

## 경수로형 조사후핵연료의 수송중 사고결과 평가

윤여창 · 하정우

한국에너지연구소

### 요 약

조사된 경수로 핵연료의 도로 수송시, 방사선 영향을 INTERTRAN 코드로 평가하였다. 계산된 결과는 인구밀도로 구분한 각 지역의 소집단과 작업자에 따라 집단 선량당량으로 구하였다. 정상 수송과 수송 사고에 대한 평가 결과, 각 집단의 선량은 매우 낮은 수준을 나타내었다.

계산 프로그램은 다양한 입력 자료에 의하여 정량화 되므로 앞으로 입력 자료의 확보를 위한 연구가 필요하다.

### I. 서 론

1950년대 초기 이래 방사성물질의 사용이 증대됨에 따라, 방사성물질 수송시에 수반되는 위험이 관심을 끌게되었다. 이에 따라 세계 각국은 방사성물질의 수송중 발생할 수 있는 위해로부터 인간은 물론 환경의 안전을 보장하기 위하여 방사성물질 수송 규정의 제정에 노력을 기울여왔으며 1961년에 방사성물질 안전수송에 관한 IAEA규정이 최초로 제정되었다.

그후 IAEA에서는 새로운 선량체계를 도입하는 등 여러 수정을 거쳐 1985년 새로운 규정을 발표하였다 [1]. 이러한 규정의 제정이외, IAEA는 방사성물질의 수송중 초래되는 위해를 평가하기 위한 계획도 수행하였으며, 스웨덴과 미국의 협조로 INTERTRAN이란 전산코드를 1983년에 발표하였다[2].

INTERTRAN은 정상수송과 수송사고의 위해를 각각 계산할 수 있는 코드로서, 정상수송시에는 작업 종사자와 수송경로 주변 주민에 대한 집단선량당량을 계산하고, 사고시에는 인구밀도 분포에 따라 구분한 지역주민의 집단선량당량을 계산하여 인체 영향을 분석할 수 있다[2].

본 논문에서는 가압경수로형의 조사된 핵연료 수

송에 따르는 방사성 위험을 INTERTRAN 코드를 이용하여 평가하였다.

방사성물질 수송중 사고로 인한 영향평가는 사고 발생율, 포장물의 강도, 사고시 누출율, 대기 확산 인자 등과 같은 인자가 사전에 결정되어야 하므로 그 평가 모델은 매우 복잡하다. 코드에 필요한 인자들중 상당부분은 외국의 자료를 인용하였으나[2,3], 의미 있는 결과에 접근하기 위해서 인구분포, 사고발생율, 수송거리, 교통통계등 국가에 따라 변화할 수 있는 자료는 국내 발표자료를 인용하였다.

이러한 방사성물질 수송으로 인한 영향 평가 연구는 과거의 수송 사고가 매우 드물고 발생을 은폐하려는 경향으로 제한을 받게되나, 법령상의 요구, 포장물의 실제평가, 비상계획 절차, 위해분석, 주민에 대한 영향등을 개선시키는 역할을 담당하게 될 것이다.

### II. 평가 모델

#### 1. 모델

방사성물질 수송중 사고는 어느장소나 시간에서든 발생 가능하고, 또한 사고평가지 고려되어야 하는 여러가지 인자, 즉 방사성 물질의 종류, 포장형태, 수

송상태등이 매우 광범위하다. 또한 방사선 영향 평가를 위해서는 대기확산, 기상자료, 주민분포, 교통통계, 인체영향, 사고시의 대응책, 방사선 측정결과 등을 조사하여야 한다. 이러한 많은 사전조사 자료가 만족되어야 하므로 현존하는 모델들은 수송중에 발생하는 방사선영향 문제의 해결에 완전한 해답을 제공하지는 못한다[4].

따라서 모델의 선택은 목적과 그 응용 범위에 따라 이루어져야 한다.

방사성물질 수송중 발생하는 사고를 평가하는 모델은 거의 1980년 이후에 개발된 모델들이며 그 일부는 원자력발전소의 사고해석을 위해 만들어졌으나 수송사고 평가에도 적용할 수가 있다.

CRAC(Calculation of Reactor Accident Consequences)는 1975년 미국 Sandia 국립연구소에서 만들어졌으며, 1981년 CRAC 2로 개정 되었다. 이 모델은 수송중 발생할 수 있는 가상 사고를 중점적으로 평가할 수 있다[5].

