

국내 발전기술별 사회적 지속가능성 비교

A comparison of social sustainability by domestic power generation types

문기환(Kee-hwan Moon)*, 김승수(Seung-su Kim)***,
이영준(Young-joon Lee)***,

논문 요약

지속가능발전은 인류가 추구해야할 공통의 목적이며 가치로서 사회적 지속가능성, 경제적 지속가능성, 환경적 지속가능성의 개념이 내포되어 있다. 본 연구에서는 우리나라의 전력공급 부문에서 특히 사회적 지속가능성의 가치를 구현하기 위해서는 에너지 사용에 대한 형평성과 에너지를 생산하는 발전기술에 대한 사회적 수용성, 그리고 지속적으로 고용을 창출할 수 있는 발전기술들로 발전원을 구성되는 것이 필요하다고 보았다. 이를 위해 본 연구는 사회적 지속가능성을 ‘에너지복지’, ‘기술의 수용성’, ‘고용 창출’ 등 3가지 핵심 속성으로 나누고 속성 당 2개의 세부 속성 지표를 구성하여 총 6개의 속성지표 측면에서 발전기술별로 비교·분석하였다.

분석 결과, 사회적 지속가능성 종합점수는 원자력 > 풍력 > LNG > 석탄 > 태양광 순으로 나타나 원자력이 사회지속성 측면에서 가장 우수한 발전기술인 반면에 태양광은 가장 열위에 있는 것으로 평가되었다. 또한 속성별로 살펴보면, ‘에너지사용의 복지성’은 원자력과 석탄화력이, ‘에너지사용의 접근성’은 LNG와 석탄이, ‘기술의 안전성’은 원자력과 풍력이, ‘기술의 신뢰성’은 발전기술간 큰 차이가 없으며, ‘고용 규모’는 태양광과 원자력이, ‘고용의 질’은 풍력과 원자력이 우수한 것으로 나타나 원자력이 대부분의 속성에서 우위에 있거나 경쟁력이 있는 것으로 나타났다.

Keyword : 사회적지속가능성, 에너지복지, 기술의 수용성, 고용창출, 발전기술

* 한국원자력연구원 책임연구원, mkh@kaeri.re.kr, 042-868-2141

** 한국원자력연구원 책임연구원, sskim5@kaeri.re.kr, 042-868-2721

*** 한국원자력연구원 선임연구원, joon96@kaeri.re.kr, 042-868-8327

I. 서론

우리나라는 국토가 협소하고 자원이 빈약한 반면에 활발한 경제활동으로 인해 세계 13위권의 경제 대국으로 발돋움 하였다. 하지만 이와 같은 결실을 얻는 과정에서 많은 부작용도 따랐던 것이 현실이다. 에너지의 수입의존도는 '90년대 이후 꾸준히 95% 이상의 수준에 이르고 있어, 안정적이며 신뢰성 있는 에너지공급이 담보되어야 지속적인 경제성장을 이룰 수 있는 구조로 고착화 되었다. 또한 에너지 소비의 지속적인 증가로 인해 2014년에 568백만톤의 CO₂가 배출되어 세계 7위의 배출국이 되었다. 뿐만 아니라 경제활동 인구의 도시화에 맞물려 서울시의 초미세먼지 농도는 주요 선진국 대도시에 비해 매우 높고¹⁾, 환경오염물질 등으로 인한 국민의 건강피해 위험 또한 증가하고 있다.²⁾ 국민소득의 증가로 인한 개발에 대한 인식의 변화와 환경문제에 대한 인식이 중요하게 부각되어, 에너지 공급 및 처리와 관련된 설비의 입지를 둘러싼 갈등은 또 다른 사회의 갈등 요소가 되고 있다.

이와 같은 현실은 우리나라가 지속가능한 발전의 개념³⁾을 적극적으로 반영하여 현실의 문제와 세대의 문제를 합리적으로 풀어가야 함을 시사해 준다. 이는 경제적 지속가능성, 환경적 지속가능성, 그리고 사회적 지속가능성이 통합적이며 균형적이고 상호보완적으로 추진될 필요가 있음을 의미한다. 그리하여 본 연구에서는 지속가능성의 중요한 한 축인 사회적 지속가능성 측면에서 발전기술별로 평가해 봄으로써 향후의 전원구성에의 시사점을 도출해 보고자 하였다.

II. 분석 구조

1. 사회적 지속가능성의 핵심 속성

본 연구에서는 사회적 지속가능성을 '에너지 복지', '기술 수용성', '고용 창출' 등 세 가지 핵심 속성으로 구성되는 것으로 하였으며, 이는 최종수요자, 특히 에너지빈곤층인 에너지복지 대상층의 수요자들이 전기 사용의 기본권 확보와 전기 사용에

1) 서울시 초미세농도(25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 뉴욕(14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 런던(16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 파리(15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)임

2) 폭염 및 이상고온 질병 부담은 530억원('10) → 1,039억원('20) → 14,377억원('50)으로 전망하고 있음(자료: 관계부처합동, 제3차 지속가능발전계획(2016~2035), 2016. 1)

3) 지속가능발전은 지속가능성에 기초하여 경제의 성장, 사회의 안정과 통합 및 환경의 보전이 균형을 이루는 발전을 의미한다. "지속가능성"이란 현재 세대의 필요를 충족시키기 위하여 미래 세대가 사용할 경제·사회·환경 등의 자원을 낭비하거나 여건을 저하시키지 아니하고 서로 조화와 균형을 이루는 것을 말한다.

대한 접근성이 용이해야하기 때문이다. 또한 연료의 소 주기 과정에서 사고에 의한 인체 피해를 최소화시킬 수 있고, 전기를 안정적으로 생산·공급할 수 있을 뿐만 아니라 미래세대를 위한 양질의 고용창출이 지속적으로 이루어질 수 있을 때 사회적 지속가능성이 담보될 수 있기 때문이다.

2. 속성별/공급단계별 속성 지표 및 평가 방안

<표 1>은 속성별/공급단계별로 발전기술별 사회적 지속가능성 정도를 평가하기 위한 세부 속성지표와 평가방안을 나타낸다. 세 가지 속성 중 ‘에너지 복지’를 평가하기 위한 핵심 지표로는 ‘에너지 사용의 복지성’과 ‘에너지 사용의 접근성’을 설정하였고, ‘기술 수용성’을 위해서는 ‘기술의 안전성’과 ‘기술의 신뢰성’을, ‘고용 창출’을 위해서는 ‘고용 규모’와 ‘고용 품질’을 설정하였다.

