기존 확보 기술 활용이나 구매 등의 방법으로 확보하기로 했다. 본 적용 사례를 위해 풍력 발전 설비 중에 각 기술별 채택 가능한 기술로 A사는 <표 1>에 나타난 기술들을 후보로 보았다.

표 1 각 기술 카테고리별로 고려된 후보 기술

기술 카테고리	기술
Speed & Load Control	Active pitch control Passive fatigue load control Active control surface
Blade Manufacturing	CNC layout with automation Advanced automation Segmented blades On-site construction
Blade Design	Improved airfoil shapes Increasing blade length for offshore application Integration of advanced material
Gearbox	Direct drive Synchronous (constant speed) drive "Hybrid" 1 or 2 stage gearbox Advanced lightweight materials Integrated generator/gearbox
Generator	Wound rotor synchronous generator Low speed permanent magnet generator High speed permanent magnet generator Superconductor generators

표 1 각 기술 카테고리별로 고려된 후보 기술 (계속)

기술 카테고리	기술
Power Electronics	Full power rated converter High voltage IGBT IGCT
Tower System	Pre-cast concrete base Hybrid (steel/concrete) Hybrid (composites integration) On-site assembly Increasing height for offshore applications
Control Techniques	Upwind sensing Total wind farm optimization Integration with wind forecasting Health monitoring Statistic-based prognostics Model-based prognostics

2. 풍력 발전 시스템에 대한 기준기술 선정

본 사례에서의 기준기술은 풍력 발전 관련 기술 중에서 가장 기본이 되고, 전체 Wind Turbine 시스템 성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 기술이다. 이를 결정하기 위해 사전 전문가 면접을 진행하였다. 전문가 집단은 A사의 자문 위원들인데, 풍력 에너지 기술 개발 경험이 있는 웨인 주립대학 교수진과 연구진들로 구성되어 있다. 이들로부 터 각 기술 카테고리가 풍력 터빈 시스템에 어느 정도 영향을 미칠 것인지에 대해 <표 2>와 같은 응답 결과를 얻었다. 결국 각 기술별 중요도 측정을 통해 블레이드 길이를 늘리는 기술은 시스템 효율성과 관련해서 매우 중요한 핵심 기술임을 알게 되어 Blade Design 기술 카테고리에 속한 “Increasing blade length for offshore application” 기술을 기준기술로 선정하게 되었다.

표 2 각 기술별로 중요도 분석 결과

기술 카테고리	기술	중요도
Speed & Load Control	Active pitch control	167
	Passive fatigue load control	79
	Active control surface	167
Blade Manufacturing	CNC layout with automation	171
	Advanced automation	159
	Segmented blades	171
	On-site construction	147
Blade Design	Improved airfoil shapes	139
	Increasing blade length for offshore application	199
	Integration of advanced material	175
Gearbox	Direct drive	136
	Synchronous (constant speed) drive	141
	"Hybrid" 1 or 2 stage gearbox	141
	Advanced lightweight materials	178
	Integrated generator/gearbox	146
Generator	Wound rotor synchronous generator	142
	Low speed permanent magnet generator	142
	High speed permanent magnet generator	142
	Superconductor generators	142
Power Electronics	Full power rated converter	123
	High voltage IGBT	127
	IGCT	129
Tower System	Pre-cast concrete base	118
	Hybrid (steel/concrete)	128
	Hybrid (composites integration)	125
	On-site assembly	129
	Increasing height for offshore applications	164
Control Techniques	Upwind sensing	162
	Total wind farm optimization	194
	Integration with wind forecasting	151
	Health monitoring	156
	Statistic-based prognostics	153
	Model-based prognostics	147

3 전문가 분석

본 연구에서 설문조사의 방식으로 전문가 분석을 진행하였다. 우선 구글(Google)의 학술 검색 기능을 통해 풍력 발전 기술과 관련된 문헌 자료를 검색하였다. 구글 학술 검색은 '풍력 발전'이라는 키워드로 적절성에 따라 순위가 매겨지도록 하였으며 그 중 연락 가능한 연락처가 공개되어 있는 저자들로 상위 50명을 선정하였다. 그 중에서 이메일 또는 전화 등 방식으로 설문에 응할 의향에 대해 문의하였다. 최종적으로 10명의 전문가로부터 설문에 응할 의향이 있다고 답장이 왔으며, 실제 응답한 전문가는 8명이었다.

기준기술을 선정한 다음 일련의 전문가를 대상으로 설문조사를 진행하였다. 설문조사 응답자들은 풍력 발전 기술에 대한 개발경험이 있는 대학교수, 전문연구원 및 프로젝트 관리자 등 8명으로 구성되었으며 설문조사는 총 3회로 진행하였다. 설문조사 실시 기간과 프로세스는 <표 3>과 같다.

표 3 설문조사 진행 프로세스

설문 절차	기 간	내 용
1차 설문	2010년 5월 17일 ~ 5월 28일	인식된 각 기술과 기준기술과의 상관관계, 위험도를 측정
2차 설문	2010년 6월 4일 ~ 6월 22일	1차 설문에서 산정된 평균치를 기반으로 재측정
3차 설문	2010년 9월 13일 ~ 9월 30일	기술 조합 결과에 대한 검증

이들의 개략적인 프로파일은 다음 <표 4>와 같다.