MARC (Methodology for Assessing Radiological Consequences)는 1982년 영국 NRPB에서 개발되었으며, CRAC와 유사하게 이용될 수 있다[4].

RADTRAN은 1977년 미국 Sandia 국립연구소에서 개발되었으며, 1986년에 RADTRAN III[6]가 발표되었다. 방사성물질의 정상적인 수송시, 주변에 대한 영향 평가는 물론 사고시의 평가도 수행할 수 있다.

INTERTRAN은 1983년 IAEA가 스웨덴의 Nuclear Power Inspectorate의 협조를 얻어 발표한 모델이다. 이 모델은 RADTRAN II를 수정하여 국제적으로 널리 사용할 수 있도록 한 것이다.

그밖에도 영국에서 개발한 NECTAR, 미국에서 개발된 TREC II 등이 있다[4].

## 2. 적용 모델

INTERTRAN코드는 정상수송과 수송사고를 각각 평가할 수 있으며, 정상적인 수송인 경우는 포장물내의 선원으로 부터 피폭받는 수송경로주변 주민의 집단선량당량과 작업자 집단의 집단선량당량으로 나타내며, 수송사고인 경우는 각 사고 형태를 분석하여, 인구밀도 분포에 따라 구분한 지역의 집단선

량당량으로 나타낸다.

### 가. 표준적하모델(Standard Shipment Model)

수송되는 방사성물질은 다양한 형태를 이룰수 있다. 그러나 전산화된 계산 모델로는 다양한 형태의 포장물을 취급하기 곤란하므로 표준화된 적하 모델을 사용하게 된다.

표준화된 적하모델은 포장형태, 포장물수량, 연간 적하회수, 포장물내의 방사능, 운반지수, 수송거리, 수송상황등에 의하여 구분되며, 구분된 방사성물질은 10가지의 수송수단에 의해 적하된다.

### 나. 수송모델(Transportation Model)

수송모델은 3가지 인구밀도 지역을 통과하는 수송비율을 정의하여 각 지역의 주민 피폭선량을 계산하고, 가정된 사고 발생확률을 인구밀도 지역에 따라 정의하여 사고시 주민 피폭선량을 계산하는데 이용된다.

### 다. 인구분포 모델(Population Density Model)

INTERTRAN에서는 인구분포를 인구고밀도 지역인 도심지역(Urban Zone), 인구중밀도 지역인 교외지역(Suburban Zone), 인구저밀도 지역인 시골지역(Rural Zone)으로 구분하여 취급한다. 도심지역에서는 건물내에 위치하고 있는 사람과 도로상에 있는 보행자로 구분하여 사고 선량을 계산하며 보행자 수는 보행자 밀도 인자로서 계산한다.

### 라. 정상수송시의 방사선 영향평가

정상 수송 상태에서의 방사선 영향은 수송 포장물내의 선원으로 부터 직접 나오는 X선, 감마선 혹은 중성자에 의한 외부 피폭이 주가 된다.

주민 피폭선량은 집단선량당량으로 표시되며, 포장물내의 방사성물질은 점선원으로 취급하여 계산한다.

### 마. 사고분류 모델(Accident Severity Categorization Model)

사고분류 모델의 목적은 포장 내용물에 영향을 주는 환경을 정의 하는데 있으며, 모든 수송수단은 사고분류에 따라 정의된 사고확률을 갖는다. 사고 유형은 물리적 충격과 화재에 따라 11가지로 분류하는

데, 사고 I—IV는 물리적 충격만 있는 경우이고, 사고 I—VII는 화재만 발생하였을 경우, 사고 VIII—XI는 물리적 충격이외의 화재를 동반하는 경우로 분류한다.

#### 바. 물질분산 모델(Material Dispersibility Model)

수송 사고로 인하여 누출된 방사성물질의 중요 경로는 공기부유진의 흡입이므로, 확산가능한 에어로졸의 발생율은 사고 영향 평가에 있어서 매우 중요한 인자가 된다. 누출된 방사성물질이 모두 에어로졸로 변화하지는 않으므로 그 발생 비율은 방사성물질의 화학적, 물리적 특성, 화재 등을 고려하여 결정하여야 한다. 에어로졸화 되는 비율은 각 사고 분류와 물질 분산 분류에 의하여 결정되며, 물질분산 분류는 고체, 액체, 기체, 화재발생 가능 물질에 따라 11가지로 구분된다.