<표 1> 사회적 지속가능성의 속성별/공급단계별 속성 지표 및 평가 방안

속 성	속성 지표	1차에너지 확보 단계			비축 단계	전기 생산 및 이용 단계		
		연료 생산	연료 수송	연료 저장		전기생산	송전/배전	최종수요자
에너지 복지	에너지 사용의 복지성	x	x	x	x		x	전기요금에 대한 개인부담 정도로 평가
	에너지 사용의 접근성	x	x	x	x		송전망 또는 계통 편입에 따른 부담도로 평가	x
기술의 수용성	기술의 안전성	x	x	x	발전기술의 안전성 즉, 사고 피해의 정도를 소 주기 관점에서 평가	x		x
	기술의 신뢰성	x	x	x	운전 중인 발전소들이 안정적으로 전기를 생산 공급할 수 있는 기술인지의 여부로 평가	x		x
고용 창출	고용 규모	x	x	x	발전기술의 건설 및 운영에 따른 고용 창출 규모로 평가	x		x
	고용 품질	x	x	x	발전기술의 건설 및 운영에 따른 고용 품질도로 평가	x		x

주) 표 안의 ‘x’ 표시는 자료의 제약 상 고려치 못한 부분임(단, 기술의 안전성은 일부 고려됨)

III. 분석 방법 및 결과

1. 에너지 복지

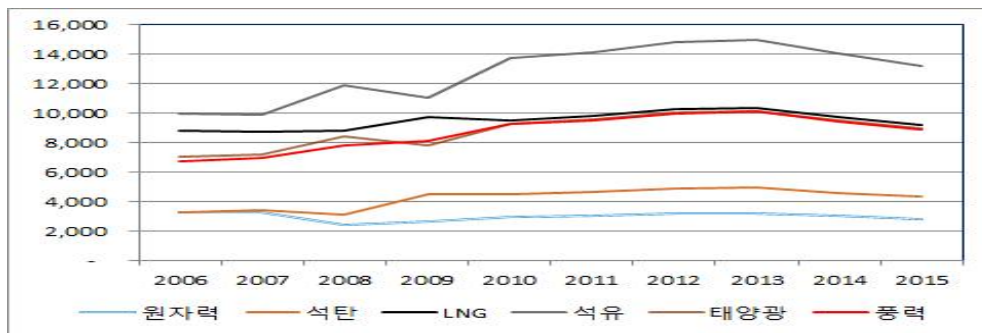
1) 에너지사용의 복지성

(1) 지표 평가방안

에너지 사용의 복지성은 형평성의 가치를 이룰 수 있는 기술인지로 정의하였으며, 이를 평가하기 위해 발전기술별(원자력, 석탄화력, LNG화력, 석유화력, 태양광, 풍력)로 개인의 가처분소득 중에서 전기에너지를 사용하기 위해 지출하는 비용의 정도를 그 척도로 하였다.

(2) 평가 결과

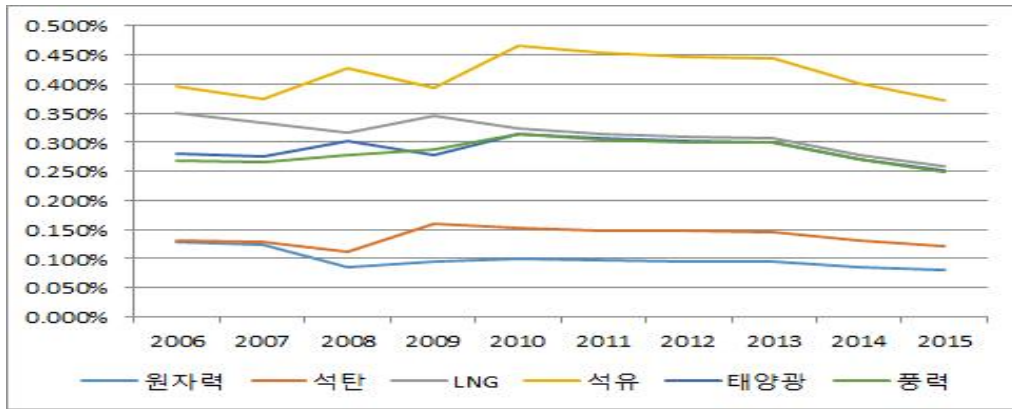
- (산정가정) 전기를 생산하는 발전 방식별 에너지복지의 기여를 살펴보기 위해 각 발전방식에서 생산하는 전기를 독립적인 상품으로 가정하였고, 최종소비자들이 선호하는 전기를 선택하여 사용한다고 가정하였다.
- (산정결과1) 하위 3분위(1~3분위) 소득자까지가 에너지복지의 대상인 에너지빈곤층⁴⁾이라고 가정할 때, 하위 3분위의 소득 중 평균 전기료의 지출은 상위 3분위(8~10분위)에 비해 1.7배로 그리 크지 않은데 이는 연료비가 소득에 관계없이 필수재임을 의미함과 동시에 하위 3분위에게는 큰 부담임을 알 수 있다.
- (산정결과2) 전기사용 지출 월 부담액을 살펴보면, 석유(12,775원) > LNG(9,502원) > 태양광(8,765원) > 풍력(8,682원) > 석탄(4,233원) > 원자력(2,984원) 순으로 나타나 원자력이 가장 부담액이 적음을 알 수 있다. (<그림 1>)



<그림 1> 발전기술별 전기요금 월 부담액

- (산정결과3) 가처분소득 중에서 발전기술별 전기요금 월 부담액 비율을 살펴보면, 석유(0.42%) > LNG(0.31%) > 태양광(0.29%) > 풍력(0.28%) > 석탄(0.14%) > 원자력(0.1%)로 나타났는데, 이를 통해 원자력이 에너지복지에 가장 적합한 발전원임을 알 수 있다.(<그림 2>)

4) 에너지빈곤층에 대한 공식적인 정의는 마련되어 있지 않으나 '09년 정부에서 발표한 「녹색성장 5개년 계획」에서는 “소득 중 10% 이상을 광열비(연료비)로 지출하는 가구”로 소개하고 있고, 이 개념이 통용되고 있는 실정임. 최근 소득분위별 에너지빈곤층 가구비율을 추정한 에너지경제연구원의 연구결과에 의하면 소득 3분위까지가 소득 중 연료비 비율이 10%가 되는 것으로 조사되었음



<그림 2> 발전기술별 가처분소득 중 전력요금 월 부담액 비율

- (평가 결과 종합) 전기를 생산하는 각 발전방식별 에너지복지의 기여 정도를 살펴보면, 원자력이 화석연료는 물론 신재생보다도 더 큰 것으로 분석되었다.

