
항만해상풍력단지 건설기술 로드맵 수립

김기윤*, 정석재**, 이석준***

Construction Technology Roadmapping for Port Offshore Wind Farm

Ki-Yoon Kim*, Suk-Jai Jeong**, Suk-Jun Lee***

요약 본 논문의 목적은 항만해상풍력단지 건설을 위한 기술개발 로드맵을 제시하는 것이다. FGI(Focus Group Interview)와 설문지를 이용한 AHP(Analytical Hierarchy Process) 방법을 적용해서 대/중/소 분류된 건설기술의 가중치를 도출했고, 분류된 건설기술에 대한 우선순위를 근거로 항만해상풍력단지 건설기술 로드맵이 수립되었다. 기술 로드맵은 항만해상풍력단지의 분류된 건설기술에 대한 R&D 사업을 달성하기 위한 20년간(2016년부터 2036년 까지)의 일정을 제시하고 있다. 이러한 건설기술 로드맵은 녹색항만건설산업의 R&D 전략을 수립하기 위한 이정표로 활용될 수 있다.

주제어 : 해상풍력단지, 건설기술, 로드맵, 다계층분석

Abstract This paper aims to presents a systematic procedure for the development of construction technology roadmap, which can consider the offshore wind farm on port. Then the weight among the large/medium/small classified construction technology has identified through the AHP(Analytical Hierarchy Process) approach using FGI(Focus Group Interview) and questionnaire study. Based on the priority for classified construction technology a construction technology roadmap for port offshore wind farm was also developed. The technology roadmap suggests the time frame(20 years, from 2016 to 2036) to complete R&D work for the classified construction technology of port offshore wind farm. Such construction technology roadmap can be utilized as a milestone in setting up the R&D strategy in the green port construction industry.

Key Words : offshore wind farm, construction technology, roadmap, AHP

1. 서론

녹색성장은 온실가스와 환경오염을 줄이고, 녹색기술과 청정에너지를 신성장 동력으로 활용하고, 저비용 고효율 국토환경으로 삶의 질을 개선하는 것이다. 에너지 종류는 석탄, 석유 등 CO₂를 발생시키는 화석 에너지와 지속가능한 신재생 에너지로 구분되고, 신재생 에너지는 신에너지와 재생에너지로 구분된다. 여기서 신에너지는 기존 화석연료를 친환경적으로 변환하여 에너지를 생산

하는 수소에너지, 연료전지, 석탄액화 및 가스화 등을 의미하고, 재생 에너지는 재생 가능한 에너지를 활용하여 에너지를 생산하는 풍력, 태양광, 태양열, 바이오, 수력, 지열, 해양, 폐기물 등을 의미한다.

최근 항만관리정책은 탄소 배출량을 절감하는 환경친화적 녹색항만을 조성하는 것이다[9][17]. 현재 항만에서 사용하고 있는 에너지는 경우 및 전기사용이 대부분으로 신재생에너지 개발을 통한 에너지 자급능력 향상이 시급하다고 판단된다. 우리나라 항만의 2020년 온실가스 배

*본 논문은 2012년 광운대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

*광운대학교 경영학과 교수(교신저자)

**광운대학교 경영학과 교수

***University of Arizona, 박사 후 연구원

논문접수: 2013년 1월 7일, 1차 수정을 거쳐, 심사완료: 2013년 1월 25일, 확정일: 2013년 2월 20일

출량은 276만 톤에 달할 것으로 전망되고 있다[21]. 항만에서는 2020년 30%, 2035년 50%의 탄소배출의 저감이 가능하나, 2050년 70%의 CO₂ 저감은 현존 기술로는 불가능한 것으로 나타나 있다[19]. 따라서 목표 달성을 위해서는 신재생에너지, 특히 풍력과 같은 새로운 재생에너지로 대체하는 방안을 강구해야 한다. 항만건설기술 분야에서도 녹색건설기술인 신재생에너지기술을 적용한 친환경 녹색항만(green port)을 구축하기 위해서는 항만해양풍력단지가 건설되어야 한다[13]. 이를 위해서 국토해양부에서는 항만에서 사용하고 있는 전력을 풍력발전으로 대체하는 사업을 추진하고 있다. 항만해양풍력단지 건설기술인 단지구축, 지지구조, 단지운영 및 유지관리에 대한 세부기술을 파악해서, 기술개발 우선순위에 따른 기술개발 로드맵에 대한 계획이 체계적으로 수립 될 필요가 있다. 이와 더불어 한국의 일반적인 건설기술은 해외 경쟁력이 있으므로, 항만해양풍력단지의 건설기술을 자체 개발한 후, 국산화해서 구축 및 적용하는 장기 전략이 필요하다. 항만해양풍력단지의 건설기술개발문제는 기술예측의 불확실성 정도, 해상풍력건설 기술개발 전문가들, 항만풍력단지의 세부기술 등을 고려해야 하는 다속성 의사결정문제이다. 그러나 여러 가지 세부기술들을 고려해야 하는 해상풍력건설기술 개발전문가들은 단순히 과거 관련 건설기술 자료와 직관에 의해서 여러 가능한 기술개발에 대한 중요도를 추정하고 있다.

본 논문의 연구목적은 구체적으로 다음과 같이 요약될 수 있다. 첫째, 항만해양풍력단지의 건설기술에 대한 대분류, 중분류, 소분류 등 기술분류체계를 제시하고, 각 기술분류에 대한 중요도를 측정하고자 한다. 둘째, 항만풍력단지의 건설에 대한 세부기술개발들을 평가하여 최적 기술개발에 대한 우선순위를 결정하는 다속성 의사결정문제에 다계층분석(AHP; Analytical Hierarchy Process) 접근방법을 제시한다. 셋째, 항만해양풍력단지의 핵심기술인 단지구축, 지지구조, 단지운영 및 유지관리 관점에서 최적 세부기술의 우선순위에 기초해서 기술개발 정책수립에 로드맵을 제시하려고 한다. 이를 위해서 본 논문 2장에서는 항만해양풍력단지의 건설기술개발에 관한 기존 연구를 요약했고, 3장에서는 AHP 접근방법을 설명했다. 4장에서는 건설기술개발에 대한 우선순위 분석사례에 AHP 방법을 적용해서 건설기술개발 전략에 대한 시사점을 제시했고, 끝으로 5장에서는 연구 결론과 한계점을 제시했다.

