

3P 데이터를 활용한 연구동향 분석

: 핵폐기물 처리 기술 전략 수립을 위한 중성자 발생장치 개발 사례를 중심으로

황성하*, 김유빈**, 최원재***, 도현수****, 강동엽*****

I. 서론

전 세계적으로 급격한 인구 증가로 인한 전력 소비는 끊임없이 증가하는 추세를 보이고 있고 이는 폭발적인 에너지 소비로 급기야는 기후변화 등의 지구의 환경 파괴로 이어졌다. 먼 과거부터 현재까지 인류와 함께한 에너지는 환경문제와 과학기술의 발달로 인해 에너지원의 형태도 다양하게 변화되었다. 특히, 지구 온난화의 주범인 석탄, 석유와 같은 화석연료는 감축될 것으로 전망되며 친환경 에너지원인 핵융합과 태양열, 풍력 등은 경제성 문제와 개발 중으로 현실적 대안으로 제시되고 있지 못하여 결국 환경공해가 적고 경제성이 높은 원자력 에너지가 대두되고 있다.

본 논문에서는 원자력 발전 후 남은 핵폐기물 처리를 위한 중성자 발생장치 개발 연구의 3P 네트워크 분석을 통해 관련 분야 원천기술 및 최신 기술의 기술흐름, 경쟁력 분석과 경쟁기업 비교를 통한 미래 선도 기술 예측, 수요 시장 규모 및 동향 분석으로 향후 중성자 발생장치 개발을 통해 혁신적인 핵폐기물 처리 기술 선점을 위한 전략 수립에 유용한 분석 방법으로 활용될 수 있다고 생각된다.

II. 선행연구

1. 국내·외 에너지 정책 동향

국제 에너지 정세는 파리협정(15.12) 출범과 함께 에너지원(석탄, 석유, 천연 가스, 신재생 에너지, 원자력 등)에 많은 변화가 일어날 거라 전망하고 있다. 전 세계는 파리협정의 주 골자인 온실가스 감축이라는 국제 공동 목표를 달성하기 위한 실천 의지를 강력히 피력했기

* 황성하, 국가핵융합연구소 미래전략실 선임연구원, shhwang@nfri.re.kr

** 김유빈, 국가핵융합연구소 미래전략실 실장, 한양대학교 과학기술정책학과 박사과정, ybkim@nfri.re.kr

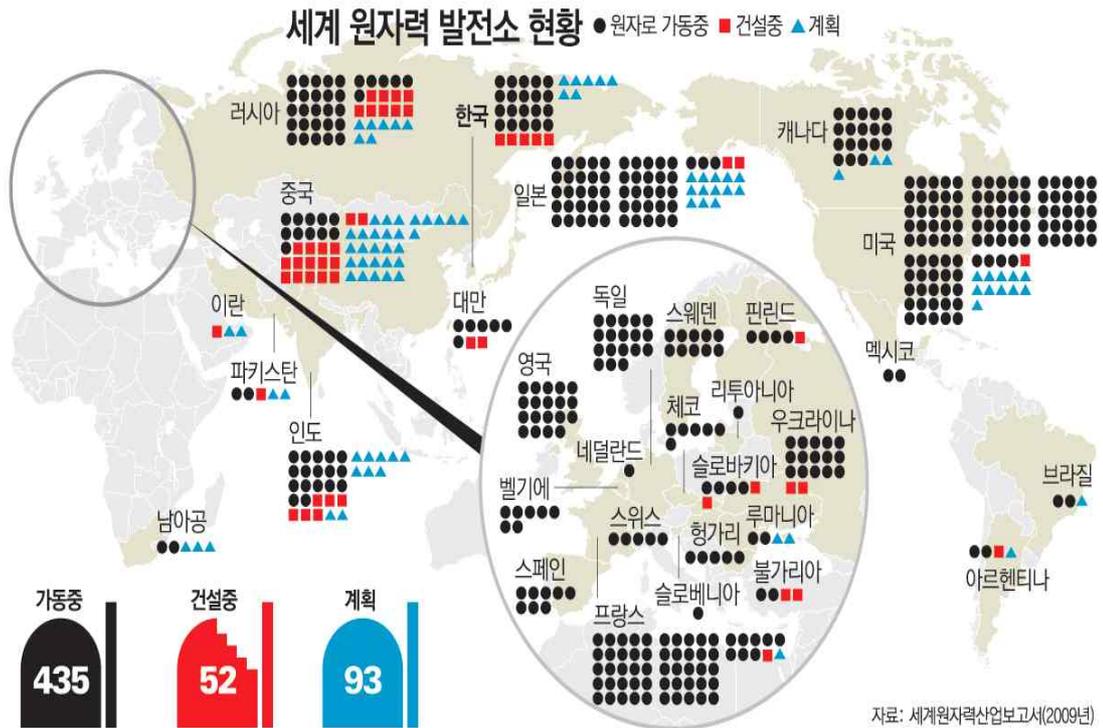
*** 최원재, 국가핵융합연구소 미래전략실 선임연구원, cwj147@nfri.re.kr