2) 에너지사용의 접근성

(1) 지표 평가방안

에너지 사용의 접근성은 최종 수요자 특히 에너지복지 대상층에서 전력계통에 연계된 전기를 사용하려 할 때 비용과 기술적인 측면에서 용이한 기술인가로 정의하였고, 이를 평가하기 위해 전력계통에의 연계비용을 그 척도로 하였다.

(2) 평가 결과

- (평가가정) 전기를 생산하는 발전방식별 에너지 사용의 접근성을 살펴보기 위해, 각 발전방식별로 계통에 연계되는 비용에 대한 국내 자료와 이를 보완하기 위해 외국의 연구자료를 참고하여 판단하는 것으로 하였다.
- (평가결과_국내연구) 에너지경제연구원의 연구⁵⁾에 의하면, 송전비용은 발전원별로 원자력(4.25원/kWh) > 석탄(3.78원/kWh) > LNG&석유(2.95원/kWh)으로 평가하였다. 이는 원자력과 같이 원거리에 위치할 경우 수요지역으로 생산된 전기를 운반할 대규모 송전설비 필요하지만, LNG와 유류 발전은 상대적으로 수요지 인근에 위치해 있어 지원금이 덜 들어가기 때문이다.
- (평가결과_외국연구) OECD/NEA의 시스템비용연구(2012)
 - 아래의 <표 2>에서는 각각의 발전원이 전력계통에서 차지하는 발전비중에 따라 시스템비용이 차별화되는 효과를 나타냄. 정부에서 2030년에 발전량의 20%를 신재생으로 공급할 계획이기 때문에 이와 같은 상황을 가정으로 계통 연계비용을 개략적으로 추정하면, MWh 당 원자력 1.57\$, 석탄 0.46\$, 천연가스 0.34\$, 육상풍력 23.74\$, 해상풍력 40.09\$, 태양광 34.77\$ 등으로 추정됨

5) 에너지경제연구원, 원자력발전의 경제적 사회적 비용을 고려한 적정 전원믹스 연구, 2015

<표 2> 국내 발전원별 전력계통 비용

(단위 : \$/MWh)

발전기술	원자력		석탄		가스		육상풍력		해상풍력		태양광	
	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
백업비용	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	2.36	4.04	2.36	4.04	9.21	9.40
균형비용	0.88	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	7.63	14.15	7.63	14.15	7.63	14.15
계통편입비용	0.87	0.87	0.44	0.44	0.34	0.34	6.84	6.84	23.85	23.85	9.24	9.24
계통확장비용	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.81	2.81	2.15	2.15	5.33	5.33
총계통비용	1.74	1.40	0.46	0.46	0.34	0.34	19.64	27.84	35.99	44.19	31.42	38.12

※ 시스템비용 중 백업/백런싱 비용은 국내 관련 자료가 충분치 않아 우리나라의 전력계통구조가 유사한 영국의 경험을 바탕으로 하여 1차적으로 추정된 결과임

※ 백업비용(backup cost) : 변동성발전원인 신재생발전과 급전가능 발전원(원자력, 석탄화력, LNG발전 등)은 동등한 양의 전력을 공급한다 할지라도 전력계통의 공급신뢰도 측면에서의 기여도는 차별화 됨. 즉, 신재생발전원은 피크수요 시에 자연환경조건의 제약(바람, 일조량 등)으로 인해 전력공급이 불가능한 상황이 발생할 수 있기 때문에 급전가능 발전원과 동일한 공급 신뢰수준을 나타낼 수 없음. 따라서 전력계통의 안정적 신뢰도 유지 측면에서는 신재생 발전원 증가로 인해 추가적인 백업전원이 필요하게 되어 발생하는 비용

※ 균형비용(balancing cost) : 1일 선행 발전계획과 실제 발전량과의 예측 오차로 인해 불안정해지는 전력계통의 주파수 안정 등을 위해 출력조정(ramping and cycling)용 백업 발전소들이 즉시 투입 가능하도록 순동예비력을 유지하기 위해 발생하는 비용

※ 전력망 관련 비용(grid-related cost) : 해상풍력과 같이 기존 전력망과 떨어진 곳에 발전소를 건설할 경우, 기존 전력망과의 연결 및 전압과 부하전송 용량(load-carrying capacity)의 격상 등의 필요로 인해 발생하는 비용

- (평가 결과 종합) 국내 연구결과에서는 원자력이 석탄과 LNG에 비해서는 계통 연계비용이 비싸지만, NEA의 연구 결과에서도 알 수 있듯이 원자력에 비해 풍력과 태양광의 계통연계비용이 각각 25배, 22배 정도 더 들어가기 때문에 최종 수요자 측에서는 LNG>석탄>원자력>풍력(육상과 해상 풍력의 평균)>태양광 순으로 전력계통에의 연결을 위한 접근성이 좋은 것으로 나타났다.

2. 기술의 수용성

1) 기술의 안전성

(1) 지표 평가방안

기술의 안전성은 연료의 쏠 과정에서 사고로 인한 인체피해의 정도를 기술의 안정성으로 정의하였는데, 안전성이 높을수록 즉 사고로 인한 인체피해가 적을수록 기술의 사회적 수용성은 높아진다고 가정할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 기존 연구들의 결과들을 이용하여 기술의 안전성을 평가하였다.

(2) 평가 결과

기술의 안전성 관련 대표적인 연구결과를 활용하여 사고에 의한 인체 피해규모를 <표 3>과 같이 원자력 대비 상대적인 값으로 도출하였다. 자료마다 사망자의 범위 및 사망률 계산 기준이 상이함에도 불구하고 쏠 주기 과정에서 원자력이 타 발전원에 비해 사고에 의한 인체피해가 작은 안전한 기술로 평가할 수 있다.