#### 사. 사고 선량계산(Accident Dose Calculation)

사고 발생으로 인한 피폭선량 비확산물질(방사성물질 분류 1)과 확산 가능물질(방사성물질 분류2-11)로 대상을 구분하여 각 인구 밀도 지역에서의 사고 분류에 따라 수행된다.

피폭시간은 시골과 교외지역인 경우 1시간으로 가

정하고, 도시지역의 보행자는 15분으로 가정한다. 도시지역 건물내 위치한 사람의 선량은 건물벽의 방사선 차폐를 고려한 차폐인자를 이용하여 계산한다.

### III. 계산 방법과 입력 자료

#### 1. 인구 분포

인구분포는 각 지역마다 큰 변화를 나타내며, 그 분포에 따라 주민집단선량당량이 차이를 나타내게 된다.

인구분포 조사 지역은 고리로부터 한국에너지연구소에 이르는 320km의 지방도, 국도 및 고속도로의 인접 시, 군을 대상으로 하였으며, 1986년도 인구조사 결과를 참고로 하여 계산하였다[7]. 조사된 인구분포지역은 다시 도심지역, 교외지역, 시골지역으로 구분하여 각 지역인구밀도, 각 지역을 통과하는 도로 길이 및 대상 총 수송거리에 대한 백분율을 계산하였다. 도심지역은 인구밀도 1200명/km<sup>2</sup> 이상인 지역으로 구분하였으며, 인구밀도가 250명/km<sup>2</sup> 이상인 지역은 교외지역으로 구분하였고, 시골지역은 인구밀도 250

Table 1. Distribution of population densities along the selected route.

District	Area (km <sup>2</sup> )	Population	Density (/km <sup>2</sup> )	Zone
Yangsan - Gun	701.5	141,995	202	Rural
Haeundae - Gu	50.4	230,052	4,564	Urban
Ulchu - Gun	869.8	122,544	140	Rural
Wolsong - Gun	1,104.7	147,394	133	Rural
Yongchon - Gun	851.2	86,205	101	Rural
Yongchon - City	68.0	53,231	783	Suburban
Kyongsan - Gun	410.7	141,729	345	Rural
Taegu Dong - Gu	191.1	329,604	1,725	Urban
Taegu Puk - Gu	86.1	335,969	3,902	Urban
Chilgok - Gun	445.8	79,707	179	Rural
Kumi City	126.5	156,975	1,239	Urban
Kumnung - Gun	944.4	84,378	89	Rural
Kimchon City	61.3	70,495	1,150	Suburban
Yongdong - Gun	845.8	82,538	98	Rural
Okchon - Gun	534.7	81,857	153	Rural
Taeduk - Gun	339.3	80,149	236	Rural
Taejon City	204.3	892,935	4,371	Urban

명 이하인 지역으로 구분하였다.

국내 발표된 자료를 기초로하여 계산한 각 지역의 인구밀도는 표1과 같다. 조사대상 지역의 인구밀도는 879명/km<sup>2</sup> 으로서 우리나라 전체에 대한 인구밀도 450명/km<sup>2</sup>에 비해 높은편이다.

수송사고시 피폭선량 계산에 고려되는 보행인은 도로중앙선으로부터 약30m 거리내의 지역에 위치하는 사람을 대상으로 하였으며, 보행인 비율을 가정하여 인구밀도에 따라 보행인을 계산하였다.

2. 도로 및 교통 통계

INTERTRAN에 사용되는 수송수단은 8가지로 구분되며, 각 수송수단에 따라 평균 수송속도를 결정한다. 정상수송중의 선량은 수송율, 수송속도, 도로상태, 교통량, 도로와 주민간의 평균거리등에 의해 영향을 받게되나 사고시에는 이러한 인자 이외에 사고율을 고려하여야 한다.

1986년 고속도로를 운행한 차량의 연주행 거리는 5,796,137,000km이고 사고건수는 5,599건으로 사고율은 1km당  $9.66 \times 10^{-7}$ 건이다. 또한 대전, 부산간 고속도로의 평균 교통량은 612대/h으로 표2에 각 구간에 대한 일일 평균 교통량을 나타내었다.