**** 도현수, 국가핵융합연구소 미래전략실 선임연구원, ths5001@nfri.re.kr

***** 강동엽, 국가핵융합연구소 미래전략실 선임행정원, kdy79@nfri.re.kr

때문이다. 파리협정 출범 전에는 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료의 비중이 타 에너지원에 비해 높았으나 출범 후에는 온실가스의 주범인 이산화탄소 감축 정책에 따라 석유, 석유 등은 감소되고 태양, 풍력, 수력 등의 신재생에너지와 원자력 발전에 대한 증가가 예상되는 등 에너지원별 판세는 조심스럽게 재조명되고 있다. 예컨대, 세계 에너지 수요증가의 30% 이상을 차지하는 중국과 향후 가까운 미래에 세계 2위 에너지소비 대국으로 부상할 인도는 원전 추가 건설 계획으로 국제 에너지 정세에 큰 영향을 미칠 전망이다. 또한, 일본은 후쿠시마 원전사고('15.3)로 인해 원전 성장에 불확실성이 증가하였으나 온실가스 감축에 기여하고 안정적 전력공급을 위해 원전 추가 건설을 추진 중에 있다.

원자력 발전이 자연 재해(지진, 해일 등) 및 인재 등을 통해 원전사고로 이어져 안전성이라는 사회 수용성에 문제를 일으키고 있지만, 당장 줄이기도 어려운 게 현실이다. 신재생에너지로 대체하자는 의견이 나오지만 이는 지난 10년간 태양광, 풍력 등의 신재생에너지를 분석해 봤을 때 에너지 효율이 아직도 현저히 낮은 수준이다. 공급 가능성과 경제성 측면에서 원자력이 여전히 상당한 비중을 차지할 수밖에 없다는 것이 전문가들의 의견이며, 우리나라의 중장기적인 에너지 믹스(에너지원별 비중 조정) 계획에서 원자력 비중을 현행대로 유지하거 오히려 소폭 늘려야 한다고 주장하는 이유가 여기에 있다. [그림 1]은 세계 원자력 발전소 현황을 보여준다. EU는 원전 비중 감축과 폐기라는 정책을 내세우고 있지만, 원자력 선진국인 미국, 러시아, 중국, 일본과 인도 등은 원전 비중을 확대하기 위해 원전 건설을 추가하려는 정책을 추진하고 있다[표 1]. 우리나라는 '15년 기준으로, 신한울(경남 울진)에 2개, 신고리(경남 울산)에 2개의 원전을 추가 건설을 추진 중이다.



* 자료 출처 : 세계원자력산업보고서(2009)