<표 3> 발전기술별 사고에 의한 인체피해 비교(원자력을 '1'로 했을 때 상대비율)

자료	원자력	석탄	LNG	석유	태양광	풍력
포브스	1.0	1111.1	44.4	400.0	4.9	1.7
Hirshberg 논문	1.0	11.8	5.4	-	3.8	1.2
Burgerr 논문	1.0	16.5	9.9	13.2	0.0	0.7
NEA	1.0	3.3	1.8	2.8	-	-

- (평가결과 1_미국 경제전문지 포브스 자료(2012년)) 세계보건기구 자료 및 유럽연합위원회의 ExternE 프로젝트 결과를 활용하여, 발전원별 화학·방사성 오염물질 배출에 따른 사망자 수를 발전량으로 나누어 계산한 것이며, 원자력의 경우 체르노빌 및 후쿠시마 사고가 포함되어 계산된 값이며, 원자력이 사고로 인한 인체피해가 가장 적은 것으로 평가하였음

(단위: deaths/trillion kWh)

석탄	석유	LNG	수력	원자력	태양광	풍력
10만	3.6만	4,000	1,400	90	440	150

- (평가결과 2_Stefan Hirschberg 외 6인 논문(2016년)) 발전기술별로 1GWh 전기를 생산하는 과정에서 예상되는 수명 단축 기간은 원자력이 가장 작은 것으로 평가되었음

(단위: YOLL/GWh)

석탄	석유	LNG	수력	원자력	태양광	해상풍력
59	-	27	1	5	19	6

주) YOLL(Year Of Life Lost)은 수명단축기간을 의미함

- (평가결과 3_Peter Burgerr 외 1인 논문(2014년)) PSI의 Energy-related Severe Accident Database(ENSAD) 내 1970~2008년 동안 사망자 수가 5명

이상인 총 3,367건의 에너지관련 사고 실적 데이터와 과학적인 추정방법, 전문가 판단 등을 기반으로 분석하였으며, 원자력의 GEN III 노형에 이어 태양광이 사고에 의한 사망률이 낮은 것으로 평가됨

에너지원		사망률 [Fatalities/GWyr]		
		OECD	비OECD	
석탄		0.12	중국제외	0.575
			중국 ¹⁾	4.45
석유		0.0955	0.951	
천연가스		0.0719	0.116	
수력		0.0027	7.03	
원자력	Gen. II ²⁾	0.00726		
	Gen. III ³⁾	0.0000107		
	Chernobyl ⁴⁾	0.0302		
신재생	태양광		0.000245	
	풍력	육상 ⁵⁾	0.00178	
		해상 ⁶⁾	0.0085	

(출처: PSI Energy-related Severe Accident Database(ENSAD), 1) 중국; 1994-2008년 데이터, 2) 가압경수로(PWR); 스위스, 3) 유럽 가압형 원자로 (EPR); 스위스, 4) 흑연감속 비등경수 압력관형 원자로(RBMK), 5) 독일 데이터, 6) 영국 데이터)

- (평가결과 4_OECD/NEA 보고서(2010년)) 스위스 Paul Scherrer Institute(PSI) 에서 1969~2000년 동안 사망자 수가 5명 이상인 총 1,870건의 에너지 관련 실제 사고 데이터를 바탕으로 사망률을 다음과 같이 산출하였으며, 수력에 이어 원자력이 사고에 의한 사망률이 낮은 것으로 평가됨

에너지원	OECD			비OECD		
	사고	사망자	사망률 [사망자/G Wyr]	사고	사망자	사망률 [사망자/G Wyr]
석탄	75	2,259	0.157	1,044	18,017	0.597
석유	165	3,713	0.132	232	16,505	0.897
천연가스	90	1,043	0.085	45	1,000	0.111
LPG	59	1,905	1.957	46	2,016	14.896
수력	1	14	0.003	10	29,924	10.285
원자력	0	0	-	1	31	0.048
총합	390	8,934		1,480	72,324	

- (평가 결과 종합) 자료마다 발전원별 사망자의 범위 및 사망률 계산 기준이 상이함에도 불구하고 쉰 주기 과정에서 원자력이 타 발전원에 비해 사고에 의한 인체피해가 작은 안전한 기술로 평가할 수 있다. 하지만, 최근 국민 인식 조사 결과⁶⁾에 의하면 원자력은 신재생과 화력발전원에 비해 가장 안전하지 못한 발

전기술로 인식하고 있는데, 이는 원전 사고는 사고에 의한 즉시사망자 수가 작을지라도, 사고가 났을 경우와 지연 사망자 수가 클 수 있다는 우려 때문으로 판단된다.

2) 기술의 신뢰성

(1) 지표 평가방안

발전기술의 인체피해 정도가 기술의 수용성 측면에서 중요한 한 축이라면, 운전 중인 발전소들이 안정적으로 전기를 생산·공급할 수 있는 기술인지의 여부 즉 기술의 신뢰성도 기술 수용성의 또 다른 한 축이라고 할 수 있다. 이를 평가 위해 본 연구에서는 발전원별 신뢰도를 그 척도로 하였다.

(2) 평가 결과

- (평가가정) 발전설비의 정지종류는 아래의 <표 4>처럼 계획 정지, 비계획 정지, 운영예비 초과 정지로 나눌 수 있다. 이 중에서 계획정지와 운영예비초과 정지의 경우는 기술의 신뢰성과 관련된 정지가 아니기 때문에 비계획정지만을 신뢰성의 판단지표로 설정하였다.

