

한국 표준형 원전에서의 중대사고시 방사선원 평가

박수용, 김시달, 진영호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

1000 MWe 국내 표준형 원전을 대상으로 노심이 손상되는 각종 중대사고 시나리오에 대하여 방사선원항 특성을 평가하기 위하여, 2단계 확률론적 안전성 평가 방법론에 따라 방사선원 방출군을 정의하고 원전 중대사고 발생시 격납건물 손상을 가정하여 각 방출군별로 격납건물 외부로 방출되는 방사능 방출율을 정량화하였다. 도출된 19개의 그룹중에서 방출물이 작거나 발생빈도가 낮은 7개를 제외하고 12가지 대표 사고경위에 대하여 계산을 수행하였으며, 분석결과는 격납건물 내에서 감쇄효과가 작은 증기발생기 세관 파단사고, 격납건물 격리 실패사고 및 조기 격납건물 파손사고 등이 상대적으로 큰 방사능 방출량을 보여주었다.

1. 개요

본 분석에서는 원전 중대사고시 방사선원 방출군에 따른 방사선원항의 특성을 평가하고자 하였다. 방사선원 방출군은 원전에서 발생할 수 있는 모든 사고를 사고진행에 따라 체계적으로 분류함으로써 방사선원항의 특성이 비슷한 것끼리 군집화 한 것이며 따라서 같은 방출군에 속해있는 사고경위들은 방사능 방출시점, 기간, 선량, 위치 등에 있어서 비슷한 특성을 갖게 된다. 일단 방사선원 방출군을 결정하고 나서 각 방출군을 대표할 수 있는 사고경위를 선정하여 중대사고 해석코드를 이용한 방사선원 방출량 분석을 수행하였으며 해석코드로는 EPRI에서 개발된 MAAP4를 사용하였다. 그동안 국내 원전에 대한 방사선원 분석은 특정사고에 대하여 수행된 적은 있지만 사고경위가 매우 제한적이었으며, 본 보고서에서는 원전에서 발생할 수 있는 모든 사고를 체계적으로 분류하여 종합적인 방사선원 평가를 수행하였다는데 그 의의가 있다고 하겠다.

2. 방법론

- 방사선원 방출군 분류

방사선원 방출군은 2단계 PSA의 격납건물 사건수목 분석결과로부터 도출할 수 있다. 격납건물 사건수목 분석결과 나오는 사고 종류들은 매우 다양하며 상세한 방사선원 분석을 수행하기 위해서는 대기로 방출되는 방사능의 양, 시간 등의 특성에 따라 유사한 사고끼리 묶을 필요가 있다. 방출군을 도출하기 위해 방출군 군집화 논리도를 사용하였으며 여기에서 사용된 군집화 변수(Binning Parameters)로는 방사선원 특성에 영향을 줄 수 있는 격납건물 우회(Bypass) 또는 고립(Isolation), 원자로용기 내부에서의 사고 정지여부, 알파모드 격납건물 파손여부, 격납건물 파손시간, 원자로용기 외부 노심용융물 냉각도, 살수계통의 재순환 여부 등이 고려되었다.

- 분석 대상 사고경위의 선정

각 방출군은 유사한 방사선원항 특성을 갖는 다수의 격납건물 사건수목 최종점들로 구성된다. 따라서 방출군 군집화 논리도에 의해 방출군들이 결정되면, 각 방출군은 방출군 군집화 변수들의 분류 범위내에서 다양한 조건들을 갖는 사고경위들을 포함하게 된다. 각 방출군 내에서의 사고경위별 방사선원항 분석결과는 크게 다르지 않을 것으로 예상되므로 각 방출군을 가장 적절히 대표할 수 있는 사고경위에 대하여 방사선원항 분석을 수행한다. 각 방출군에 대한 대표 사고경위는 발생빈도와 방출군 특성을 고려하여 선정하였다.