표 4 설문 응답자 프로파일

전문가 번호	소속	제1 전문분야
1	제주대학교 청정에너지실증연구센터	Speed & Load Control
2	효성 풍력 에너지연구센터	Tower System
3	Industrial and Manufacturing Engineering, Wayne State University	Blade Design & Gearbox
4	호남광역경제권 선도산업지원단	Generator & Power Electronics & Control Techniques
5	한국전기연구원 스마트그리드 연구본부 신재생에너지시스템 연구센터	Generator & Power Electronics
6	한국선급 신재생에너지팀 에너지환경사업단	Tower System

표 4 설문 응답자 프로필 (계속)

전문가 번호	소속	제1 전문분야
7	한국선급 에너지 및 환경 사업 센터 신 성장 기술 지원팀 선임 연구원	Blade Design & Tower System
8	호남 광역 경제권 선도산업 지원단 풍력 지원실 PD	Blade Manufacturing & Generator & Power Electronics

이들 전문가를 대상으로 이메일을 통해 1차 설문을 실시하였다. 1차 설문을 통해 인식된 각 기술과 기준기술과의 상관관계, 위험도를 측정하도록 했다. 기준기술과의 상관관계를 측정하기 위해 측정항목은 리커트 7점 척도(-3 = 기준기술의 발전에 부정적 영향을 준다, 0 = 기준기술 발전과 특별히 관련이 없다, 3 = 기준기술의 발전에 긍정적 영향을 준다)로 측정하였다. 위험도에 대한 각 기술들은 연속적인 답변을 확보하기 어려우므로 향후 몇 년 이내에 실제 풍력에너지 시스템에 상용화를 될 수 있을지에 대한 2012, 2015, 2020년의 세 가지 시점별로 답변하게 하였다 (1 = 절대로 상용화 안됨, 7 = 반드시 상용화 될 것임). 이렇게 1차 설문조사를 진행하고 나서 각 기술별의 전체 설문결과의 평균치를 산정되었다.

2차 설문은 1차 설문에서 산정된 평균치를 참조해서 다시 한번 진행된 것이다. 이리므로 더 객관적이고 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있었다. 2차 설문에서 각 전문가로 하여금 각 기술 카테고리별로 자신의 전문성에 대해 답변을 하도록 했다. 기술 카테고리별 전문성을 측정한 다음 각 전문가의 종합적인 전문성에 대한 평가를 하였다. 측정 결과는 다음 <표 5>와 같이 제시되었다. 계산된 종합적 전문성 값을 2차 설문에서 측정된 기준기술과의 상관관계와 변동성 값에 대한 가중 평균치로 반영하였다.

표 5 종합적 전문성 평가 결과

기술 카테고리	전문가1	전문가2	전문가3	전문가4	전문가5	전문가6	전문가7	전문가8
Speed & Load Control	0.245	0.163	0.020	0.082	0.082	0.082	0.163	0.163
Blade Manufacturing	0.180	0.090	0.010	0.090	0.090	0.180	0.090	0.270
Blade Design	0.180	0.090	0.011	0.090	0.090	0.090	0.270	0.180
Gearbox	0.178	0.178	0.022	0.089	0.089	0.089	0.178	0.178
Generator	0.082	0.082	0.010	0.165	0.247	0.082	0.082	0.247
Power Electronics	0.083	0.083	0.010	0.165	0.248	0.083	0.083	0.248
Tower System	0.130	0.194	0.028	0.065	0.130	0.194	0.194	0.065
Control Techniques	0.082	0.163	0.020	0.163	0.163	0.163	0.082	0.163

위험성의 측정은 측정 연도인 2010년의 상용화 수준을 0으로 설정하였다. 그런 후에 각 기술별, 연도별 기준 평균치로 위험성 분석을 하였다. 결국 각 기술들에 대하여 관련성과 위험성 값들이 <표 6>과 같이 계산되었다. 특이한 점은 위험성의 표준 오차가 관련성에 비하여 상대적으로 낮게 나오는데, 이는 제안된 방법론의 실행 가능성을 검증하기 위한 실제 기업에서 실행중인 풍력 발전 프로젝트를 선택했기 때문으로 보인다. 즉, 채택된 모든 기술들은 랜덤 하게 나열한 것이 아니라 실제 A사 풍력 발전 개발 프로젝트에서 후보로 고려하는 것들로서, 이미 기술 성공 가능성이 높게 점쳐진 기술들이었을 것이므로, 전문가 평가에서도 위험성의 분산이 상대적으로 낮게 나온 것으로 보인다. 위의 결과를 바탕으로 먼저 각 카레고리별 상관관계-변동성 지도를 <그림 6>과 같이 작성하였다. 단 괄호 안의 수치는 표준오차를 의미한다. 또한 관련성의 경우 -3점부터 3점 사이의 평균이며, 위험성은 0부터 1사이의 값의 가중 평균이다. 따라서 관련성의 표준오차가 위험성보다 다소 큰 것으로 보이는 것은 이러한 값의 범위 상의 차이 때문이다. 평가치에 대한 전문가들의 견해 차이를 보기 위해서 각 평가 항목별 가장 오차가 많이 나는 기술을 보았는데, 관련성의 경우에는 Blade Manufacturing의 On-site construction 기술(1.923)이었으며, 위험성의 경우에는 Control techniques의 Integration with wind forecasting 기술(0.098)이었다. 1.923은 0에서 1사이로 정규화하면 약 0.3에 해당하므로 전문가 사이에 비교적 일치하는 견해를 보였다고 볼 수 있다.