2. 기존 연구

2.1 항만해양풍력단지 건설기술

해상풍력발전의 기술은 해상구조물 기술과 풍력발전 시스템 기술의 집합이므로, 해상풍력단지 건설비용에 가장 큰 영향을 주는 것은 콘크리트 지지구조의 해상구조물 건설비용과 변전소와의 계통연계시스템 설치비용과 시공비용이다. 해상풍력발전은 육상풍력발전에 비해서 해상구조물 건설비가 추가되므로, 초기건설비가 증가할 수밖에 없다[11]. 그러나, 항만에 건설되는 해상풍력단지는 풍황 조건이 육지 내륙에 비해서 양호해서 발전단가가 저렴하고, 육지에서 멀리 떨어진 해상에 설치하는 해상풍력단지보다는 건설비와 유지비가 더 적게 소요되는 장점이 있다. Kim et al.(2009)는 일반적인 건설기술개발 분야를 설계 최적화, 건설 로봇, 모듈화, 지능건설관리, 유지관리, 신건설자재 등 5개 분야로 구분했다. 항만해양풍력단지의 건설기술은 크게 단지구축기술, 지지구조기술, 단지운영기술 및 유지관리기술 등 3개의 기술 분야로 구분 할 수 있다.

첫째, 단지구축기술 관점에서 입지선정을 위해서는 우선 풍력단지건설 환경 분석으로 풍황 조사가 선결되어야 하고, 해상풍은 육상풍에 비해서 풍속이 높고, 해안으로부터 거리가 멀어질수록 더욱 커지고, 발전량은 통상 풍속의 3승에 비례해서 증가한다[16]. 풍황 조사의 분석결과에 의해서 경제성 있는 발전단지의 규모가 결정되며, 이어서 제반 해양환경영향 평가에 따른 항로, 어로구역, 양식장 피해, 철새 및 수중동물 등에 대한 조사, 그리고 항만 교통량, 항만 및 배후시설 등을 고려한 풍력단지 입지 타당성과 설계 최적화 관련 기술이 필요하다[35][42].

둘째, 지지구조기술 관점에서 해상구조물의 지지구조형식개발, 설계, 제작, 시공 등에 관한 기술이 중요하다. 이러한 해상구조물의 지지구조 위에 설치되는 해상풍력 시스템의 제작 및 시공을 위해서는 풍차, 상부 타워, 발전기, 동력전달장치, 해저케이블 등에 관한 제작 모듈화 기술과 정밀 설치시공기술이 필요하다[23].

셋째, 단지운영기술 및 유지관리기술 관점에서 단지의 운영기준 및 유지관리 매뉴얼에 의해서 해양생태환경영향, 발전효율, 소음, 세굴, 해저케이블 등에 관한 계측센서를 실시간 모니터링한 후 관련 데이터를 분석해서 해상풍력단지의 운영, 안전성 평가, 보수/보강/복구에 의한 유지 관리 등 기술이 필요하다.

우리나라는 삼면이 바다로 둘러 쌓여있고, 특히 수심이 낮은 남해와 서해는 풍력자원이 우수하므로, 특히 노출 해변에 위치한 항만에는 항만해상풍력단지의 조성이 가능하기 때문에, 항만해상풍력단지 건설기술의 세부기술을 도출하고 건설기술의 중요도를 측정해서, 기술개발의 로드 맵을 수립 할 필요가 있다.

2.2 기술 로드 맵 수립 방법

기술 로드맵은 미래의 기술계획, 기술선택, 그리고 기술혁신을 관리하는 도구로서, 기술 예측과 선택을 위한 계획화, 의사소통, 조정 등을 나타내는 표시 혹은 표현으로서[47], 기술 로드맵에 대해서는 다양한 정의가 있다 [29][41][45]. Phaal et al.(2004)은 로드 맵의 목적에 따라서, 제품계획, 서비스 역량계획, 전략계획, 장기계획, 지적 자산계획, 프로그램 계획, 통합계획 등 8가지 종류로 구분했다. 형태에 따른 로드맵의 종류는 다층, 단층, 바(bar), 표, 그래프, 그림, 흐름도, 문자 등 8가지로 구분된다. Amer와 Daim (2010)은 국가수준, 산업수준, 조직수준 관점에서 시나리오 기반 계획화, SWOT 분석, 델파이, 전문가 패널, 위험평가, PEST 분석, Patent 분석, 인용 네트워크 분석, 내부기업회의, QFD 등 기술 로드맵 수립 방법들([28][31][32][33])의 사용빈도를 고, 중, 저 등 3수준으로 비교했다. 이 중에서 국가수준에서 가장 많이 사용되는 방법은 전문가 패널과 시나리오 기반 계획화이다.

최상희 외 3인(2007)은 국내 컨테이너 항만기술개발 로드맵(PTRM: Port Technology Road Map) 수립단계를 항만환경변화분석, 항만기술의 분류, 분야 별 추세변화와 미래방향 예측, 분야 별 핵심기술 도출, 로드맵 작성, 추진전략 및 정책 등 6단계를 제시했다. Lee 외 2인(2009)은 분야 별 기술 목록화, 기술분석, 능력분석, 핵심기술 선택, 개별적인 기술 로드맵 형성 등 4단계를 제시했다. Martin과 Daim(2012)은 주요 기술의 식별, 기술계층과 일정의 개발, 기술의 정의, 기업/시장 동인(drivers)의 식별, 목표의 식별, 계층적 모형화, 적절성 척도의 정의, 기술 서비스 가치 계산 등 8단계를 제시했다. 이와 더불어 특히 건설기술의 핵심기술을 도출하는 다양한 기술개발 로드맵 수립단계가 연구되었다[3][5][12].

본 연구에서는 장기적 계획의 로드 맵을 이용해서 항만풍력단지 건설기술에 대한 국가적 관점에서 전문가 패널을 통해서 필요한 세부기술을 대, 중, 소 분류 별로 계층적 구조로 도출하고, 기간 별 기술 개발단계에 대한 장

기계획을 흐름도 형태로 제시하려고 한다. 이를 위해서 항만풍력단지 건설기술의 환경변화 분석, AHP를 이용한 항만풍력단지 건설기술의 분류 및 우선순위 분석, 항만풍력단지 건설기술의 로드맵 작성, 항만풍력단지 건설기술의 핵심기술 도출 등 4단계 별로 로드 맵을 수립하려고 한다. 특히 두 번째 단계에서 다속성 의사결정방법인 AHP 분석에 의해서 기술의 계층적 구조를 도출해서 중요도에 따른 개발 우선순위결정을 다음과 같이 적용하려고 한다.

