

발전원별 위험도 비교평가를 위한 에너지원별 사고사례 경향분석

Trending Analysis of Severe Accident Occurrences related to the Use of Primary Energies

민경란, 김태운, 하재주
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

전세계 및 국내에서는 산업이 발달함에 따라 전기에너지의 사용량이 증가하게 되고 전기를 생산하기 위한 에너지원의 종류도 다양하게 된다. 발전을 위한 에너지원의 선택은 환경 영향, 사회경제적 측면 및 위험도에 대한 인식적인 측면에서 달라지게 된다. 국가 에너지 정책도 여러 가지 발전원들의 대중 보건, 환경, 경제 및 사회에 미치는 영향을 고려하여 국가가 부여하는 목표 달성 가치에 따라 결정되므로 여러 발전원들간 위험도 관점에서의 객관적 비교 분석의 필요성이 대두된다. 전력을 생산하기 위한 에너지 사용으로 인한 사회나 환경에 부과되는 외부비용 평가는 전통적인 연료주기에 대한 경제성 평가에서 무시되어 왔으나 최근에는 에너지 사용에 대한 환경 및 인체의 건강에 미치는 영향을 정량화하여 에너지 정책 결정 과정에 반영하려는 움직임이 매우 활발하다. 발전원별로 환경 및 인체에 미치는 위험도 및 비용 평가 결과는 국가 정책결정 과정에 반영되어야 할 뿐만 아니라, 이들 결과에 대한 비용/이득 분석 결과들은 여러 가지 발전원별 대안 선택에 있어서 중요 결정인자로 활용되어야 한다. 따라서 모든 발전원에 대한 종합 위험도 평가 체계의 구축과 이를 통해 발전원간 위험도의 정량적 비교 분석을 체계적이고 과학적으로 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 발전원별 중대사고로 인한 위험도를 비교 평가하기 위해 필수적인 1차 에너지 사용 관련 중대사고 사례를 수집하고 분석하여 에너지원별 사고발생 변화 추이를 알아보고자 하였다. 또한 이 자료를 활용하여 위험도(리스크) 개념을 도입한 발전원별 위험도 비교 평가 체계를 구축하는 데 도움이 되고자 하였다.

Abstract

Many kinds of energy resources are used to produce as the demand of electric power increases from the industries in the world and also in our country. Among

various energy resources, public health, environmental, economic and social effect, should be considered in determining a national energy policy.

Although the external cost imposed on society or the environment has been ignored in the fuel cycle economical efficiency analysis, recently many people have an interest in determining of the national energy policy from a quantified data on environmental and health effects. A cost-benefit analysis in selecting an alternative will be an reasonable approach from this purpose. Therefore there is a need to construct a systematic and integrated risk analysis system, allowing a quantitative risk analysis among energy generating systems.

In this study, we have collected and analyzed severe accident experience data related to the use of primary energy sources in our country and in the world during recent 30 years. The database in view of quantitative risk analysis is expected to be useful in the construction of comparative risk analysis system.

1. 서 론

국내 뿐만 아니라 전 세계적으로 에너지 소비량은 늘고 있고 화석연료 사용의 급격한 증가로 인하여 환경오염 가스의 배출이 급격히 상승하고 있다. 에너지 소비 중 발전연료로의 사용이 막대한 비중을 차지하고 있다. 향후 늘어가는 전력량과 관련하여 온실가스의 양을 줄이면서 사회적 중대사고 리스크를 동시에 줄이는 발전원의 배치 및 결정에 도움을 주기 위하여 전과정 환경영향 평가와 더불어 중대사고 리스크를 예측하는 일이 무엇보다도 중대한 일이라 할 수 있다. 본 연구에서는 향후 발전원 배치 결정에 도움을 주기 위한 업무 중의 하나로 에너지원별 중대사고 발생 사례를 조사하여 분석하고 데이터베이스화하는 업무를 착수하게 되었다. 에너지 사용이 본격화된 역사가 국내외 모두 30년 이상 되어 경험적인 자료를 수집하여 활용하는 방법도 있으나, 경험적인 자료가 부족할 경우에는 예측하는 방법을 활용할 수도 있을 것이다. 특히 수력 발전원의 경우에는 선진국에서는 사용한지가 무려 100년이 더 경과하였다. 그 다음은 석탄 화력, 석유 화력을 사용하게 되었고 원자력은 30년 전부터 본격적으로 사용하게 되었다. 천연가스의 경우에는 최근 10여 년 전부터 발전원으로서의 사용기술이 개발되어 본격적으로 사용되기 시작하였다.