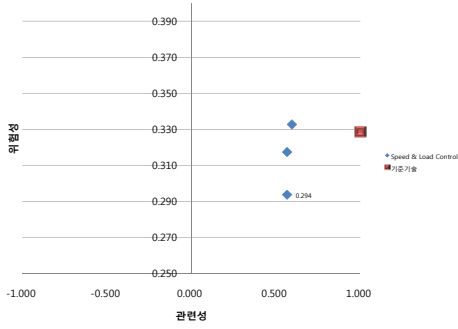
표 6 기술별 기준기술과의 관련성 및 위험성

기술 카테고리	기술	관련성(표준편차)	위험성(표준편차)
Speed & Load Control	Active pitch control	0.567(1.414)	0.294(0.089)
	Passive fatigue load control	0.596(1.653)	0.333(0.087)
	Active control surface	0.567(1.776)	0.317(0.053)
Blade Manufacturing	CNC layout with automation	0.640(1.035)	0.302(0.032)
	Advanced automation	0.730(1.069)	0.292(0.024)
	Segmented blades	0.808(0.835)	0.353(0.054)
	On-site construction	0.520(1.923)	0.278(0.030)
Blade Design	Improved airfoil shapes	0.814(0.886)	0.337(0.048)
	Increasing blade length for offshore application	1.000(0.000)	0.329(0.038)
	Integration of advanced material	0.940(0.463)	0.300(0.052)

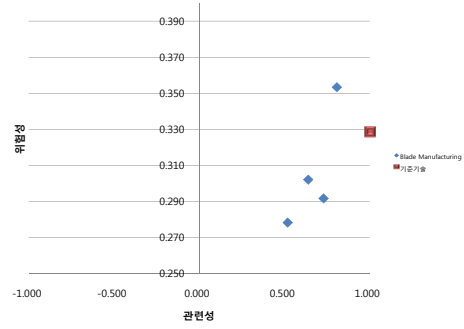
표 6 기술별 기준기술과의 관련성 및 위험성 (계속)

기술 카테고리	기술	관련성(표준편차)	위험성(표준편차)
Gearbox	Direct drive	0.422(1.389)	0.297(0.043)
	Synchronous (constant speed) drive	0.387(1.389)	0.323(0.044)
	"Hybrid" 1 or 2 stage gearbox	0.470(0.991)	0.310(0.035)
	Advanced lightweight materials	0.385(1.302)	0.354(0.053)
	Integrated generator/gearbox	0.296(1.309)	0.317(0.042)
Generator	Wound Rotor Synchronous Generator	0.463(1.309)	0.309(0.034)
	Low Speed Permanent Magnet Generator	0.595(1.188)	0.343(0.041)
	High Speed Permanent Magnet Generator	0.388(0.991)	0.324(0.031)
	Superconductor Generators	0.298(0.641)	0.377(0.057)
Power Electronics	Full power rated converter	0.689(1.408)	0.349(0.038)
	High Voltage IGBT	0.622(1.282)	0.343(0.054)
	IGCT	0.432(1.126)	0.343(0.052)
Tower System	Pre-cast concrete base	0.273(0.835)	0.292(0.053)
	Hybrid (steel/concrete)	0.338(1.035)	0.297(0.060)
	Hybrid (composites integration)	0.292(1.282)	0.352(0.050)
	On-site assembly	0.148(1.126)	0.340(0.038)
	Increasing height for offshore applications	0.427(1.035)	0.370(0.049)
Control Techniques	Upwind sensing	0.426(0.886)	0.334(0.055)
	Total wind farm optimization	0.437(1.188)	0.304(0.064)
	Integration with wind forecasting	0.562(1.408)	0.370(0.098)
	Health monitoring	0.415(0.916)	0.309(0.059)
	Statistic-based prognostics	0.431(0.886)	0.322(0.055)
	Model-based prognostics	0.235(0.707)	0.324(0.054)