3. AHP 분석

3.1 다속성 의사결정방법으로서 AHP 방법

다속성 의사결정은 기본적으로 상충되는 다수의 속성을 고려하여 최적 대안을 선정하는 것이다. Belton과 Stewart(2002)는 기존의 다속성 의사결정 방법들을 다음과 같이 세 가지 영역으로 구분했다. 첫 번째는 AHP와 MAUT(Multi- Attribute Utility Theory)와 같은 가치측정모형들이다[27]. 둘째는 ELECTRE(Elimination and (Et) Choice Translating Reality)와 PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) 같은 방법들이다[27]. 셋째는 TOPSIS(Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)와 같은 목표지향 참조수준 방법(goal aspiration and reference level method)이다 [27]. 풍력을 포함한 태양 에너지, 수력, 바이오 에너지, 지열 에너지 등 지속가능한 재생 에너지들에 관한 다속성 의사결정문제에 관한 연구에서 다양한 접근방법들이 제시되었다[25][26][30][37][38]. Zhou 외 2인(2006)은 Huang 외 2인(1995)의 연구를 기초로 해서, 1975년에서 2004년 까지 에너지 및 환경 분야 의사결정모형 관련 논문 252편을 분석한 결과, 다속성 의사결정모형을 AHP, MAUT, ELECTRE, PROMETHEE, 기타 등으로 분류했다[51]. 에너지 의사결정에 대한 다속성 의사결정방법을 다음과 같이 세 가지로 구분했다[50]. 첫째, 초보적인 방법으로 가중합산방법(WSM: Weighted Sum Method)과 가중적률방법(WPM: Weighted Product Method)이다 [50]. 둘째, 여러가지 의사결정기준들을 통합하는 방법으로 AHP, TOPSIS, 그레이 관계방법(Grey Relation Method), 다기준의사결정을 위한 퍼지방법 등 이다[50].

〈표 1〉 중분류 기술 관점에서 가중치와 순위

대분류 기술	가중치(A)	중분류 기술	가중치(B)	전체 가중치(A*B)	순위
단지구축(0.0)	0.246	입지선정(0.01)	0.190	0.047	9
		단지 설계 및 최적화(0.01)	0.360	0.089	7
		평가 및 인증	0.450	0.111	4
지지구조(0.08)	0.448	지지구조 형식개발(0.01)	0.393	0.176	2
		해석 및 설계(0.00)	0.204	0.091	6
		제작 및 시공(0.01)	0.144	0.065	8
단지운영 및 유지관리(0.0)	0.306	단지 운영 및 모니터링(0.01)	0.637	0.195	1
		단지 유지관리기술(0.02)	0.363	0.111	4

* 일관성 비율(CR: Consistency Ratio)은 대분류 및 중분류 기술 ()에 표시했고, 평가 및 인증은 소분류 기술이 없음.

〈표 2〉 단지구축에 대한 소분류 기술 관점에서 가중치와 순위

대분류 기술	중분류 기술	소분류 기술	가중치	순위
단지구축	입지선정	기상탑 설계/시공/해체 기술	0.053	9
		변전소 설계/시공 기술	0.066	8
		해상풍력 에너지 부존량 평가 기술	0.092	7
		해양환경 및 지반 조사/평가 기술	0.131	2
		계통연계기술	0.093	6
		경제성 평가 기술	0.116	4
		항만교통량 영향평가	0.063	8
		해양환경특성 예측 및 평가	0.156	1
		인허가/법/제도화 정비 기술	0.128	3
	단지 설계 및 최적화	해상풍력발전용 항만/배후시설 조성 기술	0.104	5
		단지설계기준 개발	0.258	1
		풍황 및 해양자원 분석	0.131	4
		실측자료 보정/예측 기술	0.101	6
		단지 최적화 매치 기술	0.208	2
		후류효과(Wake-Effect)영향분석	0.122	5
	평가/인증	에너지 저장 기술	0.181	3

셋째, 순위선호방법으로 ELECTRE와 PROMETHEE 이다[50].

다속성 의사결정문제의 분석방법 중 하나인 AHP는 Saaty(1980)에 의해서 개발된 것으로 의사결정의 계층구조를 구성하는 요소들 간의 쌍대비교를 통해, 각 단계 별 가중치를 종합적으로 계산해서 대안들의 상대적인 우선 순위를 나타내는 기법이다. AHP는 복잡한 문제를 계층구조로 분해해서 정량적 및 정성적 평가기준 모두를 고려 할 수 있고, 평가의 일관성 파악이 용이하고, 의사결정자들의 의견 통합 및 집단 의사결정 도출에 적합해서 다양한 분야에서 실무적으로 활용되고 있다. 항만 및 건설 분야에서 AHP를 적용한 연구로는 항만관리 방안[10], 항만개발 우선순위 평가[14], 건설기계 자동화 기술 로드맵[3], 건설기술 로드맵[39] 등이 있다.

3.2 AHP 적용절차

AHP 방법의 절차는 문제의 계층화, 의사결정 요소 간 쌍대비교, 가중치 추정, 가중치 종합 등 4단계로 구분할 수 있다. 다속성 의사결정문제에 AHP 방법을 적용시키는 단계 별 절차는 다음과 같다.

단계 1: 의사결정계층을 결정한다. 문제의 계층화 단계에서는 문제 관련 요소를 추출하고, 각 평가요소 및 대안의 계층을 구조화 한다.

단계 2: 기준들을 쌍대 비교한다. 각 기준의 판단자료를 수집하고, 계층 별 의사결정 요소 간 쌍대비교를 수행한다. 이를 통해 각 계층 별 쌍대비교행렬을 도출하게 된다. 여기서 하나의 상위요소에 포함되는 n 개의 평가항목에 대해 nC_2 회의 쌍대비교가 필요하며, 평가척도는 9점 척도를 이용한다.

