

## 개량형 경수로 격납용기내 재장전수탱크의 수위계측기 선정

한규성, 박순희, 최현호, 김인식, 손갑현  
한국원자력연구소

### 요 약

기존 발전소의 재장전수탱크는 격납용기 외부에 설치되어 있으며, 압력/차압 계측기를 이용하여 재장전수탱크 수위를 측정하고 있다. 한편, 개량형 경수로의 경우에는 재장전수탱크를 격납용기 하부에 설치하도록 되어 있으므로 격납용기 벽이나 수집체적조 및 원자로 공동과 인접하게 되어 수위감시를 위한 압력/차압 계측기를 격납용기내에 설치하는 것은 매우 어려울 것으로 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 격납용기내 재장전수탱크, 수집체적조 및 원자로 공동 수위계측기에 적용되는 미국 원자력규제위원회 및 전력연구소의 설계기준, 환경 및 기기생존 조건들을 검토한 후, 이에 따라 이 계측기들이 유지해야 할 설계 기능요건을 평가하고, 수위계측기의 형태 선정에 필요한 설계고려사항들을 파악하여 개량형 원자로의 해당 수위계측기의 선정 및 설계와 관련된 개념들을 설명하였다. 검토결과, 격납용기내 재장전수탱크 수위지시를 위해서는 압력/차압 계측기를 격납용기 외부에 설치하고, 수집체적조 및 원자로 공동의 수위감시를 위해서는 부유형 감지기를 사용하는 것이 발전소 운전 및 보수측면에서 장점이 있는 것으로 판단되어 이를 개량형 경수로 설계에 적용할 것을 제안하고자 한다.

### 1.0 서론

기존 가압경수로형 발전소의 재장전수탱크 수위계측기의 기능은 개량형경수로에서 설계개념과 서로 다르다. 기존 발전소의 설계개념은 격납용기 외부에 설치된 재장전수탱크로부터의 주입모드와 재장전수탱크의 냉각수가 다 소모된 이후 격납용기 배수조로부터의 재순환모드를 활용하므로, 재장전수탱크 수위계측기는 먼저 안전주입 펌프 및 격납용기살수 펌프를 통해 필요한 냉각수를 냉각재계통과 격납용기에 주입시 재장전수탱크의 수위를 확인하고, 그후 안전주입 펌프 및 격납용기살수 펌프의 흡입원을 재장전수탱크로부터 격납용기 배수조로 자동변환하는데 사용하고 있으며, 격납용기 배수조 수위계측기는 이러한 펌프들의 운전이 가능하도록 적절한 유량이 격납용기 배수조에 충수되어 있는가를 확인하기 위하여 사용된다. 반면에, 개량형 경수로에서는 재장전수탱크와 수집체적조가 격납용기 내부에 설치되어 있어, 안전주입 및 격납용기살수 펌프는 사고회복 기간 동안 펌프 흡입을 격납용기내 재장전수탱크로부터 계속 공급받을 수 있으므로 펌프 흡입원의 변환이 요구되지 않으며, 발전소 사고 후 운전자에게 수위를 감시하기 위한 적절한 수단을 제공하는 기능을 수행하게 된다. 현재 ABB-CE SYS 80는 격납용기내 재장전수탱크, 수집체적조 및 원자로 공동의 수위를 감시하기 위하여 격납용기내에 설치된 압력/차압 측정 방식의 수위계측기를 채택하고 있으나, CESSAR-DC 19.11.4.4.1.4.4항에는 격납용기내 재장전수탱크의 수위는 격납용기 외부에 설치된 차압 측정 방식의 수위계측기에 의해 감시되는 것으로 기술하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 개량형 경수로의 격납용기내 재장전수탱크가 원통형, 혹은 구형 격납용기의 하부에 설치되는 점을 고려하여, 격납용기내 재장전수탱크 수위계측기의 선정 및 그 설치 위치의 타당성에 대하여 이들 수위계측기에 적용되는 미국 원자력규제위원회 및 전력연구소의 운전 기준, 환경 및 기기생존 기준들을 검토한 후, 이에 따라 이 계측기들이 유지하여야 할 설계 기능요건을 평가하여 차세대 원자로 및 후속기 설계사업의 해당 수위계측기의 선정 및 설치위치의 결정과 관련된 상세 설계고려사항 및 설계개념들을 기술하고자 한다.