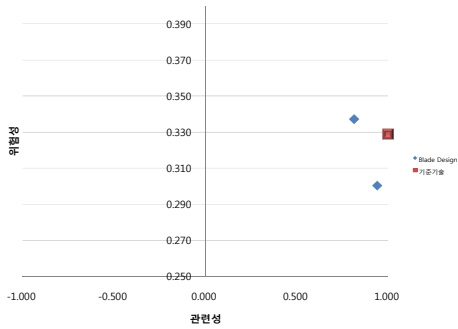
그림 6 기술 카테고리별 상관관계-변동성 지도



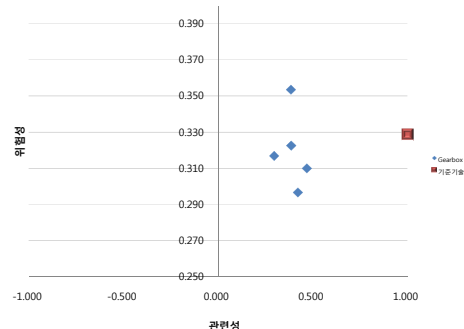
(a) Speed & Load Control



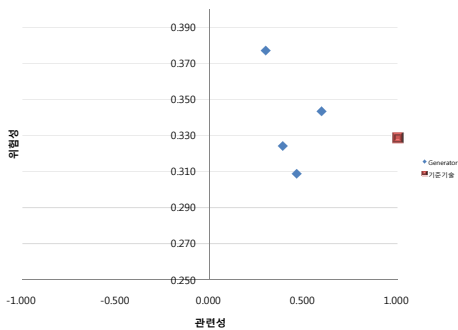
(b) Blade Manufacturing



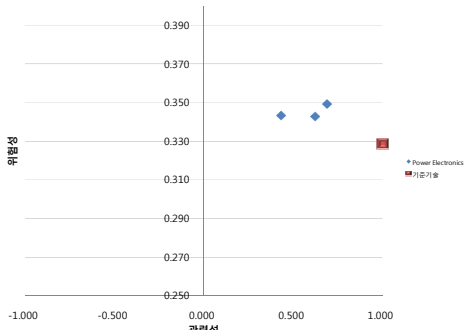
(c) Blade Design



(d) Gearbox

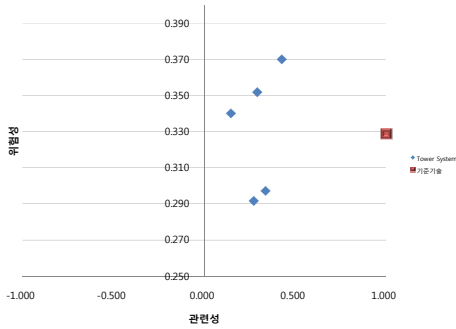


(e) Generator

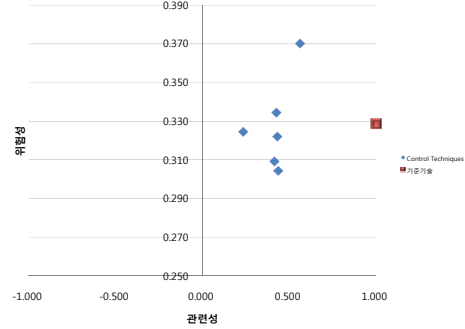


(f) Power Electronics

그림 6 기술 카테고리별 상관관계-변동성 지도 (계속)



(g) Tower System



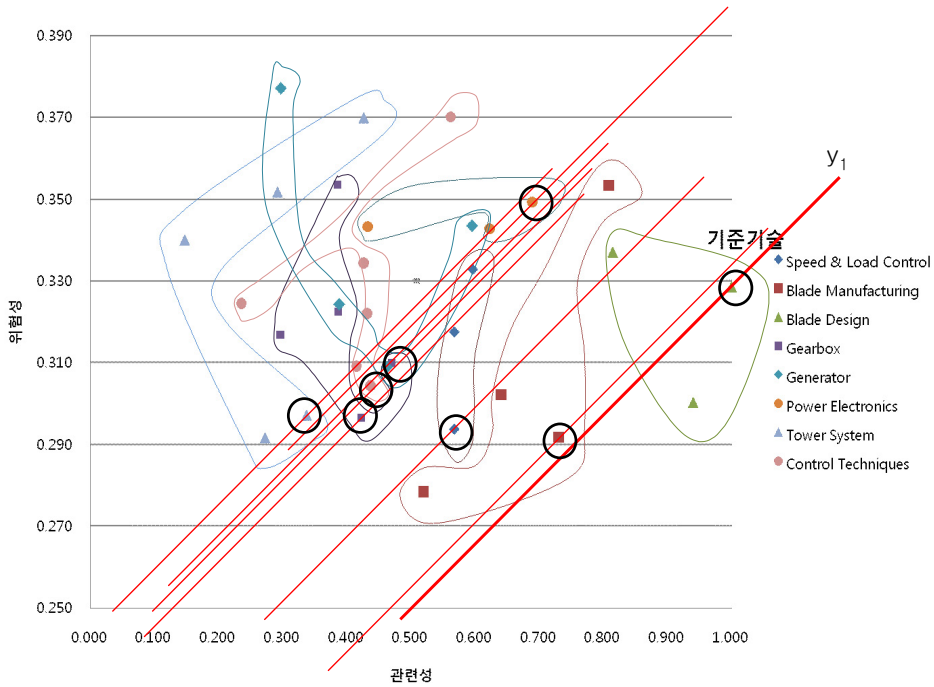
(h) Control Techniques

다음으로 모든 기술을 포함한 상관관계-변동성 지도를 작성하였다. 이를 위해 먼저 선정 식의 기울기를 결정하는 데 영향을 주는 ω_ρ 과 ω_σ 를 판정할 필요가 있었다. 이것은 전문가가 결정할 사안이 아니라 수요자인 A기업이 결정할 사항이었으며 본 사업 프로젝트는 연구 개발 사업이나 아직 예산이 확정된 사업이 아니기 때문에 ω_ρ 과 ω_σ 사이에 어떤 것을 더욱 크게 할 특별한 근거가 없었고, 설혹 있다고 하더라도 그 영향은 미미할 것으로 판단되었다. 그래서 판정식은 다음과 같이 결정하였다.

$$y_1 = \rho - \sigma \quad \text{-----} \quad (4)$$

식(4)와 선정된 기준기술을 기반으로 <그림 7>과 같이 최적 기술이 선정되었다. <그림 7>의 각 군집은 기술 카테고리를 의미하며 선정된 기술들은 각 군집 내에서 y_1 과 가장 거리가 가까운 것들이다. 선정된 기술들은 원형으로 표시하였다.