〈표 3〉 지지구조에 대한 소분류 기술 관점에서 가중치와 순위

대분류 기술	중분류 기술	소분류	가중치	순위
지지구조	지지구조 형식개발	부유식 지지구조 개발	0.074	7
		하이브리드 지지구조 개발	0.124	3
		복합신소재(FRP Composite) 지지구조 개발	0.102	5
		콘크리트 지지구조 개발	0.242	1
		강-콘크리트 합성 지지구조 개발	0.196	2
		석선과일 지지구조 개발	0.103	4
		대구경 강재 모노파일 지지구조 개발	0.090	6
		가변형 지지구조 개발	0.068	8
	해석 및 설계	지지구조물 설계기준 개발	0.101	2
		반복하중의 해저지반 강성/감쇠변화 해석기술	0.041	11
		지지구조물 지지력 평가기술	0.077	3
		지지구조/타워연결부 해석기술	0.067	6
		Transition Piece 최적설계기술	0.046	9
		지지구조물 이송/진수/설치안전성검토키술	0.042	10
		Foundation 안전성 평가/해석 기술	0.072	4
		세굴방지공 설계 기술	0.039	12
		부식방지 기술 개발	0.035	14
		지반 모델 물성치 산정 해석 기술 개발	0.050	8
		충돌방지 대책 시설 설계 기술	0.029	16
		지지구조물 피로해석 기술	0.064	7
		통합하중(지반/기초/하부구조/타워 등)산정 기술	0.195	1
		내진 설계 및 해석 기술	0.072	4
	해양생물(Marine Growth) 영향 분석 기술	0.033	15	
	제작 및 시공	그라우팅(Grouting) 연결부 해석 기술	0.037	13
		해상풍력 설치/시공 시방서 개발	0.170	1
		해상에서 제작 가능한 모듈화 기술	0.085	3
		정밀시공기술	0.061	6
		급속시공기술	0.041	14
		상부 타워 및 나셀 이송/진수/설치 기술	0.055	8
		고강도 조기발현용 그라우팅 개발	0.038	15
		시공 중 지지구조물 거동 계측 기술	0.071	4
		복합소재 응용 모듈화 기술	0.054	9
		해저케이블 급속 시공 기술	0.047	12
		시공 중 지지구조물 거동 계측 기술	0.071	4
		부식방지기술	0.046	13
		GPS/가속도계 이용한 시공단계관리 프로그램 개발	0.054	9
부재간연결부상세(제작)기술		0.061	6	
친환경제작기술	0.053	11		
건설 공정 최적화 기술	0.091	2		
평가/인증				

단계 3: 기준들의 가중치를 구한다. 쌍대 비교행렬로부터 각 계층의 상대적 가중치를 계산한다. 개별 전문가들의 쌍대 비교행렬은 기하평균이 이용되며, 가중치 추정을 위한 방법으로는 일반적으로 고유벡터법이 많이 사용된다. 기하평균의 경우 쌍대행렬의 각 원소의 역수성을 지키는 유일한 방법으로 알려져 있다. 또한, 이 단계에서는 응답의 신뢰도를 측정하기 위해 일관성 비율(CR; Consistency Ratio)을 검증한다. 여기서 일관성 비율(CR)은 일관성 지수(CI; Consistency Index)를 무작위 지수(RI; Random Index)로 나눈 값이다. Saay(1980)는 일관

성 비율(CR)이 0.1 미만이면 쌍대비교는 합리적인 일관성을 갖는 것으로 판단하고, 0.2 이내일 경우 용납할 수 있는 수준의 일관성을 갖고 있으나, 0.2 이상이면 일관성이 부족한 것으로 제조사가 필요하다고 제안했다.

단계 4: 종합적인 우선순위를 도출하고 대안을 선정하기 위해서 계층 별로 상대적 가중치를 합산한다. 이러한 합산방법에는 단순가중합법(simple additive weighting method)이 많이 사용된다. 이렇게 도출된 각 대안의 가중치는 비율척도를 나타낸다.

〈표 4〉 단지운영 및 유지관리에 대한 소분류 기술 관점에서 가중치와 순위

대분류 기술	중분류 기술	소분류 기술	가중치	순위
단지 운영 및 유지 관리	단지운영 및 모니터링	단지 운영 기준 개발	0.223	2
		SCADA(CMS와 SHM) 시스템 기술	0.150	3
		RISK Analysis/신뢰도 평가 기준	0.352	1
		세굴 모니터링 기술	0.096	5
		계측센서 데이터 신뢰도 향상기술	0.082	6
		실시간 모니터링 데이터 DB/통계처리 기술	0.097	4
	단지 유지 관리 기술	유지관리 매뉴얼 개발	0.123	1
		비상시 제어시스템 구축	0.095	7
		열화/내구성/안전성 평가 기술	0.072	8
		보수/보강 기술	0.103	3
		소음 모니터링/저감 기술	0.057	11
		저장시스템 효율 분석/측정 기술	0.071	10
		해양생태환경영향 조사/분석/예측/평가/저감 기술	0.112	2
		발전효율 조사/분석 기술	0.097	5
		해체/보강 기술	0.072	8
		해저 케이블 긴급 복구 기술	0.097	5
		해저케이블 유지관리 지원 개발	0.101	4

4. 사례연구

4.1 항만해상풍력단지 건설기술의 계층구조

항만해상풍력단지 건설기술 관련 교수들 7명으로 구성된 패널 전문가들을 FGI(Focus Group Interview)의 참가자로 구성해서, 인터뷰와 설문조사를 실행했다. 그 결과로 항만해상풍력단지 건설기술에 대해서 3개의 대분류(단지구축, 지지구조, 단지운영 및 유지관리) 기술과 9개의 중분류 기술, 그리고 72개 소분류 기술들을 [그림 1]과 같이 도출했다. 본 사례의 계층적 구조에서 의사결정 문제의 목표는 항만풍력단지 건설기술의 우선순위결정이며, 9개의 중분류 기술속성은 입지선정, 단지설계 및 최적화, 단지구축의 평가 및 인증, 지지구조 형식개발, 해석 및 설계, 제작 및 시공, 지지구조의 평가 및 인증, 단지운영 및 모니터링, 단지유지관리기술 등 이다. 항만풍력단지 건설기술에 대한 9개의 중분류 기술속성 개념은 다음과 같다.

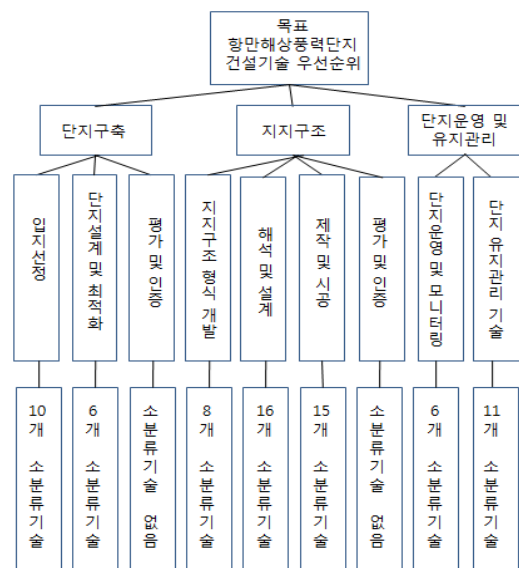
입지선정: 해상풍력단지 건설 시 가장 중요한 평가요소는 풍력자원에 대한 잠재량 산정이며, 미국 국가재생에너지연구소(NREL; National Renewable Energy Laboratory)가 제안한 풍력등급 4등급 이상이면, 사업경제성이 확보된 입지로 평가되고 있다. 이와 더불어 파랑, 조석, 조류 등 해양환경 특성평가 기술, 그리고 수심, 이안거리, 등 국가지리정보 관련 지반조사 평가기술도 중요하다[4][6].

단지설계 및 최적화: 풍력단지의 설계기준과 최적 배

치를 위해서 후류효과(Wake-Effect)에 대한 발전량의 증감에 대한 최적화 기술이 필요하다[2][49].