2. 본 론

(1) 국내외 에너지 사용 진화 추이

가. 국내 에너지 지표의 변화

에너지 다소비업종인 중화학공업 중심의 경제성장으로 인하여 1981년-2000년 기간 중의 총에너지 소비는 1981년 45,718천TOE¹⁾에서 2000년 192,887천TOE(약 4.2배)로 증가하여

연평균 7.9%의 빠른 성장세를 기록하였다. '80년대 (1981년~1990년)에는 연평균 8.9%의 높은 경제성장 추세에 따라 총에너지 소비증가율도 연평균 8.2%에 달하였다. 그러나 '90년대(1990년-2000년)에 들어서는 안정적 성장추세 및 IMF외환위기 등으로 인해 경제성장률이 다소 둔화되어 연평균 6.4%의 성장률을 기록하였으며 이에 따라 총에너지 소비증가율도 연평균 7.5%로 '80년대에 비하여 약간 감소하였다. 에너지원단위 측면에서는 '90년대 에너지원단위(총에너지소비량/GDP)가 악화됨으로 인해 경제성장률 감소 폭에 비하여 총에너지소비 증가율 감소 폭이 작았다. 에너지경제연구원 보고¹에 따르면 다음 표 1-1 에 20년간의 국내 에너지원별 소비 변화 추이가 잘 나타나있다.

나. 에너지원별 세계 에너지 소비 추이

세계 에너지 총 소비는 개도국의 높은 증가에 힘입어 2010년까지 연 평균 2.3% 씩 꾸준히 증가할 전망이라고 보고된 바 있다¹. 석유는 주 에너지원으로서의 역할을 유지하고, 청정연료인 가스의 급성장이 예상되고 있다. 또한 석유는 수송부분의 소비증가가 산업부분의 수요 감소를 대체하여, 전체에너지에서 차지하는 비중은 현재 수준인 40%를 유지할 전망이다. (표 1-2 참조)

다. 국내 발전원별 전력 현황

2001년 한국전력 통계²에 따르면 표 2와 같이 국내 발전원의 구성은 유연탄과 LNG, 원자력을 이용하는 발전설비의 비율이 각각 28%, 25.3% 및 27% 로 대부분을 차지하며, 기타 발전 설비로 석유, 무연탄, 수력 등이 있다. 현재 회사별 설비를 보면 수력원자력과 5개의 복합화력 회사에 의해 주로 운영되고 있는 실정이고, 발전 실적은 원자력이 39.9%이고, 유연탄이 37.4%로서 대부분의 발전을 담당하고 있다. 에너지원에 따른 설비별 이용률현황은 한국전력통계에 따르면 지난 15년 동안 수력의 이용률은 약 50% 정도 감소한 반면 원자력과 유연탄 발전의 이용률은 각각 19%, 37% 증가하였음을 알 수 있다. 화력의 이용률이 지난 3년간 48.2%에서 56.54%로 꾸준히 증가하고 있는 데 이러한 현상이 환경 오염에 미치는 영향을 간과해서는 안될 것으로 생각한다.

(2) 국내외 에너지원 사용 관련 중대사고 발생 현황

발전원별 종합 위험도 비교 평가를 위해 국내외 발전과 관련하여 에너지 개발 및 사용 과정에서 발생한 중대사고를 포함한 환경 위해사례 발생 현황 및 피해 상황을 수집하고 조사하였다. 또한 데이터 수집범위 및 품질요건 설정하였다. 발전과 관련된 에너지원으로는 석탄, 석유, 천연가스, 수력, 원자력 에너지를 고려하였으며, 발전을 위한 각 에너지원의 개발 단계로서는 채굴, 정제, 수송, 운전 단계로 나누어 고려하였다.

1) TOE : Tonnage of Oil Equivalent

표 1-1. 국내 에너지원별 소비 변화 추이¹

	1981	1990	1997	1998	2000	81-'90 증가율	91-'00 증가율
석탄	15,244 (33.3)	24,385 (26.2)	34,799 (19.3)	36,039 (21.7)	42,911 (22.2)	5.4%	5.8%
(유연탄)	4,906 (10.7)	14,438 (15.5)	32,810 (18.2)	33,832 (20.4)	39,817 (20.6)	12.7%	10.7%
석유	26,580 (58.1)	50,175 (53.8)	109,080 (60.4)	90,582 (54.6)	100,279 (52.0)	7.3%	7.2%
(납사)	2,620 (5.7)	6,048 (6.5)	24,791 (13.7)	27,200 (16.4)	29,131 (15.1)	9.7%	17.0%
LNG	0	3,023 (3.2)	14,792 (8.2)	13,838 (8.3)	18,924 (9.8)	-	20.1%
수력	677 (1.5)	1,590 (1.7)	1,351 (0.7)	1,525 (0.9)	1,402 (0.7)	9.9%	-1.2%
원자력	724 (1.6)	13,222 (14.2)	19,272 (10.7)	22,422 (13.5)	27,241 (14.1)	38.1%	7.5%
신재생	2,492 (5.5)	797 (0.9)	1,344 (0.7)	1,526 (0.9)	2,130 (1.1)	-11.9%	10.3%
계	45,718 (100.0)	93,192 (100.0)	180,638 (100.0)	165,932 (100.0)	192,887 (100.0)	8.2%	7.5%
인당에너지	1.18	2.17	3.93	3.57	4.08	7.0%	6.5%