그림 7 풍력 발전 기술에 대한 상관관계-변동성 지도



우선 상관관계-변동성 직선의 기술기에 대해 민감도가 거의 없는 경우는 한 기술 카테고리 내에서 하나의 기술이 다른 기술에 대해서 유사한 위험성에 높은 상관관계를 보이거나 또는 유사한 상관관계에서 위험성이 낮은 기술이 존재하는 등 한 기술이 절대적으로 우세할 때 발생한다. 그런데 <그림 7>에서 보인 대로 A사의 사례에서는 Tower System과 Power Electronics를 제외하고는 한 기술이 우세한 것으로 나타났다. 이는 추후 환경 또는 개발 주체의 전략 상 위험성과 상관관계 사이의 상대적 중요도가 변동되어도 기술 조합에는 거의 영향을 주지 않을 것이라는 점을 암시하고 있어 Tower System과 Power Electronics의 민감도 분석을 제외하고는 기술 조합이 안정적인 것임을 나타내고 있다. 다만 Tower System의 경우 상관관계의 중요도가 더욱 높아지면 Pre-cast concrete base 기술로 대체되고, Power Electronics의 경우 위험성의 중요도가 더욱 높아지면 High Voltage IGBT 기술로 대체될 수 있음을 보여주고 있다. 결국 <그림 7>의 분석을 기반으로 선정된 기술 조합은 <표 7>과 같았다.

표 7 선정된 최적 풍력 발전 기술 조합

기술 카테고리	기술	관련성	위험성
Speed & Load Control	Active pitch control	0.567	0.294
Blade Manufacturing	Advanced automation	0.730	0.292
Blade Design	Increasing blade length for offshore application	1.000	0.329
Gearbox	Direct drive	0.422	0.297
Generator	Wound Rotor Synchronous Generator	0.463	0.309
Power Electronics	Full power rated converter	0.689	0.349
Tower System	Hybrid (steel/concrete)	0.338	0.297
Control Techniques	Total wind farm optimization	0.437	0.304

마지막으로 3차 설문은 동일한 전문가들을 대상으로 기술 조합 결과에 대한 검증을 위해 실시되었으며, 주로 <표 4>와 같이 나온 조합 결과의 합리성을 측정하였다. 조합 결과의 합리성은 “본 기술 조합이 얼마나 합리적으로 이루어졌는지 답변하여 주십시오”라는 질문으로 7점 척도 측정하도록 하였다. 그 결과 평균 5.50점을 획득했으며 이때 표준오차는 0.5345로서 매우 일관된 평가였다고 볼 수 있다. 실제로 응답한 전문가들은 4명이 6점을, 또 다른 4명이 5점을 주었다. 또한 <표 5>상의 기술 조합으로 풍력 발전 개발을 할 경우 5년 이내 상용화 가능성에 대해서도 평균 5.50점(표준오차 1.0690)으로 응답하였다.

따라서 최종 결과가 상당히 합리적이며 또한 실현 가능성도 높다고 볼 수 있었으며, 따라서 본 논문에서 제안하고 있는 최적 기술 조합 방법론이 현실적으로 적용 가능하다고 결론을 내릴 수 있었다. 물론 이러한 결론은 최종 결정된 한 가지에 대한 설문이므로 상대평가를 통해 그 기술이 전체 최적인지가 검증된 것은 아니다. 하지만 해를 구하는 경제성을 고려할 때 최적 조합 결정에 있어서 이상적으로 모든 가능한 조합을 다 나열해 보고 최적 대안을 선정하는 완전 탐색 접근법을 사용하는 것이 좋다. 그런데 본 사례에서의 기술 조합의 경우의 수는 $3^4 \times 2$ (기준기술 제외하여 2가지) $\times 5^4 \times 3^5 \times 6$ 로서 총 4만 3,200가지에 이른다. 목적함수와 제약식이 계량화될 수 있다면 최적 조합을 찾을 수 있으나, 본 연구와 같이 정성적인 고려가 많이 가미되는 경우에는 비록 그 답이 전체 최적이라는 보장은 없어도 발견적 탐색(heuristic search) 접근법을 취하는 것이 경제적인 것이다.

V. 결론

복수개의 기술 카테고리 중에서 요소 기술을 선정하려는 의사결정은 중대 규모의 친환경 기술 상용화 또는 연구개발 프로젝트에서 중요한 부분이다. 중대 규모의 프로젝트를 위해서 복수개의 기술을 선정하여 구성할 때 각 기술 간 합치성 등을 주관적 검토하는 등의 이유로 인해 최적의 조합을 이루지 못함으로 인해 프로젝트 효과성의 저하 현상이 발생할 수 있다. 또한 현금 흐름 분석 등 일반적인 경제적 효과 분석은 미래형 기술 개발 프로젝트에 존재하는 불확실성 때문에 부정확한 자료를 입력하므로 그 결과 또한 적합하지 않게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제들을 해소할 수 있도록 비화폐적이면서도 구조적인 기술 조합 방법을 제안한 것이다.

본 논문의 방법론에서 중요한 가정은 통상 여러 기술들을 동일한 우선순위로 개발하지는 않고 가장 근간이 되는 기술 개발 과제가 있으며, 나머지 기술 개발 과제는 근간이 되는 기술 개발 과제와 부합되어 선정된다는 것이다. 실제로 친환경 기술 개발 프로젝트는 중대형 과제이며 사업단 수준으로 운영되고 있다. 그리고 사업단 내에서 과제를 선정하거나 과제제안요청서(Request For Proposal)를 작성할 때 각 과제 간 논리적 연관성을 고려하게 된다. 특히 단순 나열형 원천기술 개발 과제가 아니라 특정 제품을 개발하는 실용화 과제일수록 이러한 과제 간 연관성은 더욱 중요한 고려 사항이다. 이와 같은 측면에서 본 방법론의 기술 조합 선정에서는 근간이 되는 기준기술과 관련성과 실현 가능성을 의미하는 위협성을 가장 중요한 의사결정 요인으로 보았다. 그리고 실제 풍력 발전 기술 조합 선정 사례를 통해 논문에서 제시한 두 가지 기준으로 최적 기술 조합을 선정하는 것이 적절함을 보였다.

현재는 친환경 기술 중에서 풍력 에너지 기술만을 고려하였는데 다른 분야에도 적용이 가능한지, 적용하려면 방법론상의 보완 이슈는 없는지에 대한 일반성 검토 연구도 계획하고 있다. 첫째로, 여기서 소개된 기술 카테고리들과 세부 기술들은 모두 특정 기업의 프로젝트에 적합하도록 선정된 것이다. 물론 분류된 기술들이 다른 풍력 발전 프로젝트에도 참고할 만큼 폭 넓기 때문에 참고할 만한 가치는 충분하지만 그대로 일반화하기에는 보다 더 세밀한 주의가 필요하다. 본 연구의 주안점은 일반적으로 적용할 풍력 발전 기술을 선정하는 것이 아니라 어떤 국책 과제 혹은 기업 과제이든지 적용할 수 있는 일반화된 선정 방법론을 제시하는 데 있었다. 둘째, 또한 3차 설문조사를 동일한 전문가들을 대상으로 시행하는 것보다 동일 분야에 타 전문가를 대상으로 실시하면

주관적 영향요인을 감소할 수 있을지에 대한 검토가 필요할 것이다. 셋째로 기술수준에 대한 고려를 새로운 차원으로 추가하는 것이다. 비록 본 논문의 특성이 수년 내 실용화 가능성을 중시했기 때문에 고려하지 않았지만, 장기 풍력 발전 개발 프로젝트로 본다면 기술의 실현 가능성은 더욱 높아질 것이므로 기술 수준이 실현 가능성보다 더 중요한 요인이 될 것이며, 결국 실현 가능성을 반영한 위험성이라고 하는 인자는 기술 수준요인에 의하여 조정되어야 할 것이다.

참고문헌

- 김경택, 이덕주. 2010. “실물옵션을 이용한 풍력 에너지 기술의 경제적 가치 평가”. 대한산업공학회 2010 춘계학술대회논문집.
- 박승창. 2009. “Green IT 기술의 최근 산업화 동향”. 『정보통신연구진흥원 주간기술동향 통권』 8(19): 29-41.
- 박종오. 2000. “개별기술 등급평가 모델과 평가 사례”. 『기술혁신학회지』 3(1): 55-67.
- 방형준. 2007. “풍력 발전 기술의 현황 및 전망”. 『한국태양에너지학회지』 6(2): 3-12.
- 손충렬. 2010. “풍력 에너지의 국내의 기술개발동향”. 『대한설비공학회』 39(1): 55-62.
- 이덕기, 박수익, 김경희, 양종택. 2001. “MAUT를 이용한 에너지 기술평가 및 선정 연구”. 『한국에너지공학회 춘계 학술발표회 논문집』: 197-203.
- 이연남, 권오병. 2008. “특정 유비쿼터스 지능공간 구축을 위한 기술 조합에 대한 최적 선정 방법론”. 『지능정보연구』 14(3): 109-131.
- 이용석, 노도환. 2009. “신재생에너지 기술혁신 개발과 R&D 성과 사업화 촉진방안”. 『기술혁신학회지』 12(4): 788-818.
- 이장호, 김성호, 조강표, 송화창, 김용이, 이지현, 강기원. 2009. “도시형 풍력 발전의 종류와 원천기술 개발”. 『유체기계 연구개발 발표회 논문집』: 589-592.
- 정근하, 고대승, 이정근, 손석호, 변도영. 2002. “과학기술예측 대상기술 선정을 위한 주요 기술영역의 조사연구”. 『기술혁신학회지』 5(1): 110-126.
- 张伯泉, 杨一民. 2006. “风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势”. *Electric Power*, 39(6): 65-69.
- Bard, J. F. and A. Feinberg. 1989. “A two-phase methodology for technology selection and system design”. *Engineering Management*, 36(1): 28-36.
- BTM Consult ApS. 2010. <http://www.btm.dk> [2010.9.1].
- Chan, F. T. S., M. H. Chan, and N. K. H. Tang. 2000. “Evaluation methodologies for technology selection”. *Journal of Materials Processing Technology*, 107: 330-337.
- Chen, A. J. W., M. Boudreau, and R. T. Watson. 2008. “Information systems and ecological sustainability”. *Journal of Systems and Information Technology*, 10(3): 186-201.
- Davis, G. and B. Owens. 2003. “Optimizing the level of renewable electric R&D expenditures using real options analysis”. *Energy Policy*, 31(15): 1589-1608.