평가 및 인증: 단지건설 혹은 지지구조에 대한 경제성 평가와 인증을 위해서는 건설기간, 수명기간, 감가상각비, 이자율 등이 고려되어야 한다[7].

지지구조 형식개발: 다양한 지지구조(부유식, 하이브리드, 복합신소재, 콘크리트, 강-콘크리트 합성, 석션파일, 모노파일, 가변형 등)에 대한 형식개발기술이 필요하다.



〔그림 1〕 항만해상풍력단지 건설기술계층구조

해석 및 설계: 하중, 피로, 연결부 등에 대한 해석기술, 지지력, 안전성, 해양생물 영향 등에 대한 평가기술, 그리고 지지구조물, 세굴/부식/충돌 방지, 내진 등에 대한 설계기술이 필요하다.

제작 및 시공: 모듈화, 연결부, 친환경 등 제작기술, 그리고 해상풍력 설치, 정밀시공, 급속시공, 지지구조물 거동계측 등 시공기술이 필요하다.

단지운영 및 모니터링: 풍력단지 운영기준, 모니터링 데이터 처리, 위험분석 및 신뢰도 등 평가기술이 필요하다. 풍력단지는 일반적으로 풍력터빈, 내부망 그리드, 변전소, 외부망 그리드 등으로 구성되며, 신뢰도 평가는 COPT(Capacity Outage Probability Table) 개념으로 전력전달 효율로 측정한다[8].

단지 유지관리 기술: 풍력단지 유지보수를 위한 해체, 보수, 보강, 비상시 제어 및 긴급복구(특히 해저케이블 긴급복구), 발전 및 저장시스템 효율, 해양생태환경 영향 조사 등에 관한 기술과 유지관리 매뉴얼 개발이 필요하다[15].

항만해상풍력단지 건설기술 관련 기관에 대한 객관적 측정 자료가 확보되어 있지 않기 때문에, 항만풍력단지 건설기술 관련 전문가들의 과거경험을 근거로 주관적 평가할 수밖에 없는 상황이다. 그러므로 도출된 9개의 중분류 기술과 72개 소분류 기술들에 대한 주관적 가중치를 계산하기 위해서 AHP 방법을 다음과 같이 적용했다.

4.2 AHP 방법의 적용

본 연구에서는 AHP 방법을 다음과 같이 단계 별로 적용했다.

단계 1: 7명의 패널 전문가들에 대한 설문조사에 의해서 항만해상풍력단지 건설기술 우선순위결정문제의 계층적 구조를 [그림 1]과 같이 구조화했다. 항만해상풍력단지 건설기술에 대해서 3개의 대분류 기술, 9개의 중분류 기술, 그리고 72개 소분류 기술들로 계층 별 요소기술을 도출했다.

단계 2: 9개의 중분류 기술, 그리고 72개 소분류 기술 계층 별 요소 기술 간 상대비교를 수행했다. 이를 통해 9점 척도를 이용해서, 각 계층 별 상대비교행렬을 도출했다.

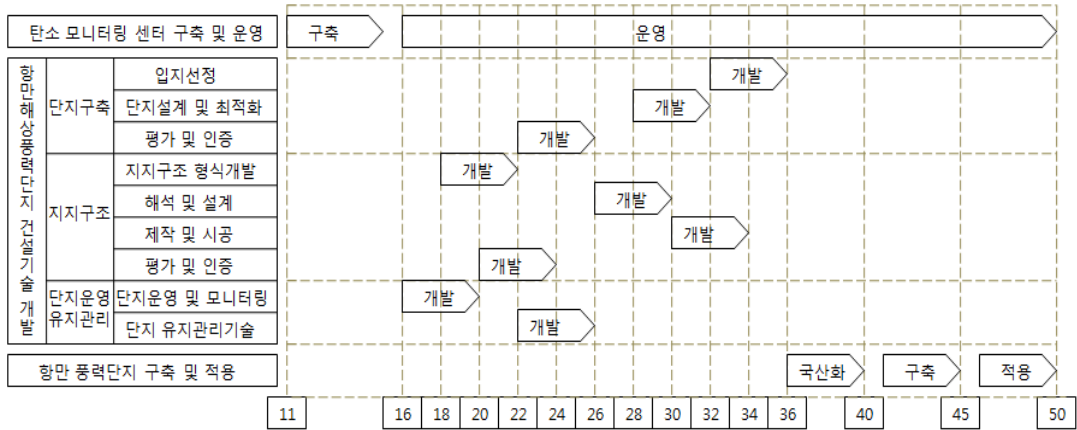
단계 3: 9개의 중분류 기술의 쌍대 비교행렬로부터 상대적 가중치를 계산한 것 <표 1>이고, 72개 소분류 기술의 쌍대 비교행렬로부터 상대적 가중치와 일관성 비율을 계산한 것 <표 2>, <표 3>, <표 4> 이다. 설문결과에 대

한 일관성 비율(CR: Consistency Ratio)을 확인한 결과, CR 지수가 0.1 미만으로 나타나 AHP 설문을 통해 얻어진 가중치는 신뢰할 수 있는 것으로 판명되었다.

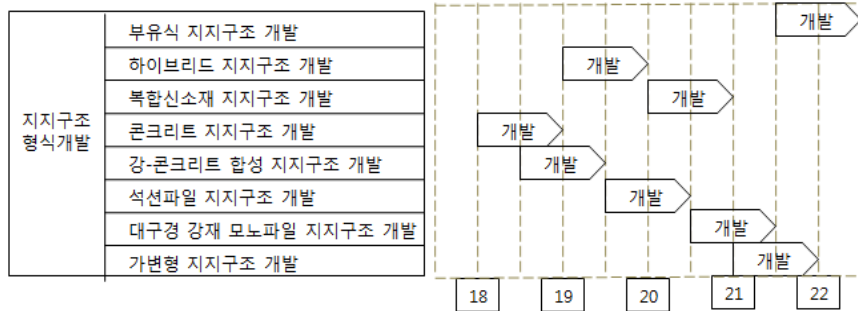
단계 4: 3개의 대분류 기술의 가중치와 9개의 중분류 기술의 가중치를 곱한 전체 가중치 계산 결과에 의해서 상대적 우선순위를 도출한 것이 <표 1> 이다. 대분류 기술 관점에서는 대분류 기술의 가중치 크기에 따라서, 지지구조 > 단지운영 및 유지관리 > 단지구축 순으로 중요하다. 대분류 및 중분류 기술이 서로 각각 독립적이라는 가정에서 대분류 기술의 가중치와 중분류 기술의 가중치를 곱한 9개의 전체 가중치에 의한 우선순위는 단지 운영 및 모니터링 > 지지구조 형식개발 > 지지구조의 평가 및 인증 > ... > 입지선정 순으로 나타났다. <표 3>은 단지구축, <표 4>는 지지구조, 그리고 <표 5>는 단지운영 및 유지관리에 대한 소분류 기술 관점에서 가중치와 순위를 제시한 것이다. 여기서 순위는 소분류 기술들 간에는 서로 종속적이라는 가정에서 중분류 기술 내에서 우선순위를 제시한 것이다.