### 2.0 설계 기준

개량형 경수로에서는 사고 후 수집체적조로부터 방수로를 통하여 격납용기 재장전수탱크로 필요한 유량이 보충되어 안전주입 및 격납용기살수 펌프의 흡입유량을 계속 제공할 수 있으므로, 기존 발전소에서와 같이 이들 펌프가 주입모드에서 재순환모드로 변환될 필요가 없다. 그러므로, 미국 원자력규제위원회 및 전력

연구소의 설계 기준을 검토하기 전에 다음의 사항들이 인식되어야 한다. 첫째, 격납용기내 재장전수탱크는 설계기준사고시 완전히 배수되지 않고, 둘째, 격납용기내 재장전수탱크 수위계측기는 안전주입 및 격납용기 살수 펌프의 흡입원을 변환시키는데 사용되지 않으며, 셋째, 격납용기내 재장전수탱크는 안전주입 및 격납용기 살수 펌프의 초기 흡입유량을 제공하는 외에 수집체적조와 더불어 격납용기 배수조의 기능을 담당한다.

## 2.1 운전 기준

### 2.1.1 미국 원자력규제위원회 기준

10CFR50.34(f)(2)(xvii)에서는 격납용기 수위에 대하여 주 제어실에 측정, 기록, 정보의 출력이 가능한 계측기를 제공하도록 요구하고 있으며, Reg. Guide 1.97에서 요구하고 있는 계기의 감시기능 및 설계기준 요건은 표 1, 2와 같다.

표1. 계기의 감시기능

| 변수형태   | 변 수                                   | 범 위                  | 범주 | 목 적          |
|--------|---------------------------------------|----------------------|----|--------------|
| ○ B *  | ○ 원자로 냉각재계통<br>건전성 유지<br>- 격납용기 배수조수위 | - 협역(배수조)            | 2  | - 감시기능; 사고완화 |
|        |                                       | - 광역(Plant specific) | 1  | - 성취; 확인     |
| ○ D ** | ○ 안전주입계통<br>- 재장전수탱크 수위               | - 상단부터 하단            | 2  | - 운전감시       |

\* 변수형태 B : 발전소의 안전기능이 성취되는지 여부의 정보를 제공하는 변수

\*\* 변수형태 D : 안전에 중요한 각각의 안전계통 및 다른계통의 운전 정보를 제공하는 변수

표2. 계기의 설계기준 요건

| 설계기준 요건   | 범 주 1           | 범 주 2                  |
|-----------|-----------------|------------------------|
| ○ 환경 검증요건 | - R.G. 1.89 적용  | - R.G. 1.89 적용         |
| ○ 내진 검증요건 | - R.G. 1.100 적용 | - 해당 없음                |
| ○ 다중성     | - 다중성 요구        | - 해당 없음                |
| ○ 동력원     | - 1E            | - 1E는 필요 없으나 높은 신뢰도 요구 |

또한, NUREG-0737(NUREG-0718, Rev.02) II.F.1, 첨부 5, 격납용기 수위감시에서는 모든 발전소의 주 제어실에는 격납용기 수위를 계속적으로 지시할 수 있는 설비를 갖추도록 요구하고 있으며, 이를 위해 협역계기는 격납용기 배수조 하단에서부터 상단 범위의 수위를 지시하도록 하여야 하며, 광역계기는 격납용기 하단에서부터 2,271m<sup>3</sup> (600,000 gallon)의 유량이 형성하는 높이 범위의 수위를 지시하도록 하고 있다. 또한, 격납용기 광역 수위지시 계측기는 NUREG-0737, 부록 A에 기술된 설계 및 자격 기준을 만족시켜야 하고, 협역 수위지시 계측기는 R.G. 1.89의 요건을 충족시키도록 하고 있다.