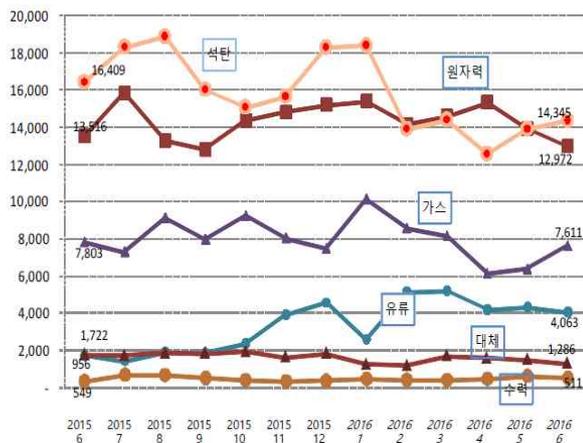
(그림 1) 세계 원자력 발전소 현황

<표 1> 주요국 원자력에너지 정책

국 가 명	원자력에너지 정책
미 국	34년 만에 신규 원전 건설 재개
캐 나 다	중수로 원전을 경수로로 전환해 원전 유지
영 국	노후 원전 폐쇄에서 신규 원전 대체로 선회
러 시 아	'30년까지 원전 비중 30%로 확대
인 도	'50년까지 원전 비중 25%로 확대
중 국	동남부 원전 26기 건설 재개
프 랑 스	원전 비중 현행 75%에서 '25년까지 50% 축소
독 일	'22년까지 원전 17기 폐기
이탈리아	국민투표로 원전 재도입 계획 폐기

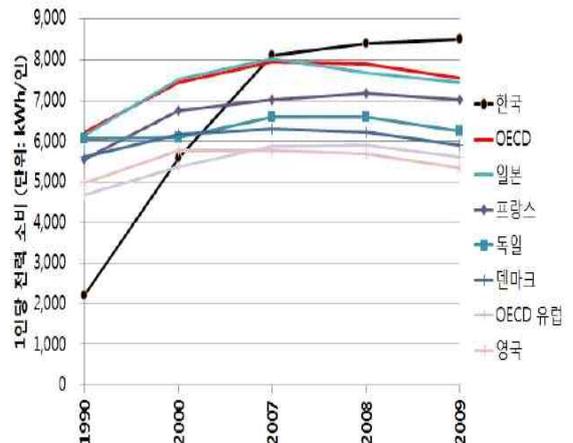
* 자료 출처 : 매경이코노미(2013)

신 기후변화의 영향은 우리나라의 에너지원별 변화로 이어지고 있다. 우리나라의 에너지원별 발전전력의 경우, 화석 연료(석탄, 석유, 가스 등)의 감소는 에너지 공급의 차질로 이어져 이로 인한 에너지 수요를 충족하기 위한 대안으로 원자력과 신재생에너지(태양열, 풍력, 수력 등)의 증가라는 결과를 초래하였다. 예컨대, 석탄의 감소가 두드러진 이유는 파리협정이 공식적으로 채택된 시기인 2015년 12월 이후로 현격히 감소하는 것으로 나타났다[그림 2]. 또한, 우리나라의 에너지 수요는 타 국가의 에너지 수요와는 대조적으로 수요가 점증적으로 증가하여 2007년 이후로 1인당 전력 소비량이 세계에서 가장 많은 것으로 나타났다[그림 3].



* 자료 출처 : 한전, 전력통계속보(2016.6)

(그림 2) 주요 에너지원별 발전전력량 추이



* 자료 출처 : 에너지 대안 포럼(2012)

(그림 3) 주요국 1인당 전력 소비량

2. 핵폐기물이란?

핵폐기물(방사성 폐기물)이란 핵반응에서 부산물로 생성되는 오염된 물질로 일단 방출되면 인체에 해가 되어 분리 및 저장 등의 처리 과정이 필요한 위험한 물질이다. 핵폐기물은 방

사능 세기에 따라 저준위 폐기물, 중준위 폐기물과 고준위 폐기물로 분류된다[표 2]. 핵폐기물은 시간이 지나면 방사능 세기가 감소되는데 즉, 방사능 물질의 초기 값이 절반이 되는데 걸리는 시간 이를 반감기라 한다. 특히, 원자력 발전에 사용되는 핵연료봉은 사용 후 방사능 위험이 높아 고준위 폐기물로 분류되며 이와 같은 고준위 폐기물에서 나오는 방사능 물질의 반감기는 수십 년에서 수만 년까지 된다[표 3]

<표 2> 핵폐기물의 종류

구분	내용	처리방법
저준위 폐기물 (Low Level Waste)	(정의) 방사능 세기가 낮은 방사성 폐기물 (예제) 원전에서 사용한 장갑 등 쓰레기류	저장 후 폐기
중준위 폐기물 (Intermediate Level Waste)	(정의) 방사능 세기가 높은 방사성 폐기물 (예제) 방사선 차폐복, 원자로 부품 등	저장
고준위 폐기물 (High Level Waste)	(정의) 방사능 세기가 매우 강한 방사성 폐기물 (예제) 원전에 사용 한 핵연료	저장, 핵변환