- 방사선원항 평가

각 방출군에 대하여 대표 사고경위가 선정되면 발전소 고유의 중대사고시 방사선원항을 평가한다. 방사선원항의 크기와 특성은 발전소 및 격납건물의 계통 특성과 중대사고현상의 영향을 받는다. 방사선원항에 영향을 미칠 수 있는 설계특성에는 제어봉 집합체 설계, 노심 출력 밀도 및 분포, 금속의 조성비, 일차계통 및 발전소의 기하학적인 구조, 일차계통 압력, 냉각수의 가용성, 노외 노심 용융물의 초기온도 및 두께, 콘트리트의 조성, 격납건물내 잔열제거계통 설계 특성, 격납건물 및 보조건물에서의 누출 및 손상의 정도 등이 포함되며 방사성 핵종의 방출은 이러한 발전소 고유의 설계특성 외에 사고경위에 따라서는 크게 다르다.

본 분석에서는 방사선원항 분석의 주 도구로 MAAP 전산코드를 사용하였다. MAAP 코드는 중대사고에 대한 모델이 상세분석코드에 비해 단순하나, 발전소에서 발생하는 광범위한 중대사고 현상에 대한 종합적인 분석을 수행할 수 있다. 앞에서 언급한 발전소 고유 설계특성 및 중대사고 현상 등의 영향을 반영하여 원자로 냉각재 계통 및 격납건물내에서의 방사선원항 방출 및 이송 등의 거동 특성을 분석하며 높은 빈도를 가지는 방출군과 격납건물 초기손상 또는 우회가 발생하는 사고경위와 같이 비교적 큰 방출을 유발하는 방출군 등을 포함한 각 방출군의 대표 사고경위에 대하여 분석을 수행한다. 핵분열반응중 노심에서 발생하는 모든 핵분열생성물을 모두를 고려할 수 없으며, 핵분열생성물들은 열역학적인 특성에 따라 휘발성의 정도가 각기 다르므로 각각의 고유한

화학적 및 물리적 특성에 따라 군집화된다. 간단한 군집화에서 아주 세분화된 군집화까지 군집화에 대한 다양한 구조가 개발되어 있으나 본 분석에서는 MAAP 전산코드의 핵분열생성물 군집화 모델에 따라 결과가 표현되었다.

3. 계산결과

표 1에는 각 방사선원 방출군의 특성과 2단계 PSA결과로 계산된 빈도값이 정리되어 있다. 격납건물 조기파손(Early Containment Failure)과 후기파손(Late Containment Failure)의 구분은 원자로 압력용기 파손 후 4시간을 기준으로 하였으며 Leak와 Rupture는 파손압력이 각각 169 psig, 178 psig 이고 격납건물 파손면적은 0.1 ft² 및 1.0 ft² 로 가정하였다. 표 1 에서 볼 수 있는 것처럼, 방사선원 방출군 1과 방출군 2는 가장 큰 확률값을 가지고 있으며 전체 빈도의 69.3%를 차지한다. 그러나 방출군 1은 노심이 용융되다가 원자로 용기가 파손되기 이전에 더 이상 용융이 진행되지 않는 경우이며, 방출군 2는 원자로 용기는 파손되더라도 격납건물이 건전성을 유지함으로써 핵분열 생성물이 건물 밖으로 빠져 나오지 않은 경우다. 또한 2.2%를 차지하는 방출군 15는 원자로 용기가 파손되기 이전에 격납건물이 먼저 파손되는 경우이지만 MAAP 4 계산결과에 의하면 사고가 시작되고 나서 3일(72시간) 이후에 격납건물이 파손되기 때문에 핵분열 생성물 방출이 일어나지 않는 것으로 간주하였다. 즉, 전체적으로 노심손상 빈도의 71.5%는 격납건물의 건전성이 유지된다. 표 1에서 알 수 있는 것처럼 빈도측면에서 핵분열 생성물을 대기로 방출할 수 있는 중요한 방사선원 방출군은 격납건물 후기파손을 가져오는 방출군 6과 8이며 증기발생기 세관 파단 사고인 방출군 19, 그리고 원자로 공동바닥 관통사고 경위인 방출군 13이다.