* (단위 : 천TOE, TOE/인)

표 1-2. 에너지원별 세계에너지 소비 추이¹

구분	1990년	1999년	2010년	2020년	연평균증가율(%)	
					'99 - '10	'10 - '20
석유	339.9 (39.1)	383.5 (39.9)	492.4 (39.7)	609.3 (39.5)	2.3	2.2
천연가스	187.7 (21.5)	219.0 (22.8)	311.0 (25.1)	424.9 (27.6)	3.2	3.2
석탄	226.8 (26.0)	213.7 (22.2)	263.8 (21.3)	308.2 (20.0)	1.9	1.6
원자력	50.4 (5.8)	63.8 (6.6)	69.3 (5.6)	70.6 (4.6)	0.8	0.2
수력 및 기타	66.8 (7.7)	83.4 (8.7)	104.8 (8.4)	127.8 (8.3)	2.1	2.0
합계	872.4 (100)	962.4 (100)	1241.4 (100)	1541.0 (100)	2.3	2.2

* (단위 : 천만 TOE, %)

표 1-3. 에너지원별 세계에너지 소비 추이¹ (단위: 백만 TOE)

	총에너지소비	석유	천연가스	석탄	수력	원자력
1972	5,628	2,412	1,044	1,628	326	38
1973	5,915	2,798	1,068	1,668	332	49
1974	5,953	2,757	1,093	1,691	350	63
1975	5,960	2,721	1,084	1,709	359	87
1976	6,293	2,891	1,146	1,785	365	106
1977	6,487	2,984	1,168	1,830	373	132
1978	6,715	3,084	1,213	1,860	406	152
1979	6,809	3,142	1,271	1,820	422	156
1980	6,729	3,024	1,286	1,816	432	172
1981	6,406	2,913	1,316	1,816	155	206
1982	6,368	2,788	1,316	1,878	155	232
1983	6,431	2,765	1,330	1,918	161	258
1984	6,755	2,807	1,451	2,001	170	315
1985	6,949	2,803	1,491	2,100	174	382
1986	7,117	2,893	1,502	2,134	177	412
1987	7,354	2,948	1,581	2,198	180	448
1988	7,613	3,038	1,662	2,242	184	488
1989	7,782	3,088	1,738	2,272	182	502
1990	7,856	3,136	1,774	2,270	189	517
1991	8,147	3,138	1,806	2,180	511	475
1992	8,172	3,170	1,810	2,204	509	479
1993	8,222	3,141	1,849	2,200	530	495
1994	8,321	3,200	1,858	2,219	541	504
1995	8,512	3,247	1,914	2,255	570	526
1996	8,787	3,323	2,004	2,336	579	545
1997	8,841	3,396	1,992	2,324	589	541
1998	8,853	3,410	2,017	2,280	596	551
1999	8,884	3,481	2,069	2,163	600	571
	203,857	84,496	42,851	56,795	10,115	9,401

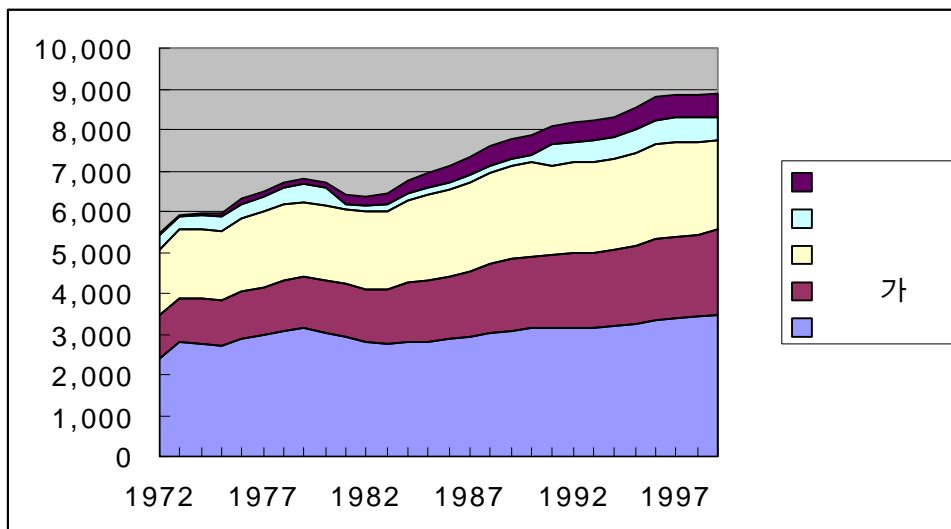


그림 1. 세계 에너지 소비 추이 (30년간)

표 2. 국내 발전원별 발전설비 현황 (2001년 12월 기준)