- Dimaggio, P. J. and W. W. Powell. 1983. "The iron cage revisited: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields". *American Sociological Review*, 48: 147-160.
- EIA. 2008. Annual Energy Review. <http://www.eia.doe.gov/aer/pdf/aer.pdf> [2010.9.1].
- Fotsch, R. J. 1983. "Machine tool justification policies, their effects on productivity and protability". *Journal of Manufacturing Systems*, 3(2): 169-195.
- Fox, G. E, N. R. Baker, and J. L. Bryant. 1984. "Models for R and D project selection in the presence of project interactions". *Management Science*, 30(7): 890-902.
- Henry, H. W., F. W. Symonds, R. A. Bohm, J. H. Gibbons, J. R. Moore, and W. T. Snyder. 1980. *Energy Management: Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc., NY.
- Joanan, I. Lewis and Ryan H. Wiser. 2007. "Fostering a renewable energy technology industry: An international comparison of wind industry policy support mechanisms". *Energy Policy*, 35: 1844-1857.
- Klahorst, H. T. 1983. "How to justify multi-machine system". *Machinist*, edited by J. R. Meredith, Justifying new technology (IIE,1986): 149-152.
- Kirby, M. R. and D. N. Marvis. 2000. "A method for technology selection based on benefit, available schedule and budget resources". *World Aviation Congress & Exposition*, October.
- Krishnan, V. and Shantanu Bhattacharya. 2002. "Technology selection and commitment in new product development: The role of uncertainty and design flexibility". *Management Science*, 48(3): 313-327.
- Meyer, J. R. 1982. A cookbook approach to robotics and automation justification. *Robots 6th Conference Proceedings*. 1982. edited by J. R., Meredith. Justifying new technology. IIE, U.S. 1986: 119-148.
- Khouja, M. 1994. "The use of data envelopment analysis for technology selection". *Computers & Industrial Engineering*, 28(1): 123-132.

<부록 A> 전문가 대상 설문 조사 양식

* 사전 전문가 면접에 의하면, 아래에서 보시는 것과 같이 Blade Design 기술 카테고리에 속한 “Increasing blade length for offshore application” 기술이 풍력 발전 관련 기술 중에서 가장 기본이 되고, 전체 Wind Turbine 시스템 성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 “기준기술”요인이라고 인식되었습니다. 이에 아래의 질문에 답하여 주십시오.

1. 아래의 기술들이 각각 기준기술인 “Increasing blade length for offshore application”과 비교해 볼 때 어느 정도의 관련성 또는 시너지 효과가 있는지 답변하여 주십시오.

기준기술의 발전에 부정적 영향을 준다		기준기술 발전과 특별히 관련이 없다		기준기술의 발전에 긍정적 영향을 준다		
-3	-2	-1	0	1	2	3

기술 카테고리	기술	관련도
Speed & Load Control	Active pitch control (능동 피치 제어로 더 높은 속도를 낼 수 있게 함)	
	Passive fatigue load control (피로 하중을 통제 관리하는 기술)	
	Active control surface (흔들거림을 방지하는 효과성을 극대화하는 기술)	
Blade Manufacturing	CNC layout with automation (CNC 자동 레이아웃 머신)	
	Advanced automation (날개 회전 각도를 자동화하는 기술)	
	Segmented blades (날개를 하나로 연결시키지 않고 분리된 것으로 제조하는 기술)	
	On-site construction (발전기 설치 장소에서 제조 조립하는 기술)	
Blade Design	Improved airfoil shapes (날개 옆면 에어포일의 모양 설계 기술)	
	Increasing blade length for offshore application (근해용 블레이드의 길이를 늘리는 기술)	3
	Integration of advanced material (블레이드 설계 관련 고급 재료들을 통합하는 기술)	