<표 4> 발전설비의 정지 종류

종 류		정 의
계 획 정지	계 획 예 방 정 비 정지	- 연간 발전기 정지계획에 포함된 발전기의 정지
	계 획 중 간 정 비 정지	- 연간 정지계획에 포함되지 않고, 월간 또는 주간 정지계획에 포함된 발전기의 정지
비 계 획 정지	불시 정지	- 전력거래소에 사전 통보 및 입찰변경 없이 운전 중인 발전기의 정지
	비계 획 정 비 정지	- 계획 정지에 포함되지 않았으나, 정지 발생 이전에 전력거래소에 정지사실을 통보하고 입찰변경을 완료한 정지
	파급 정지	- 발전소 귀책사유가 아닌 외부요인에 의한 발전기의 정지
	기동 실패	- 정격출력 50% 미만에서 발생한 정지
운영예비초과 정지		- 운영예비 초과에 따른 발전대기 상태의 정지

- (평가결과_원자력·화력) 비계획 정지를 발전기의 신뢰도⁷⁾라 말할 수 있으며,

6) 성균관대 SSK 위험커뮤니케이션연구단에서 ‘발전 및 에너지원에 대한 국민인식 조사결과’를 발표하였으며, 태양열·풍력·수력 발전은 안심, 화력발전은 보통, 원자력발전은 불안한 에너지원으로 인식하고 있는 것으로 조사됨(2017. 6.14)

$$7) \text{신뢰도} = \left\{ \frac{\sum \text{호기별} \frac{\text{역일시간} - \text{비계획정지시간}}{\text{역일시간}} \times \text{정격용량}}{\sum \text{전 발전기 정격용량}} \right\} \times 100\%$$

- 역일시간 : 1년 8760시간, 1개월(28일 : 672시간 :, 30일 :720시간, 31일 : 744시간)

<표 5>의 3년 평균 실적자료를 근거로 한 신뢰도는 석탄(99.67%) > 석유(99.47%) > LNG(99.10%) > 원자력(98.79%) 순으로 나타났다. 하지만 국내 발전기의 종합 신뢰도가 99.23% 정도로 상당히 우수하고 발전기별 큰 차이가 없이 안정적으로 전기를 생산·공급하고 있음을 알 수 있다.

<표 5> 국내 발전원별 신뢰도 실적

(단위: %)

	원자력	석탄	LNG	석유	50만KW		평균
					이상	미만	
2013	99.34	99.54	98.90	99.14	99.48	99.07	99.28
2014	98.15	99.73	99.29	99.77	99.02	99.37	99.19
2015	98.88	99.74	99.11	99.50	99.37	99.05	99.21
평균	98.79	99.67	99.10	99.47	99.29	99.16	99.23

자료) 전력거래소, 2015년도 전력설비 정지통계, 2016.3

- (평가결과_풍력)⁸⁾ 2016년 8월 현재까지 국내 풍력발전기 사고 등으로 정지된 건수는 <표 6>에서 보듯 총 60건인 것으로 조사되었는데, 특히 이 중 50건(약83.3%)은 외국산 터빈을 사용하는 풍력발전기에서 발생한 사고이다. 국내 풍력터빈은 과거 국산제품이 개발되기 이전에는 대부분 외산제품을 사용하였으나 2010년 이후로 국산 풍력터빈 설치가 증가하고 있다. 하지만 2015년말 기준, 국내 풍력발전기 누적 설치용량 834.25MW 중 국산은 347.45MW(41.6%)인데 반해 외국산 제품은 486.8MW로 전체의 58.4%에 달하고 있다.

<표 6> 국내 풍력발전기 연도별 고장 정지 건수

구분	'00	'05	'06	'07	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	합계
건수	1	1	2	2	7	12	6	6	7	4	8	4	60

- (평가결과_태양광)⁹⁾ 국내 태양광 발전시스템의 고장 현황을 살펴보면, 2008~2012년 사이에 발생한 주요 부품별 총 고장 건수는 136건으로 조사되었다. 이 중 모듈 25건(18%), 인버터 88건(65%), 접속함 2건(1%), 모니터링 21건(15%) 등으로 분석되었다.
- (평가 결과 종합) 원자력은 신뢰성 측면에서는 화석연료 발전원보다 다소 열위에 있으나 전력공급에 심각한 차질을 줄 만큼의 신뢰도 차이를 보이지는 않는 것으로 판단된다. 신재생의 경우, 발전기 당 고장정지는 낮은 수준이지만 간헐

- 비계획 정지 : 불시정지+비계획정비정지+과급정지+기동실패

8) 김정훈 의원실(부산 남구갑)에서 산업통상자원부에 요청하여 제출받은 「국내 풍력발전기 설치 및 가동 현황」 답변자료 인용(2016.11.2.)

9) 솔라투데이의 2017년 7월6일자 “태양광 발전시스템, 더 오래 높은 효율 유지하는 방법은?” 기사에서 인용함

적인 전기생산의 특성에 고장정지의 불확실성이 더해지면 기술의 신뢰성에 더 큰 영향을 끼칠 수 있다.

3. 고용 창출

1) 고용 규모

(1) 지표 평가방안

고용 규모는 고용의 양적 정도를 파악하기 위한 지표로 정의되며, 이를 평가하기 위해 국내 실적과 외국 연구 사례 결과를 참고로 종합적인 평가를 하였다.

(2) 평가 결과

- (평가결과_2015년 국내실적 기준)¹⁰⁾ 국내의 태양광, 풍력, 원자력 산업의 실적자료를 살펴보면, <표 7>에서 알 수 있는 바와 같이, MWe 당 고용 인원은 원자력이 1.6명으로 태양광과 풍력 대비 각각 68%, 58% 수준으로 나타났다. 하지만 1인당 매출액은 태양광(8.7억원)이 원자력(7.5억원)과 풍력(6.2억원)보다 크고, 업체 당 고용인원은 원자력이 146명으로 태양광과 풍력보다 2배 이상 큰 것으로 조사되었다. 이를 통해 원자력이 태양광과 풍력보다 산업적인 측면에서 국가경제에 큰 기여를 하고 있고 관련 인프라가 잘 갖추어져 있음을 알 수 있다. 특별히 원자력의 경우, 종사자의 83% 정도가 학사 출신 이상으로 고용의 질이 좋으며, 정규직이 94% 정도로 고용의 안정성도 우수한 것으로 나타났다.

<표 7> 태양광, 풍력, 원자력 발전기술별 업체 수, 고용인원 및 매출액 실적

구 분		태양광	풍력	원자력
실적 자료	업체 수(개)	127	37	242
	고용인원(명)	8,698	2,369	35,330
	매출액(억원)	75,637	14,571	266,324
단위 지표 자료	MWe 당 고용 인원(명/MWe)	2.4	2.8	1.6
	1인당 매출액(억원/명)	8.7	6.2	7.5
	업체당 고용인원(명/업체)	68	64	146
설비용량(MWe)		3,615	852	21,716

- (평가결과_2015년 외국사례 기준) 고용 규모 관련 대표적인 연구결과를 활용하

10) 자료1) 산업통상자원부, 2015년 신재생에너지 보급통계, 2016. 11
 2) 산업통상자원부, 2015년 신재생에너지 산업통계, 2016. 11
 3) 미래창조과학부, 원자력산업 실태조사(2015년), 2017. 4
 4) 한국전력공사, 한국전력통계(제86호, 2016년), 2017. 6

여 발전기술별 고용규모와 고용특성을 살펴보았다.