<표 3> 방사성 물질의 반감기

방사능 물질	반감기	방사능 물질	반감기
세륨 144	285일	세슘 137	30년
루테튬 106	1년	사마륨 151	96년
스트론튬 90	29년	플루토늄 239	2,400년

* 자료 출처 : 위키백과

3. 핵폐기물 처리 기술

현재 원자력 에너지원이 직면해 있는 가장 큰 장애 2가지는 안전성과 핵폐기물 처리다. 첫 번째, 안전성 문제는 국민의 건강과 안의 등 특히, 원자력 발전 연료로 쓰인 뒤 수명을 다한 핵연료봉은 방사능 위험이 높아 고준위 폐기물로 분류되어 저장시설에 격리 보관한다. 핵폐기물 처리 기술은 핵종 변환에 의한 핵변환, 재처리, 방폐장 시설에 의한 영구 저장 등의 다양한 방법이 있다[표 4].

우리나라는 핵폐기물 처리를 위해 사용 후 핵연료의 저장과 재사용에 대한 각종 연구를 수행 중이다. 다양한 처리 기술 중, 고준위 방사성 폐기물을 심층지하에 저장하는 방법에 관한 연구와 사용 후 핵연료를 중성자, 레이저 등을 쏘아 핵종을 분리하는 증식로와 핵폐연료 소각 전용 가속기구동 미임계로 등 장수명 방사성 핵종을 단수명 핵종으로 변환시키는 핵변환 원자로에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

본 논문에서는 핵폐기물 처리 기술 중 원자력 발전에 사용 후 폐기되는 핵연료봉과 같은 고준위 폐기물에 대한 저감 및 처리를 위한 해결 방안의 하나인 중성자를 활용한 핵연료 처리 기술에 대한 국내·외 연구 및 기술 동향을 분석하였다. 특히, 기존의 핵분열 중성자원이거나 가속기 기반의 중성자 발생 장치 등의 개발 논문 및 특허 데이터 기반으로 3P 분석을 수행하였다.

<표 4> 핵폐기물 처리 기술 분류

처리 기술	설명
핵변환	(정의) 고준위 폐기물에 중성자, 레이저 등을 쏘아 다른 원소로 변환하는 기술 (사례) 고속로, 핵폐기물 처리 전용 가속기 구동 미임계로 등
재처리	(정의) 원전에 사용한 핵연료를 원자력 발전 연료로 재사용하는 기술 (사례) 파이로 프로세싱(건식 처리 공법) ¹⁾ , 퓨렉스(습식 처리 공법) ²⁾ 등
저장	(정의) 방사능 차폐를 위한 지리적 조건(지하, 지표면, 공학적)에 따른 저장 (사례) 미국 유카 산 방사성 폐기물 처리장, 경주 방사능 폐기물 처리장

III. 연구방법 및 구성

1. 데이터 수집

핵폐기물 처리를 위한 중성자 발생 장치 개발에 대한 연구는 기존의 원천기술을 기반으로 가속기나 중성자원, 원자료를 활용한 사용 후 핵연료 처리에 대한 다양하고 활발한 연구를 진행하고 있는 원전 선진국(미국, 러시아, EU, 일본, 중국 등)에서 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 중성자 발생 장치 개발 연구에 보고된 논문, 특히, 시장 분석을 위해 다양한 전문 분석 틀을 활용하여 본 연구에 대한 Raw-data 수집 작업을 수행하였고 이에 대한 내용은 [표 5]에서 보여준다.

<표 5> 3P 데이터 수집

구분	검색 키워드	검색 건수
논문	Nuclear Fusion, Neutron, Neutron source, Generator, Accelerator, RF, Radio Frequency, Electrostatic	2,497
특허		1,598
시장		153