기술 카테고리	기술	관련도
Gearbox	Direct drive (전동기의 회전력을 기어박스 등 기구를 통하지 않고 직접 구동 대상에 전달하는 기술)	
	Synchronous (constant speed) drive (풍력 발전에 사용되는 직접 구동형 항속 장비)	
	"Hybrid" 1 or 2 stage gearbox (1 혹은 2 단계 기어박스를 동시에 사용하는 기술)	
	Advanced lightweight materials (기어박스에 사용할 초경량 재료 개발 기술)	
	Integrated generator/gearbox (발전기와 기어박스 통합형 기구 개발 기술)	
Generator	Wound Rotor Synchronous Generator (권선형 회전자를 갖는 동기식 발전기)	
	Low Speed Permanent Magnet Generator (저속으로 작동되는 정류부 장착 발전기)	
	High Speed Permanent Magnet Generator (고속으로 작동되는 정류부 장착 발전기)	
	Superconductor Generators (초전도 발전기: 회전자 계자권선에 NbTi 초전도 도체를 사용하고 이것을 액체 헬륨(-269℃)으로 냉각하여 대전류를 통전함)	
Power Electronics	Full power rated converter (터빈의 특성에 맞게 적정 풍속과 회전속도에서 최대전력을 생산할 수 있도록 제어)	
	High Voltage IGBT (고전압 절연 게이트 양극성 트랜지스터 개발 기술)	
	IGCT (통합 게이트 정류 사이리스터로서 대용량 전류를 제어할 수 있는 반도체 소자 개발 기술)	
Tower System	Pre-cast concrete base (미리 성형한 콘크리트로 제작하는 기술)	
	Hybrid (steel/concrete) (철과 콘크리트를 복합하여 사용 제작하는 기술)	
	Hybrid (composites integration) (그 외의 복합재를 사용하여 제작하는 기술)	
	On-site assembly (발전기 설치 현장에서 조립하는 기술)	
	Increasing height for offshore applications (근해용 풍력 발전기의 효과성을 위해 타워의 높이를 키우는 기술)	

친환경 에너지 개발 기술 최적 조합 선정을 위한 구조적 방법론

기술 카테고리	기술	관련도
Control Techniques	Upwind sensing (사면을 타고 오르는 바람 또는 역풍을 센싱하는 기술)	
	Total wind farm optimization (풍차 전체를 최적화하는 기술)	
	Integration with wind forecasting (일기예보 정보를 통합하는 기술)	
	Health monitoring (풍력 정보를 근간으로 한 건강 관련 정보 모니터링 기술)	
	Statistic-based prognostics (통계기법을 활용하여 풍력 발전 통제와 관련된 정보를 예측하는 기술)	
	Model-based prognostics (모델기법을 활용하여 풍력 발전 통제와 관련된 정보를 예측하는 기술)	

2. 아래의 기술들은 대략 향후 몇 년 이내에 실제 풍력에너지 시스템에 적용될 수 있다고 보십니까? 2012, 2015, 2020년의 세 가지로 고려하여 해당하는 번호를 각각 기입해 주십시오.

절대로 상용화 안됨					반드시 상용화 될 것임	
1	2	3	4	5	6	7

기술 카테고리	기술	달성 목표	2012	2015	2020
Speed & Load Control	Active pitch control	3MW 이상			
	Passive fatigue load control	3MW 이상			
	Active control surface	3MW 이상			
Blade Manufacturing	CNC layout with automation	5% 비용 감축			
	Advanced automation	5% 비용 감축			
	Segmented blades	5% 비용 감축			
	On-site construction	5% 비용 감축			
Blade Design	Improved airfoil shapes	효율 ~ 0.5			
	Increasing blade length for offshore application	5~10 % 면적 (area) 증가			
	Integration of advanced material	효율 ~ 0.5			

기술 카테고리	기술	달성 목표	2012	2015	2020
Gearbox	Direct drive	효율 5% 증가			
	Synchronous (constant speed) drive	효율 5% 증가			
	“Hybrid” 1 or 2 stage gearbox	효율 5% 증가			
	Advanced lightweight materials	효율 5% 증가			
	Integrated generator/gearbox	효율 5% 증가			
Generator	Wound Rotor Synchronous Generator	효율 5% 증가			
	Low Speed Permanent Magnet Generator	효율 5% 증가			
	High Speed Permanent Magnet Generator	효율 5% 증가			
	Superconductor Generators	효율 5% 증가			
Power Electronics	Full power rated converter	효율 5% 증가			
	High Voltage IGBT	효율 5% 증가			
	IGCT	효율 5% 증가			
Tower System	Pre-cast concrete base	지상 150m까지			
	Hybrid (steel/concrete)	지상 150m까지			
	Hybrid (composites integration)	지상 150m까지			
	On-site assembly	지상 150m까지			
	Increasing height for offshore applications	지상 150m까지 및 수심 30m 이상			
Control Techniques	Upwind sensing	효율 5% 증가			
	Total wind farm optimization	효율 5% 증가			
	Integration with wind forecasting	효율 5% 증가			
	Health monitoring	효율 5% 증가			
	Statistic-based prognostics	효율 5% 증가			
	Model-based prognostics	효율 5% 증가			

3. 응답자에 관한 일반적 사항

1) 위의 기술 카테고리 중 가장 관심 분야는 어디이십니까?

2) 기타 풍력 발전 기술 중에서 관심 세부 연구분야 (가급적 상세히 기재해 주시기 바랍니다.)

3) 풍력 에너지 기술 개발 관련 연구/실무 경력

_____년

4) 귀하는 다음 기술 카테고리 각각에 대하여 어느 정도의 전문성을 가지고 계시는지요. 해당하는 번호를 각각 기입해 주십시오.

보통	높음	매우 높음
1	2	3

기술 카테고리	전문성
Speed & Load Control	
Blade Manufacturing	
Blade Design	
Gearbox	
Generator	
Power Electronics	
Tower System	
Control Techniques	