- (고용 규모) 발전기술별로 고용규모를 살펴보면, 태양광 대비 원자력, 풍력, 석탄, LNG는 각각 43%, 31%, 16%, 10% 수준으로 평가되었다. 이 결과는 MCI(제조·건설·설치)와 O&M(운전유지) 단계의 총합 수준에서의 규모이며, 원자력은 태양광 다음으로 고용효과가 큰 것으로 분석되었음(<표 8>)

<표 8> 발전기술별 고용 규모(태양광 기준 상대비로 환산)

구 분	석탄	LNG	원자력	태양광	풍력
연구1	-	-	-	100	74
연구2	17	6	9	100	25
연구3	24	26	55	100	34
연구4	18	5	47	100	5
연구5	5	2	27	100	4
연구6	-	-	78	100	46
평균	16	10	43	100	31

주) 연구1과 연구2의 풍력 자료는 육상풍력과 해상풍력 자료의 평균값을 적용함

- (고용 특성) 태양광과 풍력과 같은 재생에너지 발전기술은 원자력, 석탄, LNG 발전기술에 비해 MCI 단계에서 고용효과가 대부분 발생하고, O&M 단계에서는 고용유발 효과가 상대적으로 적은 것으로 나타남(<표 9>)

<표 9> 발전기술별 고용 특성(MCI와 O&M 단계 구성비로 환산)

(단위: %)

구 분	구 분	석탄	LNG	원자력	태양광	풍력
연구1	MCI 단계	-	-	-	98	99
	O&M 단계	-	-	-	2	1
연구2	MCI 단계	96	89	69	97	95
	O&M 단계	4	11	31	3	5
연구3	MCI 단계	58	8	83	67	54
	O&M 단계	42	92	17	33	46
연구4	MCI 단계	-	-	-	-	-
	O&M 단계	-	-	-	-	-
연구5	MCI 단계	96	97	97	98	90
	O&M 단계	4	3	3	2	10
연구6	MCI 단계	-	-	95	98	98
	O&M 단계	-	-	5	2	2
평균	MCI 단계	83	65	86	92	87
	O&M 단계	17	35	14	8	13

- 연구1(IRENA 보고서(2013)) : 태양광과 육상 및 해상 풍력의 고용효과는 해상풍력(18.3) > 태양광(18.2) > 육상풍력(8.8)로 나타남
- 연구2(UTS/ISF 보고서(2015)) 건설·설치·제조에서는 태양광(20.4) > 해상

풍력(6.10) > 육상풍력(4.25) > 석탄(3.46) > 원자력(1.91) > 가스(1.155) 순으로 고용효과가 큰 것으로 평가되었고, 운전유지 부문에서는 태양광(0.7) > 원자력(0.6) > 육상풍력(0.3) > 해상풍력(0.2) > 석탄과 가스(0.14) 순으로 고용효과가 큰 것으로 나타남

- 연구3(Max Wei(2010) 논문) : 총 고용효과 측면에서 살펴보면, 1 GWh를 생산하는데 필요한 평균 고용자 수는 태양광이 0.87명으로 가장 많고, 그 다음으로 풍력(0.17), 원자력(0.14), 석탄과 가스(0.1) 순으로 나타났음
 - 연구4(NEI 보고서(2014)) : 원자력은 대규모 전력공급원이면서 노동집약적이기 때문에 고용자들의 연간수입이 가장 큰 것으로 평가됨. MWe 당 고용효과는 원자력에 비해 태양광은 2배 수준, 풍력은 1/10 수준으로 평가됨
 - 연구5(IAEA 보고서(2016)) : 직접·간접·파생 고용을 모두 고려한 경우, MWe 당 고용인원은 태양광(9.57) > 원자력(2.34) > 풍력(0.93) > 석탄(0.57) > 가스(0.14)의 순으로 고용효과가 큰 것으로 나타났으며, 직접고용만을 고려할 경우에도 발전원별 고용효과의 크기는 변하지 않고 태양광과 원자력이 가장 우수한 것으로 평가됨
 - 연구6(OECD/NEA 보고서(2017)) 건설·설치·제조 부문의 고용효과는 원자력의 경우 MW 당 25인·년, 태양광 33인·년, 풍력은 15인·년 수준의 효과가 있는 것으로 추정함. 운전유지 부문은 MWe 당 원자력이 가장 효과가 커서 1.2명 수준이며, 태양광(0.6 수준), 풍력(0.3수준)으로 추정함
- (평가 결과 종합) 원자력이 태양광과 풍력보다 단위 용량 당 고용인원은 다소 낮지만 업체 당 매출액 측면에서도 우수하여 국내 산업에 깊이 뿌리를 내리고 있고 국가경제에도 큰 기여를 하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 발전기술별로 건설·설치·제조 및 운전유지 전 부문을 대상으로 한 고용규모 추정 결과, 원자력의 고용수준은 태양광의 43% 수준이지만, 나머지 발전기술인 풍력, 석탄, LNG에 비해서는 각각 1.4배, 2.7배, 4.6배 정도 고용효과가 큰 것으로 평가되었다. 고용 특성 측면에서는, 태양광과 풍력과 같은 재생에너지 발전기술은 원자력, 석탄, LNG 발전기술에 비해 제조·건설·설치 단계에서 고용효과가 대부분 발생하고 운전유지 단계에서는 고용유발 효과가 적은 것으로 나타났다.

2) 고용의 질

(1) 지표 평가방안

고용의 규모도 중요하지만 고용의 질 또한 고용측면에서는 중요한 요소이다. 고용의 질은 임금과 교육 요구량 등으로 평가할 수 있으며, 일반적으로 고소득자가 사회의 연대와 삶의 질에 기여하는 것으로 알려져 있다. 이는 피고용인의 질이 높아질수록 고용계약 기간이 길어지고, 계약기간이 길어질수록 지역과 국가경제에 기여하는 효과가 큰 것으로 알려져 있다.