4.3 기술개발 로드 맵 수립

홍근희와 안익성(2009)은 항만에서의 해상풍력발전 도입을 위해서 전국 28개 무역항을 대상으로 전기사용량을 조사하고, 항계 수역 내에서의 풍력자원 잠재량 추정을 통하여 소요규모, 입지, 배치계획 등을 검토해서, 기초조사(2009년), 현장계측(2010년), 시범사업(2011년~2012년), 사업화단계(2013년~2024년) 등 항만해상풍력발전 개발계획을 제시했다. 최상희외 3인(2011)의 '녹색기술 기반의 미래 항만개발전략 효과분석' 연구에 의하면, 녹색항만사업 추진 로드맵은 항만 특화 신재생에너지단지 구축 및 적용사업, 관련 세계 혜택사업, 탄소 모니터링센터 구축 및 운영사업 등에 대한 사업추진 기간을 다음과 같이 제시했다. 탄소 모니터링센터 구축 및 운영사업의 구축기간(2011년~2015년)과 운영기간(2016년~2050년), 그리고 항만 특화 신재생에너지단지 구축 및 적용사업에서 풍력시스템에 대해서 국산화 개발기간(2036년~2040년), 구축기간(2041년~2045년), 그리고 적용기간(2046년~2050년)에 대한 연구결과를 [그림 2]에서 탄소 모니터링센터 구축 및 운영 그리고 항만풍력단지 구축 및 적용으로 표시했다. 여기서 항만 특화 신재생에너지단지 구축사업이 2035년 이후부터 추진하는 것으로 설정된 이유는 CO_2 저감 70%를 달성하기 위해 경제성과 효율성이



[그림 2] 항만해상풍력단지 건설기술개발 로드맵



[그림 3] 지지구조 형식개발 건설기술개발 상세 로드맵 예시

확보되는 시점이기 때문이다. 이와 함께 국가주도의 녹색항만기술 R&D 사업 로드 맵과 상호 연동성을 가질 수 있도록 민간 주도의 녹색기술 항만사업 추진 로드맵이 수립되었다[19].

본 연구에서는 최상회의 3인(2011)의 연구결과를 토대로 해서, [그림 2]와 같이 항만해상풍력단지 건설기술의 9개 중분류 기술 중심으로 항만풍력단지 건설기술개발 로드 맵을 제시했다. 항만풍력단지 건설기술개발 로드맵은 탄소모니터링 센터가 구축되어 운영을 시작하는 2016년부터, 항만풍력단지 구축 및 적용을 시작하는 2036년까지, 20년의 기간에 대해서 항만해상풍력단지 9개 중분류 기술들이 AHP 중요도 순위 별로 2년 간격으로 각각 4년간의 개발기간으로 배열된 것이다. 항만해상풍력단지 건설기술의 9개 중분류 기술 내에는 각각 6개~16개의 소분류 기술이 있으며, 소분류 기술들 역시 AHP 중요도 순위에 따라서 개발되어야 할 것이다. 여기서 풍력단지 건설기술의 개별적인 세부기술 별로 개발, 성장, 성숙, 쇠

퇴라는 생명주기가 서로 다르지만, 개발 초기단계 (embryonic phase)로 4년 내외의 기간으로 추정 할 수 있다 [46].

4.4 항만풍력단지 건설기술의 핵심기술

항만해상풍력단지 건설기술의 핵심기술을 시급히 확보하기 위해서는 본 연구의 기술개발 로드맵을 기초로 해서 우리나라의 항만풍력단지 건설기술이 아시아에서 주도적인 위치를 확보할 수 있도록 정부 및 산업계의 개발전략이 필요하다. 항만해상풍력단지 건설기술의 3개의 대분류 기술 관점에서 9개 중분류 기술 내의 6개~16개의 소분류 기술 중에서 개발 우선순위 1~2위 중심의 핵심기술은 다음과 같다. 첫째, <표 2>과 같이, 단지구축 분야에서 입지선정 측면에서 ‘해양환경특성 예측 및 평가’와 ‘해양환경 및 지반 조사/평가 기술’, 그리고 단지설계 및 최적화 측면에서 ‘단지설계기준 개발’이 핵심기술이다. 이와 더불어 평가 및 인증 분야가 중요하다. 둘째,

<표 3>와 같이, 지지구조 분야에서 지지구조 형식개발 측면에서 ‘콘크리트 지지구조 개발’과 ‘강-콘크리트 합성 지지구조 개발’, 그리고 해석 및 설계 측면에서 ‘통합하중 산정 기술’, 제작 및 시공 측면에서 ‘해상풍력 설치/시공 시방서 개발’이 핵심기술이다. 이와 더불어 평가 및 인증 분야가 중요하다. 셋째, <표 4>와 같이, 단지운영 및 유지관리 분야에서 단지운영 및 모니터링 측면에서 ‘RISK Analysis/신뢰도 평가 기준’과 ‘단지 운영 기준 개발’, 단지 유지관리 측면에서 ‘유지관리 매뉴얼 개발’이 핵심기술이다.

항만해상풍력단지 건설기술의 9개 중분류 기술 중심으로 제시된 항만풍력단지 건설기술개발 로드맵인 [그림 2]에서 소분류 기술들을 가중치 순위에 따라서, 4년 내의 개발기간 중 6개월 단위로 배열해서 상세 로드맵을 작성할 수 있다. 예로서 소분류 기술 중에서 지지구조 형식개발에 대한 상세 로드맵이 [그림 3]이다. 중분류 기술인 지지구조 형식개발 내에 8개의 개별적인 소분류 기술들의 가중치 순위에 따라서 6개월 단위로 배열해서 상세 로드맵을 제시한 것이다. 9개의 중분류 기술 내에 소분류 기술에 대해서도 위와 같은 방법으로 상세 로드맵을 제시할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 항만해상풍력단지의 건설기술개발에 대한 AHP 방법을 적용해서 항만해상풍력단지의 건설기술의 계층화 구조를 도출해서 기술개발의 우선순위와 건설기술개발 로드맵을 제시했다. 구체적으로 본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 항만해상풍력단지의 건설기술에 대한 대분류, 중분류, 소분류 등 기술분류체계를 제시했다. 7명의 패널 전문가들에 대한 설문조사에 의해서 항만해상풍력단지 건설기술을 계층적 구조화해서, 3개의 대분류 기술, 9개의 중분류 기술, 그리고 72개 소분류 기술들로 계층별 요소기술을 도출했다.