### 2.1.2 미국 전력연구소 기준

개량형 경수로 사업주 요건서 5장, 공학적인안전설비 요건에서 계통 및 기기에 대한 요건에는 기능 및 임무 분석이 필요한 Man-Machine Interface 계통의 감시 및 경보장치가 주 제어실과 원격 정지 설비에 제공되도록 요구하고 있다(재장전수탱크 수위포함). 중대사고시 필요한 변환기 및 다른 계기 감지기는 격납용기 외부에 설치하거나 중대사고 환경에서도 사용될 수 있도록 요구하고 있고, 원자로 용기가 용융되기 전에 원자로 공동이나 건정(Drywell)에 냉각수의 존재를 지시할 수 있는 계측기가 제공되어야 하며, 기존의 비상노심냉각계통 배수조, 혹은 다른 격납용기 배수조의 수위감시기는 이러한 기능을 수행할 수 있도록 하고 있다.

## 2.2 환경 및 기기생존(Equipment survivability) 기준

### 2.2.1 설계기준사고시 환경 기준

격납용기내 재장전수탱크 및 수집체적조 수위계측기의 경우는 범주 1 혹은 2 기기로서 설계기준사고시 R.G. 1.89에 따른 환경 검증요건을 만족시켜야 하며, 발전소 안전에 필요한 기기의 일반 환경 검증기준은 10CFR50.49에 기술되어 있다. 원자로 공동 수위계측기는 중대사고시를 대비한 것이므로 설계기준사고시에 는 필요가 없으나 원자로 계통설계 관점에서는 R.G. 1.89, R.G. 1.97 및 10CFR50.49등의 기준요건들을 만족 시키는 것이 바람직하다.

### 2.2.2 중대사고시 기기생존 기준

미국 원자력규제위원회의 SECY-90-016의 항목 III.F에서 중대사고 완화 설비들은 그들이 의도한 기능을 필요한 기간만큼 중대사고 상황에서 수행할 수 있는 적절한 확신을 가지도록 설계되어야 하고, 설계 기준 사고를 기준으로 설계된 안전관련 계통 및 기기가 중대사고 상황을 수습할 것으로 기대하는 경우에도, 그 의도된 기능을 수행하는데 필요한 기간동안은 중대사고 상황에서도 작동될 수 있는 높은 신뢰도를 가질 수 있어야 하나, 다중 배열 설비의 경우는 이에 해당되지 않는 것으로 기술하고 있다. SECY-93-087, 항목 I.L 에는 중대사고 상황에서 기기생존에 대한 기대는 적용 가능한 초기사건(소내 정전 혹은 지진 등)의 상황과, 기기들이 그 기능을 수행해야 하는 환경(압력, 온도, 방사선 등) 등을 고려하도록 하고 있으며, 관련 계통들이 수행해야 할 필요한 기준들은 이와 같은 특정설계 평가결과를 근간으로 제시될 것으로 기술하고 있다. 그리고, 10CFR50.34(f)(2)(ix)(c)항에서는 안전 정지를 위해 사용될 기기들은 수소 환경 및 수소 조절계통이 작동할 때의 환경조건에 견딜 수 있도록 요구하고 있다. 수소방출 환경은 설계기준사고 이외의 사고 (Beyond design basis event)이므로 중대사고시 기기생존과 관련있는 요건에 포함될 수 있도록 하고 있다. 미국전력연구소의 개량형경수로 사업주 요건서 5장을 살펴보면, 중대사고 완화를 위해 사용될 기기는 그 기기가 중대사고 상황에서 그 기능을 충분히 수행할 수 있는 적절한 확신을 가질 수 있도록 설계되어야 하고, 중대사고 상황에서 기기생존을 위한 설계고려사항에는 적용 가능한 초기사건들의 상황과 그 기기들이 기능을 수행해야 하는 환경(즉 압력, 온도, 방사선 등)을 포함시키도록 하고 있다. 중대사고 관리를 위해 사용될 기기들은 가능한한 발전소 내에 설치되어 중대사고 상황에서 사용할 수 있는 유용성을 높이도록 하고, 중대 사고 완화를 위해서 추가적으로 사용될 안전관련 기기는 인허가 설계기준사고 상황에 대해서만 자격요건을 갖추고, 그 요건에 부합되는 품질보증 요건을 만족시키면 되도록 하고 있다.

## 3.0 설계 기능요건

### 3.1 격납용기내 재장전수탱크 수위지시

정상운전 중 격납용기내 재장전수탱크 수위계측기는 격납용기내 재장전수탱크의 충수 및 배수, 안전주입/격납용기살수에 필요한 충분한 냉각수 유량 확보 확인 및 과유동 수위(Spillway to hold up volume tank) 이하 유지 확인 등의 기능을 수행하는 데 필요하다. 설계기준사고 후 격납용기내 재장전수탱크 수위계측기는 안전주입/격납용기살수 펌프가 작동된 후 격납용기내 재장전수탱크의 수위 감시, 수집체적조가 채워진 후 격납용기내 재장전수탱크의 수위 저하 여부 감시 등의 기능을 수행하는데 필요하다. 기본적으로, 설계기준사고시 격납용기내 재장전수탱크 수위계측기는 기존 발전소의 재장전수탱크 및 격납용기 배수조 수위계측기의 역할을 담당하고 있다. 그러므로, 사고 후 격납용기내 재장전수탱크 계측기 요건에는 격납용기 배수조 계측기의 기능도 포함시켜야 한다. 중대사고시 격납용기내 재장전수탱크 수위계측기는 공동충수계통 (Cavity Flooding System)을 작동시키기 위해 원자로 공동의 충수를 위한 충분한 유량이 확보되고 있는가를 확인하기 위해 사용되며, 공동충수계통이 작동하고 나면 격납용기내 재장전수탱크의 수위가 감소되고 있는가를 감시한다. 이는 원자로 냉각수가 수집체적조 및 원자로 공동으로 보내지고 있음을 보여주는 것이다. 또한, 격납용기내 재장전수탱크 수위계측기는 중대사고 후 격납 용기 외부의 보조 수원으로부터 냉각수의 보충을 필요로 할 때 사용된다.

### 3.2 수집체적조 수위지시

정상운전 중 수집체적조는 비어있으며 수집체적조 배수조에는 수위계측기가 설치되어 원자로 냉각재의 누수를 감지하고 측정한다. 냉각재상실사고 후, 파단지점으로부터 흘러나오는 냉각수와 격납용기에 살수된 냉각수는 수집체적조로 흘러들어가 모이게 된다. 수집체적조가 차게 되면 방수로를 통해 격납용기내 재장전수탱크로 흘러들어가므로 격납용기내 재장전수탱크의 유량은 계속 보충이 된다. 설계기준사고 후 수집체적조의 수위지시 기능요건은 R.G.1.97 및 NUREG-0737의 격납용기 비상노심냉각계통 배수조 수위계측기에 대한 요건을 기준으로 한다. 이러한 규제요건서는 격납용기 비상노심냉각계통 배수조의 협역 및 광역 수위지시를 요구하고 있고 협역계측기는 원자로냉각계통의 파단 여부를 감지하는 데 사용되며, 광역계측기는 R.G.1.97에 언급 되어 있는 사고완화 성취 및 장기간 감시기능을 만족시키기 위한 것이다. 특히, SYS 80에서의 광역계측기는 수집체적조가 충수되어 있을 때 재장전수탱크의 수위가 하강하는지 여부를 감시하는 데도 쓰이게 된다. 중대사고시 수집체적조 수위계측기는 공동충수계통의 밸브가 열린 후 격납용기내 재장전수탱크로부터 유량이 흘러들어오는지의 여부를 확인하는 데 사용된다.

### 3.3 원자로 공동 수위지시

정상운전 중 원자로 공동은 비어있다. 원자로 공동 배수조에 설치된 수위계측기는 원자로 냉각재의 누수를 감지하고 누수량을 측정한다. 설계기준사고 및 중대사고시 원자로 공동의 수위를 감시하기 위한 미국 원자력규제위원회의 특별한 요건은 없다.

### 4.0 수위계측기 설계 고려사항

격납용기내 재장전수탱크, 수집체적조 및 원자로 공동의 계기감지기 선정에 영향을 미치는 설계고려사항을 검토를 위한 기본적인 고려대상 수위계측기는 압력/차압 감지기(Pressure/differential pressure sensor)와 부유형 감지기(Float type level sensor)이다.

#### 4.1 압력/차압 수위 계측기

격납용기내 재장전수탱크, 수집체적조 혹은 원자로 공동의 수위를 감시하기 위하여 압력/차압 계측기의 변환기는 각각의 체적에 대해 측정되어야 할 체적의 위치 아래부분에 설치되어야 하며, 이를 격납용기 내부에 설치할 경우 수중에 설치해야 하는 바, 현재로서는 수중에 설치되면서 환경 검증요건을 갖춘 압력/차압 계측기는 존재하지 않아 격납용기 내부 설치는 곤란하다. 따라서, 압력/차압 계측기를 격납용기 외부에 설치하여 사용하여야 하는데 이는 격납용기 격리장치를 필요로 하게 되며, 이때 계기관에 적용되는 격납용기 격리요건은 10CFR50, 부록 A, 일반설계기준 56과 Safety Guide 11(Reg. Guide 1.11)을 따른다. 일반설계기준 56에 의하면, 특정 등급의 관(계기배관 등)에 대한 다른 규정에 의거하여 격납용기 격리장치로 적절하다고 입증되지 않는 한, 격납용기 내부 및 외부에 각각 한 개씩의 격리밸브를 설치해야 하며, Safety Guide 11(Reg. Guide 1.11)에서는 정상운전중 계기관 파단에 따른 소외선량이 10CFR100의 지침보다 현저히 작음이 확실할 경우와 계기의 본래 의도된 기능 수행에 영향을 미치지 않으면서 원자로 냉각재의 누출을 가능한 낮출 수 있는 유량제한 장치를 고려할 경우 자동작동 혹은 운전자에 의한 원격조정이 가능한 한개의 격리밸브를 설치하도록 하고 있다. 따라서, 격납용기 외부에 설치된 압력/차압 계측기는 격납용기내 재장전수탱크의 수위지시를 위해 사용될 수 있으나 수집체적조 및 원자로 공동의 수위지시를 위해서는 바람직하지 못하다. 이는 수집체적조 및 원자로 공동의 격납용기내 위치를 고려해 볼 때, 계기관이 격납용기내 재장전수탱크나 콘크리트 벽의 두꺼운 단면을 지나 긴 거리로 배치되어야 하고 이들 계기관을 위한 추가 격납용기 관통이 필요하기 때문이다.

#### 4.2 부유형 수위 계측기

부유형 수위계측기는 현재 발전중인 기존 발전소에서 사고 후 격납용기 배수조의 수위를 감시하기 위해 사용되고 있다. 부유 수위 감지기는 격납용기내에 설치되어 있으며 변환기는 격납용기 외부에 설치되어 있어 수집체적조나 원자로 공동의 수위 지시를 위해 사용될 수 있다. 부유형 수위 계측기는 Reg. Guide 1.97

범주1 요건을 만족시키기 위해 사용되어 왔다. 표3에서는 수위측정을 위해 사용되는 압력감지설비와 부유형 감지설비의 요건과 특징을 비교하였다.

표3. 압력/부유형 감지 설비 비교표

| 요건/특징                       | 압력/차압 설비<br>(격납용기 내부) | 압력/차압 설비<br>(격납용기 외부) | 부유형 설비 |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| ○ 격납용기 격리장치 <sup>주(1)</sup> | 필요 없음                 | 필요함                   | 필요 없음  |
| ○ 흑독 환경 검증요건                | 필요함                   | 필요 없음                 | 주(2)   |
| ○ 수물 검증요건                   | 필요함                   | 필요 없음                 | 필요 없음  |
| ○ 배열 융통성                    | 제한됨                   | 제한되지 않음               | 제한됨    |
| ○ 원자로용기 파단 후 작동성            | 한정됨                   | 가능함                   | 한정됨    |

주 : (1) 원격조정밸브를 포함한 격리장치  
 (2) 격납용기 외부에 설치된 변환기는 흑독한 환경에 노출되지 않으며 격납용기 내부에 설치된 부유감지지만 흑독한 환경에 노출됨.