수송거리는 고리로부터 부산인터체인지까지 약30km, 부산인터체인지로 부터 대전인터체인지까지 275km, 대전인터체인지로 부터 한국에너지 연구소까지는 약15km로서 총 수송거리는 약320km에 달하

며, 도심지역을 통과하는 거리는 68km로서 총 수송거리의 21%이고, 교외지역은 30km로 10%, 나머지 거리 222km는 시골지역으로 총 수송거리의 69%에 해당된다. 표3에는 각 구분지역의 총 수송거리에 대한 해당 지역거리와 그 비율을 나타내었다.

차량간의 간격과 수송속도는 인구밀도 지역에 따라 국내 실정을 고려하여 가정하였으며, 수송중 차량 휴식 시간은 2시간마다 15분으로 가정하였다. 러시아위의 교통량은 평균 교통량의 2배로 가정하였다.

3. 피폭 거리

조사된 핵연료의 적하 및 하역은 모두 크레인을 사용하므로 작업자의 거리는 2m로 가정하였으며, 포장물 표면 접근은 제한된 인원이 제한된 시간에 허용된다고 가정하여 무시하였다.

차량 휴식시간중 포장물에 접근하는 평균 거리는 5m로 가정하였다.

도로상 수송중인 차량을 지나쳐가는 다른 차량과의 간격은 도심 거리에서 3m, 고속도로에서 10m로 계산하였다.

4. 사고 가정

조사된 경수로핵연료의 수송중 발생하는 가상사고는 수송용기의 차폐체 일부에 손상이 있어 차폐효과가 감소되고, 방사성물질의 누출은 없는 것으로 가정하였다.

Table 2. Daily average traffic count in highway.

Taejon - Kimchon	Kimchon - Taegu	Taegu - Kyongju	Kyongju - Pusan
13, 904	15, 635	14, 629	14, 856

Table 3. Statistics of traffic in each zone.

Zone	Distance (km)	Percentage (%)	Population Density (/km)
Rural	222	69	168
Suburban	30	10	991
Urban	68	21	3, 160

\* Total route : 320km  
Average population density : 879 per km<sup>2</sup>

수송 트럭에는 하나의 수송용기를 적하하고, 수송용기내의 방사능은 50,000 Ci, 핵연료로부터 발생하는 감마선의 평균 에너지는 0.6MeV, 반감기는  $1.2 \times 10^4$  day로 가정하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

조사된 경수로 핵연료 수송에 대한 방사선 영향은 사고없이 수송되는 정상수송과 사고발생을 가정한 수송사고로 구분하여 평가 비교하였다.

평가 결과는 수송 작업에 관련된 방사선 작업 종사자와 운반 경로의 양측에 거주하고 있는 주민들에 대한 집단선량당량으로 나타내었다.

##### 1. 정상 수송시의 평가

조사된 경수로 핵연료를 고리로 부터 한국에너지 연구소까지 정상적으로 수송하였을때의 방사선영향을 평가한 결과는 표4에 나타내었다.

**Table 4.** Radiological consequence of the incident-free transportation.

Group	Population Dose (man · Sv)
Crewman	$3.916 \times 10^{-5}$
Surrounding Population while Underway	$8.579 \times 10^{-7}$
People Traveling on Transport Link	$7.850 \times 10^{-7}$
Surrounding Population while Stopped	$5.827 \times 10^{-6}$

조사된 경수로핵연료를 탑재한 차량의 승무원 집단선량당량은  $3.9 \times 10^{-5}$  man Sv이었으며, 수송 경로의 주위에 거주하고 있는 주민과 조사된 핵연료 수송차량을 지나치는 차량의 승객에 대한 집단선량당량은 각각  $8.6 \times 10^{-7}$  man Sv과  $7.9 \times 10^{-7}$  man Sv으로 매우 낮은 수준을 나타내고 있다. 수송차량이 급유, 정비,

휴식등을 위하여 휴게소에서 일시 정지하였을 경우의 주변 집단에 대한 집단선량당량은  $5.8 \times 10^{-7}$  man Sv을 나타내고 있다.

이상과 같은 정상수송시의 결과, 위해의 발생 가능성확률이 매우 희박함을 알 수 있다.

##### 2. 가정된 수송사고시의 평가

가상 사고에 의한 평가 결과는 시골 지역, 교외 지역, 도심 지역으로 구분하여 계산되었으며 표5에 나타내었다.