구분		발전소 (개소)	발전기 (대수)	설비용량 (천kw)	구 성 비 (%)
수력	일반	16	49	1536	2.9
	(수자원)	9	26	1004	1.9
	양수	4	8	2300	4.3
	소수력	28	84	40	0.1
	소계	48	141	3,826	7.2
석탄	무연탄	4	7	1,191	2.2
	유연탄	6	30	14,740	27.4
	소계	10	37	15,931	29.4
석유	중유	6	19	4,280	8.0
	경유(내연)	12	64	380	0.7
	소계	18	83	4,660	8.7
LNG		13	106	13,618	25.3
한 화		1	15	1,650	3.1
LG		3	12	1,401	2.6
원자력		4	18	14,716	29.2
합계		93	385	52,801	100.0

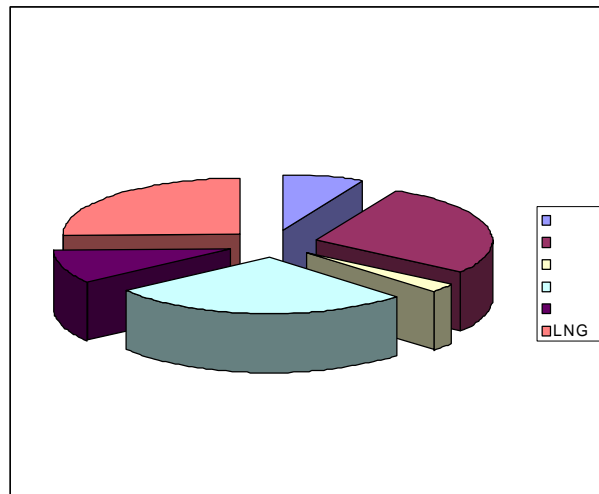


그림 2. 발전원별 국내 발전설비 구성 현황(2001년 기준)

국내외 1차 에너지 사용에 따른 중대 사고를 사례 수집 및 분석, 국내 발전원별 발전비중 조사, 그리고 해외 가스 및 전기산업체, 수력발전 관련 댐 붕괴 사고 사례 뿐만 아니라 국내 에너지 관련 중대사고 발생 현황 조사를 연구대상으로 하였다.

발전원별 위험도 비교 평가를 위해 국내외 사고 사례를 수집 및 조사하는데 있어서 보고된 정보가 빈약하다는 커다란 제한점이 있었다. 1차 에너지원 사용과 관련하여 국내외 중대사고 사례를 중점적으로 수집하고 경향을 분석하였다(표 3-1, 2).

표 3-1. 국내 에너지원별 중대사고 발생 현황

	석탄	가스	석유	수력	원자력
사건 발생 수	불명	2800명	14	2	0
사망자 수	4338명	484명	177	0	0
부상자 수	51405명	3500명	194	0	0
대피자 수					0
재산피해액			1천억원 (울산SK. '99)		
참고문헌	에너지경제 연구원	한국가스안전공 사 가스연감	산업안전공단 중대산업사고사 례 ('93-'01)	일반언론매체	일반언론매체
수집년도	68-'01 (33년간)	93-02' (10년간)	55-'00 (45년간)		

표 3-2. 국외 에너지원별 중대사고 발생 현황

	석탄	가스	석유	수력	원자력
사건 발생 수	187	29	46	65	3
사망자 수	5천명	2천명	1천명	6천명	34
부상자 수	1천명	4천명	3천명	1천명	400
대피자 수	2천명	30만명	10만명	18만명	28만명
참고문헌	ENSAD ²⁾	OECD ³⁾	OECD	ICOLD ⁴⁾	TMI,체르노빌 JCO
자료 수집연도	69-96 (30년간)	70-98 (30년간)	70-98 (30년간)		
중국	백만건/'01년 13만명 사망	-	-	23만명 사망 (1975) 양쯔강 반취오댐 붕괴	-

(3) 국내 발전용 연료사용과 중대 사고발생 현황과의 관계

석탄 및 석유, LNG, 수력 그리고 원자력 에너지원의 발전용 연료로의 투입구조를 살펴 보면 총 투입량의 비중은 1차 에너지 투입량이 1차 에너지 총 소비량에서 차지하는 비중을 말한다. 30년전 석탄의 비중은 11.2%, 석유는 76.6%, 수력이 12.2%에 해당하였으나 현재는 원자력의 비중이 43%로 상대적으로 크게 증가했음을 알 수 있었다. 반면에 석유의 비중은 약 1/9 정도 감소한 것으로 나타났다. 이러한 자료는 1차 에너지원의 사고 발생빈도와 상기와 같이 수집한 에너지원별 최근 10년간 사고 발생 현황 데이터와 보고된 통계

2) ENSAD, 스위스 PSI Database

3) OECD, 중대산업사고 Database

4) ICOLD, 국제대댐학회 Database

자료^{1,2}를 토대로 1차 에너지원 소비추이와 발전용 투입량(표4)을 천 TOE로 변환함으로써 발전원들간 사고로 인한 사망자수를 추정해 보았다.

표 4. 30년간 국내 발전용 연료(1차에너지) 투입구조³

	총투입량		석 탄		석 유		LNG		수력		원 자 력	
	(비중)		(비중)		(비중)		(비중)		(비중)		(비중)	
1970	2,500	100	279	11.2	1,916	76.6	-	-	305	12.2	-	-
1980	9,035	100	682	7.6	6,988	77.3	-	-	496	5.5	869	9.6
1990	26,055	100	4,603	17.7	4,398	16.9	2,242	8.6	1,590	6.1	13,222	50.7
1991	28,582	100	4,638	16.2	6,280	22	2,323	8.1	1,263	4.4	14,078	49.3
1992	31,362	100	5,106	16.3	8,004	25.5	2,903	9.3	1,216	3.9	14,133	45.1
1993	34,253	100	7,098	20.7	7,828	22.9	3,290	9.6	1,502	4.4	14,535	42.4
1994	38,525	100	9,468	24.6	9,016	23.4	4,354	11.3	1,025	2.6	14,663	38.1
1995	43,272	100	11,021	25.5	9,465	21.9	4,659	10.8	1,370	3.2	16,757	38.7
1996	47,971	100	12,745	26.6	9,416	19.6	6,029	12.6	1,300	2.7	18,481	38.5
1997	52,221	100	14,979	28.7	9,604	18.4	7,015	13.4	1,351	2.6	19,272	36.9
1998	49,486	100	16,749	33.8	3,320	6.7	5,470	11.1	1,525	3.1	22,422	45.3
1999	54,863	100	18,089	33	3,268	6	6,223	11.3	1,517	2.7	25,766	47
2000	60,993	100	21,504	35.2	4,993	9.6	5,852	9.6	1,402	2.3	27,240	44.7
2001	65,161	100	24,310	37.3	5,539	8.5	6,241	9.6	1,038	1.6	25,766	43

* 단위: 천 TOE

주 : 1. 총투입량의 비중은 발전용 1차에너지투입량이 1차에너지총소비량에서 차지하는 비중

2. 기타 에너지원별 비중은 각 에너지원별 발전용투입량이 발전용 총투입량에서 차지하는 비중

자료 : 산업자원부

다음 표 5-1, 2, 3, 4, 5 는 1차 에너지원인 석탄, 석유, LNG 와 수력, 원자력분야에서 최근 10년간 에너지 소비 변화량과 발전용으로의 투입현황과 연관지어 수집된 사고 사례 데이터베이스로부터 사망자수를 추정해 본 것이다.

천 TOE 당 석탄으로 인한 인명 피해가 타 에너지원에 비해 상대적으로 월등히 큰 것으로 나타났다. 그러나 1991년에 발전으로 인한 추정 사망자수가 292명이고, 천 TOE당 사망자수가 6.30E-02명이었으나, 2000년에는 추정 사망자수(21명)와 천 TOE당 사망자수(9.79E-04명)가 크게 감소하였음을 알 수 있었다.

천 TOE당 사망자수는 석탄, LNG 가스 부문에서 석유 순으로 나타남을 알 수 있었다. 특히 수력이나 원자력 부문에서는 사고가 최근 10년 동안 국내에서는 전혀 발생하지 않았으므로 천TOE당 사망자수를 추정하는데 제한적이었다.

에너지원에 따른 천TOE당 사망자수는 절대적인 수치이기는 하나 사고 발생의 빈도와

결과 측면에서 볼 때 상대적인 값이라 해도 실제 발생 건수가 월등히 적은 경우라도 사고 리스크 측면에서 영향을 달리 해석할 수 있다.

표 5-1. 석탄 에너지원의 발전원으로 활용시 천 TOE당 추정 사망자수

	발전용 투입량, (천TOE) (A)	1차 에너지소비량 (천TOE) (B)	발전에 투입된 비중 C = A/B	1차 에너지 소비로 인한 총 사망자수 (D)	발전으로 인한 추정 사망자수 E = D x C	발전연료 천TOE 투입당 추정사망자수 F=E/A
1991	4,638	24,535	0.18	1,545	292.1	6.30E-02
1992	5,106	23,618	0.21	984	212.7	4.17E-02
1993	7,098	25,882	0.27	557	152.8	2.15E-02
1994	9,468	26,680	0.35	426	151.2	1.60E-02
1995	11,021	28,091	0.39	274	107.5	9.75E-03
1996	12,745	32,200	0.39	172	68.1	5.34E-03
1997	14,979	34,799	0.43	142	61.1	4.08E-03
1998	16,749	36,039	0.46	108	50.2	3.00E-03
1999	18,089	38,155	0.47	60	28.4	1.57E-03
2000	21,504	42,911	0.50	42	21.0	9.79E-04
합계	121,397	312,910	0.39	4,310	1,145.1	9.43E-03

표 5-2. 석유 에너지원의 발전원으로 활용시 천 TOE당 추정 사망자수

	발전용 투입량, (천TOE) (A)	1차 에너지소비량 (천TOE) (B)	발전에 투입된 비중 C = A/B	1차 에너지 소비로 인한 총 사망자수 (D)	발전으로 인한 추정 사망자수 E = D x C	발전연료 천TOE 투입당 추정사망자수 F=E/A
1991	6,280	59,627	0.1053	1	0.1	1.68E-05
1992	8,004	71,740	0.1116	0	0.0	0.00E+00
1993	7,828	78,495	0.0997	0	0.0	0.00E+00
1994	9,016	86,343	0.1044	0	0.0	0.00E+00
1995	9,465	93,955	0.1007	1	0.1	1.06E-05
1996	9,416	99,898	0.0943	0	0.0	0.00E+00
1997	9,604	109,080	0.0880	2	0.2	1.83E-05
1998	3,320	90,582	0.0367	1	0.0	1.10E-05
1999	3,268	97,270	0.0336	0	0.0	0.00E+00
2000	4,993	100,279	0.0498	1	0.0	9.97E-06
합계	71,194	887,269	0.08	6	0.4	5.62E-06

표 5-3. LNG 에너지원의 발전원으로 활용시 천 TOE당 추정 사망자수

	발전용 투입량, (천TOE) (A)	1차 에너지소비량 (천TOE) (B)	발전에 투입된 비중 $C = A/B$	1차 에너지 소비로 인한 총 사망자수 (D)	발전으로 인한 추정 사망자수 $E = D \times C$	발전연료 천TOE 투입당 추정사망자수 $F=E/A$
1991	2,323	3503	0.6631	0	0.0	0.00E+00
1992	2,903	4581	0.6337	0	0.0	0.00E+00
1993	3,290	5723	0.5749	18	10.3	3.15E-03
1994	4,354	7618	0.5715	27	15.4	3.54E-03
1995	4,659	9213	0.5057	33	16.7	3.58E-03
1996	6,029	12172	0.4953	40	19.8	3.29E-03
1997	7,015	14792	0.4742	59	28.0	3.99E-03
1998	5,470	13838	0.3953	34	13.4	2.46E-03
1999	6,223	16849	0.3693	19	7.0	1.13E-03
2000	5,852	18924	0.3092	23	7.1	2.11E-02
합계	48,118	107,213	0.45	253	117.8	2.45E-03

표 5-4. 수력 에너지원의 발전원으로 활용시 천 TOE당 추정 사망자수

	발전용 투입량, (천TOE) (A)	1차 에너지소비량 (천TOE) (B)	발전에 투입된 비중 $C = A/B$	1차 에너지 소비로 인한 총 사망자수 (D)	발전으로 인한 추정 사망자수 $E = D \times C$	발전연료 천TOE 투입당 추정사망자수 $F=E/A$
1991	1,263	1,263	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1992	1,216	1,216	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1993	1,502	1,502	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1994	1,025	1,025	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1995	1,370	1,369	1.0007	0	0.0	0.00E+00
1996	1,300	1,301	0.9992	0	0.0	0.00E+00
1997	1,351	1,351	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1998	1,525	1,525	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1999	1,517	1,517	1.0000	0	0.0	0.00E+00
2000	1,402	1,402	1.0000	0	0.0	0.00E+00
합계	13,471	13,471	1.0	0	0.0	0.00E+00

표 5-5. 원자력 에너지원의 발전원으로 활용시 천 TOE당 추정 사망자수

	발전용 투입량, (천TOE) (A)	1차 에너지소비량 (천TOE) (B)	발전에 투입된 비중 $C = A/B$	1차 에너지 소비로 인한 총 사망자수 (D)	발전으로 인한 추정 사망자수 $E = D \times C$	발전연료 천TOE 투입당 추정사망자수 $F=E/A$
1991	14,078	14,078	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1992	14,133	14,133	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1993	14,535	14,535	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1994	14,663	14,663	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1995	16,757	16,757	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1996	18,481	18,481	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1997	19,272	19,272	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1998	22,422	22,422	1.0000	0	0.0	0.00E+00
1999	25,766	25,766	1.0000	0	0.0	0.00E+00
2000	27,240	27,241	1.0000	0	0.0	0.00E+00
합계	187,347	187,347	1.0	0	0.0	0.00E+00

다음 표 6과 7은 각 발전원별로 총 발전량 대비 중대사고 (사망자수) 발생을 측면에서 국내외 추정 결과를 비교하여 본 것이다. 국내의 경우는 1991년부터 2000년까지 최근 10년 동안의 각 발전원별 연료 투입자료와 중대사고 통계자료를 이용하였고 국외의 경우에는 Hirschberg (1998)에 의하여 조사된 1969년부터 1996년까지 30년간의 통계자료를 이용하였다.