5.0 결론

격납용기내 재장전수탱크 수위측정을 위해서 격납용기 외부에 설치되는 압력/차압 수위계측기의 사용을 제안하며, 이를 위해서는 계기관에 원격 수동 격리밸브 및 유량제한 오리피스스의 추가 설치가 요구된다. 이를 제안한 이유로는 압력/차압 계측기는 0-100%의 수위지시가 가능하며 격납용기 외부에 설치하므로 환경 검증요건을 만족시키기에 용이하고 계측기가 격납용기내의 흑독한 환경이나 수소폭발 등의 환경에 놓이지 않을 수 있기 때문이다. 수집체적조 및 원자로 공동 수위측정을 위해서는 부유형 감지기의 사용을 제안한다. 이는 현재 경수로형 발전소의 격납용기 배수조 수위지시를 위해 사용되고 있고, 변환기가 격납용기 외부에 설치될 수 있어 환경 검증요건을 만족시키기에 용이하다. 단지, 전기신호선만이 격납용기를 관통하므로(압력 감지관에 비해) 원격조정 격리밸브는 필요하지 않다. 부유형 감지기는 Reg. Guide 1.97의 범주1 요건을 만족시키기 위하여 가동중인 발전소에서 사용되고 있다. 또한, 격납용기내 재장전수탱크, 수집체적조 및 원자로 공동 수위계측기의 설계개념 제안에 대한 요약은 표4와 같다.

표4. 수위계측기 설계개념 요약표

| 수위기능                                          | 감지기        | 변환기 위치             | 다중성       | 환경/기기생존 <sup>주(1)</sup><br>검증요건   | 내진<br>검증요건 | IE<br>전력공급 |
|-----------------------------------------------|------------|--------------------|-----------|-----------------------------------|------------|------------|
| 1. 격납용기내<br>재장전수조<br>○ 광역 (정상운전)<br>○ 광역(사고시) | 압력<br>차압   | 수집체적조<br>격납용기 외부   | 불필요<br>필요 | 불필요/불필요<br>필요/필요                  | 불필요<br>필요  | 불필요<br>필요  |
| 2. 수집체적조<br>○ 광역<br>○ 협역                      | 부유형<br>부유형 | 격납용기 외부<br>격납용기 외부 | 필요<br>불필요 | 필요/불필요 <sup>주(2)</sup><br>불필요/불필요 | 필요<br>불필요  | 필요<br>불필요  |
| 3. 원자로 공동<br>○ 광역                             | 부유형        | 격납용기 외부            | 필요        | 필요/불필요                            | 필요         | 필요         |

주: (1) 설계기준사고시 환경 검증요건 ; 중대사고시 기기생존  
 (2) 변환기는 격납용기 외부에 설치되어 자격요건을 갖춤.

## 참 고 문 헌

1. SYS80\* Combustion Engineering Standard Safety Analysis Report- Design Certification (CESSAR-DC), Amendment W, June 20, 1994
2. 10CFR50.34 Contents and Applications ; Technical Information
3. 10CFR50.49 Environmental Qualification of Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants
4. 10CFR50 APP. A, General Design Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Processing Plants
5. 10CFR50 APP. B, Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Processing Plants
6. Reg. Guide 1.97, Instrumentation for Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants to Assess Plant and Environs Conditions During and Following an Accident, Rev. 03, May 1983
7. Reg. Guide 1.89, Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants, Rev. 01, June 1984
8. Reg. Guide 1.100 Seismic Qualification of Electric and Mechanical Equipment for Nuclear Power Plants, Rev. 02, June 1988
9. NUREG-0737, Classification of TMI Action Requirements, October 31, 1980
10. EPRI, Advanced Light Water Utility Requirements Document, Vol. II, ALWR Evolution Plant, Rev. 06, December 1993
11. NUREG-1465, Accident Source Terms for Light Water Nuclear Power Plants, February 28, 1995
12. Safety Guide 11(Reg. Guide 1.11) Instrument Lines Penetrating Primary Reactor Containment, March 10, 1971