

발전용 연료사용에 따른 중대 사고 발생 현황 분석

민경관 · 김태운 · 하재주

한국원자력연구소

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 전기에너지의 사용량이 증가하게 되고 전기를 생산하기 위한 에너지원의 종류도 다양하게 된다. 전력생산을 위한 에너지원의 선택 역시 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. 따라서 모든 발전원에 대한 위험도 비교 평가를 통해 발전원간 위험도의 정량적 비교 분석을 체계적이고 과학적으로 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 발전원별 중대사고로 인한 위험도를 비교 평가하기 위해 필수적인 1차 에너지 사용과 관련하여 국내외 중대사고 사례를 수집하고 분석하여 에너지원별 사고발생 변화 추이를 비교 분석하였다.

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 45,718천TOE(Ton of oil Equivalent)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 20년간의 국내 에너지원별 소비 변화 추이가 잘 나타나있다.

나. 에너지원별 세계 에너지 소비 추이

세계 에너지 총소비는 개도국의 높은 증가에 힘입어 2010년까지 연 평균 2.3% 씩 꾸준히 증가할 전망이다이라고 보고된 바 있다¹⁾. 석유는 주 에너지원으로서의 역할을 유지하고, 청정연료인 가스의 급성장이 예상되고 있다. 또한 석유는 수송부분의 소비증가가 산업부분의 수요감소를 대체하여, 전체에너지에서 차지하는 비중은 현재 수준인 40%를 유지할 전망이다.

(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 현황을 수집하고 조사하였다. 발전과 관련된 1차 에너지원으로서 석탄, 석유, 천연가스, 수력, 원자력 에너지 등을 고려하였으며, 발전을 위한 각 에너지원의 개발 단계로서는 채굴, 정제, 수송, 운전 단계로 나누어 고려하였다.

표 1-1, 1-2 에서는 발전 연료용으로 사용되는 1차 에너지원에 대해 국내외에서 발생한 중대 사고 사례를 수집한 것을 정리한 것이다. 국내의 경우 에너지경제연구원, 한국가스안전공사 산업안전공단의 통계자료와 기타 언론 및 인터넷 자료를 활용하였다. 국외의 경우 OECD 및 유럽공동체, 국제 댐학회 기타 인터넷 등의 일반언론매체를 통해 수집한 자료를 활용하였다. 발전원별 위험도 비교 평가를 위해 국내외 사고 사례를 수집 및 조사하는데 있어서 보고된 정보가 빈약하다는 커다란 제한점이 있었다.

표 1-1. 국내 에너지원별 중대사고 발생 현황

	석탄	가스	석유	수력	원자력
사건		2800명	14	2	0
사망	4338명	484명	177	0	0
부상	51405명	3500명	194	0	0
대피			0		0
재산			1천억원 (울산SK.99)		
참고	에너지경제 연구원	한국가스안전공사 가스연감	산업안전공단 중대산업사고사례 ('93-'01)		
수집년도	68-'01 (33년간)	93-'02' (10년간)	55-'00 (45년간)		

표 1-2. 국외 에너지원별 중대사고 발생 현황

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

(3) 국내 발전용 연료사용과 중대 사고발생 현황과의 상관관계 분석

석탄 및 석유, LNG, 수력 그리고 원자력 에너지원의 발전용 연료로의 투입구조를 살펴보면 총투입량의 비중은 1차 에너지 투입량이 1차 에너지 총소비량에서 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. 1차 에너지원의 사고 발생 빈도와 에너지원별 최근 10년간 사고 발생 현황 데이터와 보고된 통계자료^{1,2}를 토대로 1차 에너지원 소비추이와 발전용 투입량(표2)을 천 TOE로 변환함으로써 발전원들간 사고로 인한 사망자수를 추정해 보았다.

표 2. 30년간 국내 발전용 연료(1차에너지) 투입구조³

	총투입량		석탄		석유		LNG		수력		원자력	
	(단위)	(비중)	(단위)	(비중)	(단위)	(비중)	(단위)	(비중)	(단위)	(비중)	(단위)	(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

* 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 3-1, 2, 3는 1차에너지원인 석탄, 석유, LNG 와 수력, 원자력분야에서 최근 10년간 에너지 소비변화량과 발전용으로의 투입현황과 에너지원별 1차에너지 총소비량 중에서 발전 연료용으로 투입된 비중을 곱하여 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 추정 사망자수는 석탄, LNG 가스 부문에서 석유 순으로 나타남을 알 수 있었다. 특히 수력이나 원자력 부문에서는 사고가 최근 10년동안 국내에서는 전혀 발생하지 않았으므로 천TOE당 사망자수를 추정하는데 제한적이었다.

에너지원에 따른 천TOE당 추정사망자수는 절대적인 수치이기는 하지만 사고 발생의 빈도와 결과 측면에서 볼 때 상대적인 값이라 해도 실제 발생 건수가 월등히 적은 경우 사고 리스크 측면에서 영향을 달리 해석할 수 있다.