(2) 평가 결과

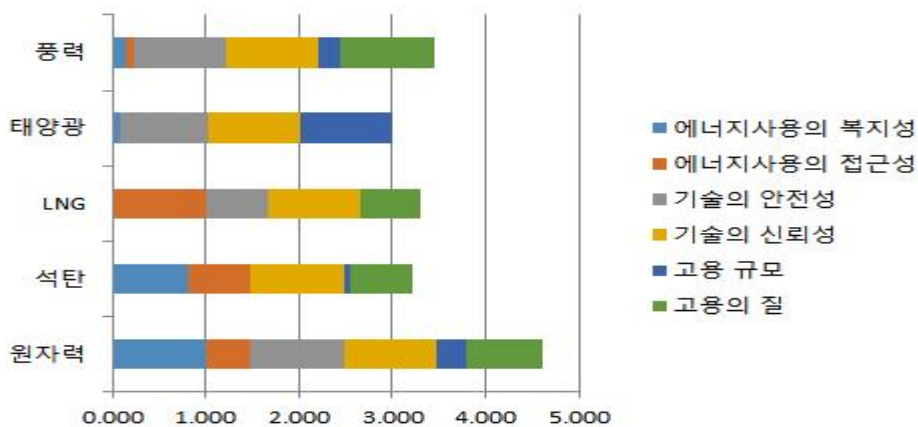
미국의 사례(NEI 보고서) : 발전원별 평균 임금(\$/시간)은 풍력(35) > 원자력(31) > 석탄&가스(28) > 태양광(15) 순으로 나타났으며, 이를 통해 원자력이 고용규모 측면뿐만 아니라 고용의 질적인 측면에서도 우수한 발전원임을 알 수 있다.<표 10>

<표 10> 발전기술별 고용효과 및 평균 임금

	고용효과(명/MW e)	평균임금(\$/시간)	직접고용자 임금(백만달러)
석 탄	0.19	28	10.99
가 스	0.05	28	2.02
원자력	0.50	31	32.49
태양광	1.06	15	0.33
풍 력	0.05	35	0.29

4. 평가결과 종합

사회적 지속가능성을 구성하는 6개의 속성지표들의 분석자료¹¹⁾들이 이질적인 자료의 특성을 가지고 있어 속성별 평가 척도를 종합하기 위해 각각의 자료를 정규화하였다. 아래의 <그림 3>은 정규화된 값을 종합한 결과이며, 사회적 지속가능성 종합점수는 원자력 > 풍력 > LNG > 석탄 > 태양광 순으로 나타나 원자력이 사회적 지속가능성 측면에서 가장 우수한 발전기술인 반면에 태양광은 가장 열위에 있는 것으로 평가되었다.

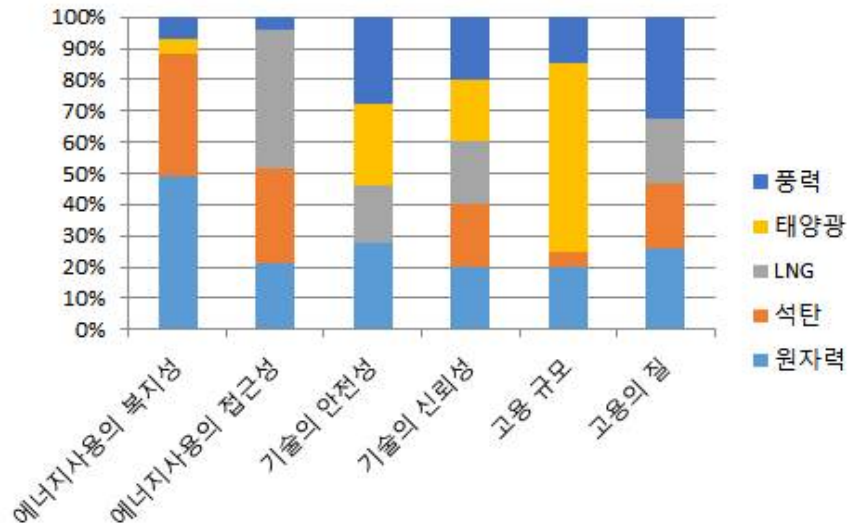


<그림 3> 발전기술별 사회지속성 종합 점수

속성지표별로 살펴보면, ‘에너지사용의 복지성’은 원자력과 석탄이, ‘에너지사용의 접근성’은 LNG와 석탄이, ‘기술의 안전성’은 원자력과 풍력이, ‘기술의 신뢰성’은 발

11) 종합 결과는 부록에 첨부하였음

전기술간 큰 차이가 없으며, ‘고용 규모’는 태양광과 원자력이, ‘고용의 질’은 풍력과 원자력이 우수한 것으로 나타났다.



〈그림 3〉 속성지표별 발전기술 기여도

IV. 결론

지속가능발전은 인류가 추구해야할 공통의 목적이며 가치로서 사회적 지속가능성, 경제적 지속가능성, 환경적 지속가능성의 개념이 내포되어 있다. 본 연구에서는 우리나라의 전력공급 부문에서 특히 사회적 지속가능성의 가치를 구현하기 위해서는 에너지 사용에 대한 형평성과 에너지를 생산하는 발전기술에 대한 사회적 수용성, 그리고 지속적으로 고용을 창출할 수 있는 발전기술들로 발전원을 구성되는 것이 필요하다고 보았다. 그리하여 본 연구에서는 사회적 지속가능성을 ‘에너지복지’, ‘기술의 수용성’, ‘고용 창출’등 3가지 핵심 속성으로 나누고 속성 당 2개의 세부 속성지표를 구성하여 총 6개의 속성지표 측면에서 발전기술별로 비교·분석하였다.

분석결과, 원자력발전기술이 사회지속성 종합측면에서 가장 우수한 발전기술로 평가되었고, 6개 속성지표에 대해 대체적으로 다른 발전기술들에 비해 우위에 있거나 경쟁력이 있는 것으로 평가되었다. 특히 에너지 복지과 기술의 안전성 측면에서는 가장 우위에 있는 것을 나타냈다.

본 연구는 전력공급 부문에 대한 사회적 지속가능성 개념을 정립하고, 종합적인 결과를 정량적으로 제시함으로써 향후의 전력수급계획 시에 활용할 수 있는 기초자료를 생산한데 그 의의가 있다.

하지만 쉘 연료주기 측면에서 자료의 한계 때문에 고려하지 못한 부문에 대한 보완이 필요하고, 발전기술별로 다양하고 성격이 다른 자료를 처리하는 방법에 대한 개선 및 지표와 지표 속성에 대한 가중치 산정 등에 대한 추가의 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 관계부처합동 (2016. 1), 「제3차 지속가능발전계획(2016~2035)」
2. 미래창조과학부 (2017. 4), 「원자력산업 실태조사(2015년)」
3. 산업통상자원부 (2016. 11), 「2015년 신재생에너지 보급통계」
4. 산업통상자원부 (2016. 11), 「2015년 신재생에너지 산업통계」
5. 성균관대 SSK 위험커뮤니케이션연구단 (2017. 6.14), “발전 및 에너지원에 대한 국민인식 조사결과”
6. 에너지경제연구원 (2015), 「원자력발전의 경제적 사회적 비용을 고려한 적정 전원믹스 연구」
7. 윤태현·박광수 (2016), 「에너지빈곤층 추정 및 에너지 소비특성 분석」, 울산: 에너지경제연구원
8. 전력거래소 (2017.5), 「2016년도 전력시장 통계」
9. 전력거래소 (2016.3), 「2015년도 전력설비 정지통계」
10. 한국전력공사 (2017. 6), 「한국전력통계(제86호, 2016년)」
11. James Conca (2012), “How deadly is your kilowatt? We rank the killer energy sources”, <http://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/#65a04905709b> (June 10 2012)
12. IAEA(International Atomic Energy Agency) (2016), “Nuclear Power and Sustainable Development”, Austria : IAEA
13. IRENA(International Renewable Energy Agency) (2013), “Renewable Energy and Jobs”, www.irena.org/Publication
14. Max Wei, Shana Patadia, Daniel M. Kammen (2009), “Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US?”, Energy Policy 38 (2010) 919-931
15. NEI(Nuclear Energy Institute, USA) (2014), “Nuclear energy’s economic benefits-current and future”
16. OECD/NEA(2010), “Comparing nuclear accident risks with those from other energy sources”
17. OECD/NEA(2017), “The full costs of generating electricity”, France : OECD/NEA
18. Peter Burgherr, Stefan Hirschberg (2014), “Comparative risk assessment of severe accidents in the energy sector”, Energy policy
19. Jay Rutovitz, Elsa Dominish, Jenni Downes (2015), “Calculating Global Energy Sector Jobs: 2015 Methodology Update”, Institute for Sustainable Futures (UTS 2015)

[부록] 발전기술별/속성지표별 분석자료 종합

에너지 부지	에너지사용의 복지성	직접계산	원자력	석탄	LNG	석유	태양광	풍력	가치분소득 중 월 전기요금 비중(%)		
에너지 부지	에너지사용의 복지성	NEA	1.57	0.46	0.34	-	34.77	31.92	발전원별 시스템비용(\$/MWh)		
	에너지사용의 접근성	에경연	4.25	3.78	2.95	-	-	-	발전원별 송전비용(원/kWh)		
기술의 신뢰성	기술의 안전성	포브스	90	100,000	4,000	36,000	440	150	사망자 수/trillion kWh		
		Hirshberg 논문	5	59	27	-	19	6	YOLL/GWh		
		Burgerr 논문	0.00726	0.12	0.0719	0.0955	0.000245	0.00514	사망자 수/GWyr		
	기술의 신뢰성	NEA	0.048	0.157	0.085	0.132	-	-	-	사망자 수/GWyr	
		국내통계	98.79	99.67	99.1	99.47	-	-	-	신뢰도(%)	
		국내 통계	1.63	-	-	-	27.2	2.40	5.0	연 평균 고장정지건수	
		NEI	0.5	0.19	0.05	-	2.80	1.06	2.80	고용규모(인/MWe)	
		IAEA	1.05	0.22	0.04	-	4.15	0.24	0.24	고용규모(인/MWe)	
		NEA	(0.33)	(0.12)	(0.02)	-	(1.83)	(0.07)	(1.83)	(0.07)	건설·설치·제조부문(인/MWe)
			(0.72)	(0.10)	(0.02)	-	(2.32)	(0.17)	(2.32)	(0.17)	운전유지부문(인/MWe)
고용 창출	고용 규모	NEA	25	-	-	-	33	15	건설·설치·제조부문(인/MWe)		
		Max Wei	1.20	-	-	-	0.60	0.30	운전유지부문(인/MWe)		
		Max Wei	(0.38)	(0.21)	(0.03)	-	(1.02)	(0.28)	(0.28)	건설·설치·제조부문(인/MWe)	
			(0.70)	(0.15)	(0.36)	-	(0.50)	(0.24)	(0.24)	운전유지부문(인/MWe)	
		UTS/ISF	1.08	0.36	0.39	-	1.52	0.52	1.52	건설·설치·제조+운전유지부문(인/MWe)	
			(1.31)	(3.32)	(1.12)	-	(19.70)	(4.93)	(19.70)	건설·설치·제조부문(인/MWe)	
		IRENA	(0.60)	(0.14)	(0.14)	-	(0.70)	(0.20)	(0.70)	운전유지부문(인/MWe)	
			1.91	3.46	1.26	-	20.40	5.13	20.40	건설·설치·제조+운전유지부문(인/MWe)	
		국내 통계	-	-	-	-	(17.90)	(13.35)	(17.90)	(13.35)	건설·설치·제조부문(인/MWe)
			-	-	-	-	(0.30)	(0.2)	(0.30)	(0.2)	운전유지부문(인/MWe)
고용의 질	고용의 질	IRENA	-	-	-	-	18.20	13.55	건설·설치·제조+운전유지부문(인/MWe)		
		정규직 비율(%)	93.5	-	-	-	-	-	-	정규직 비율(%)	
		합사 이상 비율(%)	83.0	-	-	-	-	-	-	합사 이상 비율(%)	
NEA	평균임금(\$/시간)	-	-	-	-	-	19.53	21.17	평균임금(\$/시간)		
	NEI	31	28	28	-	15	35	35	평균임금(\$/시간)		