둘째, 다속성 의사결정기법인 AHP 방법을 적용해서 항만풍력단지의 건설기술들의 가중치를 계산해서, 개발 우선순위를 제시했다. 대분류, 중분류, 소분류 기술의 가중치에 의한 우선순위를 제시했고, 또한, 대분류 및 중분류 기술의 가중치를 곱한 9개의 전체 가중치를 계산해서

순위를 비교했다.

셋째, 9개의 중분류 기술 관점에서 항만해상풍력단지의 기술개발 정책수립에 관한 로드맵을 제시했다. 항만풍력단지 건설기술개발 로드맵은 탄소모니터링 센터가 구축되어 운영을 시작하는 2016년부터, 항만풍력단지 구축 및 적용을 시작하는 2036년 까지, 20년의 기간에 대해서 항만해상풍력단지 9개 중분류 기술들이 AHP 중요도 순위 별로 제시되었다. 또한, 소분류 기술들에 대해서 가중치 순위에 따라서, 4년 내의 개발기간 중 6개월 단위로 배열해서 상세 로드맵의 작성 예시를 제시했다.

이와 같은 항만해상풍력단지 건설기술개발 로드맵에 따라서 관련 핵심기술이 개발된다면, 저탄소 항만해상풍력단지건설로 선진국 대비 건설기술수준 80~90% 경쟁력 확보가 2050년도에는 가능케 될 것이다. 또한, 국토해양부의 녹색성장정책을 위한 건설기술진흥기본계획[1]의 건설기술 R&D 강화 전략의 중요한 로드맵으로 활용될 것이다.

끝으로 기술 로드맵의 한계점은 장기적 및 거시적 관점에서 기술개발의 일정을 제시할 수 있을 뿐이고, 기술의 개발, 구축, 적용이 시간에 따라서 확산되는 구체적인 일정은 수학적인 S 곡선인 기술확산모형들(epidemic 혹은 probit 모형)로 추정해야만 가능하다[34]. 또한, AHP 방법의 한계점은 대안이 추가되거나 삭제될 경우 기존 대안의 순위역전(rank reversal)이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 또한, 비교 대상의 수가 증가함에 따라 의사결정자가 판단해야할 평가 횟수는 급증하게 되고, 일관성 비율에 대한 타당성이 명확하게 검증되지 못한다는 점이다.

참고 문헌

- [1] 김균태, 녹색건설기술 정책 소개 (2010), 건축, 대한건축학회, 54(12), 28-30.
- [2] 김도형, 장은영, 경남호, 김홍우, 김성완, 김창석 (2011), “해상풍력발전 단지배치에 따른 민감도 분석에 관한 연구,” 한국태양에너지학회논문집, 한국태양에너지학회, 31(3), 29-35.
- [3] 김영석, 서종원, 이준복, 김성근 (2008), “건설기계 자동화를 위한 기술 로드맵 개발에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 493-504.
- [4] 김정근, 정철모 (2009), “해상풍력단지 개발을 위한 입지요인분석,” 도시행정학보, 한국도시행정학회,

- 22(1), 145-165.
- [5] 김창윤, 김형관, 김창완, 김문겸 (2008), “건설기술연구개발을 위한 기술기획: 적시시공을 위한 현장 모니터링기술 사례를 기반으로,” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 849-857.
- [6] 김현구, 황효정 (2010), “국가바람지그 및 국가지리정보에 의한 국내 해상풍력단지 개발계획의 비교분석,” 한국태양에너지학회논문집, 한국태양에너지학회, 30(5), 44-55.
- [7] 문성주, 양성국, 이덕창, 손판도 (2011), “풍력사업의 경제성 분석에 관한 연구: 제주특별자치도의 건설 중인 S, I 풍력단지의 사례를 중심으로,” 산업경제연구, 한국산업경제학회, 24(6), 3695-3712.
- [8] 신제석, 이고은, 장동우, 배인수, 김진오 (2012), “대규모 풍력단지의 구성에 대한 신뢰도 평가,” 하계학술대회논문집, 대한전기학회, 18-20.
- [9] 유증원 (2004), “항만기술연구개발사업 소개,” 대한토목학회지, 대한토목학회, 52(1), 15-20.
- [10] 이강웅, 김성국 (2003), “퍼지 AHP를 이용한 부산신항의 항만관리 방안에 관한 연구,” 지방정부연구, 7(2), 69-87.
- [11] 이영호, 김범석 (2005), 해상풍력발전의 개요 및 전망, 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, 167-168.
- [12] 이정호, 옥치을, 최효성, 김영석 (2010), “건설자동화 기술개발 우선순위 도출 및 기술 로드맵 구축에 관한 연구,” 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 26(10), 131-140.
- [13] 임중섭 (2010), “항만환경 규제에 따른 Green Port 구축방안,” 한국항만경제학회지, 한국항만경제학회, 26(2), 99-118.
- [14] 장운재, 금중수 (2007), “친환경 항만을 위한 항만개발 우선순위 평가 및 보상전략 분석,” 추계학술발표회 논문집, 해양환경안전학회, 103-108.
- [15] 전영수, 최영도, 전동훈 (2009), “대규모 풍력발전단지의 최적운영방안 연구,” 전력전자학술대회논문집, 전력전자학회, 649-651.
- [16] 정문선, 문채주, 김상만, 채성열 (2010), “서남해안지역의 해상풍력단지 설계,” 추계학술발표대회논문집, 한국태양에너지학회, 30(2), 487-490.
- [17] 정봉현 (2009), “녹색성장시대에 환경친화적 항만관리정책의 발전방향,” 한국항만경제학회지, 한국항만경제학회, 25(3), 361-384.
- [18] 지식경제부 전력거래소 (2010), 제5차 전력수급기본계획, 2010. 1-16.
- [19] 최상희, 김우선, 하태영, 이주호 (2011), 녹색기술기반의 미래 항만개발전략 효과분석, 연구보고서, 한국해양수산개발원, 1-227.
- [20] 최상희, 심기섭, 김우선, 하태영 (2007), 국내 컨테이너 항만기술개발 로드 맵 수립연구, 연구보고서, 한국해양수산개발원, 1-285.
- [21] 한국해양수산개발원 (2009), 항만분야 기후변화협약 대응방안, 1-157.
- [22] 홍군희와 안익성 (2009), “우리나라 항만의 풍력발전 도입 및 기반구축 방안에 관한 연구,” 대한토목학회 정기학술대회논문집, 대한토목학회, 1126-1129.
- [23] Ackermann, T. and L. Söder (2000), “Wind Energy Technology and Current Status: A Review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4, 315-374.
- [24] Amer, M. and Tugrul U. Daim (2010), “Application of Technology Roadmaps for Renewable Energy Sector,” Technological Forecasting and Social Change, 77, 1355-1370.
- [25] Baños, B., F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, C. Gil, A. Alcayde, J. Gómez, (2011), “Optimization Methods Applied to Renewable and Sustainable Energy: A Review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 1753-1766.
- [26] Beccali, M., M. Cellura, and M. Mistretta (2003), “Decision -making energy planning: Application of the ELECTRE method at regional level for the diffusion of renewable energy technology,” Renewable Energy, 28, 2063-2087.
- [27] Belton, V. and T. J. Stewart (2002), Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach, Boston: Kluwer Academic Publications.
- [28] Fenwick, D., T.U. Daim, and N. Gerdstri (2009), Value Driven Technology Road Mapping(VTRM) Process Integrating Decision Making and Marketing Tools: Case of Internet Security Technologies, Technological Forecasting and Social Change, 76, 1055-1077.
- [29] Galvin, R. (1998), “Science Roadmaps,” Science,