2. 데이터 분석

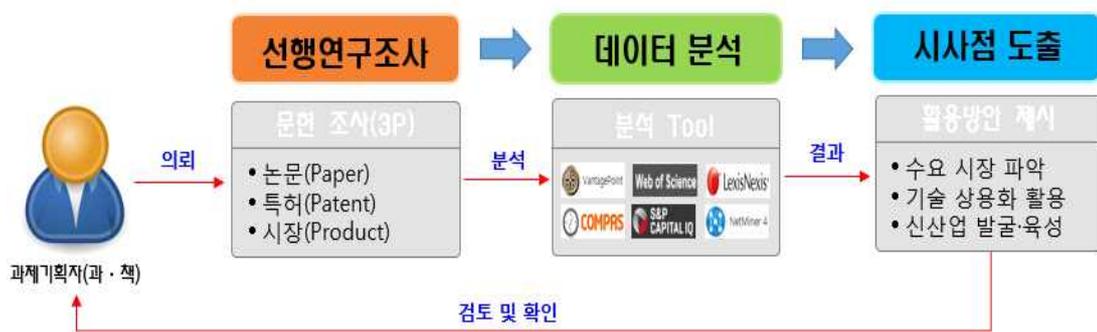
데이터 분석은 우선, 과제 기획자(과·책)와의 인터뷰를 통해 수집 된 Raw-data를 확보하여 다양한 데이터 전문 분석 Tool를 실행하여 얻은 분석 결과(선행기술 및 동향, 수요 시장 파악, 미래 유망 기술 등)를 토대로 시사점 도출하여 과제 기획자와의 검토 및 확인 후 재분석 여부를 판단하는 프로세스로 구성된다. [그림 4]는 3P 분석을 위한 프로세스를 보여주

- 1) 사용후 핵연료를 500°C이상 고온에서 용융염 상태로 만든 후 전기분해를 이용해 우라늄 등 핵물질을 분리하여 다시 핵연료로 이용하는 기술
- 2) 습식 재처리 기술로 플루토늄만 추출이 가능하여 핵무기로 활용될 여지가 있어 논란이 된 기술

고 있으며 [표 6]은 분석 Tool의 기능을 설명한다.

<표 6> 3P 데이터 분석 Tool

구분	분석 Tool	기능 설명
논문	Vantage Point	논문 정보에 대한 Data Mining 기법을 통한 다양한 연구 동향 및 추세 분석에 활용
특허	LexisNexis PatentStrategies	특허(32개국, 약 9,000만건) 검색을 통한 선행 기술 및 동향 분석에 활용
시장	S&P Capital IQ Platform	상장 및 비상장 회사에 대한, 시장정보 및 주요 재무정보 등의 시장 동향 분석에 활용



(그림 4) 3P 분석 프로세스

IV. 연구 결과

1. 논문(Paper)

'72~'16년 기간 동안에 발표된 논문은 총 2,497건으로 파악되며 세계적으로 67개 국가에서 관련 연구가 수행되는 것으로 나타났으며 그중 미국이 789편(31.6%) 가장 많은 논문을 발표한 것으로 분석되었고 그 다음으로 일본, 독일 순으로 많았다. 한국은 43편으로 전체 14위를 차지하는 것으로 나타났다[표 7].

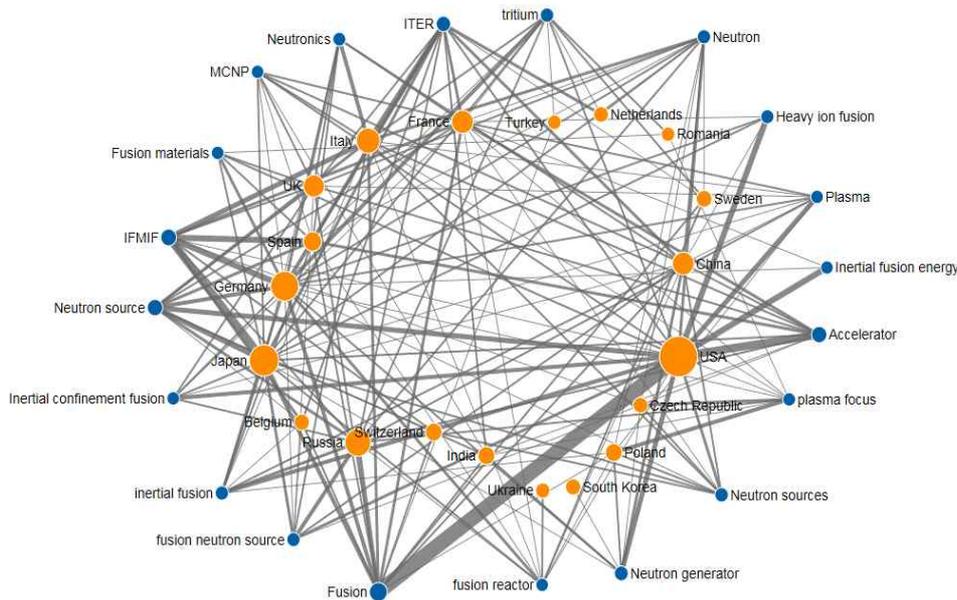
[그림 5]는 국가 간 핵폐기물 처리를 위한 중성자 발생 장치 연구에 대한 공동 연구가 활발히 진행되는 것을 보여준다. 특히, 일본과 EU를 중심으로 핵융합 고속로(고에너지 고속 중성자)와 미입계로를 활용한 연구가 국가 정책으로 채택되어 진행되고 있다. 이와 관련한 사례로 EU와 일본은 공동연구 참여로 개발하고 있는 국제 핵융합재료조사시설(IFMIF)³⁾를 준비하고 있다.