**Table 5.** Radiological consequence of the accident transportation.

Zone	Population Dose (man · Sv)
Rural	$7.288 \times 10^{-5}$
Suburban	$4.299 \times 10^{-4}$
Urban	$6.854 \times 10^{-5}$
Pedestrian	$3.379 \times 10^{-4}$

시골 지역에서는  $7.3 \times 10^{-5}$  man Sv, 교외 지역에서는  $4.3 \times 10^{-4}$  man Sv으로 가장 높은 수준을 나타내었으며, 도심 지역의 거주 집단과 보행인 집단의 집단선량당량은 각각  $6.9 \times 10^{-5}$  man Sv과  $3.4 \times 10^{-4}$  man Sv이었다.

교외지역의 결과는 도심지역보다 주거건물의 차폐효과가 적고 비교적 높은 인구밀도에 기인된것으로 추정할 수 있으며, 도심지역의 보행인 집단선량당량은 적은 보행인밀도에도 불구하고 건물에 의한 차폐효과가 매우 적으므로 교외지역과 비슷한 수준을 나타내고 있다.

이상과 같은 결과에서, 집단선량당량은 인구밀도와 깊은 관련이 있음을 알 수 있다. 표6에는 조사된 인구밀도를 기초로 하여 수송 도로로부터 거리별 인원분포를 나타내었다.

#### V. 결 론

조사된 경수로핵연료를 고리로부터 한국에너지원

**Table 6.** Expected number of people in annular areas.

Distance (km)	Rural	Suburban	Urban	Pedestrian
20	0	1	3	5
30	0	2	5	5
40	0	2	7	5
50	0	3	9	5
100	4	23	74	23
200	16	83	298	46
300	26	156	496	46
500	84	598	1,588	91
1,000	396	2,335	7,446	228

구소까지 국도, 지방 도로 및 고속도로를 이용하여 수송하는 경우, 이에 대한 방사선 영향을 사고가 없는 정상 수송과 가상 사고수송으로 구분하여 평가하였다.

INTERTRAN 코드를 사용하여 계산 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 정상 수송시 수송에 직접 관여한 차량 승무원, 수송경로 주변의 주민, 수송 차량을 지나치는 다른 차량의 승객들의 집단선량당량은 매우 낮은 수준을 나타내었다.

2. 가상 사고시의 주민 집단선량당량도 매우 낮은 수준을 나타내었으며 교외지역의 집단선량당량은 낮은 차폐효과로 인하여 도심지역보다 높았다.

수송 사고의 방사선 영향평가를 보다 실질적으로 계산하기 위해서는 수송도로로부터의 거리별 인구 밀도를 조사하여야 할 것이다. 또한, 교통사고율, 수송 경로, 운반 수단등을 면밀히 검토하고, 수송용기에 대한 실증실험을 통하여 미비점을 수정 보완함으로써 수송에 따르는 방사선 위험을 최소화하는 방안에 대해 계속 연구가 필요한 것으로 나타났다.

**참 고 문 헌**

1. International Atomic Energy Agency, *Regulation*

*for the Safe Transport of Radioactive Material*, 1985 Edition, IAEA, Vienna (1985).

2. International Atomic Energy Agency, *INTERT-RAN : A System for Assessing the Impact from Transporting Radioactive Material*, IAEA-TEC-DOC, Vienna(1983).

3. USNRC, *Final Environmental Statement on the Transportation of Radioactive Material by Air and other Modes*, NUREG-0170, USNRC(1977).

4. J. H. Mairs and K. B. Show, "Methodologies for assessing the radiological impact arising from the transport of radioactive materials", in : *Proc. Symp. on Packing and Transportation of Radioactive Materials*, SM-286/31, pp. 361-370, IAEA, Vienna (1987).

5. L. T. Ritchie, et al., *Calculation of Reactor Accident Consequences*, Sandia National lab., SAND-1944 (1987).

6. M. M. Madsen, et al., *RADTRAN III*, Sandia National Lab., SAND84-0036(1986).

7. 경제기획원 조사통계국, 한국통계연감(1986).

## **An Radiological Assessment Resulting from Accident during Transportation of Irradiated PWR Fuel**

**Yeo-Chang Yoon, Chung-Woo Ha**  
*Korea Advanced Energy Research Institute*

### **ABSTRACT**

The radiological impacts due to transportation of irradiated PWR fuel by truck were assessed for incident-free and accident conditions with the computer code INTERTRAN. The resulting collective doses exposure to different subgroups of the public and of the workers were determined. Resulting collective doses for crewman and the public sharing the transport link and living in a corridor on either side of the route are small. All attempts to quantify the risk from the transport suffer from a lack of good input data. It is in these areas that the most important advances can be made.