- 280, 803.
- [30] Gamboa, G. and G. Munda (2007), "The Problem of Wind-farm Location: A Social Multi-criteria Evaluation Framework," *Energy Policy*, 35, 1564-1583.
- [31] Gerdstri, D. (2007), "An Analytical Approach to Building a Technology Development Envelope (TDE) for Roadmapping of Emerging Technologies," *International Journal of Innovation Technology Management*, 4, 121-135.
- [32] Gerdstri, D., and R.S. Vatananan, and S. Dansamasatid (2009), "Dealing with the Dynamics of Technology Roadmapping Implementation: A Case Study," *Technology Annal of Strategy Management*, 76, 50-60.
- [33] Gerdstri, D., P. Assakul, and R.S. Vatananan (2010), "An Activity Guideline for Technology Roadmapping Implementation, *Technology Annal of Strategy Management*, 22, 229-242.
- [34] Geroski, P.A. (2000), "Models of Technology Diffusion," *Research Policy*, 29, 603-625.
- [35] Herbert, G.M. J., S. Iniyar, E. Sreevalsan, and S. Rajapandian (2007), "A Review of Wind Energy Technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1117-1145.
- [36] Huang, J.-P., K. L. Poh, and B. W. Ang (1995), "Decision Analysis in Energy and Environment Modelling," *Energy*, 20, 843-855.
- [37] Kahraman, C. and İ. Kaya (2010), "A Fuzzy Multicriteria Methodology for Selection among Energy Alternatives," *Expert Systems with Applications*, 37, 6270-6281.
- [38] Kaya, T. and C. Kahraman (2011), "Multicriteria Decision Making in Energy Planning Using a Modified Fuzzy TOPSIS Methodology," *Expert Systems with Applications*, 38, 6577-6585.
- [39] Kim, C., H. Kim, S. H. Han, C. Kim, M. K. Kim, and S. H. Park (2009), "Developing a Technology Roadmap for Construction R&D through Interdisciplinary Research Efforts," *Automation in Construction*, 18, 330-337.
- [40] Lee, S. K., G. Mogi, and J. W. Kim (2009), "Energy Technology Roadmap for the 10 Years: The Case of Korea," *Energy Policy*, 37, 588-596.
- [41] Lee, J. H., H. Kim, and R. Phaal (2012), "An Analysis of Factors Improving Technology Roadmap Credibility: A Communications Theory Assessment of Roadmapping Processes," *Technology Forecasting & Social Change*, 79, 263-280.
- [42] Leung, D. Y.C. and Y. Yang (2012), "Wind Energy Development and Its Environmental Impact: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1031-1039.
- [43] Lichtenthaler, U. (2008), "Integrated Roadmaps for Open Innovation," *Research Technology Management*, 51(3), 45-49.
- [44] Martin, H. and T. U. Daim (2012), "Technology Roadmap Development Process(TRDP) for the Service Sector: A Conceptual Framework," *Technology in Society*, 34, 94-105.
- [45] Phaal, R., C. J.P. Farrukh, and D. R. Probert (2004), "Technology Roadmapping - A Planning Framework for Evolution and Revolution," *Technological Forecasting and Social Change*, 71, 5-26.
- [46] Phaal, R., E. O'Sullivan, M. Routley, S. Ford and D. Probert (2011), "A Framework for Mapping Industrial Emergence," *Technological Forecasting and Social Change*, 78, 217-230.
- [47] Rinne, M. (2004), "Technology Roadmaps: Infrastructure for Innovation," *Technological Forecasting and Social Change*, 71, 67-80.
- [48] Saaty, T.L.(1980), *The Hierarchy Process*, McGraw-Hill, NewYork.
- [49] Saidur, R., N.A. Rahim, M.R. Islam, and K.H. Solangi (2011), "Environmental Impact of Wind Energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2423-2430.
- [50] Wang, W.-P. (2009), "Evaluating New Product Development by Fuzzy Linguistic Computing," *Expert Systems with Applications*, 36, 9759-9766.
- [51] Zhou, P., B. W. Ang and K. L. Poh (2006), "Decision Analysis in Energy and Environmental Modelling: An Update," *Energy*, 31, 2604-2622.

김 기 윤



- 1976년 2월 : 고려대학교 토목공학과(공학사)
- 1979년 2월 : 고려대학교 경영대학원(경영학석사)
- 1985년 2월 : 고려대학교 경영학과(경영학박사)
- 1980년 2월~현재 : 광운대학교 경영학과 교수

· 관심분야 : 기술평가, IT Risk Management
· E-Mail : min1203@kw.ac.kr

정 석 재



- 2002년 2월 : 한국해양대학교 물류시스템공학과 학사
- 2004년 2월 : 연세대학교 정보산업공학과 석사
- 2009년 8월 : 연세대학교 정보산업공학과 박사
- 2010년 3월~현재 : 광운대학교 경영학부 조교수

· 관심분야 : 공급사슬관리, 생산운영관리
· E-Mail : sjeongr@kw.ac.kr

이 석 준



- 2004년 2월 : 한성대학교 경영학과(경영학사)
- 2007년 8월 : 연세대학교 정보산업공학과(공학석사)
- 2011년 8월 : 연세대학교 정보산업공학과(공학박사)
- 2012년 2월~현재 : 에리조나대학 박사후 연구원

· 관심분야 : 경영정보시스템, 기술경영
· E-Mail : lsj77@yonsei.ac.kr