표 6. 국외 30년간 총 발전량 및 중대사고로 인한 사망자수

발전원	총 사망자수 (A)	전 세계 30년 총계 GWeYr 발전당 추정 사망자수 (B)	30년간 총 발전량 (GWeYr) $(C=A/B)$	발전연료 소모량 (백만 TOE) $(D=C*8760/3.5/1000)$	세계에너지소 비량 (30년간) (백만 TOE) (E)	발전비중 (%) $(F=D/E)$
석탄	5,000	3.40E-01	14,706	36,807	56,795	0.65
석유	7,505	4.20E-01	17,869	44,724	84,496	0.53
가스	1,141	8.50E-02	13,424	33,597	42,851	0.78
수력	3,500	8.80E-01	3,977	9,955	10,115	0.98
원자력	30	8.40E-03	3,571	8,939	9,401	0.95
합계	17,176	3.21E-01	53,547	134,021	203,657	0.66

1 kg of oil = 3.5 kWh, 천 TOE = 3.5/8760 GWyr

국외 : Hirschberg 1998 자료, 1969-1996 30년간 총계

발전연료용으로 1차 에너지를 사용함으로써 발생한 중대사고율은 국외와 비교하여 보았을 때 석탄의 경우는 69.4배, LNG의 경우는 72.1배가 높았고, 석유의 경우는 30배가 낮았

다. 5개의 발전원을 종합하였을 때는 국내가 국외에 비해 4.13배가 높았다.

표 7. 국내 발전으로 인한 추정 사망자수 (최근 10년 총계)와 국외 30년 총계 비교

	발전용 투입량, (천TOE) (A)	1차 에너지소 비량 (천TOE) (B)	발전에 투입된 비중 C=A/B	1차 에너지 소비로 인한 총 사망자수 (D)	발전으로 인한 추정 사망자수 E=DxC	발전연료 천TOE 투입당 추정 사망자수 F=E/A	발전연료 GWeYr 투입당 추정 사망자수 G=F*8760/3.5	전 세계 30년 총계 GWeYr 발전당 추정 사망자수 (H)	국외대비 국내 사망자수 비교 I=G/H
석탄	121,397	312,910	0.39	4,310	1,145	9.43E-03	2.36E+01	3.4E-01	69.4
석유	71,194	887,269	0.08	6	0.4	5.62E-06	1.41E-02	4.2E-01	0.033
LNG	48,118	107,213	0.45	253	117	2.45E-03	6.13E+00	8.5E-02	72.1
수력	13,471	13,471	1.0	0	0	0	0	8.8E-01	-
원자력	187,347	187,347	1.0	0	0	0	0	8.4E-03	-
합계	441,527	1,508,210	0.39	4,569	1,262	1.19E-02	7.16E+00	1.73E+00	4.13

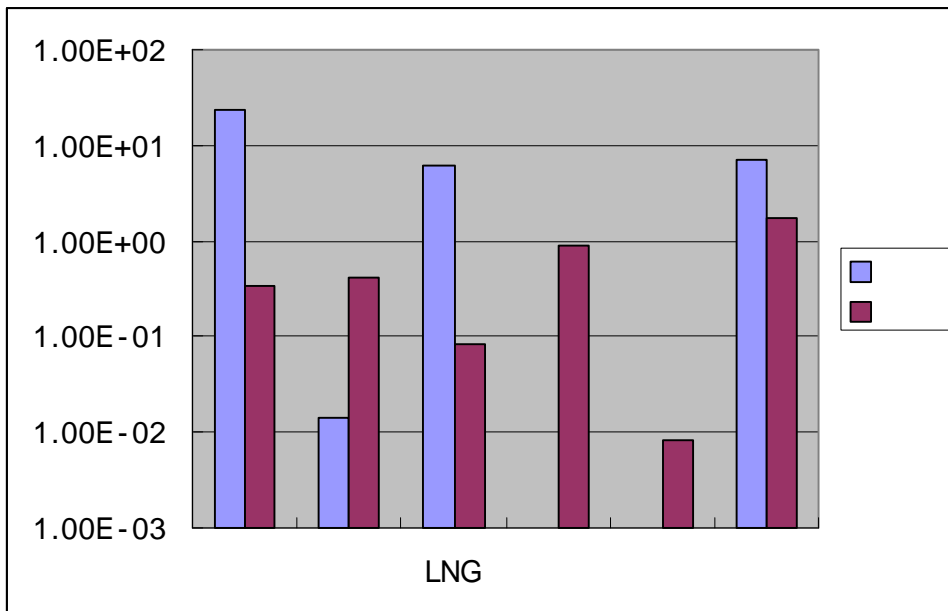


그림 3. 발전원별 GWeYr 발전당 추정 사망자수 국내외의 비교

3. 결론

석탄, 석유, 천연가스, 수력, 원자력 등에 대한 채굴 단계에서부터 운영단계까지의 모든 과정에서 발생한 중대사고 발생 현황을 조사하여 약 150건의 에너지관련 중대사고 발생 현황 및 결과를 수집 및 정리하였다. 국내외 에너지원에 따른 환경 위해 사례 수집 및 분