대상발전소인 1000 Mwe 표준원전에 대하여 방사선원 계산을 수행한 결과 중, 중요한 방사선원인 CsI가 격납건물 외부로 방출되는 율을 표 2와 그림 1에 나타내었다. 여기에서 방사능 방출율은 핵분열 생성물이 격납건물 외부로 방출되기 시작하여 36시간 동안 방출되는 양을 사고 시작전에 노심에 존재하는 재고량과의 비로 나타낸 값이다.

전체 19개의 방사선원 방출군 중에서, 방출빈도가 0인 방출군 5와 9, 그리고 방출 빈도가 매우 낮고 방사능 특성이 다른 방출군과 유사한 방출군 7 및 11, 사고시작 이후 3일 이내에는 격납건물 밖으로 방사능 누출이 없는 방출군 1, 2 및 15를 제외하고 12개 방출군에 대하여 분석을 수행하였다. 알파모드 격납건물 파손사고인 방출군 14는 극단적인 열수력 조건으로 인하여 MAAP 4 전산코드가 효과적으로 모의를 할 수 없기 때문에, 원자로 하부의 노심 지지판이 손상되는 시점까지 노내에서 방출된 모든 핵분열 생성물이 건물밖으로 방출되는 것으로 가정하였다. 방사능 방출 (특히 CsI) 측면에서 중요한 방출군은 알파모드 격납건물 파손을 가져오는 방출군 14, 증기발생기 세관파단 사고인 방출군 19, 격납건물 살수시스템이 작동되지 않고 격납건물이 격리되지 않은 방출군 17, 격납건물 조기 파손사고인 방출군 4 순이다. 계산결과는 증기발생기 세관파단과 같은 격납건물 우회사고, 격납건물 격리 실패사고 및 격납건물 조기 파손사고 등에서는 핵분열 생성물이 격납건물

내부에서 침착 (Deposition) 등에 의하여 충분히 제거되지 못하고 건물밖으로 누출율이 많은 것을 보여준다.

4. 결론

본 논문에서는 1000 MWe 국내 표준원전을 대상으로 노심이 손상되는 각종 중대사고 시나리오를 가정하고 MAAP4 전산코드를 사용하여 발전소 고유의 방사선원항 특성을 평가하였다. 분석내용에는 노심손상 후 노심에서 누출되거나, 원자로용기가 파손되고 나서 원자로공동에서 생성된 각종 방사선원 들의 일차계통 잔류량 및 격납건물 잔류량 등이 시간에 따라 변화하는 내용들도 포함되어 있지만 여기에서는 격납건물 파손시 대기로 방출되는 방사선원만을 정량화 하였다. 국내 원전에 대한 발전소 고유자료를 사용하여 다양한 사고를 체계적으로 분류하여 종합적인 방사선원 평가를 수행하고자 하였으며 이 분야의 데이터 베이스의 일부로 활용될 수 있으리라고 판단된다.

표 1. 각 방사능 방출군의 특성 및 빈도

| STC | Containment Failure Mode and Time | Late Recirculation Sprays | Ex-vessel Debris Cooling | Frequency (Fraction, %) |
|-----|---------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | Core melt stopped before reactor vessel failure | - | - | 4.87E-6 (17.5) |
| 2 | Reactor vessel failed, Containment do not failed | - | - | 1.44E-5 (51.8) |
| 3 | Early Containment Failure, Leak | - | - | 1.71E-7 (0.6) |
| 4 | Early Containment Failure, Rupture | - | - | 5.39E-8 (0.2) |
| 6 | Late Containment Failure, Leak | Fail | Cooled | 1.71E-6 (6.1) |
| 7 | Late Containment Failure, Leak | Succeed | Not-cooled | 6.57E-9 (0.02) |
| 8 | Late Containment Failure, Leak | Fail | Not-cooled | 1.60E-6 (5.8) |
| 10 | Late Containment Failure, Rupture | Fail | Cooled | 8.58E-7 (3.1) |
| 11 | Late Containment Failure, Rupture | Succeed | Not-cooled | 2.19E-9 (0.01) |
| 12 | Late Containment Failure, Rupture | Fail | Not-cooled | 7.87E-7 (2.8) |
| 13 | Basemat Melt-through | Fail | Not-cooled | 1.22E-6 (4.4) |
| 14 | Alpha Mode Failure | - | - | 3.22E-8 (0.1) |
| 15 | Containment Failure before Reactor Vessel Failure | - | - | 6.05E-7 (2.2) |
| 16 | Isolation Failure | Succeed | - | 1.18E-8 (0.04) |
| 17 | Isolation Failure | Fail | - | 1.97E-8 (0.1) |
| 18 | V-sequence (Bypass) | - | - | 1.20E-9 (0.0) |
| 19 | Steam Generator Tube Rupture (Bypass) | - | - | 1.43E-6 (5.2) |

각 방사선원 방출군에 대한 CsI 방출 분율

| STC | CsI 방출분율 |
|-----|----------|
| 3 | 3.9E-03 |
| 4 | 3.0E-02 |
| 6 | 2.4E-03 |
| 8 | 1.7E-03 |
| 10 | 4.9E-03 |
| 12 | 8.9E-04 |
| 13 | 9.7E-04 |
| 14 | 9.4E-01 |
| 16 | 2.6E-02 |
| 17 | 1.3E-01 |
| 18 | 2.4E-03 |
| 19 | 1.3E-01 |

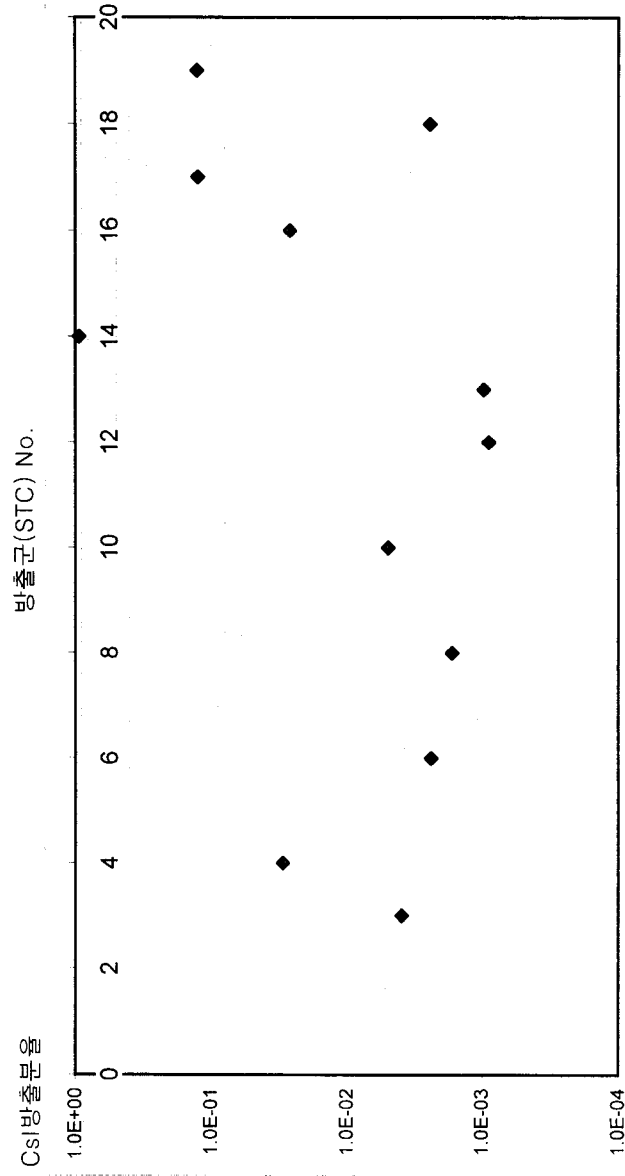


표 2

그림 1