3) EU와 일본이 공동 개발하는 중성자 조사시설로 기존 고속로 대비 10배 이상의 중성자 조사가 예상되는 세계 최고 수준의 중성자 조사시설(2025년까지 건설완료 목표)

<표 7> 국가별 논문 누적 건수

기준년도 : 1972~2016

No.	국 가 명	건수(비중)	No.	국 가 명	건수(비중)
1	미 국	789(31.6%)	6	프 랑 스	159(6.4%)
2	일 본	397(15.9%)	7	중 국	157(6.3%)
3	독 일	339(13.6%)	8	영 국	137(5.5%)
4	러 시 아	268(10.7%)	9	스 페 인	86(3.4%)
5	이탈리아	208(8.3%)	10	인 도	66(2.6%)



(그림 5) 국가-키워드 간 네트워크 분석

2. 특허(Patent)

특허 분석에는 LexisNexis PatentStrategies(전 세계 특허 9,000만건 보유) DB를 사용하였으며 검색연도는 특허 출원 및 등록 연도(1997~2016년)로 제한하였고 검색된 총 특허수는 1,598건이 수집되었다. 중성자원을 기반한 장치(accelerator, generator 등)의 특허는 일본이 가장 많은 특허를 출원 및 등록하였으며 다음으로 미국, 독일, UK 순이며, 특허 2009년을 기점으로 중국 출원 건수가 일본 출원 건수를 앞지르는 결과를 가져오는 등 중국이 약진하는 추세를 보였다. 예컨대, 중국 서남물리연구소의 특허 Strength가 최근 들어 높은 것으로 분석되었다.

예컨대, 관련 특허 회사 매출을 분석한 결과 일본의 Hitachi Ltd(약 900억 달러, 한화 약 99조원)가 가장 많고 다음으로 일본의 Toshiba Co.(약 650억 달러, 한화 약 71조) 순으로 매출 경향을 보였으며 관련 시장 분석에서도 에 대한 특허 Strength 관련해서도 일본의 Hitachi Ltd와 Toshiba Co.가 기업 규모 및 지식재산권이 강한 것으로 분석되었다[그림 6].

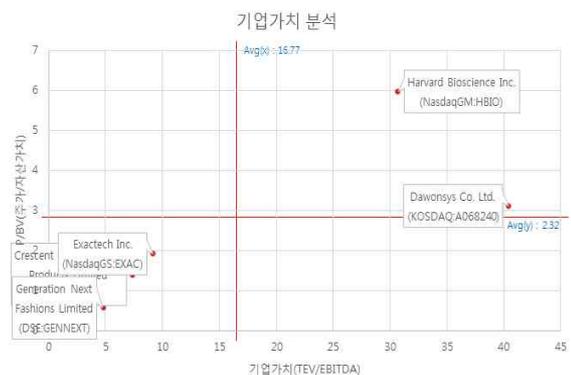


(그림 6) 특허 분석(국가별 특허 출원·등록 및 Strength와 시장성 분석)

3. 시장(Product)

시장 분석에는 Standard&Poors(Capital IQ) DB를 사용하였으며 국가별·산업별 분포현황, 매출액 규모, 영업이익 규모 및 기업가치 등을 분석한 결과, 국가별은 북미, 유럽, 아시아/태평양 순, 산업별은 산업, 의료, 재료 분야가 다수를 차지하였다. 또한 관련 기술 분야 해외시장의 규모를 분석한 결과 총 매출(24,059.7M\$), 기업 평균(429.6M\$), 전체 영업이익(2,863.7M\$), 평균 영업이익(130.2M\$) 규모로 분석되며 특허, 우리나라의 다원시스(기업가치⁴)(TEV/EBITDA=40.4) 및 주가/자산가치⁵(P/BV=3.1) 분석결과를 보여 시장에서 투자 가치가 높은 것으로 분석되었다[그림 7].