석, 국내 발전원별 발전비중 조사, 그리고 해외 가스 및 전기산업체, 수력발전 관련 댐 붕괴 사고 사례를 수집하였고, 국내 1차 에너지 사용 관련 중대사고 발생 사례도 수집하여 정리하였다. 또한 원자력 Level 3 PSA 수행 사례도 조사하였다.

그러나 중대사고를 포함한 환경위해사례가 발생한 이력은 가스나 석탄, 석유화력 등 기타 발전원에 대한 사고 이력에 비해 원전의 경우는 극히 제한적이다. 따라서 국내 발전원별 종합위험도 비교 평가에 앞서 국내 에너지 소비변화 양상과 국내 발전원별 전력현황을 살펴보았다.

주로 인터넷을 통하여 에너지 개발 및 사용과 관련하여 공개된 국내외 중대사고 사례를 검색하였기 때문에 아직 부족한 점은 많을 것으로 판단된다. 에너지원과 관련한 사고사례 데이터를 지속적으로 보완하여 발전원별 중대사고 발생 건수 및 피해 정도를 추정하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

현재까지 검색된 에너지원별 사고 자료¹⁻¹⁷만으로 판단하건데 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

외국의 경우에는 원자력과 수력이 비록 발생빈도는 낮았지만 피해 결과 측면에서는 가장 큰 결과를 낳았다. 인명피해 측면에서는 수력발전이 한번 발생하면 무려 수천 명 이상의 목숨을 앗아가는 가장 큰 결과를 발생하였다. 발생빈도 측면에서는 석탄, 가스, 석유 등 화석연료와 관련된 중대사고가 높은 빈도를 나타내었다.

국내의 경우에는 발생빈도 및 인명피해 측면에서 석탄 생산과 관련하여 가장 높은 빈도 및 가장 많은 피해를 가져왔다. 그러나 90년대에 들어오면서 연료 사용 양상이 석탄에서 석유 및 천연가스로 점차 변화되면서 최근에 와서는 피해 정도가 훨씬 감소하였다. 반면에 가스의 사용이 증대되면서 크고 작은 가스관련 사고가 종종 발생하였다. 석유와 관련된 사고는 주로 난방 연료로의 사용 단계와 관련하여 사고가 발생하였다. 수력 및 원자력과 관련된 중대사고는 국내에서는 아직 한번도 발생하지 않았다. 발전연료용으로 1차 에너지를 사용함으로써 발생한 중대사고율은 국외와 비교하여 보았을 때 석탄의 경우는 69.4배, LNG의 경우는 72.1배가 높았고 석유의 경우는 30배가 낮았다. 5개의 발전원을 종합하였을 때는 국내가 국외에 비해 4.13배가 높았다.

발전원별로 조사된 국내외 중대사고 데이터베이스는 향후 국내 전원 계획 수립 시 중대사고 위험도 측면에서 발전원별 선호도를 분석하는 데 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 원자력 중장기 연구개발 과제로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 에너지경제연구원, CEO Energy Briefs, "1981년-2000년 에너지 소비실적 및 요인 분석", 2002

2. 한국전력 및 산업자원부, “전력분야 통계”, 2002
3. 한국가스안전공사, “2000 가스사고연감”, 2001
4. 산업자원부“에너지 통계연감자료”, 2002
5. 에너지경제연구원, CEO Energy Briefs, “국내 온실가스 배출분석”, 2002
6. EIA, “International Energy Outlook”, 2002
7. 한국산업안전공단, “중대 산업사고 사례집”. 2002
8. 월간 배관기술, “해외 가스배관 사고 현황“, Vol.16, No. 11, 2002
9. S. Hirschberg, et al, Comparison of Severe Accident Risks in Fossil, Nuclear, and Hydro Electricity Generation, Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland.
10. 기술개발최종보고서, PSA Level III 분석기법개발, 94.12, 한국전력기술주식회사
11. 정해봉 외, KAERI/CM-575/2001, 원전의 환경영향 분석모형 수립을 위한 DB 구축, 연구기관 (주)에코프런티어, 2002.7.30
12. ISSN 1226-606X, 에너지통계연보, Yearbook of Energy Statistics, 2001, 산업자원부, 에너지경제연구원
13. ExternE Project, European Commission
14. GaBE Project, Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland.
15. 대한산업안전협회, KISA, Korea Industrial Safety Association,
16. Dongbu Insurance Risk Management Service
17. 한국시설안전공단, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation