

사용후핵연료 운송 중 사보타주에 의한 결말 분석

황미정*, 김승환

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*mjhwang@kaeri.re.kr

1. 서론

국내에서는 사용후 연료를 발전소 밖으로 이송한 경험은 없지만, 향후 영구 처분장으로서의 운송이 이루어질 경우에 대한 사보타주 영향을 평가하였다. 본 연구는 사고 결말 분석을 위해 폭발이 사용후 핵연료 운송 용기에 미치는 영향 파악 결과에 기반하여 대기로의 확산에 의한 영향 평가 결과를 보여 준다.

2. 본론

2.1 폭발 영향 분석 결과

사용후 핵연료 운송용기(KN-18)에 대한 폭발 영향 평가를 수행한 결과, 구성된 시나리오에 의해 운송 용기가 파손되지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 가정된 시나리오보다 더 강력한 수단의 사보타주를 고려해 본 결과에서는 운송용기의 손상이 발생하는 것으로 평가되었다. 또한, 운송용기가 손상된 상태에서 폭발 발생 후 운송 트럭의 전복이나 운송용기 자체가 다시 낙하되는 복합사고 시에는 핵연료봉까지 손상될 가능성을 배제할 수는 없을 것으로 판단된다.

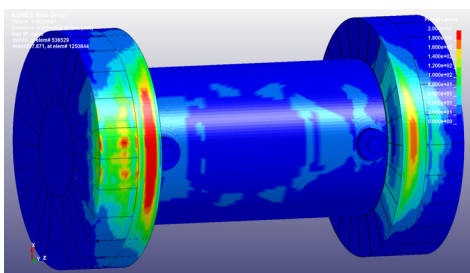


Fig. 1. Effective stress reaction for reflected pressure.

2.2 사고 결말 분석

사고 결말 분석을 위해 누설 면적 100 mm²가 운송용기 덮개에 발생하는 것으로 가정하였다. 각 어셈블리에 대한 주요 방사성 동위 원소의 재고량은 Table 1과 같고, 사용후 핵연료는 60 GWD/MTHM의 연소도와, 4.03%의 초기 농축 및 원자로에서 배출된 후 10

년이 경과한 것으로 가정하였다. 이들 핵종 집합은 사용후 핵연료 전체 재고량의 99%이상을 차지한다.

Table 1. KN-18 Subset of radioisotopes in spent fuel significant to dose calculations

핵종	핵종명	형태	집합체당 재고량(Ci)
Am-241	americium	fuel matrix	1,189
Cm-244	curium	fuel matrix	9,275
Co-60	cobalt	CRUD	31
Cs-134	cesium	volatile	7,099
Cs-137	cesium	volatile	67,352
Eu-154	europium	fuel matrix	5,108
Kr-85	krypton	fission gas	3,527
Pu-238	plutonium	fuel matrix	4,933
Pu-239	plutonium	fuel matrix	128
Pu-240	plutonium	fuel matrix	137
Pu-241	plutonium	fuel matrix	54,168
Ru-106	ruthenium	volatile	422
Sr-90	strontium	fuel matrix	42,366
Y-90	yttrium	fuel matrix	42,380

2.2.1 방사선원항 평가

사용후 핵연료 이송 중 파손으로 인한 방사선원항 평가는 집합체당 핵종별 방사성물질량, Cask당 집합체 수, 연료 파손확률 및 파손 시 용기 외부로 누출되는 방사선 물질량에 의해 결정되며 다음 식으로 평가된다.

$$(\text{Curies/assembly} * \text{Assemblies/cask}) * P_{\text{Fail}} * \text{RF}_{\text{Rod-to-Cask}} * \text{RF}_{\text{Cask-to-Environment}}$$

연료봉으로부터 이송용기로의 방출 비율은 파손 시 연료봉으로부터 Cask 내부로 방출되는 물질의 양으로 Table 2와 같다.

Table 2. Rod-to-cask release fractions

Material Type	Release Fraction	Source
Fuel Matrix	4.8×10^{-6}	Hanson (2008) - Table 4.10
Volatiles	3.0×10^{-5}	Hanson (2008) - Average of all tests p. 4.12
CRUD	1.0	NUREG-2125
Fission Gas	0.12	NUREG-2125

Cask에서 대기 중으로의 방출 비율은 Cask 내부로부터 외부로 방출되는 물질의 양으로 Table 3과 같다.

Table 3. Cask-to-environment release fractions

Material Type	Release Fraction	Source
Fuel Matrix	0.7	NUREG/CR-6672
Volatiles	0.5	NUREG/CR-6672
CRUD	0.001	Einziger and Beyer (2007)
Fission Gas	0.8	NUREG/CR-6672

2.2.2 기상안정도 분포 분석

경남 해안 지역의 최근 1 년간의 기상 자료를 분석하여 방사성물질의 확산에 영향을 주는 기상 안전 등급을 결정하였다. 분석 결과 기상 안정도 D 등급이 86.7%를 차지하였다.

2.3 대기 확산 분석

방사선원을 특정한 대기 안정성 및 풍속의 기상 조건에 대하여 Gaussian plume dispersion 모델로 MACCS2 코드 및 Hotspot 코드를 사용하여 분석하였다. 대기 확산 분석 조건에 사용된 기본 기상 안정도는 D-4(D등급, 풍속 4 m/sec) 등급이고 Table 4의 추가 기상 등급에 대한 분석을 수행하였다.

Table 4. Cask-to-environment release fractions

Case	기상조건	기상등급	풍속/강수량
D1	Dry (맑은 날씨)	B	3m/sec
D2		D	1m/sec
D3		E	1m/sec
D4		F	1m/sec
W1	Wet (우천시)	R1	(D) 2m/sec, 2mm/hr
W2		R2	(D) 2m/sec, 4mm/hr
W3		R3	(D) 2m/sec, 6mm/hr
W4		R4	(D) 2m/sec, 8mm/hr

3. 분석 결과

Fig. 2~4는 MACCS2와 HotSpot으로 계산된 plume 중심선을 따른 총유효선량당량 (Total Effective Dose Equivalent: TEDE)를 나타내고 있다. 분석에서는 개개인이 24 시간 노출된 것을 가정하고 있다. 두 계산 코드의 결과 차이는 plume 확산 변수 평가를 위해 서로 다른 모델을 사용하기 때문이다. 0.05 Sv (5 rem) 피폭량은 산업 노동자의 전신 피폭량의 연간 제한치이며 피해 분석의 중요도를 판단하는 기준 임계치로 간주된다. 본 분석 결과, 피폭량은 어느 거리에서도 5 rem을 초과

하지 않고 있다. 단, 폭발로 인한 100 m 이내의 불확실성을 감안해야 한다.

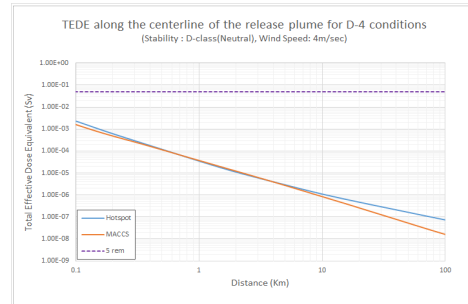


Fig. 2. KN-18 Centerline Dose (D-4 conditions).

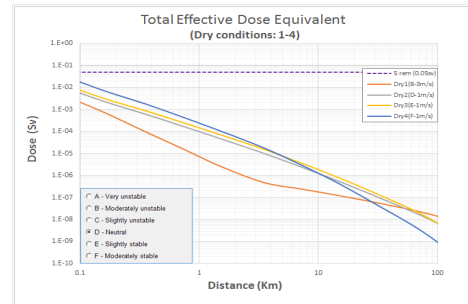


Fig. 3. KN-18 Dose at Distance (Dry conditions 1~4).

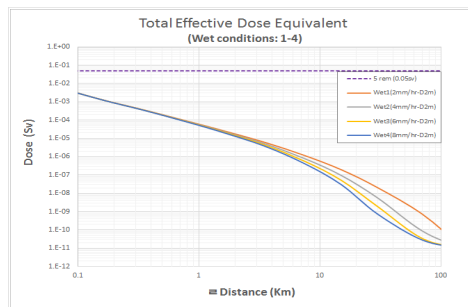


Fig. 4. KN-18 Dose at Distance (Wet conditions 1~4).

4. 결론

경남 해안 지역의 1년간의 기상자료를 바탕으로 최 빈 분포 등급을 결정하기 위한 통계 분석을 수행한 결과 기상 등급(D등급, 4 m/sec)을 결정하였으며, 이 등급에 대한 분석 결과 허용방사능 연간 제한치(5 rem)의 최대 12%로 크게 밑돌고 있음을 보여주고 있으므로 기상 환경은 맑은 날씨(Dry) 및 우천(Wet)시 어느 경우에도 운송 안정성을 확보하고 있음을 확인하였다.

5. 참고문헌

[1] NRC, "Spent Fuel Transportation Risk Assessment," NUREG-2125, 2014.
 [2] Hanson, B.D., Wu, W., Daniel, R.C., MacFarlan, P.J., Casella, A.M., Shimskey, R.W., and Wittman, R.S. (2008). "Fuel-in-Air FY07 Summary Report."