회사명	TEV/EBITDA	P/BV
Crescent Steel & Allied Products Limited (KASE:CSAP)	7.4	1.39
Dawonsys Co. Ltd. (KOSDAQ:A068240)	40.4	3.10
Exactech Inc. (NasdaqGS:EXAC)	9.2	1.91
Generation Next Fashions Limited (DSE:GENNEXT)	4.8	0.56
Harvard Bioscience Inc. (NasdaqGM:HBIO)	30.7	5.97
...



(그림 7) 시장 분석(산업체 기업가치 분석)

- 4) 기업의 가치가 영업활동을 통한 이익의 몇 배인가를 나타내는 지표[기업가치(TEV)/이자·세금·감가상각비 공제 전 이익(EBITDA)]
- 5) P/BV(Price/Book Value per share) 값이 클수록 시장에서 해당 기업의 주가 가치 평가가 높음을 의미

V. 결론

우리 인류는 에너지 부족과 환경오염으로 인한 기후변화 등의 공통적 위기를 해결하기 위해서는 안전하고 깨끗한 에너지원 확보가 무엇보다 필요하다. 최근 전 세계가 합의한 파리 기후협정은 전 세계 에너지 정책에 대한 에너지 패러다임의 변화를 가져오게 했다.

본 연구는 중성자 발생 장치 개발을 통해 고준위 폐기물 처리기술 확보로 국민의 안전성 향상 및 혁신적인 핵폐기물 처리기술에 대한 선점을 위해 3P 분석을 기반으로 하는 네트워크 분석을 수행하였다. 특히, 3P 분석은 기존 선행기술에 대한 연구 동향의 현주소와 미래 유망 기술 발굴을 위한 기초자료로서 활용된다. 본 분석을 통해 중성자 발생 장치 분야는 원자력 분야 선진국을 중심으로 활발한 연구가 진행되는 것으로 파악되었으며, 특히 최근에는 미국, EU, 일본을 중심으로 상호 간 공동 협력을 통한 연구가 활발히 이루어지는 것으로 분석되었다. 또한, 특허를 통한 원천기술 보유국들이 관련 산업 시장에서도 강세를 보이며, 특히 일본의 지속적 강세와 중국의 약진이 두드러지는 결과를 보였다.

본 논문에서 제시한 3P 분석 방법은 R&D 과제 중복을 배제하고 연구의 효율성 극대화 및 실패 가능성을 최소화하는 R&D 기획 과정의 도입한다면 연구기획 향상에 도움이 될 수 있을 것이며 논문, 특허와 시장의 비교 및 네트워크 분석을 통해 기술 수요 확대가 기대되는 유망기술 발굴과 원천기술 확보로 관련 기술 선점 및 국가 경쟁력 강화에 기여할 수 있으며 나아가 신산업 창출을 통한 산업 생태계 조성 등을 위한 전략 수립에 활용될 수 있다고 생각된다.

[참고문헌]

- 김종선, 서지영(2012), “동북아 원자력 안전을 위한 과학기술 국제협력 방안 모색”, 과학기술정책 연구원.
- 박성원(2006), “사용 후 핵연료 관리 현안과 전망-연구계 견해에서”, 한국방사성폐기물학회 추계학술 발표대회
- 에너지 대안 포럼(2012), “20130 에너지 대안 시나리오”
- 양맹호, “2015 국제 원자력 동향과 시사점”, 한국원자력연구원(2015)
- 한국원자력연구원(2015), 소듐냉각고속로개발사업단 연차보고서
- IAEA(2011), IAEA Action Plan on Nuclear Safety.
- IEA(2011), Energy Prices&Taxes(Quarterly Statistics).
- F. Venneri, The Los Alamos Accelerator Driven Transmutation of Nuclear Waste (ATW), PP154-178, IAEA-TECDOC-985 (1997).
- National Research Council, Nuclear Waste; Technologies for Separations and Transmutation (National Academy Press, 1996).