표 3-1. 석탄 에너지원의 발전원으로 활용시 천 TOE당 추정 사망자수

	발전용 석탄투입량, 천TOE(A)	에너지소비량(B)/천T OE	C = A/B	사망자수(D)	발전으로 인한 추정 사망자수 E = D x C	천TOE당 추정 사망자수 F=E/A
1991	4,638	24535	0.1890	1,545	292.1	6.30E-02
1992	5,106	23618	0.2162	984	212.7	4.17E-02
1993	7,098	25882	0.2742	557	152.8	2.15E-02
1994	9,468	26680	0.3549	426	151.2	1.60E-02
1995	11,021	28091	0.3923	274	107.5	9.75E-03
1996	12,745	32200	0.3958	172	68.1	5.34E-03
1997	14,979	34799	0.4304	142	61.1	4.08E-03
1998	16,749	36039	0.4647	108	50.2	3.00E-03
1999	18,089	38155	0.4741	60	28.4	1.57E-03
2000	21,504	42911	0.5011	42	21.0	9.79E-04
				총사망자수	1,145.1	1.67E-01

표 3-2. 석유 에너지원의 발전원으로 활용시 천 TOE당 추정 사망자수

	발전용 석유투입량, 천TOE(A)	에너지소비량(B)/천T OE	C = A/B	사망자수(D)	발전으로 인한 추정 사망자수 E = D x C	천TOE당 추정 사망자수 F=E/A
1991	6,280	59627	0.1053	1	0.1	1.68E-05
1992	8,004	71740	0.1116		0.0	0.00E+00
1993	7,828	78495	0.0997		0.0	0.00E+00
1994	9,016	86343	0.1044		0.0	0.00E+00
1995	9,465	93955	0.1007	1	0.1	1.06E-05
1996	9,416	99898	0.0943		0.0	0.00E+00
1997	9,604	109080	0.0880	2	0.2	1.83E-05
1998	3,320	90582	0.0367	1	0.0	1.10E-05
1999	3,268	97270	0.0336		0.0	0.00E+00
2000	4,993	100279	0.0498	1	0.0	9.97E-06
				총사망자수	0.5	6.68E-05

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

	발전용 LNG투입량/천TO E(A)	에너지소비량(B)/천T OE	C = A/B	사망자수(D)	발전으로 인한 추정 사망자수 E = D x C	천TOE당 추정 사망자수 F=E/A
1991	2,323	3503	0.6631		0.0	0.00E+00
1992	2,903	4581	0.6337		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
				총사망자수	117.8	2.11E-02

* 수력 및 원자력 에너지원에 대한 천 TOE당 추정 사망자수는 지면관계상 생략함.

다음 표 4와 5은 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.

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.

표 4. 국외 30년간 총 발전량 및 중대사고로 인한 사망자수

발전원	총 사망자 수 (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)	세계에너지소비량 (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

표 6. 국내 발전으로 인한 추정 사망자수 (최근 10년 총계)와 국외 30년 총계 비교

	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=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

3. 결론

국내 발전원별 종합위험도 비교 평가를 위해서 중대사고를 포함한 환경위해사례가 발생한 이력은 가스나 석탄, 석유화력 등 기타 발전원에 대한 사고 이력에 비해 원전의 경우는 극히 제한적이었다. 발전원별 위험도 비교를 위해 먼저 국내에서 발전용 연료 사용 관련한 중대사고 발생 사례를 수집하여 분석정리하였다.

에너지 개발 및 사용과 관련하여 공개된 국내외 중대사고 사례를 검색하였고 한국산업안전공단의 중대산업사고데이터베이스 및 해외의 OECD, ENSAD와 같은 데이터베이스를 조사하고 사례를 수집하였으나 아직 부족한 점은 많을 것으로 판단된다. 차기년도에는 에너지원과 관련한 사고사례 데이터를 지속적으로 보완하고 에너지원별 발전용 연료로의 투입량을 고려하여 발전원별 중대사고 발생 건수 및 피해 정도를 추정하려고 한다.

국내의 경우에는 발생빈도 및 인명피해 측면에서 석탄 생산과 관련하여 가장 높은 빈

도 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. 원자력과 관련된 중대사고는 국내에서는 아직 한번도 발생하지 않았다. 그러나 현재 수집된 데이터베이스의 자료의 제한점이 있으므로 사고 데이터의 지속적인 수집과 보완이 이루어져야 할 것이다.

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, "에너지 통계연감자료", 2002
3. 한국가스안전공사, "2000 가스사고연감", 2001
4. EIA, "International Energy Outlook", 2002
5. 한국산업안전공단, "중대 산업사고 사례집". 2002
6. S. Hirschberg, et al, Comparison of Severe Accident Risks in Fossil, Nuclear, and Hydro Electricity Generation, Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland.